

樹脂 3D プリンタによる加工物の 2D 面寸法補正に関する考察*

和合 健**、長嶋 宏之***、菊池 貴****、黒須 信吾**

画像式座標測定機を利用して樹脂 3D プリンタで造形したホールプレートの座標測定を行い、得られた結果を用いて 2D 方向の寸法補正を行った。寸法補正は、設計値と造形後の測定値の比率による変形率から逆算して補正量を求める方式とした。得られた変形率の平均値は、熱溶解積層法で 99.84%、光造形法で 99.60%であった。この変形率を利用した補正值により再造形した結果、位置誤差が熱溶解積層法で平均値 8.52 μm 、光造形法で平均値 27.89 μm となり、位置誤差が初回造形時と比較して 1/5 に低減し、補正の効果を確認できた。

キーワード：樹脂 3D プリンタ、寸法補正、位置誤差、ホールプレート、2D 加工物

Size correction on X–Y plane for work -pieces made with resin 3D printer

TAKESHI Wago, HIROYUKI Nagashima, TAKASHI Kikuchi and SHINGO Kurosu

The coordinates of hole-plates prepared with a resin 3D printer are measured by a coordinate measuring machine using image processing. Two-dimensional correction of the measured coordinates of the hole plates performed on the X-Y plane of the hole plate. For this purpose, the correction amount is back-calculated from the deformation ratios of the measured coordinates after the first printing of the hole plate by using the design value of the resin 3D printer. The average deformation ratio is 99.84% in fused deposition modeling (FDM) and 99.60% in laser beam lithography (LBL). Next, after the second printing of the hole plate by using the deformation ratios, the average position error becomes 8.52 μm in FDM and 27.89 μm in LBL. The position errors are thus reduced to one-fifth of those in the first printing and the effect of dimension correction method is confirmed.

key words: Resin 3D printer, Size correction, Position error, Hole plate, 2D work piece

1 緒言

従来の合成樹脂製品製造は、金型を利用した射出成形法により行われていた。射出成形法では、金型離型後に合成樹脂製品寸法が収縮することから、高精度の製品を得るために、収縮分を考慮した金型設計及び成形条件決定などが必要になる。

一方、金型を使用しないで直接的に合成樹脂製品を製造できる 3D プリンタが、現在注目を集めている。さらに 3D スキャナと連携を図るクローズドループエンジニアリングを適用することで、製造物の形状誤差を収束低減化させ、合成樹脂製品を高精度・高能率に製造するこ

とも期待されている。しかしながら、3D プリンタにより製造した合成樹脂製品においても、製造時の寸法精度や紫外線、温度及び湿度などによる経年劣化など、製造技術に関する多くの固有技術がまだ十分に蓄積されていない。そこで、国立研究開発法人産業技術総合研究所を中心に、これらクローズドループエンジニアリングの固有技術を蓄積することを目的としたプロジェクトが進められている。当センターもこれに参加し、共同研究を実施しているが、本報告では、プロジェクトの事務局が示した手順書¹⁾に従って樹脂 3D プリンタで造形器物を製作し、その 2D 方向における寸法補正に取り組んだ結果を

* 平成 28 年度、平成 29 年度 産総研地域連携戦略予算プロジェクト

** 素形材技術部

*** デザイン部

**** 電子情報技術部

示す。

2 実験方法

2-1 造形装置及び製造器物

樹脂 3D プリンタには、熱溶解積層法 (Fused deposition modeling、以下、Fdm と記す) と光造形法 (Laser beam lithography、以下、Lbl と記す) の 2 種を使用した。主な仕様を表 1 に示す。

表 1 造形で使用した 3D プリンタの主な仕様

Equipment	FORTUS 360mc S	NRM-6000
Manufacturer	Stratasys Ltd.	CMET Ltd.
Method	Fused deposition modeling	Laser beam lithography
Plastics	Thermoplastic resin (filler)	Photocurable resin (liquid)
Vertical pitch	0.127 mm / 0.178 mm	0.05 mm / 0.1 mm / 0.15 mm (select)
Maximum modeling range	W 355 × D 254 × H 254 mm	W 610 × D 610 × H 500 mm

それぞれの装置は造形原理が異なり、Lbl は液体状の光硬化性樹脂をスポット径の小さいレーザービームを照射して固化させる方式である。そのため精細ピッチの造形が行えるが、使用する樹脂が限定される。一方、Fdm は繊維状の樹脂を溶解しノズルから吐出して積層させるため、造形能率は低いが ABS 樹脂など汎用樹脂による造形が可能である。ここでの造形時の積層ピッチは Fdm で 0.127mm、Lbl で 0.1mm とした。

造形器物の形状は、X、Y 両方向の 2D の寸法補正を対象にしたため、平板状の製品形状とした。各造形方式で 3 個ずつ製作した器物を図 1 に示す。また図 2 に、造形した器物の設計値を示す。外形寸法は 100×100×5mm であり、X 方向及び Y 方向に 15mm ピッチで φ2mm の貫通穴を全 25 個配置している。

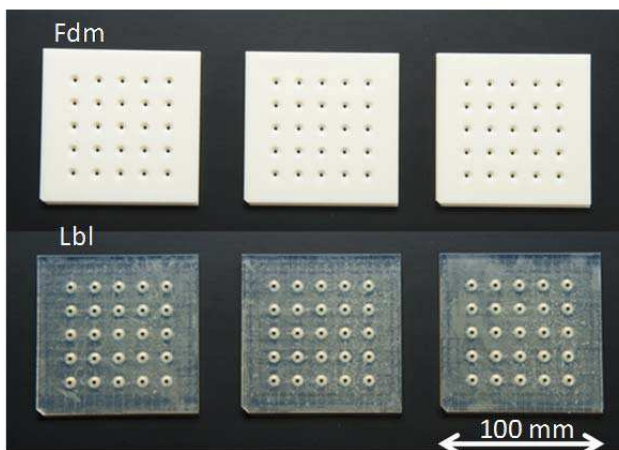


図 1 各 3D プリンタで造形した器物

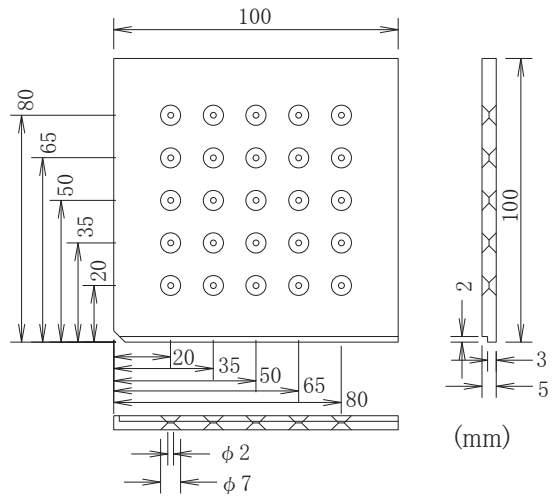


図 2 造形した器物の設計値

2-2 座標測定

造形した器物の穴位置は、画像式座標測定機 (型式: HQV404Pro、メーカー: ミットヨ) を用いて測定した。画像式座標測定機の主な仕様を表 2 に示す。また測定物座標系は図 3 のとおりであり、図中の番号は穴の位置を示している。

表 2 画像式座標測定機の主な仕様

Measurement range	X,Y,Z=400, 400, 250mm
Indicated error (U1)	X,Y axis $(0.8+2L/1000) \mu\text{m}$, Z axis $(3+2L/1000) \mu\text{m}$, (L:length mm)
Indicated error (U2)	X,Y axis $(1.4+3L/1000) \mu\text{m}$
Working distance	34mm
Resolution	2.5 μm (objective lens × 1)
Measurement area	H6.27 × V4.7mm (objective lens × 1)
Total magnification	× 32 (objective lens × 1)

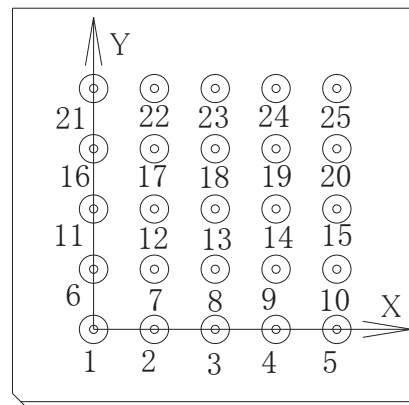


図 3 造形した器物の座標系と穴番号

平板面上に (X, Y) 座標を置き、それに対する法線方向に Z 座標を置いて 2D 空間で平面測定を行い、穴 1 と穴 5 を通る直線を回転軸として回転角を与えた。したがって、X 軸と Y 軸のそれぞれのゼロ点は穴 1 の中心座標であり、Z 軸のゼロ点は平板の中心面、すなわち平板上端の面から -2.5mm の位置に置いている。

穴位置の測定方法は、座標測定器にある円測定コマンドの自動エッジ検出機能を利用し、全周 177 点で最少二乗法での円近似により求めた。また測定誤差を除くために反転法を使用し D0、DX、DY、DZ の 4 姿勢で CNC 自動測定をそれぞれ 1 姿勢あたり 5 回繰り返し、1 器物あたり 20 回測定した。

反転法の 4 姿勢とは、X-Y 軸で形成する直交座標系の第一象限に測定物を置いた姿勢を D0 とし、これを X 軸に対して 180° 回転した姿勢を DX、Y 軸に対して 180° 回転した姿勢を DY、さらに DX を Y 軸に対して 180° 回転した姿勢を DZ とするものである。

3 結果及び考察

3-1 設計値からの誤差

まず、Fdm と Lbl で造形した器物を画像式座標測定機で測定し、それぞれの器物の穴の円中心座標を得る。ここで器物の個体番号を添え字 1、2、3 で表し、Fdm₁、Fdm₂、Fdm₃ 及び Lbl₁、Lbl₂、Lbl₃ とする。

最終的に造形器物 1 個あたり X 軸で 25 個、Y 軸で 25 個の穴の円中心座標値を取得し、誤差倍率を加えた座標値 $g(x, y)$ (mm) を式(1)で算出した。x、y はそれぞれ X 軸および Y 軸上の座標値である。

$$g(x, y) = nom(x, y) + s(x, y) \quad \dots (1)$$

ここで、 $nom(x, y)$ は穴位置の設計値 (mm) であり、また $s(x, y)$ (mm) は穴の誤差を 100 倍した値であり、(2)式で与えられる。

$$s(x, y) = \{meas(x, y) - nom(x, y)\} \times 100 \quad \dots (2)$$

$meas(x, y)$ は穴の位置の測定値 (mm) である。

設計値からの誤差を表 3、穴位置を誤差倍率 100 倍でプロットした結果を図 4、5 に示す。図中の黒点で示した 1st_Mea は初回造形での穴位置の測定値で、Nom は穴位置の設計値である。図 4、5 から Fdm と Lbl の双方とも

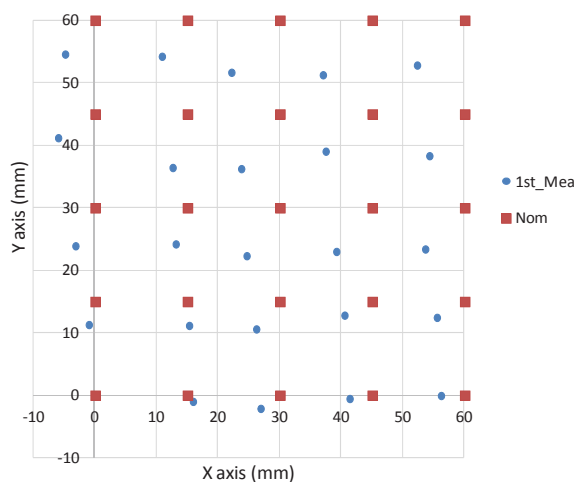


図 4 初回造形の穴位置 (Fdm)

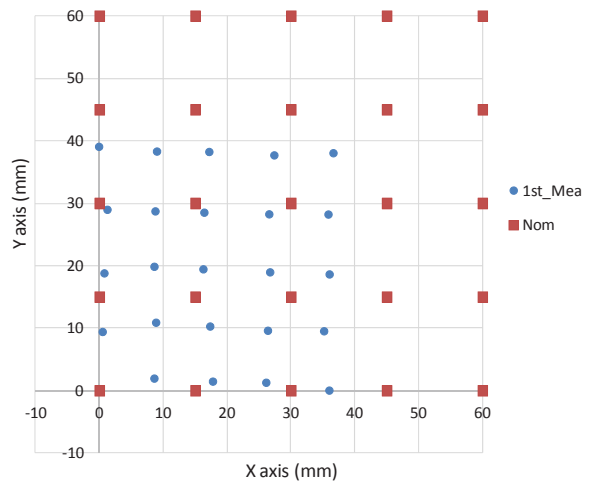


図 5 初回造形の穴位置 (Lbl)

収縮傾向が見られ、収縮の大きさは Lbl の方が大きいことが判る。

表 3 に示した設計値からの差は、造形方法毎に 3 個ずつ製作したものの平均値である。平均値の算出は正/負の符号で誤差値が相殺されないように絶対値を取って求めた。設計値からの誤差は Fdm の方が Lbl より小さく、そのため標準偏差 σ も小さく算出された。

表 3 初回造形時の位置誤差

	μ m	
	X	Y
Fdm1,2,3 (average, n=75)	42.79	56.70
σ (n=150)	27.03	
Lbl1,2,3 (average, n=75)	126.12	113.92
σ (n=150)	84.30	

3-2 補正座標値の算出

3-1 項で得られた設計値からの誤差を用いて造形時の膨張収縮分を見込んだ補正を行うことで、設計値からの誤差を小さくする方策を検討した。その結果、以下の方法で補正できることを見いだした。

まず、初回の造形で穴位置を測定し、その穴位置から設計値に対する変形率を求める。次に、その変形率を利用して再造形を行うと、再造形時に変形率には変形率に従った膨張収縮が生じて設計値に収束する。このことを用いて穴の位置誤差を縮小させる方法。ここで変形率 def (%) は、ある座標 (x, y) での測定値及び設計値を $L_{mea}(x, y)$ 及び $L_{nom}(x, y)$ とすると式(3)、(4)で求められる。

$$L_{mea}(x, y), L_{nom}(x, y) > 0 \text{ の場合} \quad \dots (3)$$

$$def = \frac{L_{mea}(x, y)}{L_{nom}(x, y)} \times 100$$

$$L_{mea}(x, y), L_{nom}(x, y) \leq 0 \text{ の場合} \quad \dots (4)$$

$$def = \frac{\{L_{mea}(x, y) + 1\}}{\{L_{nom}(x, y) + 1\}} \times 100$$

ここで式(4)は、設計値が 0 の場合は計算できないため、0 から 1 の偏りを与えて計算する。

次に補正座標値は、 $L_{comp}(x, y)$ を最終的に求める補正座標 (x, y) とすると式(5)、(6)より求められる。

$$L_{mea}(x, y), L_{nom}(x, y) > 0 \text{ の場合} \quad \dots (5)$$

$$def : 100 = L_{mea}(x, y) : L_{comp} \text{ より}$$

$$L_{comp} = \frac{100 \times L_{mea}(x, y)}{def}$$

$$L_{mea}(x, y), L_{nom}(x, y) \leq 0 \text{ の場合} \quad \dots (6)$$

$$L_{comp} = -1 \times L_{mea}(x, y)$$

式 (5) は比例の計算式により 100%時の座標値を求めるものである。設計値が 0 の場合の対策として、式(6)により 0 を起点に反転する方法としている。

表 4 に、式(3)、(4)により算出した変形率を示す。得られた変形率の平均値は、Fdm で 99.84%、Lbl で 99.60% となった。変形率のばらつきを標準偏差 σ で表した結果、Fdm で 0.972 %、Lbl で 0.447 % となった。Lbl は Fdm より変形率は大きい、ばらつきが小さく、補正精度は高くなると予想される。

表 4 式(3)、(4)より算出した変形率

	%		
	X	Y	
Fdm1,2,3 (average, n=75)	99.88	99.79	
Average (n=150)	99.84		p
σ (n=150)	0.972		
Lbl1,2,3 (average, n=75)	99.58	99.63	
Average (n=150)	99.60		
σ (n=150)	0.447		q
q/p × 100	99.77		

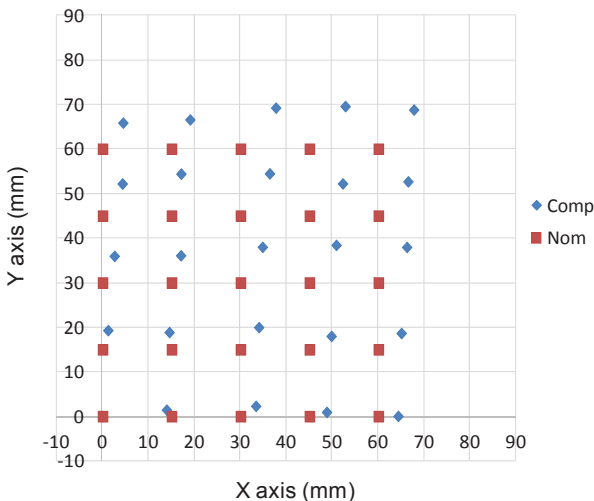


図 6 式(5)、(6)により算出した補正値 (Fdm)

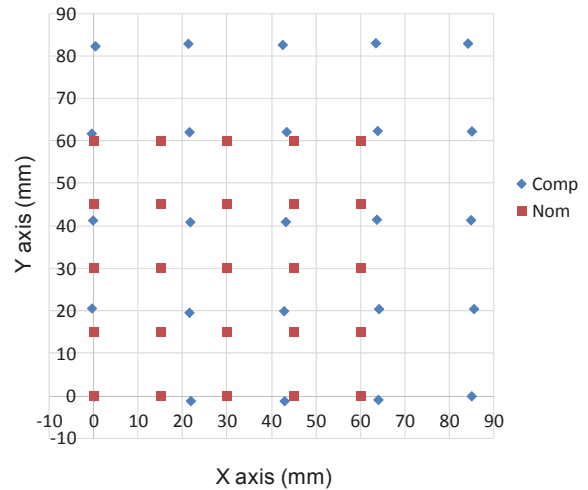


図 7 式(5)、(6)により算出した補正値 (Lbl)

補正値の座標プロットを図6、図7に示す。図中のComp は再造形で使用する補正した穴位置、Nom は穴位置の設計値である。適正な補正が実施されれば、図中の補正した穴位置が造形後に設計値へ収束することが見込まれる。

3-3 再造形の結果

式(3)~(6)で得られた変形率を利用して補正した座標値で 1 個ずつ再造形した結果を図 8、9 に示す。図中の 1st_Mea は初回造形時の穴位置の測定値、2nd_Mea は再造形時の穴位置の測定値、Nom は穴位置の設計値である。造形条件は初回造形時と同様としている。その結果、図 8、9 のとおり補正が良く機能し、初回の造形時に比較して再造形時で位置誤差が小さくなっている。

表 5 に位置誤差を示す。位置誤差は Fdm の平均値 8.52 μ m、標準偏差 σ 9.62 μ m、Lbl の平均値 27.89 μ m、標準偏差 σ 15.68 μ m になった。これは、初回造形時の位置誤差と比較して、再造形時の位置誤差が Fdm では 0.17、Lbl では 0.21 になり、位置誤差はほぼ 1/5 に縮小した。

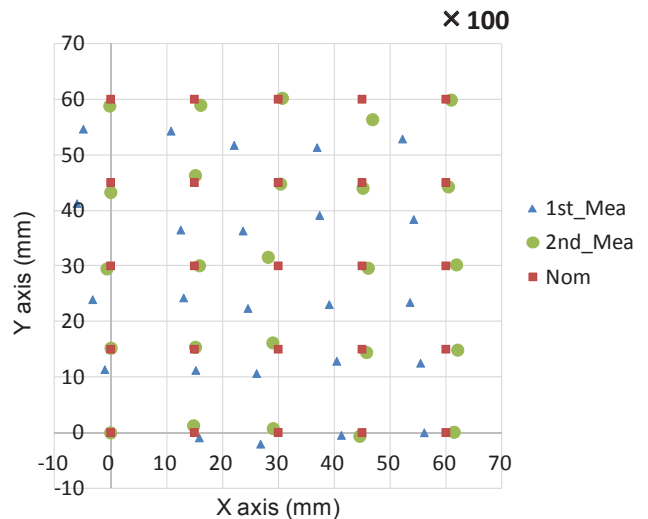


図 8 再造形の穴位置 (Fdm)

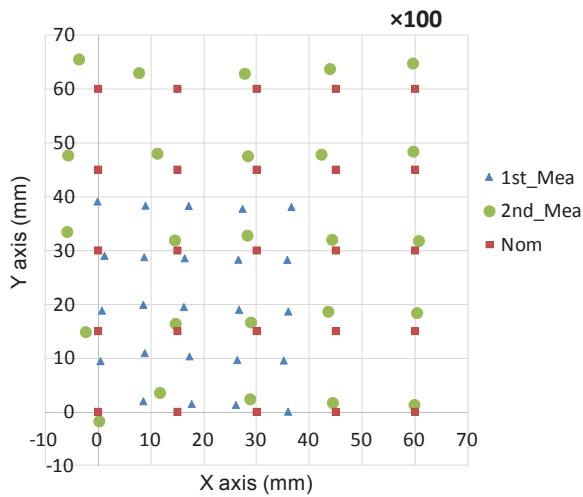


図 9 再造形の穴位置 (Lb1)

表 5 再造形後の位置誤差

	μm	
	X	Y
Fdm1,2 (average, n=50)	8.12	8.52
σ (n=100)	8.39	
Lbl1,2 (average, n=50)	21.55	27.89
σ (n=100)	13.80	

4 結 言

以上の測定結果と考察、および再造形の結果から、次

のような結論を得た

- (1) 熱溶解積層法と光造形法の二種類の樹脂 3D プリンタにより造形した器物の穴位置を比較したところ、設計値からの誤差は熱溶解積層法で $56.70\mu\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma 28.70\mu\text{m}$ 、光造形法は $126.12\mu\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma 83.39\mu\text{m}$ となり、双方とも収縮方向に変形していた。
- (2) 造形した器物の穴位置を設計値に近づけるため、初回造形時に設計値からの変形率を求め、その変形率から逆算して補正量を求める補正式を導いた。ここでの変形率は熱溶解積層法で 99.84% 、光造形法で 99.60% と算出された。この方法では基準座標が 0 の場合は計算できないので、その場合はゼロ点を起点に符号を反転させる簡易な方法をとった。
- (3) 補正を行い再造形した結果、位置誤差は熱溶解積層法では平均値 $8.52\mu\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma 9.62\mu\text{m}$ 、光造形法では平均値 $27.89\mu\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma 15.68\mu\text{m}$ となり、初回造形時の位置誤差と比較すると再造形時の位置誤差は約 $1/5$ に縮小された。

謝 辞

この研究は、産総研地域連携戦略予算プロジェクト「3D 計測エボリューション」(3D プロジェクト)で実施した。本共同研究に携わったすべての研究者に感謝する。

文 献

- 1) 3D3 プロジェクト運営協議会：実施ガイドライン地域課題 2 (2016)