

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00257

研究課題名（和文）半透明物体の光学解析に基づく高精度3次元計測法の開発

研究課題名（英文）Development of accurate 3D measurement for translucent objects based on optical analysis

研究代表者

大谷 幸三（Ohtani, Kozo）

広島工業大学・情報学部・教授

研究者番号：40351978

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、半透明物体の3次元形状を高精度に計測する新たな光学的計測法の開発に取り組んだ。まず、半透明物体内部の微粒子をモデル化し、光線追跡法を用いて表面下散乱の挙動を再現するシミュレータを構築した。その結果、微粒子の個数、サイズ、位置、透過率などのパラメータを変化させた場合における物体内部の光散乱の挙動と、物体から出射する光の様子を可視化することができた。さらに、実物体の様相とマッチングしたところ、入射光位置と出射光位置のずれを定量的に解析することが可能となった。今後は、この解析結果に基づいて、最終目標である半透明物体の形状計測装置を試作する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、半透明物体の3次元形状を高精度に計測する新たな光学的計測法の開発に取り組んだ。半透明物体に投影した光は内部で散乱し（表面下散乱）、入射した位置とは異なる位置から出射する。そのため、半透明物体の光学的3次元計測は困難な問題の一つとなっていた。開発した計測法では、まず、半透明物体の光学特性をモデル化し、表面下散乱を光線追跡法でシミュレートする。そして、入射光位置と出射光位置の相関を統計的に解析し、実測した3次元計測データを補正するものである。いくつかの課題は残ったが、本手法が確立すれば、あらゆる光学特性をもつ物体へ適用可能な3Dスキャナを構築することができ、工学的価値は非常に大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we simulated the subsurface scattering of translucent objects using the ray tracing method, and examined a shape-measurement method for three-dimensional translucent objects by the spotlight projection method using the simulation results.

We modeled colloidal particles inside a translucent object and simulated the behavior of subsurface scattering using the ray tracing method. We found it was possible to visualize the behavior of light scattering inside the object. Moreover, parameters related to colloidal particles were estimated by a method focusing on the Tyndall phenomenon of a translucent object, and the correlation between the position of light incident on the translucent object and that of emitted light and statistically analyzed.

In the future, An optical 3-D shape measurement method for translucent object will be established using the results.

研究分野：センサ工学

キーワード：半透明物体 3次元形状計測 表面下散乱 光線追跡 スポット光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

濁りのあるプラスチックやアクリルなど半透明物体の光反射特性は、拡散物体や鏡面物体とは異なるため、スポット光投影法や光切断法などの光学的形状計測法は、そのままでは半透明物体へ適用できない。そのため、半透明物体の光学的形状計測は困難な問題として知られており、未だ開発途上にある<sup>[1]-[4]</sup>。それは、半透明物体へ投影した光が物体内部の微粒子で散乱する「表面下散乱(図1)」が起きている。

図2(a)(b)に示すように、拡散物体や鏡面物体へ投影した光は、入射位置  $P$  と同じ位置で反射する。光学的3次元計測法の多くは、このことを前提としている。図2(c)に示す透明物体も、一部の鏡面反射成分を利用することで同様に扱うことができる。しかし、半透明物体の場合、図2(d)に示すように位置  $P_1$  に投影した光は内部へ透過し、微粒子によって反射・透過を繰り返した後、位置  $P_2$  から出射する。その結果、拡散物体や鏡面物体と同様の計測法を半透明物体へ適用した場合、位置  $P'$  を検出することになり、これが計測誤差になる。したがって、この誤差を如何にして解消するかが研究の鍵となり、仮にその手法を確立できれば、製品検査や3DCGのレンダリングデータ取得など様々な面で有用である。



図1: 白濁したプラスチックにレーザー光を照射したときの表面下散乱

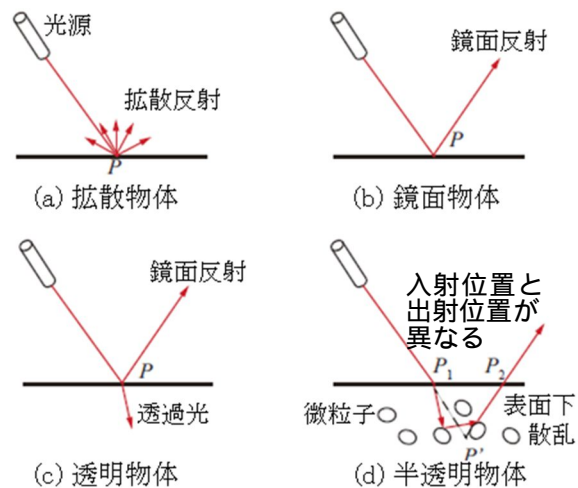


図2: 物体の反射・透過特性

2. 研究の目的

本研究では、半透明物体の3次元形状を高精度に計測する新たな光学的計測法を開発に取り組む。半透明物体に投影した光は、表面下散乱により入射した位置とは異なる位置から出射する。そのため、半透明物体の光学的3次元計測は困難な問題の一つとなっている。開発する計測法の特長は、この表面下散乱を積極的に活用する点にある。具体的には、まず、半透明物体の光学特性をモデル化し、表面下散乱を光線追跡法でシミュレートする。そして、光の入射位置と出射位置の相関を統計的に解析し、実測した3次元計測データを補正する。図3に研究概要と目的を示す。

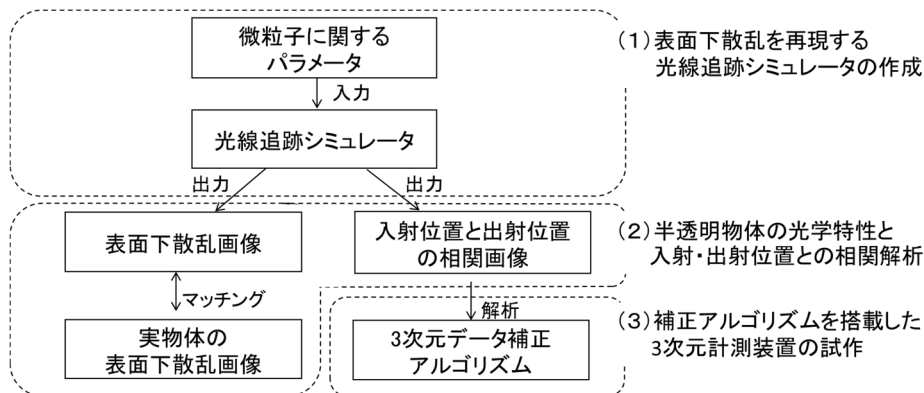


図3: 研究概要と目的

### 3. 研究の方法

本研究で実施する項目は以下に大別できる。

#### (1) 表面下散乱を再現する光線追跡シミュレータの作成

半透明物体内部の光学特性は、反射・透過特性をもつ複数の微粒子によってモデル化し、微粒子間の光線軌跡を幾何学的にシミュレートする。シミュレータの入力は微粒子に関するパラメータとし、出力は表面下散乱画像及び入射位置と出射位置の相関画像とする。表面下散乱画像は、照射された光強度に応じて微粒子を濃淡で着色して生成する。

#### (2) 半透明物体の光学特性と入射・出射位置との相関解析

測定対象となる半透明物体の形状と光学特性は未知であるため、微粒子に関するパラメータは乱数で決定する。そして、光線追跡シミュレータで表面下散乱画像を生成し、実物体の表面下散乱画像とマッチングする。このとき類似度が最大となる組み合わせが測定対象の光学特性モデルとなる。このモデルに対し、光の照射条件を種々変化させたときの出射位置の頻度を求め、入射位置  $P_1$  と出射位置  $P_2$  の相関を統計的に求める。

#### (3) 補正アルゴリズムを搭載した 3 次元計測装置の試作

上記の解析結果に基づき、実測した 3 次元データを補正するアルゴリズムを構築する。そして、本アルゴリズムを搭載した計測装置を試作して、その有効性を検証する。計測精度は機械加工分野で要求される分解能 0.05mm を目標とする。

### 4. 研究成果

#### (1) 表面下散乱を再現する光線追跡シミュレータの作成

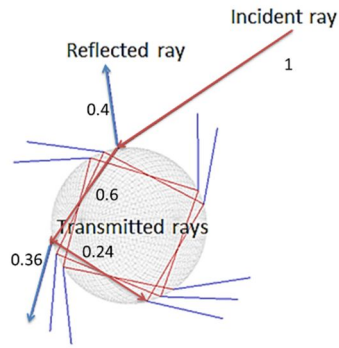
シミュレータは 3DCG 用 API である OpenGL を使用して C 言語で作成した。実行開始時に半透明物体のサイズ、微粒子の位置と大きさ等の値を設定する。微粒子の位置と大きさは、指定した範囲内の乱数で決定し、粒子数は定数で指定する。また、投影される光線は複数の細い光線の集合である光束として計算した。指定できるパラメータを表 1 に示す。

半透明物体内部の微粒子は、図 4(a) に示すように反射・透過特性をもつ球体としてモデル化した。微粒子の化学的特性を考慮すると光散乱には波長依存性があるが<sup>[6]</sup>、本研究では問題を単純化するため、まずは波長依存性を無視した。また、半透明物体は、図 4(b) に示すように複数の微粒子を立方体内に配置してモデル化した。

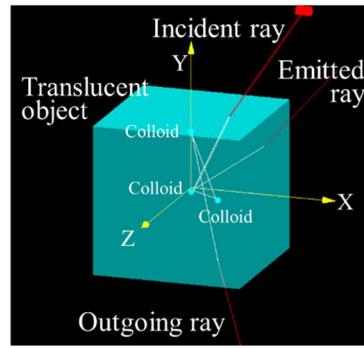
微粒子の透過率を 0.1 刻みで変化させて、シミュレータが生成する表面下散乱画像を評価した。その結果、図 5 に示すように、光線追跡法によって入射光が一つひとつの微粒子で反射・透過する様子を可視化できた。透過率が 0.4 以下の場合、入射光は主に微粒子で鏡面反射するため、物体上面から出射する光が多く観察できた。一方、透過率が 0.6 以上になると、半透明物体内部を透過していく光の割合が高くなるため、物体下面から光が出射する様子が観察できた。これらの結果が、実物体の光散乱挙動を正しく反映しているか否かはさらに検証していく必要はあるが、光線追跡に関しては正しく機能しているものと判断した。

表 1 指定可能なパラメータ

Parameters
Translucent object (Cube)
Side length
Reflective index
Colloidal particle
Radius
Number
Location
Transmittance
Reflective index
Light source
Location
Number
Projection angle

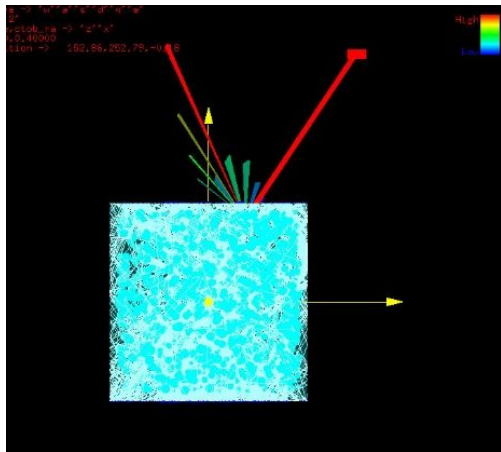


(a) 微粒子のモデル

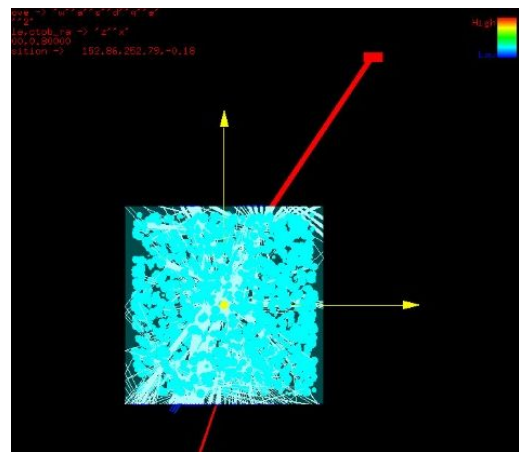


(b) 半透明物体のモデル

図 4 : シミュレータの作成



(a) 透過率 0.4



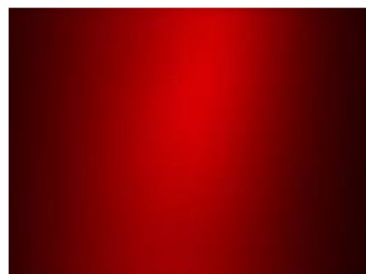
(b) 透過率 0.8

図 5 : 表面下散乱のシミュレーション画像

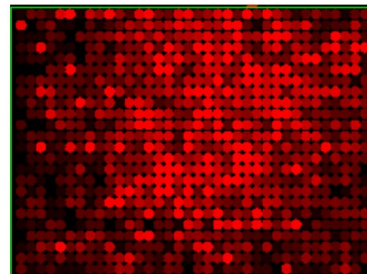
## (2) 半透明物体の光学特性と入射・出射位置との相関解析

透明度の異なる 3 種類の半透明溶液にレーザースポット光を照射し、実際の表面下散乱画像(チンダル現象)をデジタルカメラで撮影した。チンダル現象とは光が多数の微粒子で構成される媒体中を通過する際、その微粒子で光が散乱し光の道筋が見えるようになる現象のことである。図 6 に牛乳のチンダル現象画像と、類似度がもっとも高かったシミュレート画像を示す。

このときの微粒子パラメータを使い、図 7 に示すように物体表面をメッシュ状に領域分割し、各領域における出射光位置の度数を分析した。その結果、入射位置と出射位置が 0.1mm 程度でずれていることが確認できた。今後は、実物体において同様のずれが生じているか照合する必要がある。



(a) 実画像



(b) シミュレート画像

図 6 : 牛乳のチンダル現象画像の照合

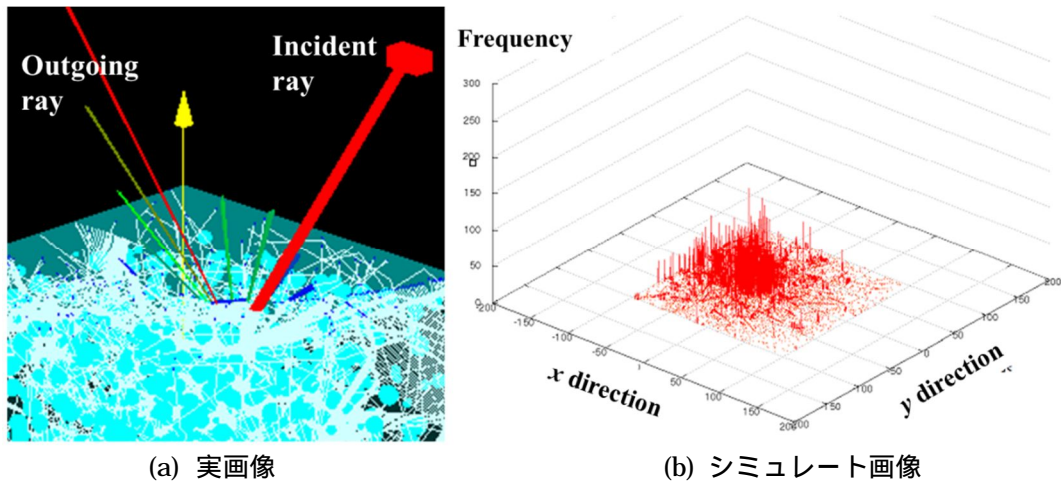


図 7：出射光位置の解析

### (3) 補正アルゴリズムを搭載した 3 次元計測装置の試作

シミュレータで解析した結果によって入射光と出射光の位置ずれが推定できる。その結果に基づいてスポット光投影法で測定した半透明物体の 3 次元形状を校正する。本研究では、このアルゴリズムを組み込んだ計測装置を試作するには至らなかったが、今後、シミュレータの精度検証とともに進めていく予定である。

本研究では、半透明物体内部の微粒子をモデル化し、光線追跡法を用いて表面下散乱の挙動をシミュレートした。その結果、微粒子の個数、サイズ、位置、透過率などのパラメータを変化させた場合における物体内部の光散乱の挙動と、物体から出射する光の様子を可視化することができた。ただし、現シミュレータでは光の波長と微粒子の反射・透過特性の関係は考慮しておらず、光散乱の再現性については、さらに検証を必要とする。また、最終目標である半透明物体の 3D 計測装置の試作についても今後の課題とする。

### 参考文献

- [1] Guy Godin, et. al., "An Assessment of Laser Range Measurement of Marble Surfaces", Proc. the 5th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, 2001.
- [2] Michael Goesele, et. al., "Disco - acquisition of translucent objects" ACM Transactions on Graphics, 23(3), 835-844, 2004
- [3] 川口有弘, 眞鍋佳嗣, 矢田紀子, 藤井秀美, "半透明物体のための三次元形状計測手法の提案" 2013 年映像情報メディア学会冬季大会, 2013
- [4] 井下智加, 向川康博, 松下康之, 八木康史, "単一散乱からの半透明物体の形状推定" 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011), 2011
- [5] 北原文雄, "界面・微化学の基礎," 講談社 (1994)
- [6] OpenGL 策定委員会 (著), 松田 晃一 (翻訳), "OpenGL プログラミングガイド 原著第 5 版," ピアソンエデュケーション (2006)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 N.Kogumasaka, K.Ohtani and M.Baba
2. 発表標題 Surface Finishing Inspection Using a Fisheye Camera System
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大谷幸三, 佐々木英二, 新宮陽太, 馬場充
2. 発表標題 逆光線追跡法による半透明物体の3次元形状計測 - 光線追跡シミュレータによる表面下散乱の解析
3. 学会等名 第23回知能メカトロニクスワークショップ (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Ohtani and M.Baba
2. 発表標題 Liquid Refractive Index Measurement Based on Inverse Raytracing Using an Optical Angle Sensor
3. 学会等名 12th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Ohtani and M.Baba
2. 発表標題 Light scattering analysis for measuring the 3-D shape of a translucent object
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

広島工業大学ホームページ

[http://www.it-hiroshima.ac.jp/faculty/information/computer/teacher/ohitani\\_kozo/research/](http://www.it-hiroshima.ac.jp/faculty/information/computer/teacher/ohitani_kozo/research/)

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
研究協力者	馬場 充  (Baba Mitsuru)		