

## 研究論文

## 3D スキャナと 3D プリンタの連携による 造形精度の検証及び高精度化

水野優<sup>\*1</sup>、水野和康<sup>\*1</sup>、依田康宏<sup>\*1</sup>

### Inspection and Improvement of Modelling Precision of 3D Printers with the Assistance of 3D Scanners

Yu MIZUNO<sup>\*1</sup>, Kazuyasu MIZUNO<sup>\*1</sup> and Yasuhiro YODA<sup>\*1</sup>

Industrial Research Center<sup>\*1</sup>

3D プリンタで造形した器物を 3D スキャナで測定し、造形精度を検証するとともに、測定結果を 3D プリンタにフィードバックし造形精度の向上を試みた。異なる造形姿勢や、造形エリア内の異なる造形位置で造形した複数の器物を測定したところ、いずれの器物も積層方向の誤差が大きく、造形時の高さ方向の位置が積層方向の倍率誤差に、造形姿勢が各方向の倍率誤差に影響することがわかった。また、測定結果をもとに倍率誤差及び角度誤差を補正して再造形することで、誤差が大きかった積層方向の倍率誤差を軽減することができ、さらに、測定点 1 点ごとの補正を併用することで局所的な偏差も軽減することができた。

#### 1. はじめに

3D プリンタは複雑な三次元曲面を容易に造形できることから、航空宇宙、医療などの次世代産業分野での活用が期待され、試作モデルの形状確認のみならず、高付加価値な加工部品の製造ツールとして注目が集まっている。一方、より幅広い製品で用いられるためには、より高い造形精度を実現する必要がある。3D プリンタの積層ピッチは 0.1 mm 程度であるが、造形精度は必ずしも同程度ではなく、造形器物の大きさや形状によっても変化することが知られている。現状、造形精度を維持するには、サポート材の配置や適切なパラメータ設定など、オペレータのノウハウに負うところが多い。

本研究ではまず、造形エリア内での器物の配置の仕方が造形精度に及ぼす影響を確認するため、造形姿勢や造形位置を変えて造形した複数の器物を 3D スキャナで測定し、測定値と器物の設計値(CAD データ)を比較して検証した。

次に、3D プリンタの造形器物を 3D スキャナで測定した結果を 3D プリンタにフィードバックすることで、造形精度の向上を図った。具体的には、3D スキャナによる測定値と器物の設計値の差を形状偏差とし、これを見込んだ補正データを作成して器物を再造形して、その精度を検証した。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 造形方法

造形には、粉末床溶融結合型の 3D プリンタ(3DSYSTEMS 社 sPro60 HD-HS、最大造形サイズ: 381 × 330 × 457 mm)を使用し、造形材料には、DuraForm PA(PA12)粉体を使用した。積層ピッチは 0.1mm、レーザーのスキャン速度は 12m/s とした。造形器物は産業技術総合研究所地域連携戦略予算プロジェクト研究(3D3 プロジェクト)において提案された器物を用いた。

配置の仕方による造形精度への影響の検証に用いた器物の形状を図 1 に示す。図 2 のように、平面の造形エリアを 4 分割した造形層を高さ方向に 3 層積み重ね、各領域で造形姿勢の異なる 2 個の器物を造形することで、合計 24 個の器物を造形した。造形姿勢は、図 1 に示す球 1~3 の中心を通る面を底面とし、球 1 から見た球 2 を +X 方向とする姿勢 1 を基準に、Y 軸回りに -90° 回転したものを姿勢 2、X 軸回りに 90° 回転したものを姿勢 3、Z 軸回りに 90° 回転したものを姿勢 4 とし、表 1 の組み合わせで造形した。

フィードバック補正による造形精度向上の検証に用いた器物を図 3 に示す。各データ面とそれに平行な各面との距離はいずれも 60 mm である。データ面 B を底面になるように配置し、中実構造と中空構造(壁厚: 2mm)の 2 種類の器物を造形した。

<sup>\*1</sup> 産業技術センター 自動車・機械技術室

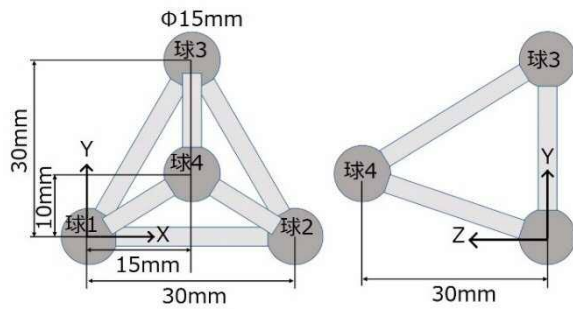


図1 配置による影響の検証用器物  
(座標系は姿勢1のときのもの)

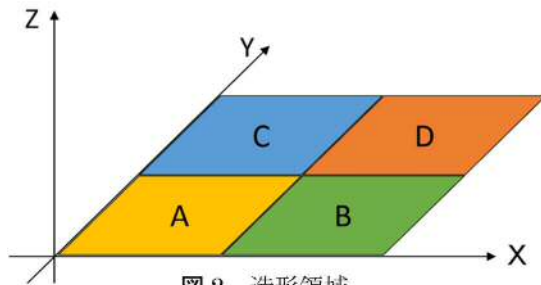


図2 造形領域

表1 造形姿勢の組み合わせ

| 高さ位置    | 姿勢      |
|---------|---------|
| 1層目(下段) | 姿勢1、姿勢2 |
| 2層目(中段) | 姿勢1、姿勢3 |
| 3層目(上段) | 姿勢1、姿勢4 |

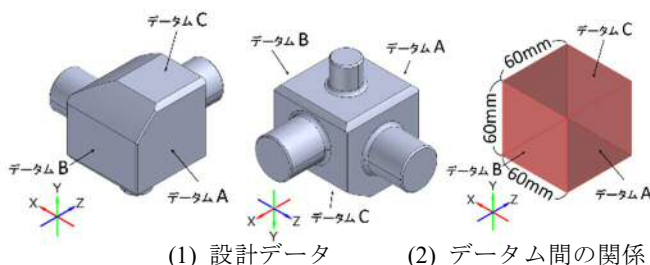


図3 フィードバック補正実験用器物

## 2.2 測定方法

測定には GOM 社 ATOS Triple Scan 16M を使用した。配置による影響の検証用器物(図1)測定では測定範囲 170×130×100 mm、点間ピッチ 0.034 mm、フィー

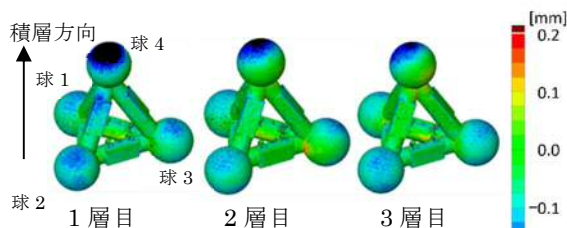


図4 高さ位置による造形誤差の違い  
(姿勢1、領域A、±0.2mm レンジ表示)

ドバック補正実験用器物(図3)の測定では測定範囲 320×240×200 mm、点間ピッチ 0.064 mm とし、いずれの造形器物も2姿勢で測定した。

## 2.3 補正方法

測定結果を 3D プリンタの造形にフィードバックするためのデータ補正方法として、以下の2つを試みた。

- ・方法1: 倍率誤差及び角度誤差から一律に補正
- ・方法2: CAD データからの偏差を測定点ごとに補正

方法1では、図3(2)に示す、データム面A、B、Cとそれらに平行な面からなる立方体の8頂点の座標から、最小二乗法により器物の倍率誤差及び角度誤差を求めた後、CAD データから変換した STL の全ての点に対して倍率と角度の補正を行った。

方法2の補正は以下の手順で実施した。

- ① 方法1と同様の倍率・角度補正を測定データに対して行った STL を作成
- ② ①で作成した STL を CAD データとベストフィット位置合わせして比較し、GOM 社 GOM Inspect で CAD データからの偏差をエクスポート
- ③ 方法1の倍率・角度補正を行った STL から ②の偏差分を引く
- ④ 最後に 3D Systems 社 Geomagic Design X でメッシュ自動修正や穴埋め、スムージング処理を実施

方法2では、CAD データと測定データとを直接比較して偏差分を補正するのではなく、まず方法1により倍率誤差及び角度誤差を補正してから偏差分を補正する手順を採用している。これは、測定点ごとの補正による補正量を小さくし、メッシュ頂点の大幅な移動によるメッシュの交差などを防止するためであり、ベストフィット状態でカラーマップを作成したのも同じ理由である。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 配置の違いによる造形精度への影響の検証

測定データを CAD データと比較した結果を図4、図5に示す。造形時の高さ方向の位置だけが異なる3つの器物の結果を比較した図4では、球4上部のマイナス誤差が下の層ほど大きくなっており、器物を配置する高さによって積層方向(高さ方向)の収縮の大きさに違いが出

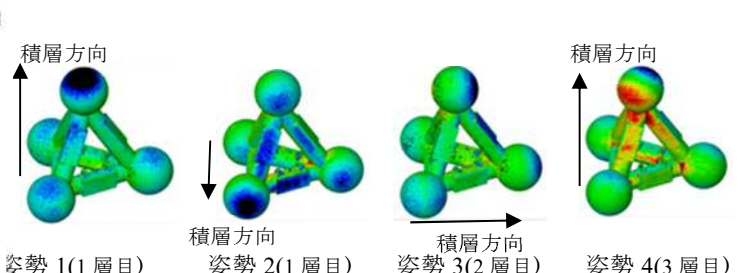


図5 造形姿勢による造形誤差の違い(領域A、±0.2mm レンジ表示)

ている。また、造形姿勢が異なる器物を比較した図 5 では、いずれの造形姿勢においても積層方向が収縮しており、他の方向より誤差が大きくなっている。

造形時の高さ方向の位置や造形姿勢が実際に造形結果に有意な影響を及ぼしているか確認するため、造形した 24 個の器物について、測定した各球の中心座標から各器物の倍率誤差及び角度誤差を求め、分散分析により高さ・姿勢・領域が誤差に影響するかどうか検証した。その結果を表 2 に示す。積層方向の倍率誤差  $\alpha_z$  については高さ方向の位置と造形姿勢が、それ以外の倍率誤差  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$  及び角度誤差  $\theta_{yz}$  については造形姿勢が、それぞれ  $p < 0.05$  となり、有意水準 5% で有意差があるとわかった。

表 2 各変動要因に関する各幾何誤差の p 値

| 要因 | $\alpha_x$ | $\alpha_y$ | $\alpha_z$ | $\theta_{yz}$ | $\theta_{zx}$ | $\theta_{xy}$ |
|----|------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| 高さ | 0.044      | 0.617      | < 0.001    | 0.464         | 0.840         | 0.983         |
| 姿勢 | < 0.001    | < 0.001    | < 0.001    | 0.011         | 0.059         | 0.052         |
| 領域 | 0.614      | 0.079      | 0.792      | 0.562         | 0.924         | 0.981         |

### 3.2 フィードバック補正による造形精度の向上

#### 3.2.1 造形 1 回目(補正なし)の器物の評価

造形した器物を CAD データと比較したカラーマップ(ベストフィット位置合わせしたもの)を図 6 に、立方体

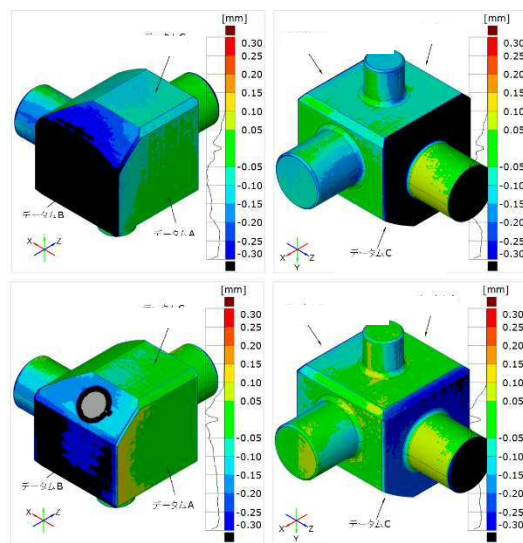


図 6 造形 1 回目(補正なし)の器物の評価  
(上：中実、下：中空)( $\pm 0.3$  mm レンジ表示)

表 3 造形 1 回目(補正なし)の倍率誤差、角度誤差

|      |               | 中実             | 中空             |
|------|---------------|----------------|----------------|
| 倍率誤差 | $\alpha_x$    | 1.0005(+0.05%) | 0.9998(-0.02%) |
|      | $\alpha_y$    | 1.0028(+0.28%) | 1.0011(+0.11%) |
|      | $\alpha_z$    | 1.0149(+1.49%) | 1.0093(+0.93%) |
| 角度誤差 | $\theta_{yz}$ | -0.00100 rad   | 0.00038 rad    |
|      | $\theta_{zx}$ | 0.00036 rad    | -0.00243 rad   |
|      | $\theta_{xy}$ | 0.00010 rad    | 0.00060 rad    |

の 8 頂点から求めた倍率誤差及び角度誤差を表 3 に示す。3.1 の結果と同様、積層方向(Z 方向)が収縮しており、倍率誤差の値から、中実器物ではデータ面 B と 60 mm 離れた面の距離が約 0.9 mm 縮んでいるとわかる。これは造形ピッチの 0.1 mm に比べ明らかに大きい。

中実と中空で誤差の値が異なり、また、前述の通り造形時の高さ方向の位置でも倍率誤差が異なることから、誤差は器物の形状や造形条件で変化することがわかる。この誤差を事前推定することは容易ではないため、造形精度向上のためにはフィードバック補正が有効と考えられる。また、同一面内でも端の方は偏差が大きいなど、偏差が一樣でない部分があり、2.3 に示した方法 1 の倍率・角度補正だけでは偏差が残る箇所があると予想される。

#### 3.2.2 造形 2 回目(方法 1 による補正)の器物の評価

2.3 に示した方法 1 により補正を行い、再造形した器物の CAD データとのカラーマップ偏差を図 7 に、倍率誤差及び角度誤差を表 4 に示す。

倍率誤差が 1% を超えていた積層方向(Z 方向)に関しては、データの修正は有効で、1 回目(補正なし)には約 0.9 mm の偏差があった中実器物のデータ面 B と 60 mm 離れた面の偏差は約 0.07 mm となり、造形ピッチ(0.1

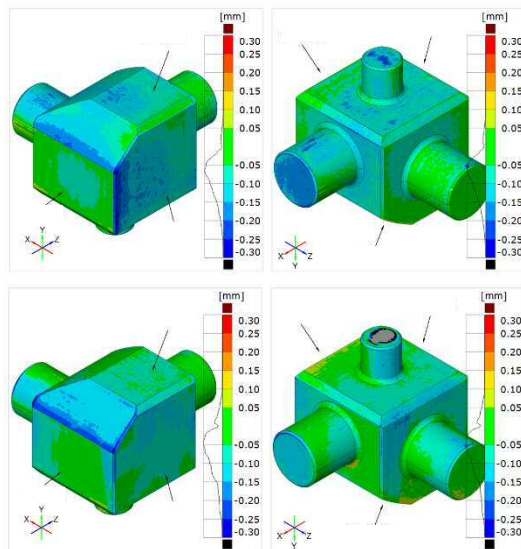


図 7 造形 2 回目(方法 1)の器物の評価  
(上：中実、下：中空)

表 4 造形 2 回目(方法 1)の倍率誤差、角度誤差

|      |               | 中実             | 中空             |
|------|---------------|----------------|----------------|
| 倍率誤差 | $\alpha_x$    | 1.0029(+0.29%) | 1.0018(+0.18%) |
|      | $\alpha_y$    | 1.0029(+0.28%) | 1.0013(+0.13%) |
|      | $\alpha_z$    | 1.0012(+0.12%) | 1.0015(+0.15%) |
| 角度誤差 | $\theta_{yz}$ | 0.00097 rad    | -0.00128 rad   |
|      | $\theta_{zx}$ | -0.00224 rad   | -0.00241 rad   |
|      | $\theta_{xy}$ | 0.00204 rad    | -0.00131 rad   |

mm)と同程度となった。一方、それ以外の方向の倍率修正、角度修正については誤差改善の効果は見られなかった。

また、例えば中実器物のデータ面Aなど、面の端に近い部分などに局所的に大きな偏差が残っているところも見られる。

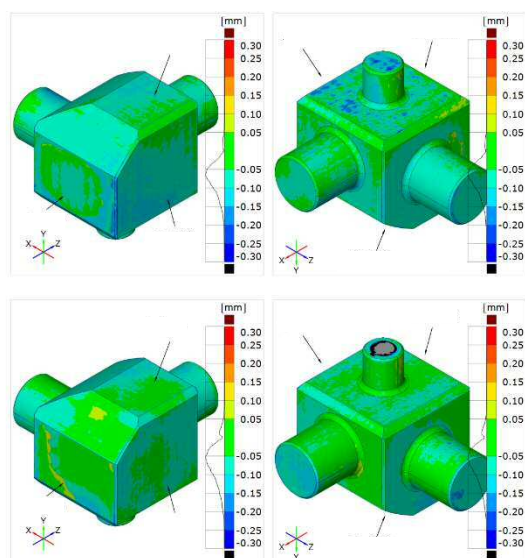


図8 造形2回目(方法2)の器物の評価  
(上：中実、下：中空)

表5 造形2回目(方法2)の倍率誤差、角度誤差

|          |               | 中実             | 中空             |
|----------|---------------|----------------|----------------|
| 倍率<br>誤差 | $\alpha_x$    | 1.0021(+0.21%) | 1.0013(+0.13%) |
|          | $\alpha_y$    | 1.0018(+0.18%) | 1.0013(+0.13%) |
|          | $\alpha_z$    | 1.0018(+0.18%) | 1.0009(+0.09%) |
| 角度<br>誤差 | $\theta_{yz}$ | 0.00164 rad    | 0.00103 rad    |
|          | $\theta_{zx}$ | 0.00109 rad    | 0.00210 rad    |
|          | $\theta_{xy}$ | 0.00127 rad    | 0.00003 rad    |

### 3.2.3 造形2回目(方法2による補正)の器物の評価

方法2により補正した場合の結果を図8、表5に示す。方法1と同様に、積層方向(Z方向)の偏差は1回目(補正なし)と比較して改善し、造形ピッチと同程度となったが、それ以外の誤差については改善効果が見られなかった。

一方、方法1のときに見られた局所的な偏差は小さくなっており、測定点ごとの補正の効果が見られる。

なお、2回目の造形器物では、一部に1回目の造形では見られなかったまだら模様が確認された。これは測定点ごとの補正を行ったために面に凹凸が生じたことが原因と考えられる。

## 4. 結び

3Dプリンタで造形した器物を3Dスキャナで測定して造形精度の検証を行い、また、測定結果を3Dプリンタにフィードバックすることで造形精度の向上を図った。

器物の配置による造形精度への影響を検証したところ、3Dプリンタの積層方向の誤差が大きく、造形時の高さ位置が積層方向の倍率誤差に影響すること、造形姿勢が全ての方向の倍率誤差に影響することがわかった。

フィードバック手法としては、①倍率誤差・角度誤差を補正する手法、②測定点ごとの補正を行う手法、の2つの手法を提案し、いずれの方法においても、誤差が大きかった積層方向の偏差を造形ピッチと同程度まで軽減できることを確認した。測定点ごとの補正を行う手法では、局所的な偏差も軽減することができたが、一部に凹凸のまだら模様が確認された。この凹凸は補正の際のスムージング処理を調整することで軽減できる可能性があると考えられるが、これは今後検討したい。

3Dプリンタには様々な造形方式のものがあるが、今回提案したフィードバック補正の手法は汎用的なものであり、造形方式によらず造形精度を改善し得る手法である。