

平成 21 年 4 月 14 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19800018

研究課題名（和文） チンダル現象を利用した光線追跡による物体形状計測

研究課題名（英文） Shape measurement by ray tracing under Tyndall effect

研究代表者

船富 卓哉（FUNATOMI TAKUYA）

京都大学・学術情報メディアセンター・助教

研究者番号：20452310

研究成果の概要：どのような表面特性を持つ物体に対しても、その三次元形状を精度良く計測できる手法の研究を行った。本研究では照射した光が光源から物体表面に到達するまでの様子を観測できるようになるチンダル現象を利用し、複数台のカメラによってこの現象を観測することで、形状計測を行う手法を提案した。提案手法を用いれば、これまでは計測が困難であった黒色物体や金属物体を含め、さまざまな物体に対して平均で 1mm 程度の誤差で形状を計測できることを実験により示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,360,000	0	1,360,000
2008 年度	1,210,000	363,000	1,573,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,570,000	363,000	2,933,000

研究分野：三次元形状計測

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

キーワード：コンピュータビジョン，バーチャルリアリティ，計測工学，チンダル現象，形状計測

1. 研究開始当初の背景

形状計測には受動型，能動型がある。受動型計測とはカメラのみで計測する手法であり，例えばステレオ法や Space curving がある。これらは，物体表面の模様（テクスチャ）を頼りに形状の推定を行うため，物体表面のテクスチャが乏しい場合には，特に物体が凹面など含む場合，その形状を精度良く獲得できないという欠点がある。これに対して能動型計測では，計測対象にレーザやパターン光

などを照射した様子をカメラで観測する手法であり，受動型計測と比べると計測対象の凹面形状なども精度良く獲得することが可能である。

しかし能動型計測でも，例えば金属光沢を持つような物体や黒い物体の計測は困難であった。これは，能動型計測が物体表面に照射されたレーザや光パターンを別の角度から観測することで，その部分の三次元位置を計算しているのに対し，金属光沢を持つような物体では特定の方向にしか光を反射しな

いため、あるいは黒い物体ではそもそも光を反射しないため、照射したパターンからの反射光をカメラで観測できず、形状を計測することが困難となる。そのため、能動型計測では計測対象物体の表面特性として、照射された光をあらゆる方向へ反射（拡散反射）することが必要であった。

2. 研究の目的

これに対し本研究では、物体表面での反射光ではなく、照射された光が物体表面に到達するまでの様子を観測し、これを基に形状を計測する手法を確立することを目的とする。本アプローチでは、計測対象物体の表面特性によらず、形状計測を行うことができ、従来では形状の計測が困難であった金属光沢を持つような物体や黒色物体に対しても形状の計測を行うことが可能となると考えられる。

3. 研究の方法

現行の能動型計測では、スポット光を照射するスポット光投影法、スリットレーザを用いた光切断法、グレイコードパターン光を用いた空間コード化法などのさまざまな手法が提案されている。光切断法、空間コード化法は、物体への光の照射を効率化するために提案されたものであるが、原理的にはスポット光投影法と同じである。そこで本研究では、スポット光投影法をベースとして考え、照射した光線1本が物体表面に到達するまでの道筋を形状計測に用いることを考える。

コンピュータグラフィックス(CG)の分野でも、物体の表面形状を表現（レンダリング）する手段として、光線1本1本の道筋を扱う光線追跡法という手法が存在する。CGでは仮想的に光線を照射することができるため、その道筋を計算することができたが、実世界でスポット光を物体表面に照射したとしても、通常的环境下では光の道筋を観測することはできない。このような観測を実現するため、本研究ではチンダル現象を利用する。チンダル現象とは、微小な粒子が分散している媒体中に光を入射させたとき、光が微小粒子によって散乱されて光の通路が見える現象である。チンダル現象を利用可能な計測環境として、本研究では密閉空間に煙を充満させ、その中に静置させた計測対象に対してスポット光を照射することでその形状を計測する（図1）。

本研究ではまず、①光線追跡による形状計測を実現するために必要な環境を構築する。実世界において光線追跡を実現する手段として本研究ではチンダル現象を利用するため、計測環境として微粒子（煙）を充満させ

た密閉空間を実現し、これに対するスポット光の照射、カメラによる観測を行なう。次に、実際に観測したスポット光の道筋を利用して様々な種類の計測対象に対する形状計測を行なう。本研究では、②密閉空間に入射した光線が計測対象の物体表面に到達するまでの道筋を利用することで、従来の形状計測と同様の情報である物体表面の三次元位置を計測する。

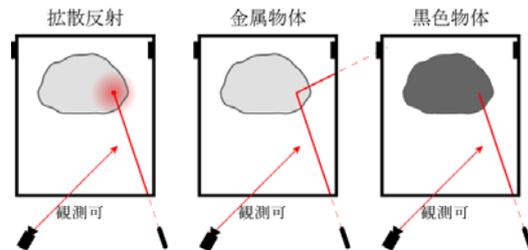


図1 チンダル現象を利用した光線追跡による形状計測

4. 研究成果

(1) 開発した手法の概要

① 構築した計測装置

チンダル現象下でスポット光投影法を実現するため、計測装置の試作を行なった。

まず密閉空間を実現するため、5mm厚の透明アクリル板で80cm×80cm×80cmの蓋付容器を作成した。容器には煙を発生させる装置と接続するための通気口を開けているが、その他は蓋を閉めることである程度密閉することができるようになっている。煙を発生させる装置として、フォグマシン（ロスコアルファ900V2）を導入し、ダクトホースによって容器と接続した。チンダル現象下でスポット光を計測対象に照射するために、容器の外に赤色レーザポインタを設置した。また、照射したスポット光の振る舞いを観測するため、容器内に一眼レフデジタルカメラ（Nikon D40、解像度3008x2000）を4台用い、それぞれ異なる方向から容器中央付近を観測するよう設置した。

チンダル現象を観測するために煙を容器に充満させる際、空間中において微粒子の濃度に偏りが生じる。微粒子の濃度が低い上部では、微粒子によって散乱される光量が小さくなり、スポット光の道筋をはっきりと観測することができなくなる。一方、微粒子の濃度が高い下部では、微粒子で散乱された光がさらに別の粒子で散乱される多重散乱が起こり、媒体全体が発光する現象に陥るため、やはりスポット光の道筋をはっきりと観測す

ることができなくなる．そこでサーキュレタとして、小型の扇風機を容器内に設置したところ、容器内の微粒子の濃度が均質となり、スポット光の道筋をはっきりと観測できるようになった．構築した装置を図2に、チンダル現象下で計測対象にレーザー光を照射した様子を観測した例を図3左上に示す．入射した光線が物体表面上で鏡面反射・拡散反射している様子を観測できていることが確認できる．ここからレーザー光の入射方向、到達点、反射方向を推定する．なお、観測に用いた各カメラのレンズ歪みを含む内部パラメータや外部パラメータは既存の手法により予め獲得した．

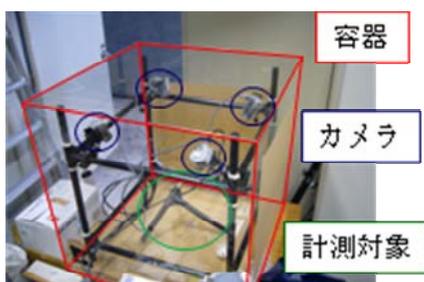


図2 計測装置

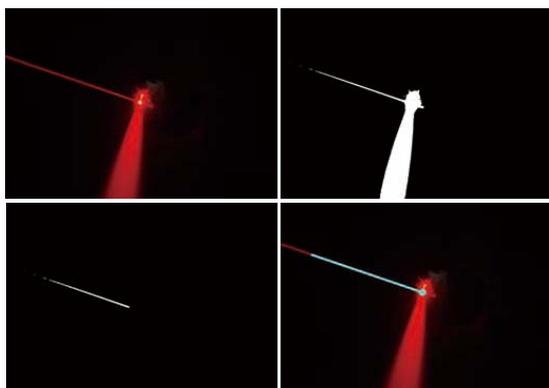


図3 観測画像とその処理結果

② レーザ光到達点推定

カメラ内部パラメータを用いて観測画像のレンズ歪みを補正した観測画像から、入射したレーザー光とその反射位置を推定する．指向性を持った赤色レーザー光を照射すると、レーザー光が通過した媒介中の円筒領域でチンダル現象による赤色発光が生じる．この現象は画像上で幅が一定 (W とする) 以下の直線として観測されるため、この領域を以下の手順で抽出する．

まず観測画像 (図3左上) から赤成分の強い領域を二値化によって抽出する (図3右上)．この領域に対し、 $(W/2)$ 回収縮させた後、 $(W/2)$ 回膨張させる．こうすることで太さが

W より大きい領域が残る．残った領域を元の二値化によって得られた領域から除去することで、反射位置付近の広範囲にわたる反射光や写り込みの部分除去でき、入射光に相当する幅 W 以下の領域のみを抽出することができる (図3左下)．これに対して Hough 変換などを用いて線分を検出し、それを画像上での入射光の方向とする．

こうして得られた入射光を元に、反射位置を検出する．物体表面で反射が少しでも起こっていて、その反射光が少しでも拡散する場合、画像内では反射位置に相当する点の付近が最も明るく観測される．反射光の強度が小さい場合、もっとも明るい点を選択するだけで反射位置を推定することができるが、反射光の強度がある程度大きい場合、反射位置だけでなくその周辺でも反射光に起因するチンダル現象が起き、広範囲の領域で発光が起こり、反射位置が埋もれてしまうため、精度良く観測することが難しくなる (図3右上)．そこで、反射位置は必ず入射光が形成する線分上の延長線上にあることに注目し、抽出した線分を含む直線上で最も画素値が大きい点を反射位置として検出する．反射位置と入射光の抽出結果を図3右下に示す．水色の線分が入射光に相当する線分で、その一端の円の中心が反射位置に相当する点である．

複数台のカメラを用いて観測した画像それぞれに対し、上記の手法によって入射光の反射位置を推定し、あらかじめ獲得した外部パラメータを元にステレオを行うことで反射位置の三次元位置を求める．レーザー光は物体表面で反射しているため、物体表面の三次元位置を獲得することができたことになる．

③ 評価実験

提案手法が物体の表面特性に依らず有効であることを検証するため、反射光を観測することが困難であると考えられる黒色物体、金属物体を含めたさまざまな対象に対する三次元位置獲得の実験を行った．実際には、① 黒いベルベット調の布、② 陶器皿、③ サイズが既知 (R とする) の金属球を用意 (図4)、これらに対する計測を行った．①、②に対する計測結果を図5に示す．表面を形成する点群を獲得できていることが見て取れる．また図6に、③に対する計測結果 (青) と、金属球と同じサイズ R の球を形成する点群 (赤) を示す．計測精度を評価するため、計測で得られた点群から金属球の中心座標を推定し、そこから各点までの距離 r と真値 R の差を計測誤差として評価した．計測から得られた253点の点群それぞれに対する誤差の分布を表1に示す．外れ値が2点含まれていたものの、誤差は概ね 3mm 以内に収まっており、

誤差の平均は 1.078mm であった。



図4 計測対象（黒い布，皿，金属球）

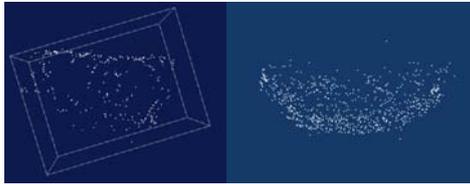


図5 計測結果（黒い布，皿）

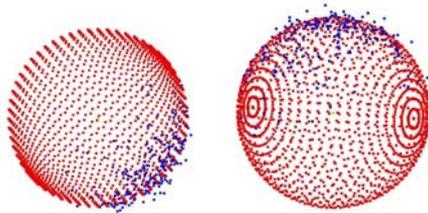


図6 金属球に対する計測結果と計測対象の比較

表1 金属球に対する計測誤差

誤差	頻度	累積%
0-1mm	175	69.44%
1-2mm	45	87.30%
2-3mm	18	94.44%
3-4mm	5	96.43%
4-5mm	3	97.62%
5-6mm	3	98.81%
6-7mm	1	99.21%
7-8mm	0	99.21%
8-9mm	0	99.21%
9-10mm	0	99.21%
10mm 以上	2	100.00%

1mm の誤差は画像上では概ね 3~5 ピクセルに相当する。計測精度がやや低かったのは、画像上での入射光到達点推定がこの程度の誤差を含んでいたことが原因と考えられる。レーザ光の幅 W が 30 程度と少し太かったことや、鏡面反射光などで画素値が最大となる領域がやや大きかったことが要因として考えられる。

(2) 今後の展望

今回は評価のために黒色物体，金属を対象を絞って評価を行ったが，より多様な物体に対する計測を行い，提案手法の適用可能性について検討を進めていく必要があると考え

ている。また観測画像中には、本研究で画像処理により抽出を行った入射光方向，反射位置以外にも，反射光のふるまいが観測されている。このふるまいは観測した物体の表面特性に応じて変化するため，観測画像中における反射光を分析することで，物体の三次元形状だけでなく，表面特性も獲得することができると思われる。以上のような点について，今後検討を深めていくことが重要と考えられる。

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 2 件)

- ① 岡田尚基, 藪内智浩, 船富卓哉, 角所考, 美濃導彦, 映像からの運動モデル獲得によるボールの未観測運動推定, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J91-D No. 12, 2008 年, pp. 2950-2960
- ② 船富卓哉, Three dimensional shape modeling of human body in various postures by light stripe triangulation, 会誌「情報処理」, 査読無, Vol. 49 No. 6, 2008 年, PP. 667

[学会発表] (計 3 件)

- ① 小山亮, テムニランラット ピッチャヤガン, 船富卓哉, 飯山将晃, 角所考, 美濃導彦, チンダル現象を利用した物体表面の三次元位置及び法線推定, 2009 年 電子情報通信学会総合大会, 2009 年 3 月 19 日, 愛媛大学
- ② 関亜也加, 早瀬直之, 藪内智浩, 飯山将晃, 船富卓哉, 角所考, 美濃導彦, バーチャルスタジオにおける現実物体を介した仮想液体操作, 2009 年 電子情報通信学会総合大会, 2009 年 3 月 17 日, 愛媛大学
- ③ 岡田尚基, 藪内智浩, 船富卓哉, 角所考, 美濃導彦, 映像からのモデル獲得による球状物体の未観測運動推定, 電子情報通信学会 MVE 研究会, 2008 年 3 月 22 日, 北九州学術研究都市 産学連携センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船富 卓哉 (FUNATOMI TAKUYA)

京都大学・学術情報メディアセンター・助教

研究者番号：20452310