

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700165

研究課題名(和文) ディスプレイ上へのコード化パターン表示による3次元形状と反射特性の同時計測

研究課題名(英文) Shape and Reflectance Property Measurement by using Controllable Lighting Device

研究代表者

坂上 文彦 (Sakaue, Fumihiko)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00432287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、ディスプレイ上に特殊なパターンを投影することにより様々な照明環境を生成し、この環境下で対象物体を撮影することで物体の反射特性および形状情報を計測する方法について検討した。その結果、反射情報を取得にはディスプレイ上に離散コサイン変換などの直行変換基底を表示させることで撮影回数を大幅に減少させて効率的に反射情報を取得可能であることを確認した。また、形状取得においては高周波パターンを利用することで拡散反射成分のみを取得でき、これにより形状情報を容易に計測可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose shape and reflectance property measurement system by using controllable lighting device such as display. Particular patterns are projected on the display and a target objects are taken under this lighting environment, and thus, we can measure shape and reflectance property efficiently. We discuss effective pattern for shape measurement and reflectance property measurement. From the discussion, we find that DCT bases are effective for measuring reflectance property. Furthermore, we also find that high frequent patterns are effective for shape measurement.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 知覚情報処理・知能ロボティクスA

キーワード：反射特性解析 形状計測 照度差ステレオ法 高周波パターン投影

## 1. 研究開始当初の背景

近年、3次元モデルを利用したコンピュータグラフィックス技術は、映画やゲームなど、非常に幅広い分野で利用されている。また、立体視が可能なテレビやビデオゲーム機などが一般向けに発売されるなど、3次元モデルのさらなる利用が進められている。

このような装置をより有効に活用するためには、一般ユーザが手軽に3次元形状を取得する手段が必要であり、様々な方法が検討されている。また、取得した3次元情報を元に写実的な画像を合成するためには、対象の3次元形状だけでなく物体の反射特性が必要とされるため、これについてもあわせて取得する方法が必要である。

一般的に3次元形状を取得するためには、2台以上のカメラを用いるステレオカメラシステムやレンジセンサが用いられる。これらの方法については既に多数の研究がなされており、それらを利用したいくつかのシステムも販売されるに至っている。しかし、これを利用するためには専用のデバイスや複数のカメラが必要とされるため、一般人が手軽に利用できる状態とは言いがたい。さらに、通常のシステムでは3次元形状を取得することは可能であるが、正確な反射特性を取得することはできない。

このような反射特性を取得するためには、通常、複数の異なる光源環境下で撮影された画像を用意する必要がある。反射特性が単純なモデルで近似可能な場合には、少数の画像からでも特性の推定が可能であるが、正確な反射特性を得るためには、双方向性反射率分布関数(BRDF)と呼ばれる関数を計測する必要がある。これを計測するためにはカメラと光源の位置を自由に移動可能な装置が必要となり、また、計測時間も長時間に及び、プロジェクタと鏡面を利用することにより、計測時間を大幅に短縮する方法も提案されているが、この方法でも特殊な形状の鏡とプロジェクタが必要とされる。そのため、より簡便に反射特性を計測する方法が求められている。

## 2. 研究の目的

本課題では、より簡易に対象物体の3次元形状および反射特性を取得する方法を目指し、1台のカメラとコンピュータのディスプレイを利用した方法を提案する。このシステムでは図1に示すとおり、計測対象となる物体をコンピュータディスプレイの前面に配置する。このとき、ディスプレイに表示するパターンはコンピュータ上から容易に制御可能であり、任意のパターンを表示することができる。従って、ディスプレイ上の表示パターンを変動させることにより、物理的な移動を伴うことなく光源位置を変化させることが可能である。また、このシステムでは照

明装置として通常のディスプレイのみを使用するため、プロジェクタや鏡面等、付加的な装置を使用すること物体形状、反射特性の取得が可能である。本研究ではこのような環境を用いて、3次元形状計測および反射特性の推定を行う方法を検討する。



図 1: システムのイメージ

まず、形状推定法について述べる。本研究課題においては、ディスプレイ(光源)と対象物体の距離が十分に近いシーンを対象としているため、この問題は近接光源下での陰影からの形状復元として定義することができる。この問題にはいくつかの解法が提案されているが、反射特性が未知の物体に対しては安定な計測が難しいという問題がある。本課題ではこの問題を解決し、対象の反射特性に関わらず形状計測を行う方法の実現を目指す。

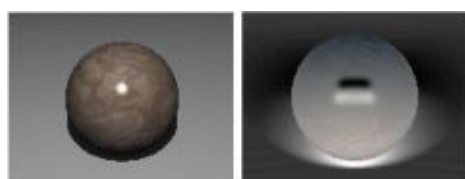
次に効率的なBRDF計測について述べる。先にも述べたとおり、任意の反射モデルをもつ物体表面の反射特性推定はBRDFの計測として捉えることができる。BRDF計測では、その計測方法だけでなく計測したデータをどのように保存しておくかが重要な問題となる。これは、計測すべきBRDFが4次元関数により表現されるため、取得すべきデータが膨大な量となることに起因する。加えて、対象物体の全ての点について反射特性を推定しようすると、画像の広がり表現する2次元が追加されるため、合計6次元のデータが必要となる。このようなデータを効果的に利用するためには、計測されたデータを何らかの方法で圧縮して保存しておく必要がある。本研究では、照明として利用するディスプレイ上に特定のパターンを表示させることにより、圧縮されたデータを直接取得する方法を提案する。これにより、通常の方法では全ての画像を取得した後に何らかの処理を施しデータの圧縮を行うのに対し、この方法では撮影画像そのものが圧縮されたデータとして得られることになる。さらに、圧縮されたデータをうまく利用することにより、計測に必要な撮影回数を大幅に減少させることが可能である。これにより、計測の効率化とデータの効率化を同時に実現することができる。本課題ではこのような効率的な計測を実現するためには、どのようなパターンの表示および撮影方法が有効であるかにつ

いて検討，解析を行う．

## 2. 研究の方法

### (1) 反射率計測

通常の BRDF 計測においては，対象物体を様々な方向から照らすことにより観測される輝度の変化を計測する．本課題では，照明としてディスプレイを利用するため，ディスプレイの各点を点灯，消灯させることによりその変化を観測することになる．この場合，図 2 左のような画像を数多く撮影することになる．本課題では，ディスプレイ上の一点を点灯するだけでなく，複数の点の光量を制御しながら同時に点灯させることにより，より効率的に計測を行う方法を考える．



単一照明      コード化照明

図 2: 単一照明とコード化照明

ここでは，画像の取得と圧縮が同時に行えるパターンを考える．例えば，画像の圧縮には 2 次元離散コサインが用いられ，この変換の基底は図 3 に示す画像として表現することができる．一般的には，離散コサイン変換の高周波成分が大きな基底に對に対応する成分は非常に小さくなることが知られており，これらをカットすることによりデータ量を削減することが可能である．したがって，このような方法を取得されたデータに適用することによりデータの圧縮が可能となる．

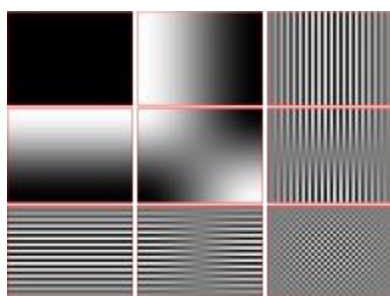


図 3: コード化照明(離散コサイン変換基底)

しかし，全ての画像を取得した後に変換を行った場合，画像の取得そのものを効率化することはできない．そこで，これを利用したパターンをディスプレイ上に投影することにより画像の取得と圧縮を同時に行う方法を考える．いま，ディスプレイを小さな点光源の集合であると考え，図 3 に示したパターンを投影する場合を考える．ここで，ディス

プレイ上の点 $(x,y)$ を 1 の光量で発光させた場合に観測される輝度を  $f(x,y)$  とする．光源が複数になった場合に観測される輝度はそれぞれの単一光源下で観測された輝度の和として計算可能であるため，ディスプレイ上の点 $(x,y)$ を  $I(x,y)$  の強度で発光させた場合に観測された輝度は，各点をそれぞれ光らせた場合の輝度の離散コサイン変換の結果，すなわち図 3 に示す離散コサイン変換基底による変換結果を直接表した画像(図 2 右)を得られる．ただし，基底中には負の値が含まれるため基底中の正の部分のみ，負の部分のみを別々に投影し，この差分を計算することにより目的の画像を得る．これにより，離散コサイン変換の結果をカメラからの撮影画像として得ることができる．

上述のとおり高周波成分をカットすることが可能であれば，それに対応する画像を撮影しないようにすることにより，撮影時間の短縮を行うこともできる．さらに，撮影された画像に対して逆離散コサイン変換を適用することにより，単一光源化で撮影された画像も取得できる．このようにして得られる画像は複数の画像から計算されることになるため，画像の SNR を向上させることにも有効であると考えられる．このようなコード化照明を利用することにより，少数の撮影画像から効率的に反射情報を取得することが可能となる．

### (2) 形状計測

次に，形状復元のための方法を示す．照明情報を利用して形状復元を行う方法として，Photometric Stereo 法(照度差ステレオ法)がよく知られている．この方法は，複数の異なる照明条件下において撮影された画像群を用いて物体の形状情報を推定する方法である．対象物体の反射情報が既知の場合，この方法を用いて適切に形状復元を行うことができる．しかし，反射情報が未知の物体に対してこの方法を適用した場合，形状を適切に復元することができない．そこで本研究では，ディスプレイ上の照明パターンを工夫することにより，反射情報が未知の物体に対して照度差ステレオ法を適用する方法について検討する．

照度差ステレオ法を使用する場合，物体表面の反射モデルが Lambert モデル(拡散反射モデル)に従う場合，最も簡単に形状情報が復元可能であることが知られている．これは，上記のモデルでは形状情報を線形式のみで記述できるため，その解を安定かつ容易に得ることができるためである．しかし，通常の方法で撮影された画像には，拡散反射以外に鏡面反射などが含まれるため，物体全体の反射を拡散反射モデルで表現することはできない．そこで，本研究では，このような鏡面反射を除去するための照明方法を検討した．

この方法では，図 4 に示すようにディス



レイ上に照明のオンオフが繰り返し表示される高周波パターンを表示させる。また、このパターンの位相（表示位置）をずらしながら複数の画像を撮影する。ここで、上述したとおり拡散反射モデルでは、照明条件の変動による輝度の変化を線型モデルで表現することが可能である。これに従えば、物体の反射が拡散反射モデルにより表現できる場合、図 4(a)の条件下で撮影された画像と図 4(b)の条件下で撮影された画像の輝度値は図 5に示すように等しくなる。一方、反射光に鏡面反射が含まれる場合、線型モデルにより表現することができなくなるため、2つの輝度値は一致しなくなる。これにより、物体の観測輝度に鏡面反射が含まれるか否かを判定することが可能である。また、鏡面反射は拡散反射よりも明るい成分となるため、2枚の画像において観測輝度値の低い画像を選択することにより、拡散反射成分のみを取り出すことが可能となる。このようにして観測画像から拡散反射成分（線形成分）のみを容易に分離することができる。

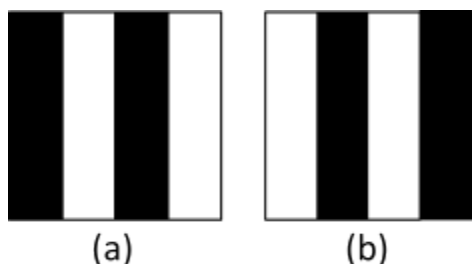


図 5：高周波パターン

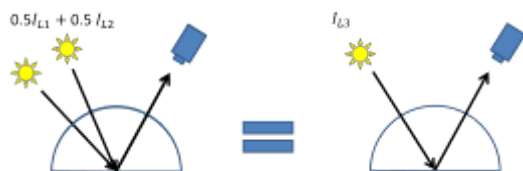


図 4：輝度の線形性

上記の方法を用いることにより、画像から拡散反射成分のみを取り出すことができる。そのため、このような方法を用いて複数の画像を撮影することにより、照度差ステレオ法を用いて3次元形状復元を実現することができる。一般的に、照度差ステレオ法においてはより多くの画像を用いた方が復元の精度および安定性が向上することが知られている。そのため、本研究においてもこのような画像を効率的に取得する方法を考える。

この方法では、反射率計測に用いた直交変換基底を利用する。上述のとおり、このような基底を利用することで、少ない画像から様々な照明条件の画像を取得することができる。これを先述の高周波照明と組み合わせることにより、拡散反射成分のみを含む画像を効率的に取得することが可能となる。この方法では、図 6に示すように、直交変換基底画像と高周波パターンを掛け合わせた画像

をディスプレイ上に表示させる。このとき、高周波パターンの位相を変化させながら複数の画像を撮影・処理することにより、直交基底照明下で撮影された、拡散反射成分のみを含む画像を取得することができる。このような画像群から様々な照明条件の画像を合成することにより、効率的に拡散反射画像を得ることができる。また、このようにして得られた画像群に対して照度差ステレオ法を適用することにより、物体の形状を取得することができる。

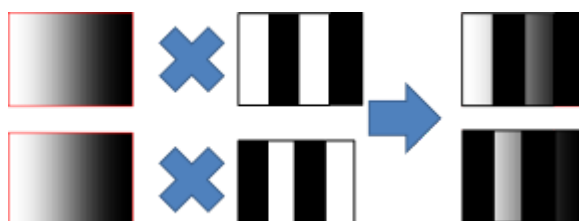


図 6：高周波パターンとコード化照明の組み合わせ

### 3. 研究成果

#### (1) 反射情報計測

まず、物体の反射情報計測について得られた成果をまとめる。ここでは、直行変換基底として離散コサイン変換基底を用いた。ディスプレイ上に表示したパターンは図 3に示した通りである。また、この規定パターン下において撮影された画像の例を図 7に示す。この画像においては左上ほど低周波の成分を表しており、右下ほど高周波のパターンが示されている。なお高周波パターン下において撮影される画像は非常に暗い画像となるため、輝度の正規化を施したのち画像を示している。なお、輝度値が低いということは画像に含まれる情報がすくないことを同時に表しており、当初の予測が正しかったことを示している。

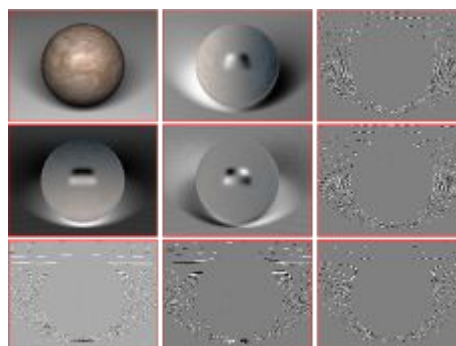


図 7：コード化照明下で撮影された画像例

次に、このようにして得られた画像群から画像の再構成を行った際の、画像の再現率を図 8に示す。このグラフにおいて、横軸は画像の構成に用いた基底の枚数を表しており、

縦軸が画像の再現度を表している．このグラフを見ると，全基底画像のうち 20%の画像を用いれば画像の 99%を表現可能であることがわかる．これは，画像撮影が通常の 1/5 の枚数で完了可能であることを示しており，撮影時間を大幅に短縮可能であることを示している．

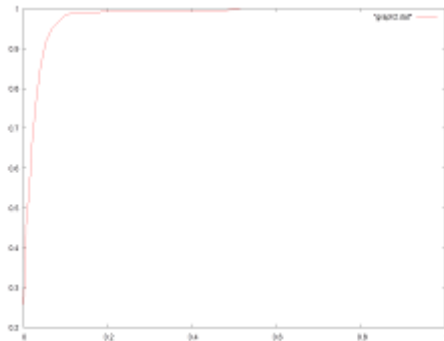


図 8: 基底枚数と画像の再現性の関係

さらに，図 9 は基底の枚数を変化させながら合成した画像を示している．この結果を見ても，少ない基底画像を用いた場合でも多数の基底画像から合成した画像と比較して遜色ない品質の画像を合成可能であることがわかる．以上により，本課題で提案した方法を用いて，少ない画像から効率的に反射情報を取得可能であることが確認された．



図 9: 画像の再構成例: 2 枚から (左), 20 枚から (中), 400 枚から (右)

(2) 形状計測

次に，照度差ステレオ法を適用するために，拡散反射成分のみを取得した画像を示す．まず，高周波パターンを用いて拡散反射成分のみを取り出した結果を示す．図 10 に示した画像は高周波パターンの元で撮影された画像の例である．これらの画像をもとに拡散反射成分を抽出した結果が図 11 の画像である．この画像を見ると，もとの画像に含まれるハイライトが除去されており，拡散反射成分のみが適切に取得できていることがわかる．

つぎに，この高周波パターンを直行変換基底と組み合わせることにより，効率的に拡散反射画像の取得を行った結果を示す．この投影パターンの下で撮影された画像の例を図 12 に示す．なお，この画像には負の値が含まれるため，灰色が 0 レベルとなるように正規化が施されている．また，この画像を元に，拡散反射成分を抽出した結果を図 13 に示す．この画像にも同様に負の値に対する正規化が施されている．この画像を見ると，撮影画像に含まれていたハイライトが除去されていることが確認できる．さらに，これらの画



図 10: 撮影画像例



図 11: 拡散反射成分取得結果



図 12: コード化照明下での撮影例



図 13: コード化照明下での撮影画像から得られた拡散反射成分( 拡散反射のみで構成される基底画像)

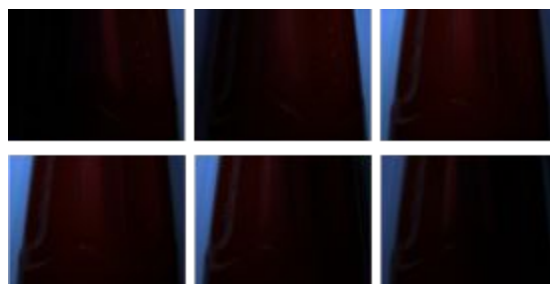


図 14: 拡散反射のみで構成された合成画像から合成した画像を図 14 に示す．この結果を見ると，様々な照明環境下で撮影された画像が合成されていることがわかる．また，合成画像にはハイライトが含まれておらず，

拡散反射成分のみにより構成されていることがわかる。

これらの結果から、本課題で提案した方法により、効率的に拡散反射画像を取得可能であることが確認された。これらの画像に対して照度差ステレオ法を適用することにより、様々な反射特性を持つ物体の形状を復元できると期待できる。

#### 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)

[雑誌論文](計 1 件)

坂上文彦, 加藤一樹, 佐藤淳, 幾何情報と工学情報に基づく多視点幾何, 電子情報通信学会論文誌, D, 情報・システム, vol.95-D, No.12, 2012, pp.2102-2112, (査読有), <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009553852>

[学会発表](計 6 件)

S. Takada, F. Sakaue, J. Sato, 3D Object Emphasis using Multiple Projectors, International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2014/1/5-8, リスボン, ポルトガル

Y. Kakumu, F. Sakaue, J. Sato, K. Ishimaru, M. Imanishi, High Frequency 3D Reconstruction from Unsynchronized Multiple Cameras, British Machine Vision Conference, 2013/9/9-13, ブリストル, イギリス

K. Suzuki, F. Sakaue, J. Sato, 3D Invariants from Coded Projection without Explicit Correspondences, International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2013/2/21-24, バルセロナ, スペイン

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

坂上 文彦 (SAKAUE, Fumihiko)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00432287