

令和元年6月19日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00257

研究課題名(和文)高分解能のまま時間短縮を実現する三次元形状・光反射特性の同時計測システム

研究課題名(英文) A system for simultaneously measuring 3-D shape and bidirectional reflectance at high spatial and angular resolution in shorter time

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目標は、高い空間分解能を保ちつつ従来より短時間で物体表面の三次元形状と光反射特性を同時に計測するシステムを開発することである。このシステムは時間相関カメラ、および緯線上の光源が経度に線形な位相シフトを伴って正弦波で強度変調(回転位相シフト正弦波変調)されるLEDドーム照明により構成される。この目標に向け本研究では、1)従来の回転走査照明方式における計測誤差の要因の追究およびその補償方法の検討、2)LEDドーム照明における回転位相シフト正弦波PWM駆動回路の検討、3)分光イメージングへの応用による回転位相シフト正弦波変調方式の妥当性の検証、を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、当初の目標である、高い空間分解能を保ちつつ従来より短時間で物体表面の三次元形状と光反射特性を同時に計測するシステムの実現には至らなかった。しかし、LEDドーム照明の新たな方式である回転位相シフト正弦波変調に関しては、その反射光強度波形から計測対象に関する有益な情報が得られることを、分光イメージングに応用し、分光反射率のフーリエ係数を実時間で画像検出するシステムを実現することにより実証した。また、LEDドーム照明および時間相関カメラの特性に基づいて計測誤差をモデル化し、さらにその補償方法を考案することにより、システムの計測精度を保証するための基礎となる知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is to develop a system for simultaneously measuring 3-D shape and bidirectional reflectance at high spatial and angular resolution in shorter time than previous methods. This system consists of a time-domain correlation camera and an LED dome, in which the light emitted from each LED placed densely along a latitude line undergoes sinusoidal amplitude modulation with a phase shift linear to the longitude ("circularly phase-shifted sinusoidal modulation," CPSSM). Toward this goal, this research made the following accomplishments: 1) modeling of the cause and compensation of measurement errors under pulse scanning mode of the LED dome; 2) investigation of the design possibility of a PWM driving circuit for LED dome under CPSSM; and 3) demonstration of CPSSM by application to spectral imaging.

研究分野：計測工学

キーワード：時間相関イメージセンサ BRDF BTF コンピューショナルフォトグラフィ 光反射モデル 画像センシング

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

物体の 3D 形状と表面での光反射特性をデジタル情報として獲得する技術への需要が高まっている。これらの情報の計測は物体認識や写実的画像生成に有用であり、特に後者では文化財のデジタル保存、オンライン商取引など応用が拡大している。反射特性については、表面上の 1 点においては入射／観測方向（各 2 自由度）をパラメータとする双方向反射率関数（BRDF）として記述され、また BTF は BRDF に観測点の位置座標（2 自由度）を加えたものであり、表面の模様を記述する。このように反射特性の計測は多自由度にわたり、計測時間と分解能のトレードオフが不可避である。分解能を損なうことなく 1 自由度でも時間圧縮ができれば大変な恩恵となる。

これに対し申請者らは、3D 形状と BTF を従来よりも短時間でかつ高分解能で同時に計測するシステムを提案している。このシステムは時間相関イメージセンサ（CIS）および回転走査照明から構成される。CIS は入射光強度信号と画素共通の参照信号との時間相関を出力するセンサであり、回転走査照明は球殻の内側を平行光源が走査しつつ中心の物体を照明する装置である。照明ではカメラ 1 フレーム間にいずれかの緯線上を平行光源が 1 周走査し、走査する緯線はフレームごと移動する。これまでに LED を用いて回転走査照明を試作し、1) 2 倍波との時間相関が拡散反射では生じず鏡面反射のみに現れることを利用して、拡散／鏡面反射成分が 1 フレームで分離推定できること、および 2) 分離された拡散反射成分から 3D 形状が計測できることを確認した。しかし回転走査照明が以下の問題の原因となることも明らかになった。

(1) CIS の非線形動作

CIS は正弦波変調光の下では画素回路のバイアスが安定し、線形領域で理想的に動作する。しかしパルス光の下ではバイアスが大きく変動し、非線形領域で動作する。回転走査照明はパルス光を生じるので、鏡面反射成分の強い物体ではカメラの時間相関出力が理想値から外れてしまう。

(2) カメラフレームとの同期ずれ

各緯線における回転走査の基準信号は、カメラのフレーム走査信号を位相同期ループ（PLL）により周波数逡倍して生成している。この基準信号はフレーム走査信号に同期することが望ましいが、実際には時間とともに同期に位相のずれが生じ、カメラ出力に誤差が生じたり回転走査そのものが異常になったりする。これは PLL に用いるアナログ回路素子が温度ドリフトなどの影響を受け、ループフィルタ特性や自走周波数が変動するためと考えられる。

(3) 照明の強度不足

回転走査照明では常にいずれか 1 個の LED しか点灯しない。このため拡散反射成分の弱い物体では照明強度が不十分となり、カメラ出力の SN 比が低下し得る。また LED 照明は理想的には平行光が望ましいが、照明強度を確保するには LED の照射距離を長くすることができず、平行光を得ることが困難である。このため平行光とみなせる有効照射領域も広くできない。さらに照射距離が短いと LED の占める立体角が大きくなるので、BTF 計測の角度分解能も悪くなる。

2. 研究の目的

本研究では申請者の提案する 3D 形状・BTF 同時計測システムにおいて、パルス幅変調（PWM）と多重極回転位相に基づく正弦波変調 LED ドーム照明を開発し、3D 形状・BTF を高精度かつ高安定に計測することを目的とする。多重極回転位相とは、変調位相を緯線に沿って順次ずらし、1 周する間に 1 回転（2 重極）、2 回転（4 重極）などと変化させることをいう。本研究では回転走査方式に対し本方式が以下の利点を持つことを理論と実験により明らかにする。

(1) 照明の正弦波変調により CIS 画素回路のバイアスが安定化するため、拡散／鏡面反射特性にかかわらず理想的な時間相関出力が得られる。

(2) 正弦波変調はカメラの画素クロックに基づき PWM 方式で行う。これにより照明の変調はカメラフレームに完全に同期し、これまで同期ずれの原因となった PLL が不要となる。

(3) 正弦波状の強度変調によりすべての LED が常時点灯するため、照明強度は大幅に増強され、時間相関出力の SN 比が向上する。これは LED の照射距離を伸ばすことにもつながり、その結果、照明をより平行に近付けることができ、有効照射領域も拡大できる。また LED の配置も高密度化されるので BTF 計測の角度分解能も向上する。

本研究の特色・独創性は、3D 形状と BTF の同時計測において、1) BTF のパラメータ 1 自由度分のプロファイルを、角度分解能を犠牲にすることなく 1 フレームに圧縮できる、2) CIS の 1 フレーム出力のみから拡散／鏡面反射成分を分離し抽出できる、3) 高分解能と時間短縮という相反する要求を両立させる、という点にある。3D 形状計測には数多くの手法が提案されているのに比べ、BRDF 計測あるいは BTF 計測の手法はそれほど多くない。3D 形状と BTF の同時計測はさらに研究例が少ない。BRDF/BTF 計測手法のほとんどは通常のカメラの利用が前提であり、CIS カメラのように 1 フレーム内での時間軸情報の圧縮が不可能である。鏡面反射成分を含む BTF のプロファイルを正確に計測するには、角度を細かく変えつつ多数の画像を獲得するほかにない。従来はこれに要する時間を短縮するため、仮定（形状が既知、反射特性が一様、など）の導入、角度の粗い標本化、BRDF 計測への限定などの方策が取られてきたが、仮定の成立しない対象への適用、計測分解能の低下、BRDF から BTF を得るための空間走査が必要などの点で問題がある。

本研究の結果、3D形状とBTFが短時間、高分解能かつ高精度、高安定で同時に計測できるようになれば、この技術がより身近なものとなり、文化財のデジタル保存やオンライン商取引などの応用を促進し、ひいてはこの分野の産業の振興に貢献するという意義を持つと予想される。

3. 研究の方法

本研究で開発する3D形状・BTF計測システムにおいて新たに製作する正弦波変調LEDドーム照明は、全体形状は球殻状であり、中心に向けてLEDを密に配置する。LEDは球殻の各緯線上を1周するように整列する。球殻の北極方向には穴を開けてCISカメラを設置し、中心に置かれた対象物体を下方に見て撮影する。CISカメラの出力画像はPC上で3D形状およびBTFのデータに変換する。

(1) FPGAを用いたPWM制御回路の設計

ドーム照明のLEDに正弦波変調を施すため、新たにPWM制御回路を設計する。各緯線上のLEDには多重極回転位相が生じるように正弦波で変調する。このためのPWM波形をCISカメラの画素クロックに同期させつつFPGAにおいて生成する。BTF計測には1重極および2重極の回転位相に対する時間相関出力が必要になる。これらの回転位相は異なる周波数の正弦波変調波形として重畳することができ、さらにCISカメラに各周波数の2系統の参照信号を同時に入力することにより、各回転位相に対する時間相関出力が1フレームで同時に得られる。

(2) FPC基板を用いたLED駆動回路の製作

PWM制御回路の出力を入力とするLED駆動回路をフレキシブル(FPC)基板として製作する。基板の両端は接合して筐体に垂直にかつ内周が筐体の緯線に沿うように設置する。内周側の駆動回路出力端子には砲弾型LEDを直接半田付けする。FPC基板はフラットケーブル(FFC)を介してPWM制御回路と接続する。

(3) LEDドーム照明の製作

ドーム照明用に筐体を製作する。筐体は申請者の所属機関にある3D造形先端加工センター(3Dセンター)所有の5軸マシニングセンタを用いて製作する。ただし筐体の直径はこれまでより大きくし、照明の平行化を図る。筐体には砲弾型白色LEDを挿入し、製作したFPC基板にLEDを半田付けする。半田付け終了後はCISカメラを用いて正弦波変調の多重極回転位相が正しく検出できるか検証する。

(4) 3D形状・BTFの計測と評価

製作したLEDドーム照明およびCISカメラを用いて3D形状およびBTFの計測を実施し、性能を評価する。計測結果はCG画像のレンダリングなどにより評価する。評価に必要な既知形状の物体は、3Dセンターの5軸マシニングセンタや3Dプリンタ等を活用して製作する。3D形状とBTFの算出および評価にはデスクトップPCを用いる。またドーム照明のLEDにおける発光強度のばらつきが誤差の要因となり得るため、計測や評価の作業と並行して較正法も確立する。

(5) 油彩画などへの応用

提案システムは、大局的には平面に近いが局所的には細かい凹凸を含むような物体に適している。このような物体として油彩画への応用に取り組む。

4. 研究成果

(1) 回転走査照明方式における計測誤差の要因の追究およびその補償方法の検討

3D形状・BTF同時計測システムにおいて、LEDドーム照明を新しい回転位相正弦波PWM方式に変更した場合でも、LEDドーム照明およびCISカメラの構造や配置は、照明を従来型の回転走査方式と基本的に変わらない。したがって、回転走査方式において生じた計測誤差がLEDドーム照明およびCISカメラの構造や配置とどう関係付けられるかを明らかにすることは、回転位相正弦波PWM方式での誤差を低減する上で非常に役立つ。

そこで、回転走査照明を用いた3D形状・BTF同時計測システムにおいて、計測誤差の要因がCISカメラの時間相関画像出力に及ぼす影響を数理的にモデル化した。計測誤差の要因には、1) LEDドーム照明の照度ムラ、2) CISカメラの非線形性、を仮定した。1)は拡散反射成分、2)は鏡面反射成分にそれぞれ影響を及ぼす。このモデルに基づき、拡散反射性の平面物体、および鏡面反射性の半球物体の撮影画像を人工的に生成したところ、実際の物体を撮影した場合と同様に誤差成分を含む画像が得られた。

次に、この誤差発生モデルに基づき、撮影画像から誤差成分を補償する理論を構築し、実際の物体の撮影画像において検証した。その結果、2)の影響は鏡面反射成分において効果的に補償された(図1)が、1)の影響は拡散反射成分から補償することができなかった。

(2) LEDドーム照明における回転位相シフト正弦波PWM駆動回路の検討

3D形状・BTF同時計測システムのLEDドーム照明に新たに導入する、回転位相シフト正弦波PWM駆動方式が、これまでの回転走査方式用に製作した回路基板上的CPLDに実装可能かを検討した。PWMデジタル波形は正弦波と鋸歯波や三角波との比較により生成できるが、このようなアナログ的演算を通常はデジタル回路の設計に用いるHDLで記述するのは困難であり、さらにデジタル回路として実装する場合は数値演算プロセッサが内部に構成できる

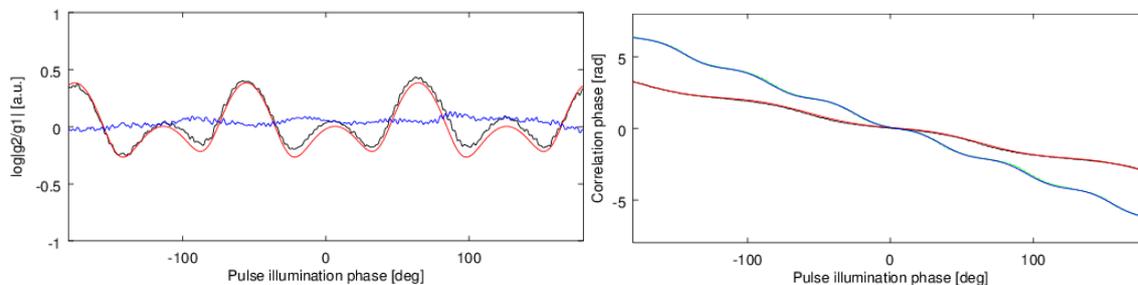


図1 CISカメラの時間相関出力における非線形性のモデル化と補償(左:絶対値,右:偏角)

FPGAを使用する必要があることが判明した。一方、あらかじめPCで生成したPWM波形を記憶し出力する構成にすればプロセッサは不要になるが、波形を記憶するためのメモリICもしくはメモリが構成できるFPGAを使用する必要があることが分かった。したがって、これまでの回路基板を流用することはできず、新たに回路基板を設計し製作しなければならないという結論に至った。

(3) 分光イメージングへの応用による回転位相シフト正弦波変調方式の妥当性の検証

3D形状・BTF同時計測システムのLEDドーム照明に新たに導入する、回転位相シフト正弦波PWM駆動方式によって、計測対象の表面上の各点における反射光強度波形は周波数が整数倍の正弦波の重ね合わせで変調される。この反射光をCISカメラの各画素で検出することにより、各周波数の正弦波成分が分離検出でき、そこから計測対象の法線方向とBTFプロファイルが推定できる。このような光強度波形の周波数ごとの分離検出が回転位相シフト正弦波変調方式において実現可能であるかを検証するため、分光イメージングに回転位相シフト正弦波変調方式を応用することにより、分光反射率波形のフーリエ係数を画像として実時間で検出する問題に取り組んだ(図2)。

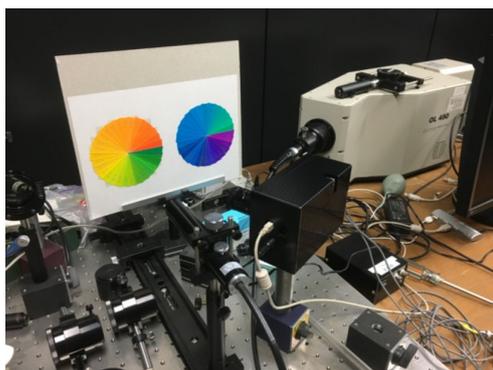


図2 分光反射率フーリエ係数の実時間イメージングシステム

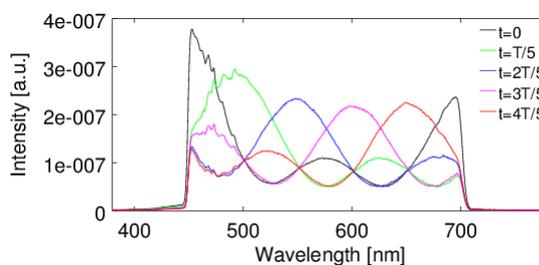
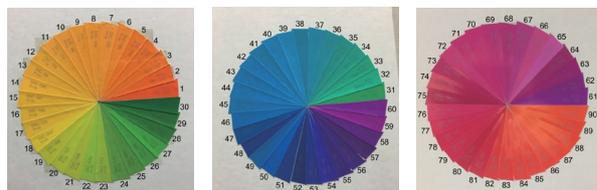
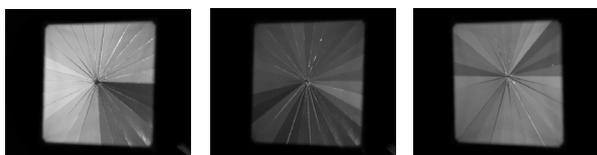


図3 回転位相シフト正弦波変調を施したスペクトル照明の分光分布

まず、分光分布が高速に変調可能な光源を用い、各波長成分が波長に線形な位相シフトを伴って正弦波により強度変調される照明を実現した(図3)。変調波形はCISカメラのフレーム周波数およびその2倍周波数の正弦波の重ね合わせで与えた。また各波長成分の最大強度は時間相関カメラの分光感度に反比例させ、各波長成分に対しCISカメラ出力が一定値となるように調整した。この照明の下で、CISカメラにフレーム周波数およびその2倍周波数の複素正弦波参照信号を入力して対象を撮影した(図4)。その結果、フレーム周波数、2倍周波数の複素正弦波に対する時間相関画像が対象の分光反射率のそれぞれ1次、2次フーリエ係수에等価であること、さらにそれらの精度が対象の分光反射率計測値から算出したフーリエ係数に対して良好であることを確かめた(図5)。



(a)撮影対象



(b)平均強度画像 (0次フーリエ係数)

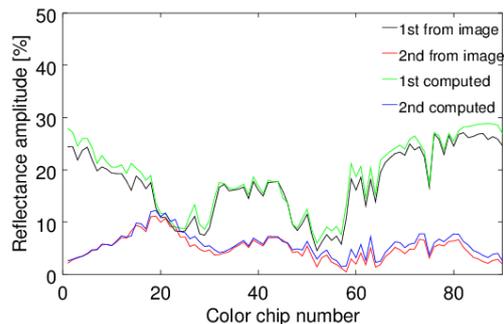


(c)時間相関画像 (1次フーリエ係数)

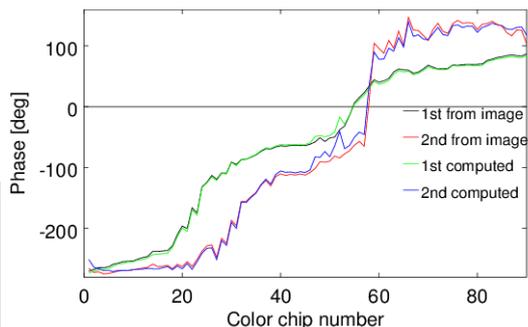


(d)時間相関画像 (2次フーリエ係数)

図4 分光反射率フーリエ係数の撮像結果



(a)絶対値



(b)偏角

図5 分光反射率フーリエ係数の検出結果

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計7件)

- ① A. Kimachi, M. Doi and S. Nishi, “An imaging system for Fourier coefficients of spectral reflectance,” *Proc. of The 7th Computational Color Imaging Workshop* (S. Tominaga et al. (eds.), *Computational Color Imaging*, LNCS 11418), pp. 41-52, Chiba, Japan, Mar., 2019.
- ② 来海暁, 土居元紀, 西省吾, “分光反射率のフーリエ特徴を抽出する実時間映像法”, 第35回センシングフォーラム, pp. 95-100, 山口大学常盤キャンパス, Aug., 2018.
- ③ 来海暁, 土居元紀, 西省吾, “スペクトルのフーリエ係数を実時間で検出する分光撮像法”, 第24回画像センシングシンポジウム, IS1-24, パシフィコ横浜アネックスホール, June, 2018.
- ④ 来海暁, 土居元紀, 西省吾, “走査型ドーム照明と時間相関カメラを用いた法線・BTF計測システムの高精度化”, 第34回センシングフォーラム, pp. 89-94, 熊本大学黒髪キャンパス, Aug., 2017.
- ⑤ A. Kimachi, M. Doi and S. Nishi, “A normal vector and BTF profile measurement system using a correlation camera and scanning dome illumination,” *Material Appearance 2017, Proc. of IS&T Int. Symp. Electronic Imaging*, pp. 13-18, Burlingame, CA, U.S.A., Jan., 2017.
- ⑥ 来海暁, 土居元紀, 西省吾, “ドーム型走査照明と時間相関カメラに基づく法線分布および反射特性の推定”, 第33回センシングフォーラム, pp. 78-83, 近畿大学和歌山キャンパス, Sep., 2016.
- ⑦ 来海暁, 土居元紀, 西省吾, “ドーム型走査照明と荷重積分法に基づくBTFプロファイル計測システム”, 第22回画像センシングシンポジウム, IS3-29, パシフィコ横浜アネックスホール, June, 2016.

[その他]

ホームページ等

<https://research.osakac.ac.jp/index.php?%E6%9D%A5%E6%B5%B7%E3%80%80%E6%9A%81>

6. 研究組織

研究協力者氏名：土居 元紀

ローマ字氏名：Motonori Doi

研究協力者氏名：西 省吾

ローマ字氏名：Shogo Nishi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。