

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19979

研究課題名（和文）画像による光学解析に基づく材質特性の物理的再現

研究課題名（英文）Physical reproduction of material properties based on optical analysis of images

研究代表者

向川 康博（Mukaigawa, Yasuhiro）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：60294435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、光学解析手法によって計測された材質の光学特性をデジタルファブリケーション技術で物理的に再現することである。物の見た目を特徴づける半透明度と光沢度の計測と再現について一定の成果が得られた。プロジェクタ・カメラシステムによって半透明度と光沢度の計測を行った。UV硬化式インクを用いたプリンタによって計測した半透明度を再現した。また、3Dプリンタの印刷パターンの変更によって光沢度が変化することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デジタルファブリケーション分野では新しい質感や感触を実現するための材料開発や機器開発が主流であるが、再現を目的とする場合には、計測系も考慮することが重要である。同様に、コンピュータビジョン分野では、3D印刷における質感再現を目的とした計測手法はあまり研究されてこなかった。本研究はこれらの分野間を相互に接続するための基礎的な試みであり、得られた成果の学術的意義は大きい。本研究の延長線には、計測に基づく個人の肌の質感再現などがあり、医療器具における社会的意義も大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：This research aims to reproduce optical properties, measured by photometric analysis methods, by digital fabrication techniques. We have achieved the basic purpose through developing methods to measure and reproduce translucency and glossiness from which the appearance of an object derives. Our method can measure the translucency and glossiness using a projector-camera system, and then reproduce the measured translucency using a UV printer. Also, we confirmed the glossiness can be modified by changing 3D print patterns.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：デジタルファブリケーション プロジェクタ・カメラシステム 半透明感 質感再現

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョン分野では、光の反射や散乱などの光学特性を計測・解析する試みが古くから行われてきた。しかし、現実の光学現象は複雑すぎるため、すべての光学特性を同時に計測・解析することは一般に困難であり、注目する光学特性以外を除去対象として無視することが多かった。そのため、一括した光学特性を計測・解析対象とする研究にはほとんど取り組まれていない。これまでに研究代表者は、プロジェクトを用いて照明を制御することで、観測画像を光学現象ごとに各成分画像へ分解することに成功している。この成果から、光学現象が複雑であっても複数の光学特性を一括してモデル化し、同時に計測・解析が可能であるという発想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、画像による光学解析手法によって、計測された材質特性をデジタルファブリケーション技術によって物理的に再現することである。計測した材質特性を3Dプリントなどによって再現できれば、例えば、自分の肌と同じ質感を持った義手や破損しやすい文化財のレプリカなどを容易に作製することが可能となり、材質特性を再現可能な3D複合機が実現できる。従来の3Dプリントは、観測画像に基づいて物体表面の色を付けたり、既定の材料を用いて物体をプリントすることが可能である。しかし、任意の材質特性を持つ物体をプリントすることは難しい。これには大きく二つの原因があり、一つは材質特性を詳細に計測する手法が明らかでないこと、もう一つは任意の材質特性を物理的に再現する手段がないことである。そこで、本研究では、一つ目の課題である材質特性の計測手法を確立することを目標とし、研究に取り組む。材質が持つ光学特性(光の反射・散乱・吸収・透過特性)を材質特性と定義し、これらを同時に計測するという挑戦的な課題に取り組む。

3. 研究の方法

本研究では、デジタルファブリケーション技術による材質特性の再現を目的としており、材質特性の計測手法確立を第一の目標とする。しかし、デジタルファブリケーション技術による再現にも応用できる形でモデルを構築していく必要があるため、再現手法についても検討する。目標達成のため、以下2つの課題を設定して研究開発に取り組んだ。

(1) 材質特性のモデル化および計測

(2) 材質特性と材料合成の関係性の明確化

2つの課題に分けて研究開発を進めるが、それぞれは完全には独立しておらず、互いに影響し合う形で進捗する必要がある。それぞれの課題に対する研究方法について説明する。

(1) 材質特性のモデル化および計測

材質が持つ光の反射・散乱・吸収・透過特性を材質特性と定義し、これらを計測する。各特性を個別に計測すると膨大な時間がかかるため、可能な限り複数の特性を同時に計測可能な手法が必要となる。複数の光学特性を同時に計測することは一般に難しく、従来は各特性を個々に取り扱うことが多かった。本研究では、光学特性が線形和で表現できることに着目し、複数の特性を同時に計測・解析できるモデルを設計する。特に、デジタルファブリケーション技術に応用するために、作製工程に利用しやすいモデルが必要となる。材質特性に起因する外観は大きく半透明度と光沢度に分けられる。半透明度は物体内部、光沢度は物体表面における光学現象によって現れる。そこで、半透明度と光沢度という観点で分けて研究開発を進めていく。

(2) 材質特性と材料合成の関係性の明確化

従来の3Dプリント用材料では既定の材質特性しか表現できないが、材料を合成することによって新しい材質特性を表現できる可能性がある。そこで、まずは、材料の合成による材質特性の変化を定式化する必要がある。さらに、設計したモデルパラメータに対する材料の種類や合成方法などの関係性を明確にし、3Dプリント可能であることを明らかにする必要がある。一般的な3Dプリンタは層を積み重ねることによって造形する。したがって、層状物体の材質特性を表現できるモデルが必要になると考えられるため、課題(1)と課題(2)は完全に独立せず、互いに干渉しつつ進捗する必要がある。また、印刷パターンを変更することによって表面および内部の光学特性が変化すると考えられるため、それらの関係性についても明確にする。例えば、微細なチェッカーパターンを加工できる場合、その間隔を変更すると、マクロな見た目が変化し、光沢度が制御できる可能性がある。計測および再現はマクロな材質特性を対象としているため、ミクロな条件とマクロな見た目の関係性も明らかにする。

4. 研究成果

はじめに、材質特性のモデル化および計測について取り組んだ。対象物体の反射・散乱・吸収特性を同時に計測するため、点像分布関数という形で一括して表現し、計測するアプローチをとった。一点の光を物体に入射した時、物体表面・内部における複雑な光学現象によって、光が広

がる様子を観測できる。この光の広がり方は点像分布関数と呼ばれる。デジタルファブリケーション機器によって加工・造形することが目的であるため、実際は、個別特性を正確に計測する必要はなく、全体としての材質特性が再現できれば良いという考えである。しかし、対象物体全域に対する点像分布関数の計測は膨大な時間を要する。そこで、点像分布関数を周波数領域で表現した変調伝達関数を用いて、材質特性の表現および計測を行った。プロジェクタ・カメラシステムを用いて、様々な周波数の正弦波パターンを投影し、正弦波の振幅減衰量によって材質が持つ変調伝達関数を計測する手法を提案した。変調伝達関数を材質特性表現に用いることは、単に計測時間の短縮のみではなく、後述するように、デジタルファブリケーション技術による材質特性再現における利点もある。一般的に、3Dプリンタや2.5D表現を可能とするUVプリンタは積層によって色や形を表現する。各層がある材質特性を持つと仮定したとき、それらが複数層を成す際の全体的な表現は、変調伝達関数によって比較的容易に計算可能であることを発見した。したがって、変調伝達関数を用いることにより、計測および再現の両方にとって利点がある。

材質特性のモデル化および計測に加えて、材質特性と材料合成の関係性の明確化に取り組んだ。材質特性として、光の反射・散乱・吸収・透過特性を想定しているが、そのうち散乱・吸収特性に関わる物の半透明度の再現について説明する。UVプリンタはUV光照射によって硬化するインクを用いたプリンタであり、紙や金属、プラスチックなどの様々な材質への印刷が可能である。また、インク層を積層することによって、2.5D表現にも利用される。半透明なインク層を積層することによって現れる材質特性の関係性を計算するため、まずは、様々なサンプル印刷を行うことで調査を行った。一般的な紙印刷における色表現には、異なる色のインクを重ねた時に現れる色を表現できるクベルカ・ムンクモデルがよく用いられるが、より半透明なインクの場合、当該モデルはそのままでは利用できない。そこで、変調伝達関数を導入することによって、クベルカ・ムンクモデルをより半透明な材質の層構造にも適用可能にした。これにより、単層の計測を行うことで、様々な材質の複数層に対する材質特性を計算可能となった。

提案した材質特性計測システムによって、インク単層の特性を計測し、それに基づいて、様々なインクによって様々な層数を印刷した際の材質特性を予め計算し、大規模な関係性テーブルを構築した。ある適当な対象物体の材質特性を計測し、その材質特性に類似する場合を関係性テーブルにおいて探索することで、当該物体の材質特性を再現するために最適な印刷条件を特定することができる。この方法により、鮭の刺し身やキウイフルーツの断面、牛肉の切り身など比較的半透明な物体の見え目が再現できることを示した。

半透明度のみでなく、物体の光沢度の計測・再現にも取り組んだ。金属などの光沢物体は複雑な反射特性を示すため、外観計測が困難である。これに対し、プロジェクタ・カメラシステムにおける投影コード変調計測手法を開発し、相互反射現象の解析を通して、光沢物体の外観要因である形状の計測を行った。光沢物体上での反射光は見る角度によって変化するため、あらゆる方向からの計測によってその反射特性を取得するアプローチが取られてきたが、膨大な計測が必要となる。そこで、近年提案された軽量の反射特性モデルを活用し、少数の多視点画像から物体の反射特性と形状を計測する手法を開発した。反射特性の再現に向け、熱溶解積層（FDM）方式3Dプリンタによる特殊な印刷方法を開発した。FDM方式では、フィラメントの積層パターンによって異なる反射特性を示す。様々な積層パターンによって、その外観が変化することを確認した。また、その応用技術として、3D印刷物に対する電子透かし技術も提案した。

研究期間全体を通して、計測と再現の両方を視野に入れ、異なる分野を連携するという観点で、本研究は大きな意義を有した。材質の光学特性を計測および再現するという試みに対し、一定の成果を得ることができた。光学現象を物体内部と表面に大別し、内部における光学特性の計測および再現は達成した。表面における光学特性の計測は概ね達成し、再現に向けた3Dプリンタの制御を可能にした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takatani Tsuyoshi、Fujita Koki、Tanaka Kenichiro、Funatomi Takuya、Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Controlling translucency by UV printing on a translucent object	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s41074-018-0043-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takatani Tsuyoshi、Mukaigawa Yasuhiro、Matsushita Yasuyuki、Yagi Yasushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Decomposition of reflection and scattering by multiple-weighted measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s41074-018-0049-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Minetomo Yuki、Kubo Hiroyuki、Funatomi Takuya、Shinya Mikio、Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Acquiring non-parametric scattering phase function from a single image	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computational Visual Media	6. 最初と最後の頁 323 ~ 331
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41095-018-0122-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Takatani, T. Aoto, K. Tanaka, T. Funatomi, Y. Mukaigawa
2. 発表標題 Reconstruction of Volumetric Reflectance using Spatio-sequential Frequency Correlation Imaging
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Iwaguchi, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, S. Narasimhan
2. 発表標題 Acquiring Short Range 4D Light Transport with Synchronized Projector Camera System
3. 学会等名 VRST2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Delmotte, K. Tanaka, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa
2. 発表標題 Blind Watermarking for 3-D Printed Objects using Surface Norm Distribution
3. 学会等名 ICIEV & icIVPR 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田朝己, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 プロジェクトカメラシステムの同期遅延と走査速度の制御にもとづく光伝播の計測と応用
3. 学会等名 CVIM
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takatani, K. Fujita, K. Tanaka, T. Funatomi, Y. Mukaigawa
2. 発表標題 Controlling Translucency by UV Printing on a Translucent Object
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高谷剛志, 藤田紘樹, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 半透明材質へのUV印刷による半透明感の制御
3. 学会等名 情処研報 CGVI
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 物体内部の光学特性を計測する計測装置及び方法	発明者 高谷剛志, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博, 青砥隆仁	権利者 奈良先端科学技術大学院大学
産業財産権の種類、番号 特許、2018-219125	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----