

距離画像センサと鏡を利用した全周形状復元

Entire shape reconstruction using a range image sensor and mirrors

精密工学専攻 45号 増村駿
Hayata Masumura

1. 緒言

距離画像計測は、製品検査や3次元モデル生成を目的として物体の形状を計測する際に広く利用されている。通常、これらの計測では一度の計測で対象物体の全周形状を取得することは困難であるため、複数視点から計測を行いそれらの計測結果を統合する手法や、ターンテーブルの上に対象物体を載せて一視点から全周形状を得る手法が多く用いられている。しかし、前者の手法では事前に距離画像センサの視点に対する厳密なキャリブレーションや、複数の距離画像の重なり合う領域を元にしたレジストレーションの必要があるため、計測や計算に手間がかかる。また、後者の手法では対象物体の大きさによっては計測が困難になるなどの問題がある。これに対し、鏡を用いることで一度の計測で複数視点からの形状を同時に取得し、より簡便に物体の全周形状を取得する手法が提案されている。

鏡と距離画像センサを使った手法では、鏡の位置を推定し、その位置をもとに距離画像の座標変換を行う必要がある。Abdullahら[1]は、Kinectとカラーカメラと鏡を組み合わせることで、高解像度のテクスチャを持った全周距離画像を取得する方法を提案した。しかし、この手法では事前にKinectとカラーカメラと鏡間の位置関係に関するキャリブレーションが必要であり計測に手間がかかるという問題がある。また、Fasanoら[2]は、四隅にマーカーが付いた鏡を用いて、カラー画像中から鏡の位置を推定する手法を提案した。しかし、この手法では計測範囲内にマーカーが複数含まれている必要があり、計測環境の大きさによっては使用できないという問題がある。

そこで本研究では、事前のキャリブレーションやマーカーを使用せずに一視点からの計測で物体の前面と背面の形状を復元する手法を検討する。そのために、距離画像中の鏡に映った床面から鏡の位置・姿勢を求める手法を提案する。また、鏡の位置・姿勢を推定する実験と、得られた鏡の位置・姿勢から距離画像の前面と背面の形状を復元する実験を行い、本手法の有効性を検証する。

2. 鏡と距離画像センサを用いた距離画像計測手法

本手法の概念図をFig. 1に示す。計測対象の後ろ側に適切な角度で鏡を配置することで、対象物体の前面と背面の距離画像を同時に取得することが可能である。この時、物体前面の形状は直接距離画像を計測することによって得られ、物体背面の形状は鏡に映った距離画像が計測される

ことによって得られる。距離画像を計測するセンサとして、ToF (time of flight) 方式のセンサやステレオカメラが主に用いられる。その中で、ToFセンサの場合、鏡を介して距離画像を取得すると光路差により正しくない距離値が得られてしまうため、本手法で用いることは困難である。すなわち、Fig. 2中の赤矢印で示した、光が物体に直接当たってセンサに帰ってくる距離値と、光が鏡に映った物体に当たってセンサに帰ってくる距離値の他に、青矢印で示した物体に当たった後鏡に当たりセンサに帰ってくる距離値と、緑矢印で示した光が鏡に当たった後物体に当たりセンサに帰ってくる距離値が取得されてしまう。これらの距離値の影響により、主に物体側面の形状を正しく測定できない。そのため、本研究ではステレオカメラを使って距離画像を取得する。

本手法の流れは以下の通りである。始めに、計測対象の後ろに鏡を配置し距離画像を取得する。この時、鏡に映った計測対象の背面を計測対象の前面に遮蔽されないように、適切な位置関係で鏡と距離画像センサを配置する。次に、得られた距離画像から鏡の位置・姿勢を推定する。通常、ステレオカメラを使った計測では、鏡の表面形状を直接計測することができない。そのため、得られた距離画像中の床面と鏡に映った床面を検出し、それらの平面の関係を元に鏡の位置・姿勢を推定する。最後に、推定された鏡の位置を元に鏡に映った距離画像の座標変換を行う。鏡を介して得られた計測対象の背面の距離画像は、実空間上での計測対象の背面の位置とは異なる場所に計測される。それらの距離画像を鏡の位置を元に座標変換することで、前面と背面の情報を持った計測対象の距離画像を生成することが可能となる。

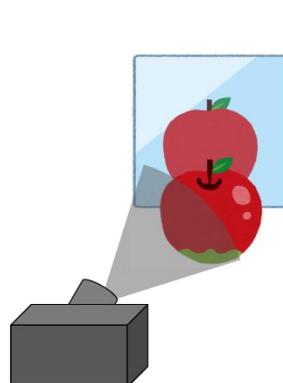


Fig. 1 本手法の概念図

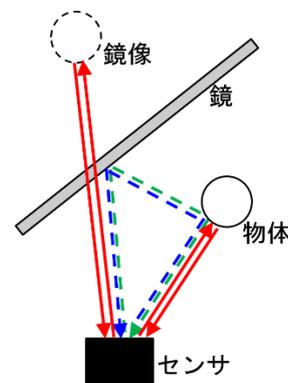


Fig. 2 ToFセンサと鏡による計測

3. 鏡の位置の検出手法

Fig. 3 に示すように床面に鏡が置かれた環境を距離画像センサで計測すると、Fig. 4 のように鏡に映った床面は通常の床面とは異なった傾きを持った平面として取得される。距離画像からこの2つの平面を検出したとき、2平面の交線が鏡の下辺にあたり、2平面の角度から鏡の角度を求めることができるため、鏡の位置と姿勢を自動で推定することができる。また、鏡の前に計測対象が置かれている環境であっても、計測対象に対して鏡が十分な大きさを持っていて距離画像中から鏡に映った床面を検出することができれば、この手法を用いて鏡の位置を推定することが可能である。

床面と鏡に映った床面の検出には RANSAC (random sample consensus) を使用する。予め床面の法線方向を大まかに指定しておき、指定した法線に近い法線を持つ平面を複数検出し、それらの平面に属さない点群を除去することで、床面と鏡に映った床面の点群のみを残す。次に、残った平面のうち、面積が大きい平面から順に検出を行うことで、床面、鏡に映った床面の順で平面を推定することができる。ここで、鏡の前に計測対象が置いてあり、計測対象が床面に近い角度の面を持っている場合であっても、距離画像中で床面と鏡に映った床面の面積がそれらの面より大きければ、床面と鏡に映った床面が正しく検出される。

床平面 P_f の式と鏡に映った床平面 $P_{f'}$ の式は次式で表される。

$$a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \quad (1)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \quad (2)$$

この時、床面の法線ベクトル \mathbf{n}_f と鏡に映った床面の法線ベクトル $\mathbf{n}_{f'}$ は次式で表される。

$$\mathbf{n}_f = (a_1, b_1, c_1) \quad (3)$$

$$\mathbf{n}_{f'} = (a_2, b_2, c_2) \quad (4)$$

また、以下の点 \mathbf{p} は2つの平面上に存在する。

$$\mathbf{p} = \left(\frac{d_1b_2 - d_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1}, \frac{d_1a_2 - d_2a_1}{a_2b_1 - a_1b_2}, 0 \right) \quad (5)$$

この時、鏡の平面に対して床面と鏡に映った床面が対称となることから、鏡の平面の法線ベクトル \mathbf{n}_m は、 P_f の法線ベクトルと $P_{f'}$ の法線ベクトルの差で表すことができる。よって、鏡の平面 P_m は、法線ベクトル $\mathbf{n}_m = (a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2)$ を持ち、点 \mathbf{p} を通ることから、以下のように表すことができる。

$$(a_1 - a_2)x + (b_1 - b_2)y + (c_1 - c_2)z + d_m = 0 \quad (6)$$

$$d_m = \frac{(a_2 - a_1)(d_1b_2 - d_2b_1)}{a_1b_2 - a_2b_1} + \frac{(b_2 - b_1)(d_1a_2 - d_2a_1)}{a_2b_1 - a_1b_2} \quad (7)$$



Fig. 3 鏡のみが置いてある計測環境

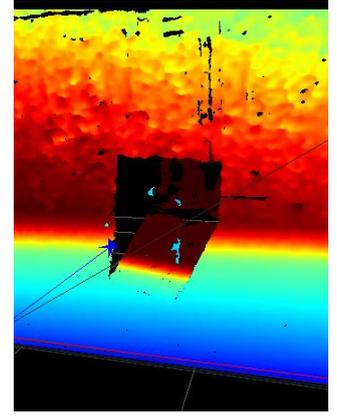


Fig. 4 Fig. 3 に対して得られた距離画像

4. 距離画像の座標変換手法

鏡を介して取得した物体背面の距離画像は、実空間上での物体の背面の位置とは異なった位置にある点群として取得される。これらの点は、実際の位置に対して鏡の平面に対称な位置に存在しているため、鏡平面の式を元に座標変換を行うことで、正しい位置に変換することができる。

鏡を介して取得した点かそうでないかの区別は、鏡平面の式を元に行う。鏡平面 P_m の式を以下のように定義する。

$$a_mx + b_my + c_mz + d_m = 0 \quad (8)$$

この時、原点から鏡平面までの距離 D は以下のように表すことができる。

$$D = \frac{|d_m|}{\sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2}} \quad (9)$$

また、ある点 $\mathbf{p}(x, y, z)$ から原点までの距離 d は以下のように表すことができる。

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (10)$$

ここで、距離画像中の全点に対して原点までの距離 d の算出を行い、 $d > D$ となった点を鏡を介して取得した点としてみなして座標変換を行う。この時、鏡より離れた位置に取得された床面や背景の点も $d > D$ となるため座標変換が行われる。しかし、それらの点を座標変換しても、計測対象の点群と重なり合うことはないため、計測対象の形状の復元には影響しない。

鏡を介して取得した点を実空間上での座標に変換したとき、座標変換後の点 $\mathbf{p}_r(x_r, y_r, z_r)$ は、鏡を介して取得した点 $\mathbf{p}_v(x_v, y_v, z_v)$ と鏡平面 P_m に対して対称であるため、線分 $\mathbf{p}_r\mathbf{p}_v$ の midpoint は鏡平面 P_m 上に存在する。よって、座標変換後の点 \mathbf{p}_r は点 \mathbf{p}_v と鏡平面 P_m を用いて以下のように表すことができる。

$$\mathbf{p}_r = \begin{pmatrix} x_v - \frac{2a_m(a_mx_v + b_my_v + c_mz_v + d_m)}{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2} \\ y_v - \frac{2b_m(a_mx_v + b_my_v + c_mz_v + d_m)}{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2} \\ z_v - \frac{2c_m(a_mx_v + b_my_v + c_mz_v + d_m)}{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

5 実験

5.1 鏡の検出実験

Fig. 3 に示す鏡のみが置いてある環境で距離画像を取得し、鏡の位置・姿勢を推定する実験を行った。また、鏡の平面が正しく求められているかを検証するために、Fig. 5 に示すように、距離画像センサと鏡の位置は動かさずに、鏡に紙を貼り付けた環境で再度距離画像の取得を行った。距離画像センサは Intel の RealSense D435 を使用し、鏡は高さ 330mm、横幅 220mm のものを使用した。

Fig. 3 の計測環境で取得した距離画像を点群として表示したものを Fig. 6 に示す。次に、Fig. 6 の点群に対して平面の検出を行った。床面と鏡に映った床面を検出した結果を Fig. 7 に示す。また、Fig. 5 の環境で取得した距離画像を点群として表示したものを Fig. 8 に示す。Fig. 7 で得られた 2 つの平面 P_f , $P_{f'}$ の方程式の係数と、それらの平面から求められた鏡の平面 P_m の方程式の係数、Fig. 8 の紙が貼り付けられた鏡平面 P_M の方程式の係数は Table 1 のようになった。推定した鏡の平面 P_m を Fig. 8 の点群上に描画した結果を Fig. 9 に示す。

Table 1 と Fig. 9 の結果から、推定値である P_m が計測値である P_M に対して高い精度で求まっており、推定した鏡の平面と実際の鏡の表面が重なり合っていることから、精度よく鏡の平面を推定できたと言える。



Fig. 5 計測環境

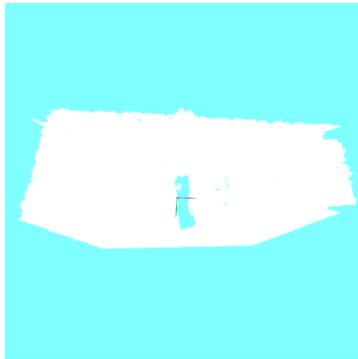


Fig. 6 Fig. 4 の点群表示

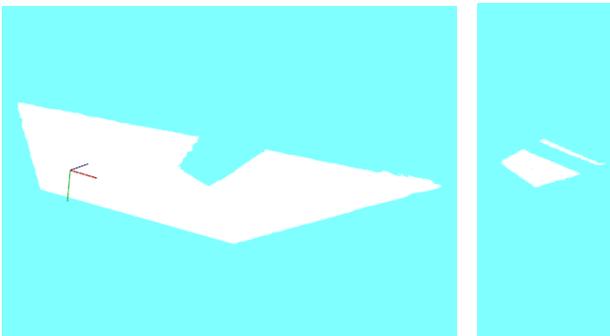


Fig. 7 平面の検出結果. 左：床面，右：鏡に映った床面

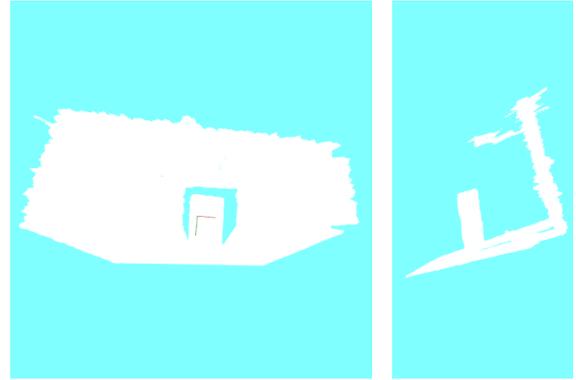


Fig. 8 鏡に紙を貼った時の計測結果. 左：正面，右：右側面

Table 1 それぞれの平面の方程式の係数

	a	b	c	d
P_f	0.1082	0.9575	0.2673	-0.3814
$P_{f'}$	-0.04706	0.9988	-0.01398	-0.1638
P_m	0.1553	-0.04128	0.2813	-0.2176
P_M	0.1587	-0.04599	0.2895	-0.2223

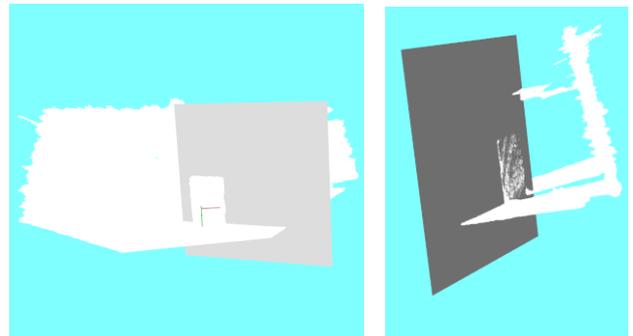


Fig. 9 推定した鏡平面を Fig. 8 に描画した結果.
左：正面，右：右側面

5.2 座標変換実験

Fig. 10 に示す鏡の前に物体が置いてある環境で取得した距離画像から、鏡の位置・姿勢の推定し、それらを元に鏡に映った距離画像を元の座標に変換する実験を行った。距離画像センサは 5.1 節と同様に Intel の RealSense D435 を使用し、鏡は高さ 600mm、横幅 600mm のものを使用した。計測対象は高さ 180mm のぬいぐるみと 1 辺 160mm の立方体を使用した。それぞれの環境で取得された距離画像を点群として表示したものを Fig. 11 と Fig. 12 に示す。また、得られた点群から推定された平面を点群上に表示したものを Fig. 13 と Fig. 14 に示す。推定された平面を元に座標変換を行ったものを Fig. 15 と Fig. 16 に示す。

Fig. 13 と Fig. 14 の結果から、鏡の前に物体が置いてある環境であっても正しく鏡の平面が推定できたと言える。これは、計測対象と比較して十分大きい鏡を使用したため、距離画像中の鏡に映った床面の面積が計測対象と比較して大きくなったためであると考えられる。また、Fig. 15 と Fig. 16 の結果から、前面と背面の形状がずれがなく重なっていることから、計測対象の背面の点群を正しい位置に変換できたと言える。しかし、Fig. 15 と Fig. 16 の上から見

た図から分かる通り、計測対象の一部形状が取得できていない。これは、計測対象の背面の一部が、鏡を介しても距離画像センサの位置からでは取得できていないためであると考えられる。

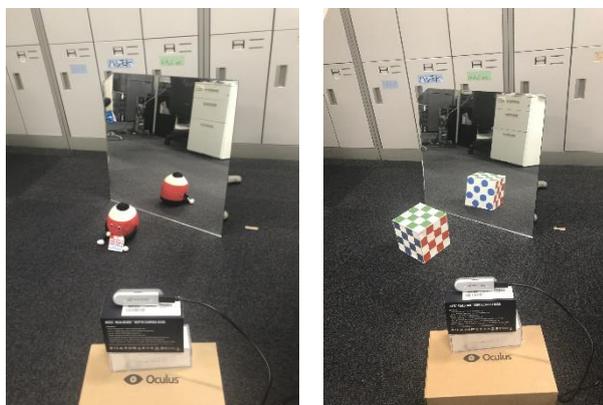


Fig. 10 実験環境. 左：ぬいぐるみ, 右：立方体

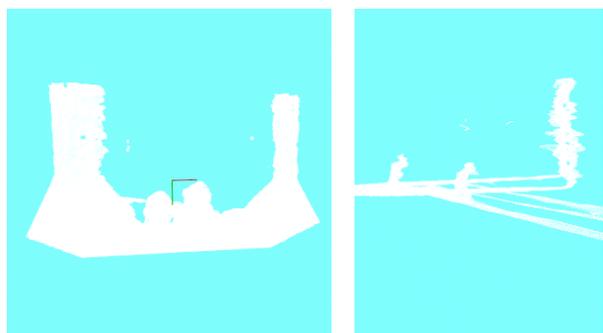


Fig. 11 ぬいぐるみの計測結果. 左：正面, 右：右側面

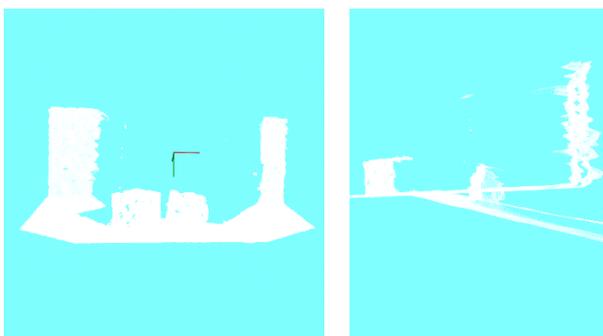


Fig. 12 立方体の計測結果. 左：正面, 右：右側面

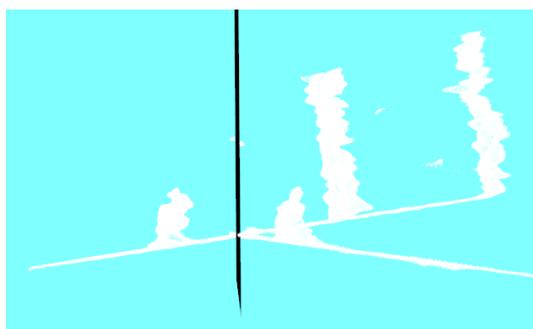


Fig. 13 ぬいぐるみの環境での鏡の平面推定結果

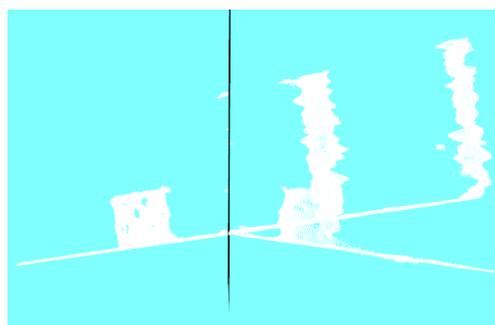


Fig. 14 立方体の環境での鏡の平面推定結果

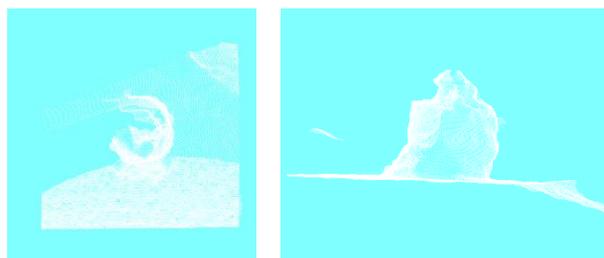


Fig. 15 ぬいぐるみの形状復元結果. 左：上面, 右：右側面

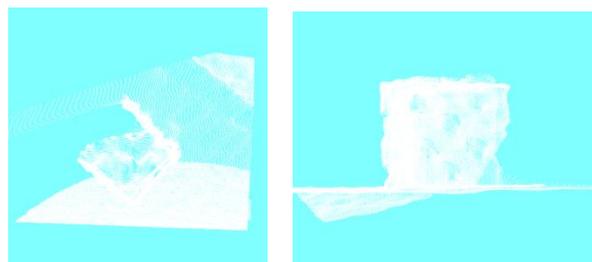


Fig. 16 立方体の形状復元結果. 左：上面, 右：右側面

6. 結言

本論文では、鏡と距離画像センサを組み合わせることで計測を行い、一度の計測で複数視点からの距離画像を取得することで、計測対象の前面と背面を同時に計測する手法と、距離画像中の床面と鏡に映った床面のみから、事前のキャリブレーションやマーカを用いずに鏡の位置・姿勢を推定する手法を提案した。また、実験により、鏡の位置・姿勢推定手法と、鏡の平面を元に鏡を介して取得した距離画像の座標変換を行う手法の有用性を示した。今後は、鏡の枚数を増やすことで、計測対象の形状をより完全に取得し復元することを目指す。

参考文献

- [1] A. Akay and Y. Akgul, 3D reconstruction with mirrors and RGB-D cameras, Proc. of 2014 International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), pp.325-334, 2014.
- [2] A. Fasano, M. Callieri, P. Cignoni, and R. Scopigno, Exploiting mirrors for laser stripe 3D scanning, Proc. of 4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pp.243-250, 2003.