

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330212

研究課題名(和文) ダイナミックレンジ拡張不要で時間短縮を実現する双方向テクスチャ関数計測システム

研究課題名(英文) A system for measuring bidirectional texture function with time compression capability and no dynamic range extension

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：物体表面の光反射特性を従来よりも短時間でかつダイナミックレンジの拡張なしに計測するシステムを開発した。要点は入射光の時間変動が検出できる時間相関イメージセンサという素子にあり、新たに光源の入射方向がカメラの1フレーム間に1回転する照明を製作した。試作システムにおいて実験を行ったところ、光反射特性のうち鏡面反射成分には無視できない誤差が生じたが、拡散反射成分は面法線方向とともに良好に計測できた。

研究成果の概要(英文)：We developed a system for measuring the reflection property of light on an object's surface in a shorter time than previous methods and without extending dynamic range. The key element of this system is the correlation image sensor, which can detect time-varying signals in the incoming light. In order to make the most of this sensor, we fabricated a lighting system in which the illuminating direction of the light source rotates on a sphere once in a frame period. Experimental results obtained on the prototype system revealed that specular reflection components were measured with nonnegligible errors, while diffuse reflection components as well as surface normal vectors were reasonably measured.

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

1. 研究開始当初の背景

物体の画像が写実的に生成できれば、眼前にない物体の前にあたかも自分がいてそれを肉眼で見ているかのごとき感覚が得られる。このような技術はオンライン商取引や文化財のデジタル保存などに需要がある。物体の写実的な画像生成に重要な情報の一つは光の表面反射特性である。表面反射特性は色のほか、つやつや感、ざらざら感などのいわゆる質感も視覚刺激としてもたす。1点における表面反射特性は入射方向・受光方向の計4変数の関数として表され、双方向反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) とよばれる。BRDF は一般的には拡散反射成分と鏡面反射成分の和としてモデル化されている。BRDF が場所ごとに異なる場合は双方向テクスチャ関数 (bidirectional texture function, BTF) とよばれ、変数は位置の2変数を加えた計6個となる。

物体の画像を写実的に生成するには、物体のBRDFやBTFを実際に計測する必要がある。従来法は多くが汎用のカメラと光源を回転機構あるいは曲面鏡と組み合わせたものである。しかしBRDFやBTFの計測は本質的に長時間を要し、それが普及の妨げとなっている。その要因は以下の2点にある。

(1) 入射方向・受光方向の分解能と計測時間との間にトレードオフが存在する。

BRDF/BTFは入射方向・受光方向について計4自由度の関数であり、その角度分解能を上げれば上げるほど密なBRDF/BTFが得られるが、逆に計測時間は長くなる。BTF計測では、物体表面各点からの反射光強度はカメラにより2次元並列に計測できるが、入射方向・受光方向は計4自由度で変化させなければならない。例えば入射方向・受光方向をそれぞれ天頂角(0~90 deg)、方位角(0~360 deg)ともに1 deg刻みで変化させると、BTF計測は30 fpsのカメラを用いて最短でも $(90 \times 360)^2 / 30 = 405$ 日もの長時間を要する。一方BRDF計測では表面反射特性が様な対象に限定されるが、3次元形状を持たせることにより、異なる受光方向に対する反射光強度がカメラの各画素において2次元並列に計測できる。しかし入射方向は別途変化させる必要がある。

(2) 鏡面反射成分を計測するためにカメラのダイナミックレンジを拡張する必要がある。

一般に鏡面反射成分は拡散反射成分に比べ大幅に強く、カメラ出力を飽和させやすい。この対策として、多くの場合では露光時間を変えつつ撮像を複数回行い、画像を合成することによりカメラのダイナミックレンジを実質的に拡張している。露光時間の切り替え回数が増えれば増えるほどダイナミックレンジが拡張できるが、逆にその回数に比例して計測時間が長くなる。

2. 研究の目的

本研究では上記の2つの困難を同時に軽減するBTF計測システムの実現を目標とする。その鍵は時間相関イメージセンサ (correlation image sensor, CIS) にある。CISは入射光強度信号と外部参照信号との時間相関を画素ごとに毎フレーム生成する撮像素子である。本研究はその数ある応用の一つである法線ベクトル映像法に着想を得ている。この手法は円対称に固定配置された6個の正弦波変調照明を用いることにより、拡散反射物体の表面法線ベクトルを1フレームで計測することができ、さらにもう1フレームを利用することにより鏡面反射物体にも適用できる。本研究ではこれらの成果を土台としつつも、CISの応用として新たにBTF計測を展開し、研究期間内に以下の課題に取り組む。

(1) CISと2軸回転走査照明を用いたBTF計測システムの構築

2軸回転走査照明とは斜め上方から物体を照射しつつ光源位置が水平回転する照明をいう。この照明を1フレーム間に1回転させつつCISで撮像することにより、高々2~3フレームの出力画像からBTFのプロファイルが計測できる。この計測理論を確立するとともに、2軸回転走査照明を製作し、CISと合わせてBTF計測システム(図1)を構築する。なお、受光方向の密な走査は物体の姿勢変化により行う必要があり、それには別途2軸傾斜ステージなどが必要となる。

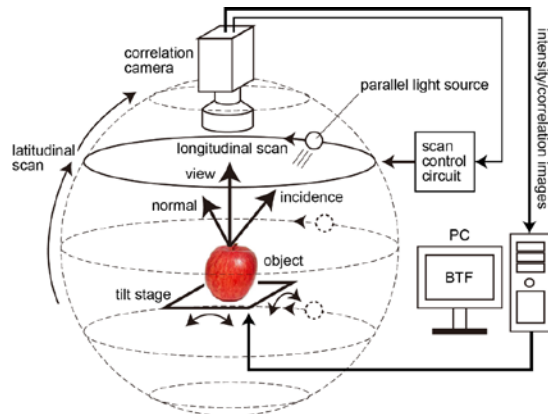


図1 BTF計測システムの構成

(2) 較正法の確立

BTF計測システムの精度向上には較正が不可欠である。本研究では、計測精度に最も重要と考えられる2軸回転走査照明の強度と入射方向に関する較正法を確立する。

(3) 3次元物体のBTF・形状計測への適用

BTF計測システムを3次元物体に適用する場合、各点において法線方向が異なるほか、隠蔽による陰影の影響を考慮しなければならない。2種類の陰影 (cast shadow, attached shadow) は、2軸回転走査照明をフレームごとに垂直に走査することにより検出し分類できる。隠蔽による陰影の生じないフレームを用いれば、本システムでは法線ベクトル映

像法と同様に法線分布が1フレームで正しく計測できる。以上を理論として構築し、隠蔽を生じる3次元物体のBTF・形状計測に本システムを適用する。

3. 研究の方法

(1) CISと2軸回転走査照明に基づくBTF計測理論の構築

提案システムでは、2軸回転走査照明を1フレーム間に1回転させつつCISで物体を撮像する。フレーム周波数の参照信号入力に対する1フレーム出力画像からは拡散反射成分が得られる。また鏡面反射成分のBTFプロファイルは、高々1~2本の高調波参照信号に対する出力画像を用いて拡散反射成分と分離して計測できる。本研究ではまずこのBTF計測理論の完成度を高め、計測精度と角度分解能や参照信号周波数などとの関係を明らかにする。

(2) 2軸回転走査照明の製作

本研究で最も困難が予想されるのが2軸回転走査照明の製作である。理想的には平行光源を水平方向に高速回転しつつ、天頂角を変えて垂直方向にも移動できることが望ましい。光源の水平・垂直2軸にわたる機械的走査は従来研究にも見られる。しかしCISのフレーム周波数が15fpsなので、光源の機械的回転には900rpmもの高速回転テーブルが必要となり、現実的でない。よって本研究では多数の光源を物体を囲む球面上に固定し、点灯位置の電氣的な制御により水平回転走査を実現する。光源の点滅は点灯位置が15Hzで水平回転できるだけの速さを必要とする。また物体表面での照明光束はできる限り平行であることが望ましいので、光源は物体から一定距離だけ離す必要がある。よって光源には高輝度白色LEDを用いる。回転走査のためLEDは水平円環に沿って配置する。なお照明の天頂付近はCISカメラの視野を確保するため開口部とする。またLEDの点灯位置を回転走査するための信号の生成回路も製作する。各円環上のLEDの個数は異なるが、いずれもCISカメラのフレーム周波数で回転走査するように生成回路を設計する。

(3) BTF計測システムの構築と検証

製作した2軸回転走査照明をCISカメラと組み合わせ、BTF計測システムを構築する。CISカメラには受光方向の広がりを抑えるためにテレセントリックレンズを取り付け、カメラは2軸回転走査照明の開口部に設置する。CISカメラと2軸回転走査照明の制御はPCを用いて行う。

構築したシステムは平面物体を用いて検証する。このためにBTFの各プロファイルを全体のBTFとして統合するソフトウェアを製作する。また統合されたBTFを2次元グラフや3次元CGとして表示するソフトウェアも製作する。さらにBTFを用いてCG画像を生成し、実物との見えを比較することにより問題点を追究する。

(4) BTF計測システムの較正法の確立

BTF計測の精度を向上させるため、照明のLEDの強度と入射方向に関する較正法を確立する。

(5) 3次元物体の形状・BTF同時計測法の理論構築と検証

本システムでは法線ベクトル映像法と同様に、理論的に物体表面の法線ベクトル分布が1フレームで計測できる。これに基づき、BTF計測と同時に法線ベクトル分布から3次元物体の形状を復元する機能を追加する。3次元物体では隠蔽による陰影が問題となるが、陰影の有無や種類(cast shadowかattached shadowか)をCIS出力に基づいて判定し、有意な法線ベクトル分布が得られるBTFプロファイルを抽出するための理論を構築する。計測精度は既知形状の物体を用いて検証し、問題点を洗い出す。

4. 研究成果

(1) 計測理論の構築

CISカメラ出力から物体の面法線、拡散反射成分、鏡面反射成分を検出するための理論を確立した。面法線と拡散反射成分を推定するには、フレーム周波数の2倍周波数の参照信号に対するCISカメラ出力が0になる必要がある。この推定値からCISカメラ出力中の拡散反射成分を推定し除去することにより、CISカメラ出力中の鏡面反射成分を取り出すことができる。この成分に荷重積分法とよばれる考え方を適用することにより、BTFプロファイル波形のうち鏡面反射成分の波形パラメータを推定する理論を案出した。

しかし、2軸回転走査照明が物体の背面から入射する条件では、拡散反射成分のみが生じていても2倍周波数成分が0にならず、上記の考え方が破綻する。それを解決するため、背面入射条件でのCISカメラ出力を数学的に記述し、それに基づきすべての緯度の照明に対して得られた出力画像系列から拡散反射成分と鏡面反射成分を分離するアルゴリズムを構築した。

(2) 計算機シミュレーションによる理論の検証

(1)で構築した理論やアルゴリズムに基づき、CISカメラ出力から面法線、拡散反射成分、鏡面反射成分が計測できることを、計算機シミュレーションにより確認した。さらに、それらの精度を計算機シミュレーションにより見積もり、ほぼ理論通りであることを確認した。

(3) 2軸回転走査LED照明の製作および計測システムの構築

2軸回転走査照明の土台となる構造物を製作した。形状は球殻状で、中心に向かってLEDを差し込む穴が多数空けられている。本来は構造物は全球にわたって製作されるのが望ましいが、加工の都合上北半球のみを製作した。北極方向にはカメラで撮影するための穴を開け、LED穴は緯線に沿いつつ赤道から北

極方向に向かって密に配置した。加工には、申請者の所属機関に設置されている5軸マシニングセンタという精密工作機械を用いた。これによりLEDの角度・位置決めが精度よくかつ高密度に実現できた。LEDには砲弾形状の高輝度型を用いた。ハイパワーLEDより光強度は低下するものの、正確な角度・位置決めと土台への取り付けが容易に行えた(図2)。



図2 試作した2軸回転走査LED照明

一方、このLED照明の回転走査を駆動する信号生成回路をCPLDで実現する方法を考案した。位相同期ループ(PLL)回路を用いることにより、CISカメラのフレーム信号を各緯度のLEDの個数分だけ通倍し、それを用いてシフトレジスタを駆動する構成とした。CPLDはこの通倍器とシフトレジスタのために用いた。この構成により、各緯度の円環ごとに周波数が異なりかつCISカメラのフレーム信号に同期する信号が生成できた。この構成に基づき、各緯線上のLEDを走査点灯するための駆動回路基板を製作するとともに、照明用構造物にLEDを固定し回路基板と接続することにより、照明装置を完成させた(図3)。



図3 試作した計測システム

(4) 撮像実験によるシステムの動作検証

(3)で製作した照明装置の下でCISカメラを用いて試験物体を撮影し、照明装置が正しく動作していることを確認するとともに、拡

散反射成分と鏡面反射成分の分離、法線ベクトル分布と拡散反射係数の推定、および鏡面反射成分パラメータの推定を行った(図4, 5)。その結果、法線ベクトル分布と拡散反射係数は妥当な値で推定できるものの、鏡面反射成分パラメータは理論通りに推定できなかった。この原因は照明のパルス走査によって時間相関イメージセンサの出力が非線形応答を生じることであると考えられ、照明変調方式のパルス点灯走査からの変更が必要であることが確認された。



図4 撮影対象の半球状物体(左から発泡スチロール、アルミ材、艶消し白塗装木片)

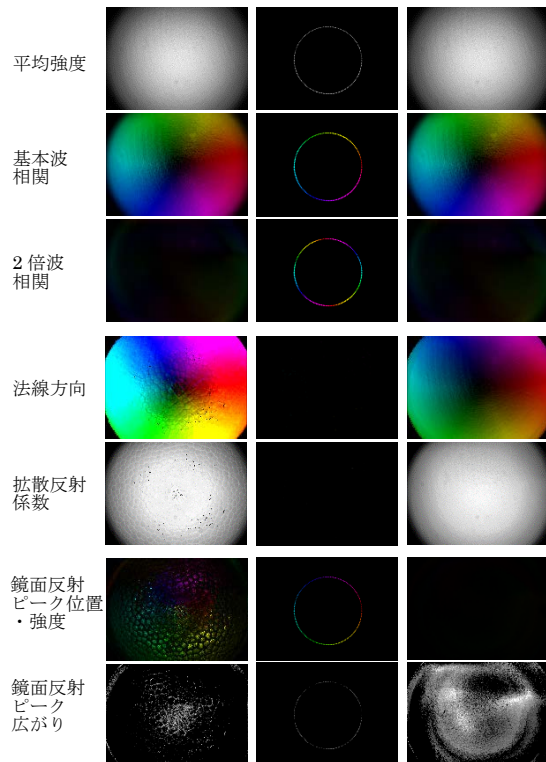


図5 実験結果(光源緯度45°, 左から発泡スチロール、アルミ材、艶消し白塗装木片)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計3件)

- ① 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 10, 2016. (査読なし)
- ② 来海暁, 土居元紀, 西省吾: 三次元物体の形状・反射計測のための回転走査照明の開発, 第32回センシングフォーラム, pp. 166-170, 大阪電気通信大学寝屋川キャンパス, Sep. 10, 2015. (査読なし)

- ③ 来海暁, 土居元紀, 西省吾 : 時間相関カメラを用いた三次元物体の形状・反射計測, 第 31 回センシングフォーラム, pp. 46-50, 佐賀大学本庄キャンパス, Sep. 25, 2014. (査読なし)

[その他]

ホームページ等

<http://www.osakac.ac.jp/labs/kima/kimabib.htm>

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

<https://researchmap.jp/kima/>

<https://www.researchgate.net/home>

6. 研究組織

(1) 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 : 3 0 3 1 2 9 8 7

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

土居 元紀 (DOI, Motonori)

大阪電気通信大学・情報通信工学部・准教授

研究者番号 : 0 0 3 0 4 1 5 5

西 省吾 (NISHI, Shogo)

大阪電気通信大学・情報通信工学部・准教授

研究者番号 : 7 0 4 1 1 4 7 8

安藤 繁 (ANDO, Shigeru)

元東京大学・情報理工学系研究科・教授

研究者番号 : 7 0 1 3 4 4 6 8