

三次元デジタイザの計測技術に関する研究

依田康宏^{*1}、水野和康^{*2}、松浦勇^{*2}、島津達哉^{*2}、竹中清人^{*2}

Study on Three-Dimensional Digitizer Metrology

Yasuhiro YODA^{*1}, Kazuyasu MIZUNO^{*2}, Isamu MATSUURA^{*2},
Tatsuya SHIMADZU^{*2} and Kiyoto TAKENAKA^{*2}

Industrial Technology Division, AITEC^{*1*2}

当所で保有する三次元デジタイザについて、実際の測定条件を考慮して、測定点間隔、基本幾何形状、エッジ部の測定精度、白色粉末および複数データのつなぎ合わせによる測定精度への影響を調べた。つなぎ合わせによる測定精度については、実際の測定とモンテカルロ法とにより評価したところ、合成用シーンを直線的に配置して測定を合成すると著しく精度が低下することがわかった。また、1回の測定可能範囲（角度）を調べ、効率的な計測方向を明らかにした。

1. はじめに

金型を含む工業製品の中には、実物を手作業による熟練技術で製作したため図面が存在しない場合や、設計図をもとに製作したが実物を少しずつ修正したため図面と実物が合っていない場合がある。そのような場合に製品を量産化するには、**図1**に示すリバースエンジニアリングが必要となり、三次元実形状を計測する技術と、計測データから設計用のCADデータを生成する技術とが求められている。

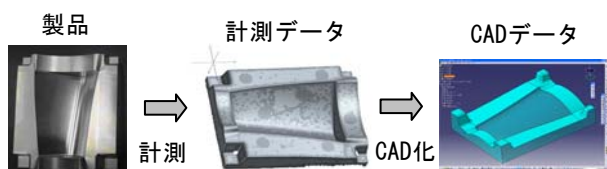


図1 リバースエンジニアリングの流れ

リバースエンジニアリング用の三次元形状測定機としては、**図2**に示すような非接触式測定機である三次元デジタイザが使われることが多い。これは、三次元デジタイザが高密度な点間隔で迅速に形状を計測できるので、未知形状のものを測定する必要があるリバースエンジニアリングの用途に適しているためである。

三次元デジタイザの精度評価方法の標準として、国内では2009年にJIS B7441「非接触座標測定機の受入検査及び定期検査」が制定され、拡散表面をもつ材料で、球の半径や球間（ボールバー）距離などを計測して精度を評価す



図2 三次元デジタイザ

る方法が説明されている。

しかし、三次元デジタイザには特有の測定条件や測定方法があり、JIS B7441による評価方法だけでは、実際の測定条件を考慮した精度評価が不十分な場合がある。

例えば、測定対象が金属の場合には、そのままでは光沢により測定できないため、白色粉末を塗布し拡散表面にする必要があるが、白色粉末自体の膜厚が誤差要因として上積みされる。また、合成用シーなどの基準マーカを測定対象に貼り、複数の測定をソフトウェアによりつなぎ合わせることができるが、測定範囲が大きくなると誤差が大きくなると考えられる。

さらに計測者にも、三次元デジタイザの効率的な計測手順がよくわかっていないという問題がある。いろいろな方向から計測したデータを合成することができるが、やみくもに計測を行うと想定以上に時間がかかる。

本研究では、三次元デジタイザの測定精度などの特性を調べるとともに、測定機の特性を考慮した効率的な計測手順を確立することを目指す。

2. 実験方法

2.1 実験に使用した三次元デジタイザ

当所では、**表1**に示す三次元デジタイザのATOSを保有しており実験に使用した。ATOSでは、カメラ及びプロジェクタのレンズを交換することにより、**表1**に示す測定範囲とは別のものとすることもできるが、今回の実験ではすべて**表1**のとおりとした。**表1**の測定精度および測定点間隔は、その測定範囲でのメーカ公称値である。

表 1 実験に使用した三次元デジタイザの概要

型式	ドイツ GOM 社 ATOS Std 520
測定方式	カメラ 2 台、プロジェクタ 1 台のステレオ方式
測定点数	約 31 万点 (640×480 画素)
計測時間	約 10 秒
測定範囲 (1 回)	250×200×200 mm
測定点間隔	0.39 mm
測定精度	±0.043 mm

2.2 測定点間隔

図 3 に示すように、測定対象面の法線方向に対して測定機を角度 θ 傾けたときの測定点間隔を評価した。

三次元デジタイザの出力データは、図 4 に示すような微小ポリゴン (三角形) の集まりである STL が標準である。これは隣り合う測定点を結んだものと考えられるため、測定点間隔は STL の 1 辺長さにより評価した。

なお、出力する STL は、設定によりデータを間引くことも可能であるが、点間隔の評価のため、間引きは行わなかった。また、複数回測定してデータを合成することはせず、1 回だけの測定とした。

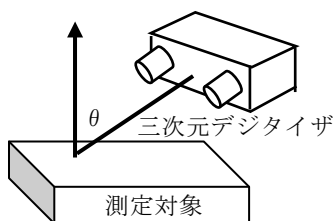


図 3 測定点間隔の評価



図 4 STL データ

2.3 基本幾何形状の精度

装置の基本的な測定精度として、図 5 に示すような基本幾何形状である (a) 平面、(b) 2 つの平面のなす角度、(c) 円筒の半径 を評価した。(a) はセラミックス製の 250×200mm の定盤、(b)、(c) はアルマイト処理したものである。(a)、(b) については、最小二乗となる平面を作成し、(b) では 2 平面のなす角度を求めた。(c) については、最小二乗となる円筒を作成し、その半径を求めた。

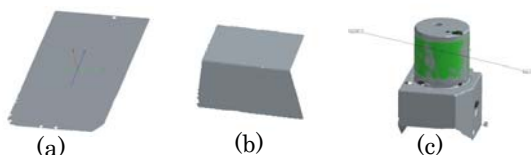


図 5 基本幾何形状の測定

2.4 エッジ部の精度

エッジ部について、直角形状がどの程度の精度で測定されるか評価した。経験的には、直角形状のものでも、ある程度、形状が丸くなることがわかっている。直角形

状のものを計測し、測定データの断面形状を二次元的に評価した。

2.5 白色粉末を塗布したときの精度

白色粉末 (スプレー) を塗布し、その厚みがどの程度で測定されるか評価した。図 6 に示すように、金属板を約 50mm 四方の領域にマスクして分け、基準部分と比較して、①、②、③、④の領域にそれぞれ、白色粉末を+2 回、+4 回、+6 回、+8 回多く塗布したものを評価した。1 回あたり、約 20cm の距離から約 2 秒スプレーを塗布した。

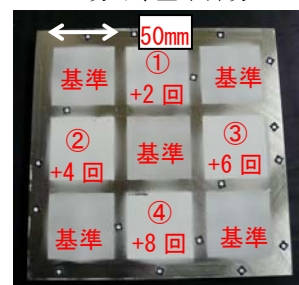


図 6 白色粉末の塗布試料

2.6 つなぎ合わせ精度

ATOS は測定対象に貼った直径 3~5mm の合成用シールをもとに、ソフトウェアによりデータのつなぎ合わせを行う。データをつなぎ合わせて測定範囲を広げたときには、精度低下が予想される。

つなぎ合わせには、二つの測定結果間で共通点が 3 点以上必要である。つなぎ合わせによりどの程度の精度低下が起きるか、以下のとおり実験とモンテカルロ法で評価した。

2.6.1 実験による評価

図 7 に示すように、半径 100mm のほぼ円周上に合成用シールを貼った。図 7 (a) の視点 1 の領域と視点 2 の領域の共通する 4 点又は 3 点の合成用シールから座標変換を求めつなぎ合わせを行った。このようなつなぎ合わせを 3 回繰り返すと、元の領域に戻って 1 周する。これは、250mm の 2.5 倍の大きさを測定したのと同様である。

図 7 (b) に示す評価点について、最初の座標値と、最初の座標値を 3 回座標変換して求めた座標値とのずれ量を評価した。

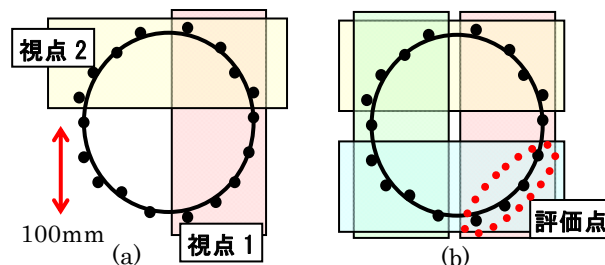


図 7 円周上でのつなぎ合わせによる 1 周

2.6.2 モンテカルロ法による評価

実際の測定では、十分な回数の実験ができないため、モンテカルロ法によるシミュレーション¹⁾を検討した。ある標準偏差の不確かさ (ガウス分布) を乱数で与えてデータを発生し、ずれ量を 10 万回計算した。計算手順は

以下のとおりである。

- (1) 合成用シールの視点 1 での座標 $X(x,y,z)$ 、視点 2 での座標 $X'(x',y',z')$ を入力値とする。 X 、 X' には乱数で不確かさを与える。
- (2) $X = RX' + t$ としたとき $X - (RX' + t)$ が最小二乗となる回転行列 R 、平行移動 t を特異値分解により計算する²⁾。
- (3) R, t から、評価点のずれ量を評価する。

座標変換を 2 回以上行う場合は、(1)、(2) を繰り返して、トータルでの座標変換の R, t を求める。

2.7 測定可能範囲（角度）

三次元デジタイザでは、円筒などを全周計測する場合に、何度ずつ回転しながら測定を行うと、最小の測定回数で効率的に全周計測できるか、ということが計測の際に課題となる。また、測定機のカメラを測定対象に対して縦・横どちらに向けたら効率的な測定ができるか、最大何度の傾斜角度まで測定できるか、ということも測定機を利用する上で知っておくべき課題である。

これらの課題は、1 回で何度の範囲の角度を測定できるかという問題と同等なので、1 度に測定可能な範囲（角度）を評価した。

3. 実験結果及び考察

3.1 測定点間隔

図 3 で θ を 0° 、 30° 、 45° 、 60° として測定したときの STL の 1 辺長さのヒストグラムを図 8 に示す。

横測定範囲 250mm をカメラの横方向 640 画素で割った $250/640=0.39\text{mm}$ は、メーカ公称値の 0.39mm に対応すると考えられる。

図 8 には、 0.39mm のピークの他にもう 1 つのピークがある。このピークは、 $0.39/\cos \theta$ (mm) 程度であり、傾けた分だけ測定点間隔が大きいことがわかった。

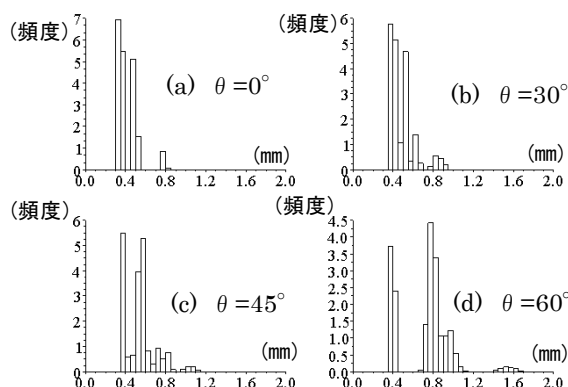


図 8 測定点間隔のヒストグラム

3.2 基本幾何形状の精度

(a) 平面、(b) 2 つの平面のなす角度、(c) 円筒半径の測定結果を表 2 に示す。精度が数 μm の接触式三次元測定

機 (CMM) の測定結果と比較して次のことがわかった。

- ・ 平面を測定すると標準偏差が約 0.01mm となり精度が良い。
- ・ 角度は 0.1° の単位までしか ATOS では表示しないので、その範囲では合っている。
- ・ 円筒半径は差異が約 0.03mm だが、公称値内の精度ではある。

表 2 基本幾何形状の測定結果

	ATOS	CMM
(a) 平面形状 (mm)	形状偏差: $-0.034 \sim 0.034$ 標準偏差: 0.007	定盤で数 μm の平面度
(b) 角度 ($^\circ$)	129.9 (3 測定とも)	129.8798
(c) 円筒半径 (mm)	$29.984, 29.976, 29.967$ (3 回測定)	29.998

3.3 エッジ部の精度

図 9 はエッジ部（直角部分）の測定の拡大図である。図より ATOS では、直角形状を測定点間隔（約 0.4mm ）程度の曲率半径として計測していることがわかる。なお、測定点間隔が $1\mu\text{m}$ 以下で、測定精度が ATOS より良い触針式表面粗さ測定機で計測した結果、曲率半径は 0.05mm 以下であり、これが実際の形状と考えられる。

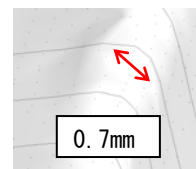


図 9 エッジ部の測定

3.4 白色粉末を塗布したときの精度

表 3、図 10 は白色粉末を塗布したものを測定した結果であり、+8 回塗布したときに最大 0.07mm 程度であるので 1 回塗布あたり約 0.01mm ということになる。均一に塗布できないため、+8 回塗布すると 0.05mm 程度のばらつきがある。

表 3 白色粉末塗布の影響

	範囲 (mm)	標準偏差 (mm)
① +2 回塗布	$0.00 \sim 0.03$	0.004
② +4 回塗布	$0.01 \sim 0.05$	0.006
③ +6 回塗布	$0.01 \sim 0.04$	0.006
④ +8 回塗布	$0.02 \sim 0.07$	0.010

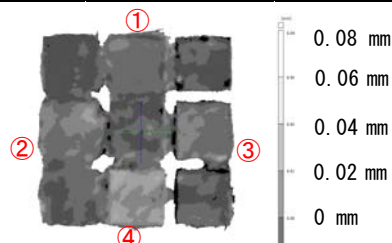


図 10 白色粉末塗布の測定

3.5 つなぎ合わせ精度

3.5.1 実験による評価

図 7 に示す 1 周の計測を 3 回行い、ずれ量 dx 、 dy 、

dz の絶対値を評価した。図 7 の水平、垂直方向を x、y 方向、円周上は z=0 平面とし、3 点および 4 点で合成した場合を計算した。3 点でつなぎ合わせを行うと非常にずれが大きくなり、同一の評価点が、三次元デジタイザにおいても違う点として認識された。

表 4 実験によるずれ評価 (1 周 3 回変換)

	dx (mm)		dy (mm)		dz (mm)	
	平均	各値	平均	各値	平均	各値
3 点で合成	0.46	0.11 1.03 0.23	2.71	0.55 5.05 16.68	8.97	2.18 16.68 8.06
4 点で合成	0.02	0.02 0.04 0.01	0.06	0.03 0.14 0.01	0.22	0.11 0.51 0.06

3.5.2 モンテカルロ法による評価 1

モンテカルロ法により、実験と同様に 1 周のずれ量 dx、dy、dz を評価した。x、y、z 方向の入力不確かさ $u(x), u(y), u(z) = 0.01, 0.015, 0.02 \text{ mm}$ として計算した結果が表 5 である。表 5 の入力不確かさ 0.015 mm の結果が表 4 の実験結果の範囲内に合致し、表 2 の平面度の標準偏差が 0.01 mm 程度であることから妥当な値と思われるので、以下の計算では入力不確かさを 0.015 mm とする。

表 5 モンテカルロ法によるずれ評価 (1 周 3 回変換)

合成 シール 数	入力 不確 かさ	dx (mm)		dy (mm)		dz (mm)	
		dx 平均	標準 偏差	dy 平均	標準 偏差	dz 平均	標準 偏差
3	0.01	0.30	4.34	0.46	7.36	2.12	8.70
	0.015	0.46	5.63	0.72	9.64	3.01	10.59
	0.02	0.61	6.50	0.96	11.32	3.83	12.44
4	0.01	0.03	0.04	0.03	0.03	0.24	0.30
	0.015	0.05	0.06	0.04	0.05	0.35	0.45
	0.02	0.06	0.08	0.05	0.07	0.47	0.61

3.5.3 モンテカルロ法による評価 2

次に、モンテカルロ法により、1 回のつなぎ合わせによるずれ量を評価した。実験では、1 回のつなぎ合わせのずれ量を評価する適当な方法がないので、本シミュレーションは有用である。

つなぎ合わせのために重複する範囲は、1 回の測定範囲の約半分とし、 $z=0$ の平面上で合成用シールを(a)x 軸方向にほぼ 1 直線で配置、(b)図 7 に示すようにほぼ円周上で配置、(c)重複する範囲で広く配置 するようにした。つなぎ合わせた測定範囲の最大端の点を評価点として、ずれ量を計算した結果を表 6 に示す。

表 6 より、3 点で合成する場合も 4 点で合成する場合も、直線上にシールを貼ると非常に精度が悪くなることがわかった。1 平面上にシールを貼る場合、広い領域に

貼ればそれほど精度は悪化しないことがわかった。

表 6 モンテカルロ法によるずれ評価 (1 回変換)

合成 シール 数	シール の 配置	dx (mm)		dy (mm)		dz (mm)	
		dx 平均	標準 偏差	dy 平均	標準 偏差	dz 平均	標準 偏差
3	1 直線	0.12	0.54	2.62	11.68	2.62	11.66
	円周上	0.13	2.79	0.20	4.80	0.92	5.33
	広く	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05
4	1 直線	0.05	0.09	0.67	1.69	0.67	1.70
	円周上	0.02	0.03	0.02	0.03	0.14	0.23
	広く	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04

3.6 測定可能範囲 (角度)

図 1 1 は直径 45mm の円筒の測定可能範囲を評価した図である。2 台のカメラを結ぶ方向を横方向、その垂直方向を縦方向として、1 回での測定可能範囲は、横方向の計測可能範囲 θ が約 118.4° 、縦方向の計測可能範囲 ϕ が約 138.6° であった。縦方向の方が測定範囲は広いので、測定方向としては効率的であることがわかった。

また、計算上はどの程度の測定範囲になるか考察した。

図 1 2 の角度 α を利用し計算すると、 $\cos \phi \cdot \cos(\theta + \alpha) = \text{定数}$ の関係がある。カメラ視線方向が測定面の法線方向から 75° まで測定できるとすると、計算では横方向 117.6° 、縦方向 145.6° となり、実験とほぼ一致した。

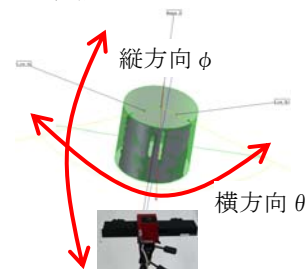


図 1 1 計測可能範囲 (実験)

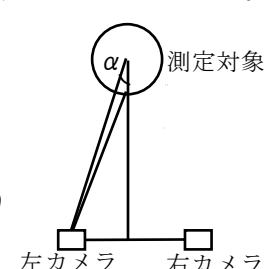


図 1 2 計測可能範囲 (計算)

4. 結び

当所で保有する三次元デジタイザについて、実際の測定条件を考慮した測定精度を調べた。つなぎ合わせによる測定精度については、実際の測定とモンテカルロ法とにより評価した。また、効率的な計測方向を調べた。今回の結果を活用し、三次元デジタイザの測定で、精度や特性を意識した計測につながることが期待できる。

文献

- 1) Cox ほか : Uncertainty and Statistical Modeling, Software Support for Metrology Best Practice Guide, 6, 57 (2001)
- 2) 徐剛 : 写真から作る 3 次元コンピュータグラフィックス, P80 (2001), 近代科学社