

三次元計測器による鏡面を利用した形状測定

平湯 秀和

The Shape Measurement by Three-Dimensional Measuring Instrument Using Specular Plane

Hidekazu HIRAYU

あらまし 型設計や意匠デザイン等において、製品や意匠品のモデルから三次元形状データを作成するために、非接触三次元計測器が用いられる。しかしながら、計測物の表面の凹凸により隠れが存在する場合や対象物全周の三次元形状データが必要な場合は1回の計測ですべての領域を網羅することは困難である。その解決方法として、現状では、専用ターンテーブルやマーカ等を用いる手法が現場では使われているが、計測物の大きさ制限やマーカを同時に計測する必要があるなど、効率的に計測する手法が未だに確立されていない。そこで、本研究では非接触三次元計測器と鏡面を使用することで専用ターンテーブルやマーカ等を使用することなく、1回の計測で効率良く計測物の三次元形状データを取得する手法の検討を行う。具体的には、計測物を非接触三次元計測器で直接測定すると同時に、直接測定できない領域に対して、鏡面を適切に配置することで間接的に計測を行う。その結果、計測物も三次元計測器も移動させることなく計測を行うことが可能となり、1回の計測で三次元形状データの取得が可能となった。

キーワード 三次元計測器、三次元モデリング、鏡面ミラー、デジタルエンジニアリング

1. はじめに

プレス成型品等の素形材製品の型設計や意匠デザイン、品質検査等において、デジタルデータを活用することは、効率化を図る上で非常に有効な手段である。そのため、製品や意匠品のモデルから型設計に必要な三次元形状データを効率的に作成することが重要であり、製造分野等の現場では、それらの三次元形状データの取得が可能な三次元計測器が用いられている。

一般的に三次元計測器には、プローブを計測物に接触させて計測する接触式とレーザ光等を計測物の表面に照射し反射した情報から三次元計測を行う非接触式がある。接触式は精度良く計測することが可能であるが一つの三次元データの取得に非常に時間がかかる。一方、非接触式は計測精度が接触式には劣るが一回の計測で大量に三次元データが取得可能であるため、計測に要する時間が少ない。そのため、対象物全体の三次元形状データの取得には効率の良い非接触三次元計測器が多く用いられることが多い。しかしながら、非接触三次元計測器は、計測物の表面の凹凸により隠れが存在する場合や対象物全周の三次元形状データが必要な場合は1回の計測ですべての領域を網羅することは困難である。

その対処方法として、専用のターンテーブルを使用し多方向から測定する手法と、マーカを計測物に貼り付け、マーカを対応点として多方向から測定する二つの手法が

ある。しかしながら、専用ターンテーブルを用いる手法は巨大もしくは荷重のある計測物や固定されて移動することが困難な計測物を測定することは困難である。また、マーカを用いる手法はマーカを貼った領域は計測できず、またマーカを同時に計測する必要がある。そのため、未だに非接触三次元計測器で効率的に計測する手法は確立されていない。

そこで、本研究では非接触三次元計測器と鏡面を使用することで専用ターンテーブルやマーカ等を使用することなく、1回の計測で計測物の三次元形状データを取得する手法の検討を行った。具体的には、計測物を非接触三次元計測器で直接測定すると同時に、直接測定できない領域に対して、鏡面を適切に配置することで間接的に計測を行った。また、実験により本手法の有効性の検討を図った。

2. システム構成

本研究におけるシステム構成を図1に示す。システムは計測器と計測物の直接計測できない領域を映すミラーから構成される。計測原理としては、通常、計測可能な領域については直接計測を行うが、直接計測できない領域についてはミラーを適切に配置することで間接的に計測する。つまり、三次元計測器により照射されたレーザ光がミラーにより鏡面反射し、計測物の直接計測のできな

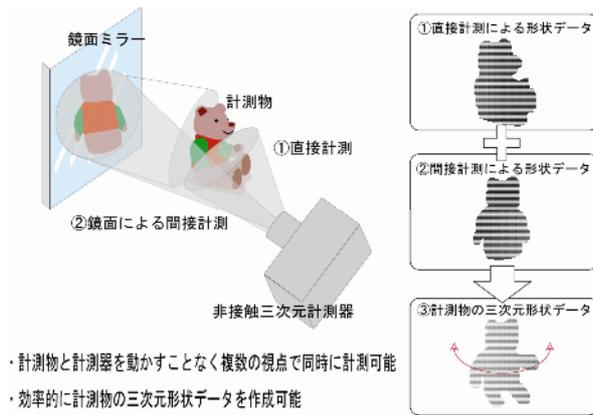


図1 システム構成

い領域に投影され、同じ光路を通り、三次元計測器に反射光として戻るといった原理で間接計測する。

2.1 鏡面により間接計測された三次元点の変換

直接計測された三次元点も間接計測された三次元点も同じ三次元計測器の座標系で表現されているが、間接計測された三次元点は鏡面反射により得られた三次元データであるため、直接計測された三次元点とは本来の座標系は異なる。そこで、直接計測された三次元点と間接計測された三次元点を一つの三次元形状データとして作成するためには、同じ座標系に変換する必要がある。

図2に示すとおり、鏡面反射により間接計測された三次元点は鏡を通して反対側に観測される。図2は円錐体を図の右方向から三次元計測器で測定した例であるが、鏡面ミラーは三次元計測器で直接測定できない円錐体の裏領域が鏡を通して見ることができるよう配置した。この場合、図3に示すとおり、円錐体の裏領域は鏡面ミラーを通して計測されるため、裏領域の三次元点は鏡面領域の平面を対称にして測定される。従って、実在点 $P(x_p, y_p, z_p)$ は間接計測された三次元点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ と鏡面領域の平面方程式 $ax + by + cz + d = 0$ より、

$$\begin{cases} x_p = as + x_q \\ y_p = bs + y_q \\ z_p = cs + z_q \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{但し, } s = -2 \frac{ax_q + by_q + cz_q + d}{a^2 + b^2 + c^2}$$

と表すことができるため、直接計測された三次元点と同じ座標系に変換することが可能となる。

2.2 2平面で構成される鏡面ミラー

前節のとおり、三次元計測器の座標系における鏡面領域の平面方程式を求めることができれば、間接計測された三次元点も直接計測された三次元点と同じ座標系に変換することが可能である。しかしながら、鏡面ミラーは

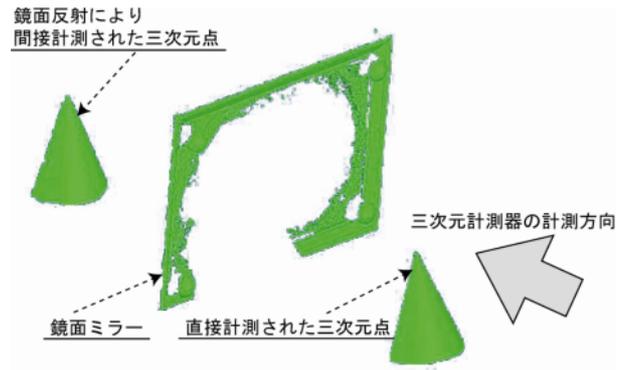


図2 円錐体を計測した結果例

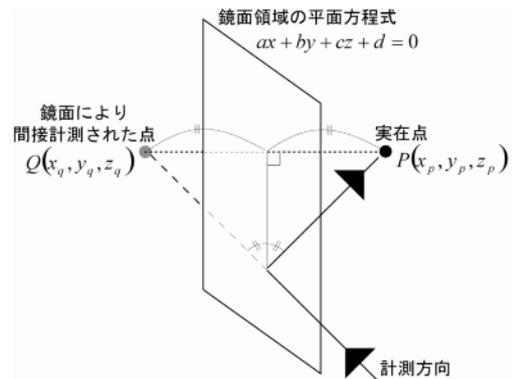


図3 間接計測された点と鏡面の関係

レーザー光を全反射するため、鏡面領域の平面方程式を直接求めることは非常に困難である。そこで、本研究では図4に示すとおり、鏡面部分と4つのターゲット球で構成された鏡面ミラーを使用することにより、4つのターゲット球で構成される平面を求め、その平面情報から鏡面領域の方程式の推定を行う。なお、4つのターゲット球は鏡面領域を遮ることがないようにミラーの四隅に配置した。また、ターゲット球は実際に三次元計測器のマーカーとして使用される精度の良い球面で構成されたものを使用した。

まず、鏡面ミラーに対して、反射防止スプレーを塗布し、鏡面部分およびターゲット球を計測する。次に計測された4つのターゲット球に関して、それぞれの球に対してセグメンテーションを行い、得られた各領域に対して球面方程式

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2 \quad (2)$$



図4 鏡面とターゲット球で構成された鏡面ミラー

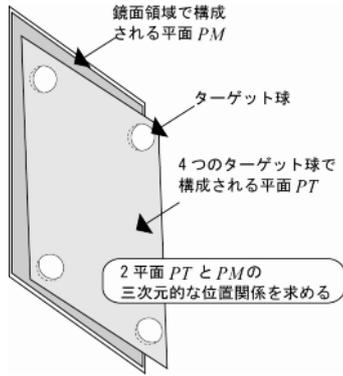


図5 2平面 PT と PM で構成された鏡面ミラー

を当てはめ、各球の中心点を求める。ここで、 (x_c, y_c, z_c) はターゲット球の中心点、 r は球の半径を表す。そして、図5に示すとおり、得られた4点を基にターゲット球で構成される平面 PT の平面方程式

$$a_t x + b_t y + c_t z + d_t = 0 \quad (3)$$

を求める^[1,2]。ここで、 a_t, b_t, c_t, d_t は平面 PT の平面方程式のパラメータを表す。

次に鏡面部分に関して、平面であるという仮定を基に平面 PM の平面方程式

$$a_m x + b_m y + c_m z + d_m = 0 \quad (4)$$

を求める。ここで、 a_m, b_m, c_m, d_m は平面 PM の平面方程式のパラメータを表す。

2.3 鏡面の平面方程式の求め方

得られた2平面 PT, PM の三次元的な位置関係を求めることができれば、間接計測時には、ターゲット球の三次元情報のみを用いて鏡面領域の平面方程式を推定することができ、結果として、間接計測された三次元点は直接計測された三次元点と同じ座標系に変換することが可能となる。

そこで、2平面 PT, PM の法線ベクトルをそれぞれ T, M とすると、2平面 PT, PM の三次元座標軸上での傾き関係 R は、

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{M} \quad (5)$$

と表せる。ここで、U は法線ベクトル T をワールド座標系の XYZ 軸と一致させるように変換する回転行列を表す。

また、2平面間の並進関係は4つのターゲット球の重心 $G(x_g, y_g, z_g)$ と平面 PM 間のユークリッド距離で表される。ここでユークリッド距離 l は、

$$l = \frac{|a_m x_g + b_m y_g + c_m z_g + d_m|}{\sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2}} \quad (6)$$

となる。式(5)と式(6)が、鏡面ミラーにおいて、ターゲット球で構成される平面と鏡面領域の平面間の三次元的な位置関係を示す。

次に間接計測時における鏡面領域の平面方程式は以下のように推定する。間接計測により計測された4つのターゲット球を通る平面方程式の法線ベクトルを T' とすると、推定される鏡面領域の平面方程式 $a'_m x + b'_m y + c'_m z + d'_m = 0$ の法線ベクトル $\mathbf{M}' = (a'_m, b'_m, c'_m)$ は

$$\mathbf{M}' = \mathbf{U}'^{-1} \mathbf{R} \quad (7)$$

となる。ここで、 \mathbf{U}'^{-1} は法線ベクトル T' をワールド座標系の XYZ 軸と一致させるように変換する回転行列 U' の逆行列を表す。

また、推定される鏡面領域の平面方程式のパラメータ d'_m は、

$$d'_m = -(a'_m x_g + b'_m y_g + c'_m z_g) - l \sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2} \quad (8)$$

となる。ここで、 x'_g, y'_g, z'_g は4つのターゲット球の重心 $G'(x'_g, y'_g, z'_g)$ を示す。

(7)式および(8)式を用いて鏡面領域の平面方程式を推定し、(1)式に適用することで、間接計測された三次元点は直接計測された三次元点と同じ座標系に変換される。

3. 実験

本手法の有効性を検討するため、図4の鏡面ミラーにおいて、ターゲット球で構成される平面と鏡面領域の平面間の三次元的な位置関係の推定を行った後、球体、円錐体、立方体の3種類の計測物に対して形状計測を行った。なお、鏡面ミラーは、図6のとおり、直接計測と間接計測が同時にできるように配置した。

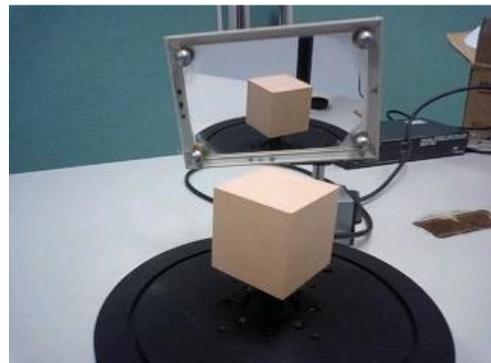


図6 実験の様子（三次元計測器側より撮影）

3.1 実験方法

本研究では非接触三次元計測器として、KONICA MINOLTA製RANGE7^[3]を使用した。RANGE7は計測物に660nmの半導体レーザー光を当て、反射した情報を基に表面形状を計測することが可能な計測器である。本機器の諸元を表1に示す。

実験では、それぞれの計測したデータにおいて、ターゲット球のみ手動で選択し、2.3節の方法で鏡面領域の平面方程式を推定した。これにより、間接計測された三次元点は直接計測された三次元点と同じ座標系に変換される。次に、統合された三次元点に関して、それぞれの形状（球体、円錐体、立方体）に当てはめ、実測値との比較を行った。本研究では、実測値は専用ターンテーブルを用いた三次元データ取得方法で得られた三次元形状とし、取得方法はRANGE7を用いて計測物を全周45°刻み（8方向）で測定し、それぞれの形状に当てはめた結果を用いた。比較する項目に関しては表2に示す。また、直接計測のみによる形状の当てはめと実測値との比較も行うことで本手法による誤差と形状の当てはめによる誤差との比較も行う。

3.2 実験結果

球体、円錐体、立方体のそれぞれの計測した三次元点の表示例を図7、図8、図9に示す。

図4の鏡面ミラーにおけるターゲット球で構成される平面と鏡面領域の平面間の三次元的な位置関係の推定結果（式(5)の \mathbf{R} 、式(6)の l ）は $\mathbf{R}=(0.2274, 0.3754, -0.8985)$ 、 $l=7.8901$ である。表2の比較項目に基づき、実測値との比較結果を表3に示す。表3において、間接計測補正とは間接計測された三次元点を直接計測された三次元点と同じ座標系に変換した三次元点群のことである。

表3のとおり、球体や円錐体の中心位置や半径において、間接計測補正や統合結果と実測値との差が1.5mm未満であり、円錐体や立方体における角度差も0.5°未満であることから、本手法の有効性を示すことができた。球体や円錐体の中心位置のユークリッド距離に関して、間接計測補正における誤差が大きい理由としては、式(4)の鏡面

表1 非接触三次元計測器の諸元

KONICA MINOLTA製 RANGE7	
測定方式	三角測量 レーザ光切断方式
撮像素子数	131万画素 (1280 × 1024)
測定距離	450mm ~ 800mm
測定範囲	267 × 334 × 194mm (WIDEレンズで測定距離800mm時)
精度 (球間距離)	± 40 μm
精度 (Z,)	4 μm

表2 比較項目

球体	中心(x, y, z)の位置, 半径の長さ
円錐体	頂点(x, y, z)の位置, 主軸(x, y, z)の傾き, 角度
立方体	二つの側面の外積と上面との角度差

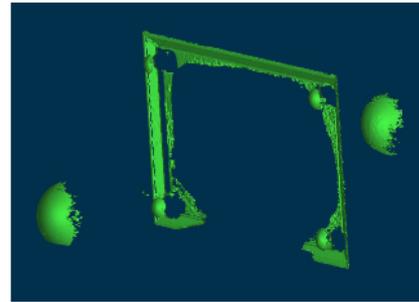


図7 球体の計測結果の例

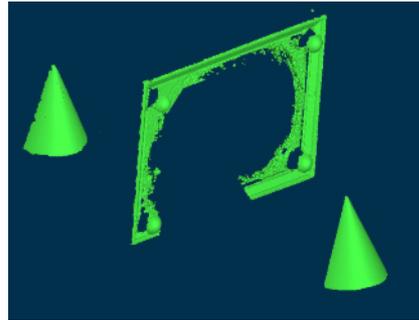


図8 円錐体の計測結果の例

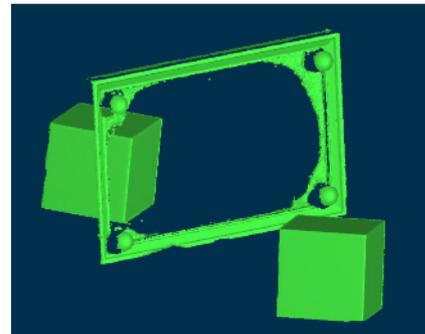


図9 立方体の計測結果の例

領域における平面方程式の推定精度が低いことが挙げられる。鏡面に対して反射防止スプレーを塗布した鏡面領域に対して平面当てはめをし、その誤差を可視化した結果を図10に示す。図10の白い領域は誤差が0.16 ~ 0.24mmを示しているが、平面に対して最大0.34mm程度の当てはめ誤差が存在する。これはスプレーを一様に塗布できなかったため平面に凹凸が生じ、平面当てはめに誤差が生じた結果である。

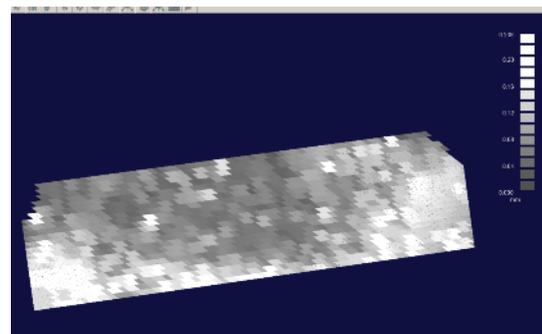


図10 鏡面領域の当てはめ誤差

4. まとめ

非接触三次元計測器と鏡面を使用することでターンテーブルやマーカ等を使用することなく、効率良く計測物の三次元形状データを取得する手法の検討を行った。また、実験により本手法の有効性を示すことができた。

今後の課題としては、鏡面領域の平面推定誤差に関して検討が必要である。

謝 辞

本事業を遂行するにあたり、非接触三次元計測器購入のための補助金を頂いた財団法人JKAに深く感謝いたします。

文 献

- [1] S.Kaveti,E.K.Teoh,H.Wang:”Second-order Implicit Polynomials For Segmentation of Range Images”, Pattern Recognition, Vol.29,No.6,pp.937-949,1996.
- [2] D. Keren, C. Gotsman:”Fitting Curves and Surfaces With Constrained Implicit Polynomials”, IEEE Trans. PAMI, Vol.21, No.1, PP.31-41, 1999.
- [3] “KONICA MINOLTA RANGE7” ,<http://konicaminolta.jp/instruments/products/3d/range7/index.html>

表3 実験結果

		中心(mm)				半径 (mm)
		X	Y	Z	ユークリッド距離	
球体	実測値	-0.4207	85.7837	-0.7381		18.9061
	直接計測	-0.4987	85.7444	-0.8937		19.0419
	残差	-0.078	-0.0393	-0.1556	0.1784372	0.1358
	間接計測補正	-0.2077	86.8209	-0.9045		18.985
	残差	0.213	1.0372	-0.1664	1.0718404	0.0789
	直接および間接計測の統合	-0.4105	85.98	-0.944		19.0634
	残差	0.0102	0.1963	-0.2059	0.2846622	0.1573

		中心(mm)				主軸			角度 (°)
		X	Y	Z	ユークリッド距離	X	Y	Z	
円錐体	実測値	-3.2128	103.6891	-0.2323		0.0099	0.9993	0.0357	26.7501
	直接計測	-3.3024	104.0386	-0.3778		0.0099	0.9993	0.0362	26.7491
	残差	-0.0896	0.3495	-0.1455	0.3890356	0	0	0.0005	-0.001
	間接計測補正	-3.0941	105.0534	-0.6726		0.0064	0.9997	0.0224	26.7734
	残差	0.1187	1.3643	-0.4403	1.4384951	-0.0035	0.0004	-0.0133	0.0233
	直接および間接計測の統合	-3.2413	104.8325	-0.7774		0.0098	0.9995	0.0296	26.3882
	残差	-0.0285	1.1434	-0.5451	1.2670082	-0.0001	0.0002	-0.0061	-0.3619

		角度差(°)
		実測値
立方体	2つの側面1と2の外積と上面	0.154856
	2つの側面3と4の外積と上面	0.15295
	直接および間接計測の統合	
	2つの側面1と2の外積と上面	0.17138
	残差	0.016524
	2つの側面3と4の外積と上面	0.243862
	残差	0.090913