

空間座標を時間軸に埋め込んだ高時間分解計測による 鏡面物体の形状推定

知念 響紀^{1,a)} 青山 尚正^{1,b)} 櫛田 貴弘¹ 田中 賢一郎^{2,1} 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要

本研究では、鏡面反射が支配的な物体の形状計測を目的とする。従来、3次元形状計測の主要な原理の1つである三角測量の原理に基づき、複数のディスプレイを用いて形状計測を行う構造化照明法が提案されている。本稿では、もう1つの主要な計測原理であるピコ秒単位の Time-of-Flight 計測に構造化照明を組み合わせた鏡面物体の形状計測手法を提案する。ピコ秒単位の時間軸に拡散板上の2次元空間座標を埋め込むことで、短時間での形状計測が可能となる。実際に鏡面物体を対象とした実験により提案手法の実現性を確認した。

1. はじめに

コンピュータビジョン分野において、物体の形状を計測する3次元計測技術は重要な研究対象の一つであり、工業など多くの分野において適用可能な有益な技術である。拡散反射を伴う物体に対しては、従来の構造化照明を用いた計測手法により高精度な計測が可能である。しかし、金属やガラスといった鏡面反射が強い物体の形状計測は容易ではなく、改良の余地が残されている。

鏡面物体を対象とした形状計測手法は、これまでにいくつか提案されている。Bajard ら [1] は、レーザ光によって表面を局所的に加熱し、その熱放射をサーマルカメラで計測することで、形状を推定する手法を提案している。しかし、加熱点を走査する必要があるため、計測に膨大な時間がかかる。また、ディスプレイに表示した構造化照明が鏡面物体に映り込んだパターンを用いて計測する手法 [2] も提案されているが、ディスプレイを動かして計測する必要がある。

これに対し本研究では、鏡面物体の3次元形状をワンショットで復元可能な手法の実現を目指し、構造化照明を用いたアプローチに、時間情報を用いて光路長を計測する

Time-of-Flight 方式を組み合わせた手法を提案する。

2. 鏡面物体の形状計測における問題点

物体表面に照射したパターン光の反射光をカメラで捉え、これを手掛かりに3次元形状を推定する構造化照明法は3次元形状計測手法の1つである。しかし、その多くは鏡面物体に適用することが難しい。これは、鏡面反射が支配的な物体では特定の方向にしか光を反射しないため、形状推定に十分な反射光がカメラで観測されないことにある。

通常の構造化照明法は特定の位置から物体に光を照射するが、鏡面物体を計測するアプローチの1つに、様々な方向から構造化照明を照射するものがある。光源位置を拡散させることで、カメラで反射光を捉えることができるようになる。3次元形状を推定するためには、カメラで捉えた反射光がどの方向から入射されたものであるかを特定することが必要となる。

Kutulakos ら [2] は、複数のディスプレイを光源として利用することで鏡面物体を計測する手法を提案した。図1に示すような、ディスプレイに表示するパターンが鏡面物体に映り込む撮影系が使用される。まず、一方のディスプレイに構造化パターンを表示し、物体での反射光をカメラで観測することで、ディスプレイ上での座標を特定する。これにより、カメラで観測された光線の光路がある程度特定できるが、それでも図1の赤、青、緑の線で示すように、光路を一意に特定することができない。そこで、別の位置に設置したディスプレイでも同様の観測を行い、そこでも対応点を取得することによって、光路を一意に特定しなければならない。それに対し、本研究では2か所以上のディスプレイを用いずに、鏡面物体の形状計測を行うことができる。

3. 提案手法

本研究では、光の飛行時間（光路長）を用いて距離を計測する Time-of-Flight 方式により鏡面物体の形状を計測する手法を提案する。従来手法 [2] がディスプレイに表示するパターンにディスプレイ上の座標を埋め込んでいたのに対し、提案手法ではガルパノスキャナを用いて拡散板上にピ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 立命館大学

a) chinen.hibiki.cc5@is.naist.jp

b) aoyama.takamasa.aq2@is.naist.jp

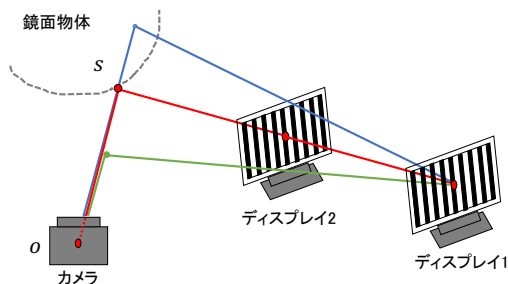


図 1 構造化照明を利用した形状推定。ディスプレイ上の対応点(赤点)と鏡面物体上の点(s)の光路を赤線とした時、ディスプレイが1つの場合は、青線や緑線などの光路と区別ができない。ディスプレイを2つ用いれば、対応点同士の位置関係より光路を特定できる。

コ秒単位の超短パルスレーザー光を照射し、その照射パターンを制御することで時間軸に拡散板上の空間座標を埋め込む。物体の3次元形状を計測するためには、カメラで観測された反射光の光路を特定する必要がある。従来手法ではこれを2つ以上のディスプレイを用いることで実現していた。一方、提案手法ではTime-of-Flight方式に基づいているため光路長を求めることができる。このため、光路長に加えて拡散板上の座標を特定することができれば、3次元形状の計測を実現することができる。

3.1 計測システム

図2に提案する計測システムを示す。本研究では、単一光子を検出できるSPADカメラによる時間相関単一光子計数法(TCSPC)を利用し、ピコ秒単位での高い分解能の時間ヒストグラムを取得する。光源には超短パルスレーザーを用い、ガルバノスキャナによって拡散板上を高速に走査する。物体上で反射した光が観測できる位置にSPADカメラと拡散板を設置する。

SPADカメラの1回の撮影では、超短パルスの照射を多数試行し、その照射と時間同期してカメラに光が入射するまでの時間を計測する。各画素はこの時間のヒストグラムを持つ。提案する鏡面物体の形状計測において、SPADカメラの1回の撮影の間にレーザー光は拡散板上の全領域を走査するものとする。レーザー光が発射され、拡散板で拡散された光が対象物体上で反射し、カメラに入射するまでの時間ヒストグラムが得られることになる。

3.2 光路長の計測による光路の特定

レーザー光が発射され、拡散板に到達した時刻を $t = 0$ 、カメラに入射した時刻を t^1 とする。このとき、 t^1 から次式を用いて光路長 l を算出することができる。

$$l = ct^1 \quad (1)$$

ここで c は光の速度である。図2に示す通り、拡散板上の光の位置を x 、物体表面の位置を s 、カメラ位置を o とす

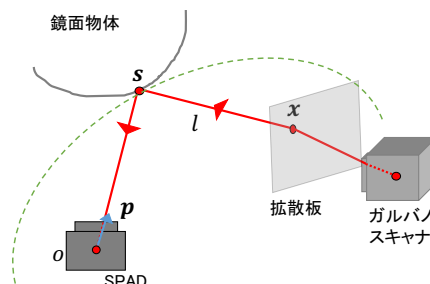


図 2 計測システムの概略図。ガルバノスキャナで走査したレーザー光は拡散板上の点 x を照明し、鏡面物体の点 s を経由してSPADカメラ o に入射する。 p は視線方向を表す単位ベクトルである。 x と o を焦点、焦点の距離の和が光路長 l とする楕円体(緑波線)を考えると、 p により s が一意に特定できる。

れば、レーザー光が通る $x \rightarrow s \rightarrow o$ の長さが l に一致することになる。

このとき、拡散板上の光の位置 x が特定されれば、これとカメラ位置 o の2つの点を焦点とし、焦点からの距離の和が光路長 l に一致する楕円体上に物体表面の位置 s が存在することになる。また、SPADカメラの画像座標から視線方向を特定することができる。このカメラの視線方向を表す直線と楕円体の交点を求めることで、物体表面の位置 s を一意に特定することができる。

つまり、SPADカメラで物体表面の形状を計測するためには、各画素で検出された光が通過した拡散板上の位置 x を特定することが必要となる。

3.3 空間座標の時間軸への埋め込み

レーザー光で拡散板上を1点ずつ照射しながら、SPADカメラでの計測を行えば、反射光が観測されたときの拡散板上の座標を用いて物体表面形状を計測することができる。しかし、鏡面物体は特定の方向にしか光を反射しないため、ほとんどの画像では反射光が観測されず、非常に効率が悪い。また、従来法と同様に多数の計測が必要となる。一方、レーザー光で拡散板上の全ての点を同時に照射すると、物体が映る全ての画素で反射光が観測されると期待されるが、カメラ画像の各画素に対応する拡散板上の座標を特定することができなくなる。

そこで本手法では、レーザー光で拡散板上を照射する際、その空間座標を照射タイミングとして時間軸に埋め込む。このとき、TCSPCが1度の観測において多数のレーザー光照射を試行することを利用して、2種類のタイミングでの照射を実施する。この2種類の照射の時間差が拡散板上の座標で異なるようにすることで、SPADカメラで取得される時間ヒストグラムから、光路長 l と拡散板上の座標 x の両方を1度に推定する。これにより、ワンショットでの計測が実現可能になると見込まれる。

1度目の照射は全点で共通である $t = 0$ とし、2度目は $t = \tau(x)$ とする。これらの点はいずれも同じ光路を辿って

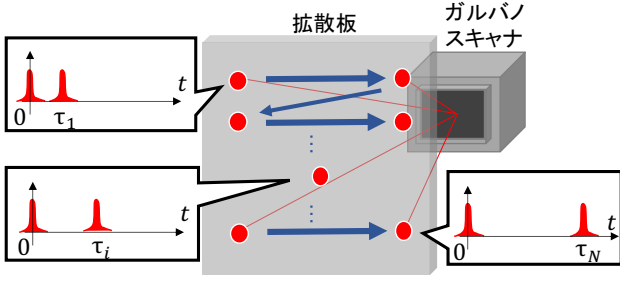


図 3 拡散板上を走査する光の様子。拡散板上では走査が進むにつれて、1 パルス目と 2 パルス目の時間差を大きくするように設定する。

検出されると考えられる。すると、任意の点について計測された時間ヒストグラムは 2 つのピークを持ち、その時刻をそれぞれ t^1 , t^2 とする。

1 度目のパルスに対応する光子の検出時刻 t^1 から光路長 l が求まる。また、1 度目と 2 度目のパルスに対応する光子の検出時刻の差が x に応じて変化することになる。この時刻差を利用して拡散板上の座標 x を特定する。図 3 に拡散板上で走査する N 個の座標を例示する。今、ある照明位置 x_i に τ_i の時間差を与える関数 f を考える。

$$f(x_i) = \tau_i \quad (2)$$

1 度目と 2 度目のパルスが同じ光路を辿って検出され、またその光が拡散板上の 1 点 x_i に対応するとしたとき、その光路長 l_i を用いれば、検出される時刻は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} t_i^1 &= l_i/c \\ t_i^2 &= l_i/c + f(x_i) \end{aligned} \quad (3)$$

このとき、逆関数 f^{-1} があれば、光子の検出時刻の差 $t_i^2 - t_i^1$ から拡散板上の 3 次元座標 $\hat{x}_i$ を求めることができる。

$$\hat{x}_i = f^{-1}(t_i^2 - t_i^1) \quad (4)$$

なお、関数 f や逆関数 f^{-1} は、3 次元空間中での拡散板の位置やレーザー光源の照射位置などを基に与えるものとする。

3.4 法線付き点群の推定

カメラ位置 $\mathbf{o}$ を原点とすると、鏡面物体の点 $\hat{s}$ は、 $\hat{x}$, $\mathbf{p}$, l を用いて次のように計算できる。

$$\hat{s} = \frac{l^2 - \hat{x}^\top \hat{x}}{2(l - \mathbf{p}^\top \hat{x})} \mathbf{p} \quad (5)$$

また、光路が特定できるため、反射点における物体の法線方向も同時に推定できる。

$$\hat{\mathbf{n}} = \text{norm}(-\mathbf{p} + \text{norm}(\hat{x} - \hat{s})) \quad (6)$$

ただし、norm は正規化を表す。よって、式 (5) と式 (6) から法線付き点群の推定が可能になる。

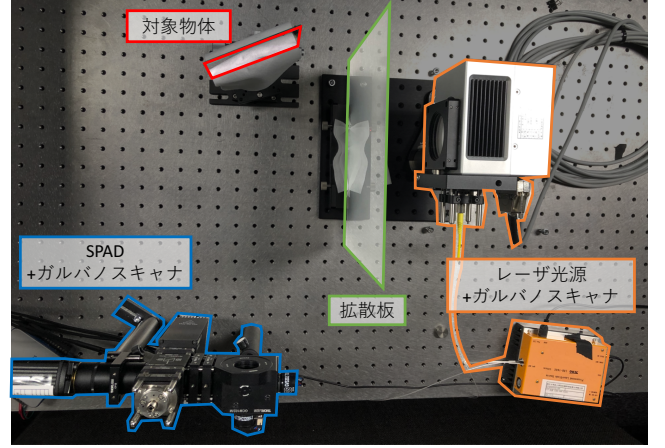


図 4 計測システムの概要。SPAD の正面に対象物体を設置し、SPAD から対象物体を通して光を観測できる位置に拡散板とレーザー光源を設置した。

4. 実証実験

提案手法の有効性を検証するため、平面、凹面、凸面の 3 種類の物体の形状を推定する実験を行った。

4.1 計測システム

実験で用いた計測システム全体の概要を図 4 に示す。提案手法は SPAD カメラの利用を想定しているが、本実験では、1 画素の SPAD と 2 つのミラーが内蔵されたガルバノスキャナで代用する。SPAD とレーザー光源は Time Controller に接続されており、SPAD から Time Controller 内部のファンクションジェネレータを用いて Time to Digital Converter (TDC) へ信号を送ることで、レーザー光源との同期を行った。レーザー光の照射タイミングの制御には Time Controller 内部のパターン発生器と遅延発生器を利用し、拡散板上の走査が進むにつれて 1 パルス目と 2 パルス目の時間差が大きくなる 2 つのパルスを生成してレーザー光源に出力した。本実験では、この時間差を座標ごとに 100ps ずつ増加するように設定した。SPAD と Time Controller はそれぞれ ID Quantique 社製 ID100 と ID900、レーザー光源は珠電子社製の LDB-160C-639F を用いた。

実験では、SPAD に取り付けられたガルバノスキャナを用いて走査し、 5×5 の合計 25 点で計測を行った。各点から 1 つの時間ヒストグラムが得られ、提案手法によって 1 点の 3 次元位置および法線を推定することができる。そのため、25 個の法線付き点群を推定できる。

計測対象は平面鏡、凸面鏡、凹面鏡の 3 種類の物体である。SPAD の直線上に対象物体を 350mm 離して設置し、物体の表面 $12 \times 12\text{mm}$ の範囲の法線付き点群を推定した。これらの物体の法線ベクトルは、平面であれば面の中心の法線ベクトルに対して並行に、凸面であれば内向き、凹面であれば外向きとなると予想される。提案手法によって推定した法線付き点群と計測対象の形状を比較することで手

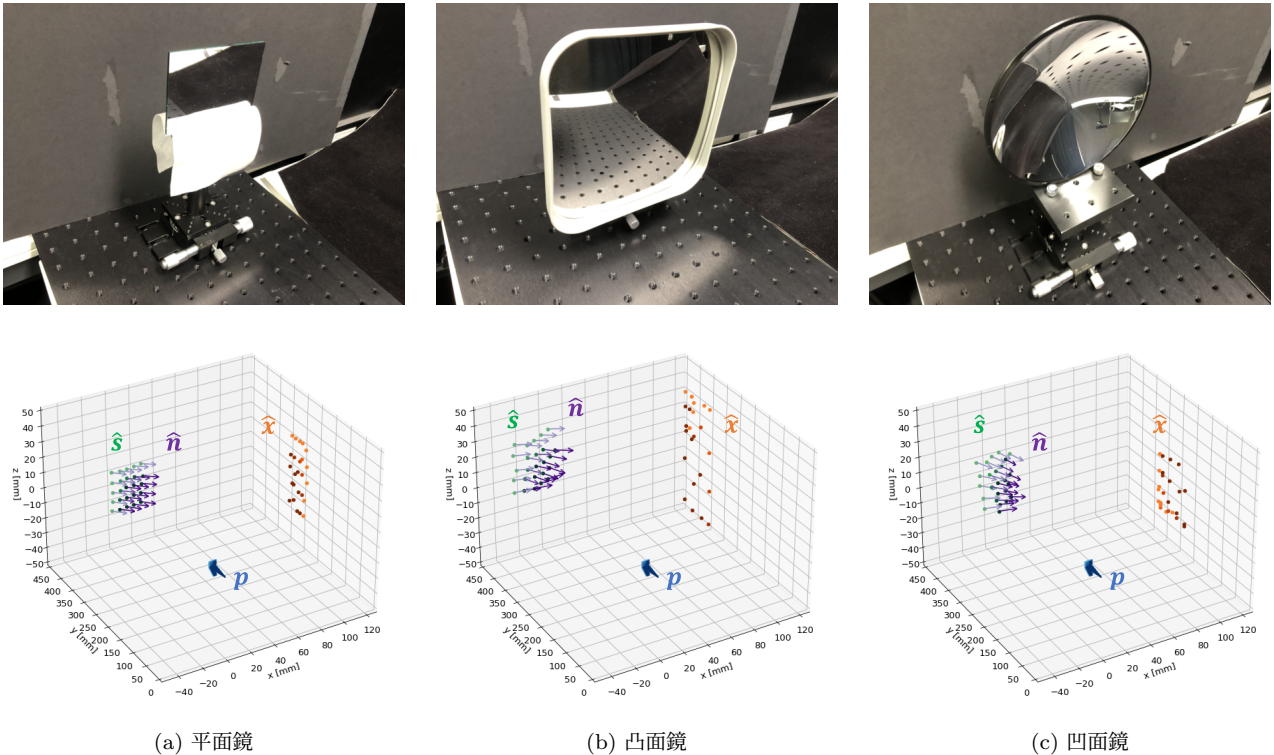


図 5 対象物体と実験結果. 画素の方向ベクトル p を中心として, 提案手法により照明位置 $\hat{x}$, 鏡面物体の点 $\hat{s}$, 法線 $\hat{n}$ を求めた.

法の評価を行った.

4.2 実験結果

計測対象と法線付き点群の推定結果を図 5 に示す. グラフ左側の緑色の点群と紫色の矢印が, 推定された形状と法線を表している. 推定された点群の位置 $\hat{s}$ をみると, それぞれ計測対象の表面に近い形が得られていることがわかる. また, 推定した法線ベクトル $\hat{n}$ はそれぞれ面の中心の法線ベクトルに対して平面鏡では並行, 凸面鏡では外向き, 凹面鏡では内向きとなっていることから, 法線についても推定されていることがわかる. 計測結果のばらつきが大きく, 形状が歪んでいるのは, 主に計測システムの時間分解能の限界によるものだと考えられるが, 提案手法によって鏡面物体の形状と法線が推定できることの原理が確認された.

5. 結論

本研究では, Time-of-Flight 方式により鏡面物体の形状を計測する手法を提案した. 提案手法ではピコ秒単位のレーザ光照射パターンを制御することで空間座標を時間軸に埋め込み, 得られた空間座標と光路長から鏡面物体の形状と法線を推定する.

実験では, 平面, 凸面, 凹面の形状を持つ鏡面物体の法線付き点群を推定し, 本手法の有効性を確認した. 今後はより密な点群の推定や計測された点群の精度評価, 法線付き点群からの形状復元方法の検討, キャリブレーション方

法の検討など, 手法の改良に取り組みたい. 提案手法は原理的にはワンショットでの形状計測が可能であるが, その実証は今後の課題である.

謝辞 本研究の一部は, JST CREST JPMJCR1764, JSPS Kaken JP18H03265 からの支援を受けた.

参考文献

- [1] Bajard, A., Aubreton, O., Bokhabrine, Y., Verney, B., Eren, G., Erçil, A. and Truchetet, F.: Three-dimensional scanning of specular and diffuse metallic surfaces using an infrared technique, *Optical Engineering*, Vol. 51, No. 6, p. 063603 (2012).
- [2] Kutulakos, K. and Steger, E.: A theory of refractive and specular 3D shape by light-path triangulation, *International Conference on Computer Vision (ICCV)* (2005).