

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04143

研究課題名(和文)分光BRDFを高い時空間分解能で計測する手法の開発

研究課題名(英文) Development of a method for measuring a spectral BRDF at high spatio-temporal resolution

研究代表者

来海 暁(Kimachi, Akira)

大阪電気通信大学・情報通信工学部・教授

研究者番号：30312987

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、従来は長時間を要していた分光BRDF(波長・入射方向・視線方向ごとの反射率の分布)の計測を短時間で行う手法を開発することである。その特色は、BRDFそのものを計測する代わりに近似的分解成分を異なる周波数で時間変調し、その周波数を手掛かりとして時間相関カメラという機器を用いて各成分を分離し計測する点にある。時間変調には波長ごとに強度が可変の光源、およびプロジェクタ用表示素子を使用する。光学系には楕円鏡の作製が必要になるが、表面に瑕のない楕円鏡の完成には至らなかった。しかし、計測理論の構築、照明光の時間変調、時間相関カメラによる成分ごとの抽出など、要素技術の確立には到達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体表面における光の反射特性はBRDFという関数で記述され、視覚刺激から物体の材質を感じ取る「質感」と深く関わっている。さらに光の波長を考慮した分光BRDFでは、入射方向や視線方向に応じて見かけの色が変化する現象が記述できる。しかし、分光BRDFの計測には角度や波長の分解能と計測時間との間にトレードオフが存在する。本研究の目標はこのトレードオフを解消し、分光BRDFの計測およびそれに基づく画像生成をオンラインで実現して、デジタルアーカイブやメタバースを介した視覚情報共有などの応用に貢献することである。最終目標にまでは到達できなかったが、それに向けての要素技術は確立することができた。

研究成果の概要(英文)：This project aims to develop a method of measuring the spectral BRDF (bidirectional reflectance distribution function, i.e. the distribution of reflectance as a function of wavelength, incident direction, and viewing direction). Its feature is to temporally modulate each approximating component of the object's spectral BRDF with different frequencies instead of measuring the whole spectral BRDF, and then to extract the components by use of an imaging device called time-domain correlation camera. The temporal modulation is carried out on a programmable spectral light source and a display device for projector use. It is necessary to design and fabricate an ellipsoidal mirror, but the one we fabricated suffered many small defects. Except for this, we were able to establish building components such as the measurement theory, temporal modulation of the illumination, and detection of modulated components of the spectral BRDF by the correlation camera.

研究分野：計測工学

キーワード：時間相関カメラ BRDF 分光画像 球面調和関数 フーリエ係数

1. 研究開始当初の背景

本研究が対象とする BRDF (bidirectional reflectance distribution function, 双方向反射率分布関数) は, 物体表面上の 1 点において, 入射光に対する反射光の強度比 (反射率) を入射方向 2 自由度, 反射 (観測/視線) 方向 2 自由度の関数として記述した量をいう. BRDF は, 物体表面の材質や微細構造によって拡散性反射から鏡面性反射に至るまで多様な形態をとり, 物体の視覚的な見え方の違いをもたらす. 近年では, 視覚刺激を通して物体の材質を感じ取る「質感」の技術において BRDF の重要性が注目されている. さらに, BRDF が光の波長への依存性 (分光特性) を伴う場合は分光 BRDF と呼ばれる. 分光特性は物体の見かけの色の元になるだけでなく, 色では識別が困難な物体を識別するための強力な手掛かりを与える. このような分光特性を伴う BRDF においては, 光の入射方向や見る方向に応じて物体の見かけの色が変化するという現象が生じる. この現象は昆虫の羽や貝殻の内側など生物において見受けられるほか, 近年では自動車などのメタリック塗装においても観察される. このような分光 BRDF を実物から獲得することができれば, 物体表面の材質や微細構造に関する手掛かりが得られるほか, 実物の画像を写実的に生成することも可能になる. しかし, 実物の BRDF を計測しようとするとき, 入射・反射方向を計 4 自由度にわたり変化させながら反射率を計測する必要があるため, 角度分解能を高めるほど長時間を要するという問題が伴う. さらに, 分光 BRDF では一般に BRDF を波長ごとに計測するため, 波長分解能を高めるほど計測時間が長くなってしまふ. このような時間・空間・波長分解能の間のトレードオフを解消しようとする研究のうち, 計測精度と時空間分解能の点では Mukaigawa *et al.* (IPSJ Trans. CVA, 2009) の手法が優れているが, 分光 BRDF の計測への適用は報告がない.

2. 研究の目的

本研究の目的は, 分光 BRDF を高い時空間分解能で計測する手法を開発することである. その特色は以下の 3 点にある.

(1) 波長可変光源による分光反射率の正弦波強度変調

分光分布 (波長ごとの強度分布) が可変の光源を用いることにより, 波長に線形に位相シフトを与えつつ単一周波数の正弦波で強度変調を施した照明を対象物体に照射する. その結果, 反射光に含まれる正弦波の振幅と位相が分光反射率のフーリエ係数に一致ようになる. また, フーリエ係数では分光反射率そのものを計測しているとはいえないが, 少なくとも 2 次までのフーリエ係数により色の情報よりも分光反射率が細かく識別できるようになる.

(2) DLP による BRDF の正弦波強度変調

Mukaigawa *et al.* は楕円鏡を介して入射方向がプロジェクタ像面の画素と 1 対 1 に写像される光学系を用い, 入射方向のパターンをプロジェクタからの投影画像としてさまざまに切り替えながら計測した. これに対し本研究では, プロジェクタの代わりに DLP モジュールを用い, 上記の波長線形位相シフト正弦波変調照明を反射させつつ, DLP 像面において一度に全ての入射方向を指定する. DLP (digital light processing) は微小な鏡面を格子状に並べた素子を用いた画像の表示方式であるが, この DLP モジュールを, 波長線形位相シフト正弦波変調照明が入射方向の緯度, 経度方向に沿ってそれぞれ異なる周波数の正弦波で強度変調されるように制御する. これにより, 対象物体の球面調和関数による BRDF 展開係数の振幅と位相が正弦波強度変調されるようになる. 球面調和関数の展開係数では BRDF そのものを計測しているとはいえないが, ある緯度で経度方向に回転させた入射光に対する反射光が, 拡散反射成分に対しては正弦波, 鏡面反射成分に対してはガウス関数で精度よく近似でき, それぞれの成分が反射光強度信号の 2 次までのフーリエ係数として抽出できることが分かっている. このフーリエ係数は球面調和関数による展開係数の一部が BRDF の特徴として抽出されたものとみなせる.

(3) 時間相関カメラによる分光 BRDF 展開係数のフレームレート抽出

Mukaigawa *et al.* の手法では, プロジェクタからの入射方向パターンが楕円鏡, 対象物体, 楕円鏡と反射されたのち, RGB カメラの撮像面上に反射方向が画素と 1 対 1 写像となるように受光され, これが入射方向パターンごとに複数回繰り返される. これに対し本研究では, 波長線形位相シフト正弦波変調照明に上記のように入射方向ごとの正弦波変調を施したのち, 反射光を時間相関カメラを用いて検出する. 時間相関カメラは, 入射光強度信号と全画素共通の参照信号との時間相関を各画素並列に毎フレーム出力するカメラである. 本研究では時間相関カメラを用いることにより, 各反射方向に対応する画素において分光 BRDF として, 分光反射率のフーリエ係数ごとに入射方向の球面調和関数による BRDF 展開係数を高々 2 フレーム程度の実時間で抽出する.

3. 研究の方法

(1) 分光 BRDF 計測の理論の構築

分光 BRDF 計測の理論を構築し, 分解能や誤差の見通しが得られるようにする. 理論においては, 楕円鏡の形状とレンズによる光線の軌跡, DLP モジュールや時間相関カメラの画素座標と入射・反射方向との対応や分解能, DLP モジュールにおけるデジタル的な正弦波強度変調による誤差の見積もり, DLP モジュールや波長可変光源の適切な駆動周波数などを検討することにより, 実機による設計の指針を得る. 構築した理論はシミュレーションにより数値的に検証

する。

(2) DLP モジュールにおける正弦波強度変調の実現

DLP モジュールを用いて入射方向の緯度・経度ごとに異なる周波数の正弦波による強度変調を実現する。DLP モジュールはデジタル制御しかできないため、正弦波変調はパルス幅変調 (PWM) により疑似的に行う。DLP モジュールからの反射光の像を時間相関カメラで撮影し、変調振幅・位相が時間相関カメラ出力において正しく検出されるかを確かめる。

(3) DLP モジュールと楕円鏡による計測光学系の構築

DLP モジュール、時間相関カメラ、楕円鏡とともに結像レンズと半透鏡を用いて計測光学系を構築する。まず DLP モジュール、結像レンズ、楕円鏡により対象物体への入射光学系を構成し、DLP モジュールからの反射光が物体表面上の 1 点に集光されるように調整する。この調整が終了後、半透鏡と時間相関カメラを追加して、物体表面上の 1 点が時間相関カメラの撮像面全体に広がるように調整する。これらの調整がうまく行かない場合は、楕円鏡自体の修正や、状況次第では作製のし直しも行う。

(4) 波長可変光源を用いた波長線形位相シフト正弦波強度変調照明の実現

波長可変光源を用いて波長線形位相シフト正弦波強度変調照明を実現する。光源上で各波長成分が順に正弦波で強度変調されたときに生じる分光分布を時刻ごとに生成し、結果を分光放射輝度計により確かめる。

(5) 分光 BRDF 計測の実現と評価

実現した波長線形位相シフト正弦波変調照明と入射方向正弦波変調を計測光学系に導入することにより、分光 BRDF 計測を実現する。典型的な拡散反射性物体や鏡面反射性物体を計測対象とすることにより性能を評価する。また、計測した分光 BRDF に基づき CG 画像のレンダリングを行い、視覚的にも評価する。さらに、その結果を詳細に検討することにより、より精度を向上させるための較正法を考案する。

4. 研究成果

(1) 分光 BRDF 計測の理論の構築

プロジェクタによる入射光強度分布の時間変調および波長可変光源の時間変調の組み合わせと、時間相関カメラで検出可能な分光 BRDF 展開係数の次数との関係を導いた。また、楕円鏡の形状と照明光学系を設計するための指針を明らかにした。以上の成果は学会 (第 38 回センシングフォーラム) で報告した。

(2) DLP モジュールにおける正弦波強度変調球面調和関数照明の実現

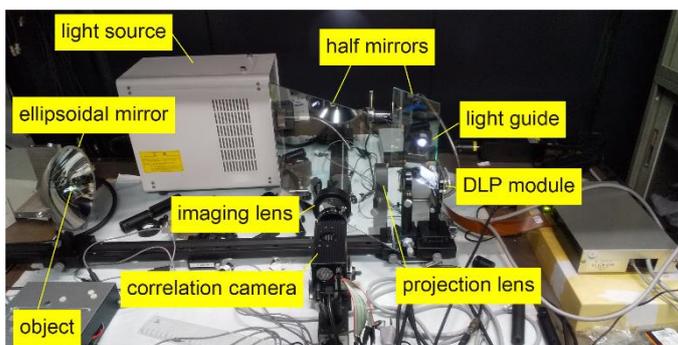
DLP モジュールにおいて、楕円鏡の焦点における入射方向ごとの照明光強度分布が球面調和関数となる空間変調を実現した。この強度分布に正弦波で時間変調を与え、空間強度分布が時間相関カメラのフレームに同期して入射経度の方向に回転する照明を実現した。さらに異なる時間変調の周波数を用いることにより、複数次数の照明パターンを多重化することも可能にした。DLP モジュールは個々の画素を 2 値的にしか制御できず、照明の強度は時間方向の 2 値系列によって決まるため、照明強度の分解能と時間変調の周波数の間にはトレードオフが存在する。この関係に基づき、変調周波数を高く維持したときに許容できる照明強度の階調数を検討した。

(3) 楕円鏡の作製

光学系の設計指針に基づき楕円鏡の形状を決定し、研究代表者らの所属機関の設備である金属光造形複合加工機を用いてステンレス粉末から楕円鏡を成形した。そしてこの楕円鏡を旋盤に取り付け研磨紙および砥粒を用いて研磨した (図 1(a))。この楕円鏡を用いて計測光学系を構築した (図 1(b)) ところ、DLP モジュールから投影された光束が楕円鏡の焦点に集光されたが、入射緯度が低くなるほど集光された光束が広がることを確認した。また、焦点に試料を置いてその反射光を時間相関カメラで撮影したところ、試料の特性に応じて異なるパターンが獲得できたが、楕円鏡表面の欠陥のパターンがそこに重畳することも確認された (図 2)。以上の成果は学会 (第 38 回センシングフォーラム) で報告した。



(a) 最初に作製した楕円鏡



(b) 光学系

図 1 楕円鏡を用いた BRDF 計測光学系。

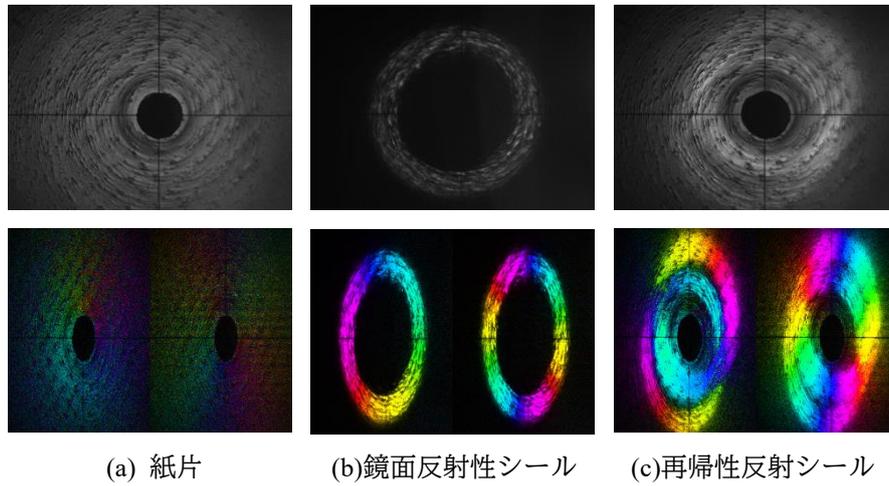


図 2 BRDF 計測光学系における計測対象物体の時間相関カメラ撮影結果。上：平均強度画像，左下：基本周波数での時間相関画像，右下：2 倍周波数での時間相関画像。

(4) 楕円鏡の改良

楕円鏡を改良するため、最初の作製において見られた欠陥が生じないような工程を検討した。最初に作製した楕円鏡では、表面に直線縞状の細かい欠陥が並び、各欠陥からは楕円鏡の中心軸を回るように尾を引く瑕が確認された。これらの欠陥は、金属光造形複合加工機の製造過程で生じる結晶構造の乱れが研磨時に金属粒子の脱落の原因となり、さらに脱落の痕の欠陥に砥粒が入ることにより研磨時に同心円状の瑕が生成されたという見解に至った。この結果を踏まえ、成形後に時効処理（焼き鈍し）と無電解ニッケルめっきという工程を加えて楕円鏡を新たに作製した。その結果、欠陥は肉眼でも見つけることが難しい程度に軽減された。しかし、楕円鏡の焦点に置かれた物体からの反射光の像を時間相関カメラで撮影したところ、直線縞状の細かい欠陥は小さいながらも依然として残っており、さらにその像には楕円鏡の中心軸の周りに同心円状に明暗のムラの模様が観察されたため、さらなる楕円鏡の改善が必要であることを確認した。

(5) 分光反射率の余弦変換係数の実時間イメージング法の提案

分光反射率の余弦変換係数を実時間で画像として計測する手法を提案した。当初は分光反射率のフーリエ基底展開係数の計測を提案していたが、分光反射率の非周期性により低次フーリエ係数による分光反射率の復元精度は高くない。一方、余弦変換は奇数次成分が非周期的（基底関数が半周期）であるため、周期的なフーリエ変換よりも分光反射率の復元に適していると考えられる。これを検証するため、色見本帳の色票の分光反射率をハイパースペクトルカメラで計測し、この計測データを用いて実験を行った。その結果、余弦変換係数の場合の方がフーリエ係数よりも低次成分による復元精度が向上することを学会（第 37 回センシングフォーラム）で報告した（図 3）。なおこの実験において、波長可変光源を用いて波長に線形な位相シフトを与えた正弦波強度変調照明を実現しており、これを DLP モジュール・楕円鏡・時間相関カメラの光学系に導入すれば分光 BRDF 計測に移行できる状態にある。

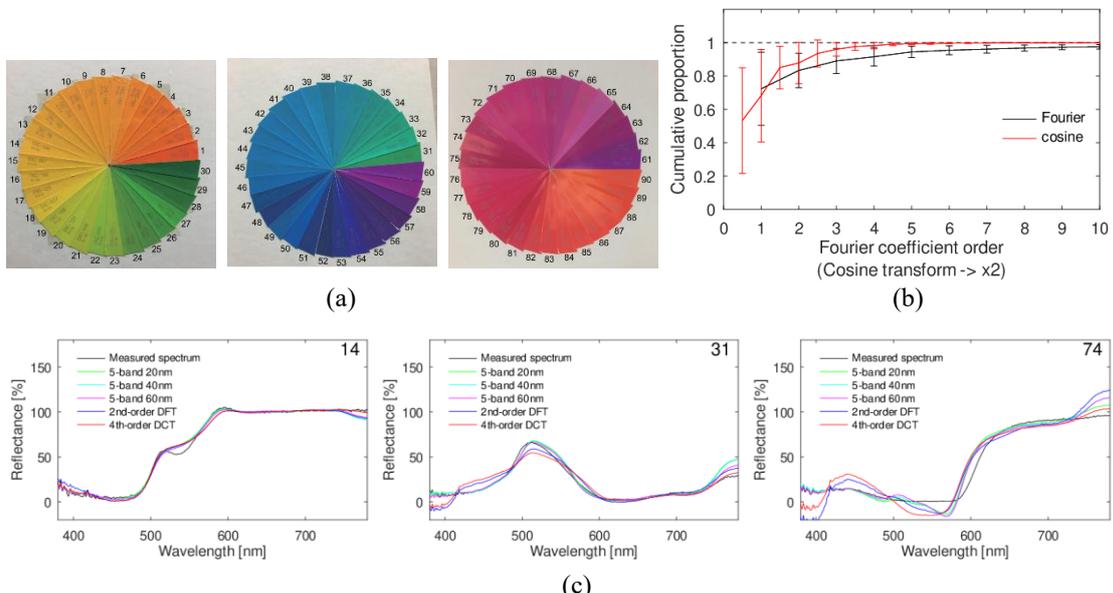


図 3 分光反射率の推定における余弦変換係数とフーリエ係数の比較。(a) 色見本帳の色票。(b) 色票の分光反射率における展開係数次数ごとの累積寄与率。(c) 分光反射率の推定結果。

(6) 総括

本研究課題の期間に短時間での分光 BRDF の計測を実現するという目標には到達しなかった。一番の課題は欠陥のない楕円鏡の作製であり、それは実現できていないが、それ以外の要素技術はほぼ準備ができているといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 土居 元紀, 来海 暁, 西 省吾
2. 発表標題 照明変動下でのパーティクルフィルタによる人物追跡
3. 学会等名 研究集会DS2ELDiA2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 氏原 祐貴, 土居 元紀, 西 省吾, 来海 暁
2. 発表標題 VQ-VAE-2を用いた皮膚の色素斑画像生成
3. 学会等名 令和3年度日本色彩学会関西支部大会発表論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M Doi, R. Kawagiwa, A. Kimachi and S. Nishi
2. 発表標題 Detection of greenery area in image by using mask R-CNN for measurement of green visibility ratio survey
3. 学会等名 Proc. of The 6th Asia Color Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 雅裕, 来海 暁
2. 発表標題 複素正弦波変調撮像に基づく運動物体の実時間両眼立体計測システム
3. 学会等名 第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 来海 暁, 土居 元紀, 西 省吾
2. 発表標題 楕円鏡と時間相関カメラを用いたBRDF計測法
3. 学会等名 第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川極 恋, 土居 元紀, 西 省吾, 来海 暁
2. 発表標題 緑視率調査を目的としたMask R-CNNを用いた草木領域抽出
3. 学会等名 第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川極 恋, 土居 元紀, 西 省吾, 来海 暁
2. 発表標題 緑視率調査を目的としたMask R-CNNを用いた草木領域抽出における学習データの検討
3. 学会等名 令和2年度日本色彩学会関西支部大会発表論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 氏原 祐貴, 土居 元紀, 西 省吾, 来海 暁
2. 発表標題 深層学習を用いた画像生成による皮膚の色素斑画像合成
3. 学会等名 令和2年度日本色彩学会関西支部大会発表論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土居 元紀, 西 省吾, 来海 暁
2. 発表標題 皮膚の見えにおける産毛の影響の検討
3. 学会等名 令和2年度日本色彩学会関西支部大会発表論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 氏原 祐貴, 土居 元紀, 西 省吾, 来海 暁
2. 発表標題 深層学習を用いた画像生成による皮膚の色素斑画像生成
3. 学会等名 日本色彩学会視覚情報基礎研究会第40回研究発表会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土居 元紀, 立川 湧己, 西 省吾, 来海 暁
2. 発表標題 M2Detによる物体領域検出を応用した照明色推定の検討
3. 学会等名 日本色彩学会視覚情報基礎研究会第40回研究発表会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 来海 暁, 土居 元紀, 西 省吾
2. 発表標題 分光反射率における余弦変換係数の実時間イメージング法の提案
3. 学会等名 第37回センシングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Doi, A. Kimachi and S. Nishi
2. 発表標題 Appearance reproduction of skin with pigment concentration pattern generated by deep convolutional generative adversarial networks
3. 学会等名 Proc. of The 5th Asia Color Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土居 元紀, 辻本 晃宏, 来海 暁, 西 省吾, 生駒 哲一
2. 発表標題 パーティクルフィルタを用いた照明色変動にロバストな人物追跡
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>記載されている研究発表のうち、以下に対しては賞が授与された。</p> <p>山本 雅裕, 来海 暁, "複素正弦波変調撮像に基づく運動物体の実時間両眼立体計測システム", 第38回センシングフォーラム, 2021 . 【計測部門・関西支部連携ポスターセッション(若手部門)優秀賞】</p>

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	土居 元紀 (Doi Motonori)	大阪電気通信大学・情報通信工学部・准教授	
	(00304155)	(34412)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西 省吾 (Nishi Shogo) (70411478)	大阪電気通信大学・情報通信工学部・准教授 (34412)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関