

# 溶融金属積層と切削加工との連携システムの開発

東京農工大学 ○永松 秀朗 ◎笹原 弘之 光武 祐介 濱元 剛

## 要 旨

ワイヤ材料とアーク放電を用いた溶融金属積層造形では造形物の寸法精度は保障されておらず、造形表面の粗さも数百 $\mu\text{m}$ 以上と大きいため切削加工などの仕上げ加工を施す必要がある。本報告ではまず、SfMによって計測した形状データの精度を調査した。次いでSfMを用いて造形物の形状データを取得し、削り残しや過切削が生じないよう切削加工時の原点を修正するシステムを開発し、削り残しなく切削できることを示した。

## 1. 緒 言

近年、機械部品や金型における複雑形状を迅速に造形し、製造コストの低減や高機能化を可能にするアディティブ・マニュファクチャリング技術への期待が高まっている<sup>1)</sup>。本研究室ではこれまでに、溶接技術で用いられているアーク放電により金属を溶融・固化させる技術に着目し、溶融金属を積層することにより3次元造形を行う溶融金属積層法の実用化に向けた研究に取り組んでいる。本手法は、造形表面の粗さも数百 $\mu\text{m}$ 以上と大きいため、より高精度な機械部品を製造するには溶融金属積層法と切削加工技術を組み合わせ、造形から仕上げ加工まで自動で行うシステムの開発が必要である。造形物を切削加工する際には、削り残しが生じないよう切削加工後の形状は造形物に内包され、かつ過切削が発生しないことが求められる。そこで、造形物の3次元形状をSfM (Structure from Motion) 法を用いて測定し、得られた3次元形状データと設計した3DCADモデルとを比較し、切削時の原点を補正し切削代を最適化するシステムを提案する。

SfMとは、異なる位置から撮られた複数枚の画像のオーバーラップ部から抽出した共通の特徴点と、各カメラの位置姿勢推定点を基に被写体表面の三次元空間上の座標値を算出し、これを用いてピクセル毎の点群データを作成し、メッシュデータを取得する<sup>2)</sup>。溶融金属積層造形物は表面に不規則な凹凸が存在し、これらが特徴点として認識されるため、本手法の造形物のモデリングに適していると判断した。そこで、SfMによって作成した3次元形状データの計測誤差が最小になる測定条件を調査した。次に中空形状の四角錐を造形し、本研究が提案するシステムを用いて仕上げ加工を施した。仕上げ加工面の形状と内部の形状を測定し、本研究が提案するシステムの有効性を評価した。

## 2. 実験方法

図1及び表1使用した撮影装置と撮影条件を示す。測定対象物を回転台の中心に置き、回転台を毎分1回転で回転し、撮影間隔1fpsで俯角の異なる2台のカメラを用いて撮影した。図2に形状測定の対象である溶融金属積層造形物を示す。SfMには商用ソフトウェアのAgisoft PhotoScan Professionalを用いた。SfMで取得した造形物の3次元形状データの寸法は寸法解析ソフトGOM Inspectを用いて測定した。図2に示す5か所の造形物の寸法と、SfMによる三次元データの測定値を比較し、これを寸法誤差とする。

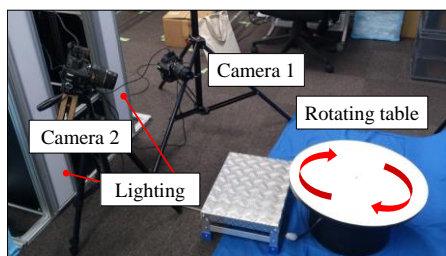


Fig.1 Experimental setup

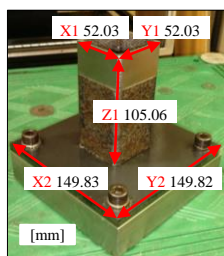
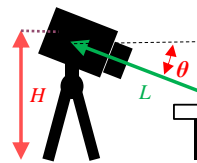


Fig.2 Measured object

Table.1 Photo shooting conditions

	Camera 1	Camera 2
Subject distance $L$ cm	62	85
The height of the camera $H$ cm	87	97
Depression angle $\theta$ °	20	30
Number of shots	30	
F-number	5.6	
Shutter speed sec	1/60	
ISO speed	400	



## 3. SfMによる溶融金属積層造形物の表面形状の計測

実際には、SfMではマーカ(参照点)をいくつか掛け、その実体上のマーカ間の距離と三次元形状データ上のマーカ間の距離が一致するようキャリブレーションを行う必要がある。そこで、このマーカ設置位置と距離、マーカ数が三次元形状データの寸法誤差に与える影響を調査した。図3にマーカO, A, B, C, D, E, Fの設定位置を示す。カメラ1台当たりの撮影枚数は30枚とした。図4より、測定誤差は、O, D, E, Fの4点にマーカを設定するとき最小になった。これよりZ座標が全て異なるマーカ座標を設定すると測定誤差は小さくなることがわかった。

SfMは用いる画像の数が多いほど形状データの精度が高くなるが、一方で解析時間が長くなる。そこで、カメラ1台当たりの撮影枚数に対する寸法誤差と解析時間との関係を調査した。マーカは4点O, E, E, Fとした。図5及び図6にカメラ1台当たりの撮影枚数を15~60枚まで変化させた時の3次元形状データの図2に示す測定誤差と解析時間を示す。寸法誤差はカメラ1台当たりの撮影枚数が20~30枚のとき最小になり、40枚、60枚になると寸法誤差が増加した。撮影画像の解像度は約0.08mm/pixelであり、X1の寸法52.2mmに対して0.15%に相当する。これより40~60枚の寸法誤差増加の傾向は誤差の範囲といえる。解析時間を考慮すると、カメラ1台当たり20~30枚の写真画像を用いるのが最適な測定条件といえる。

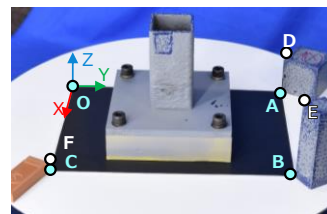


Fig.3 Coordinate setting

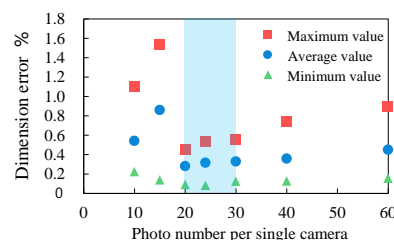
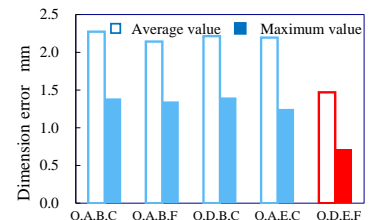


Fig.5 Comparison of inaccuracy

Fig.6 Analysis time

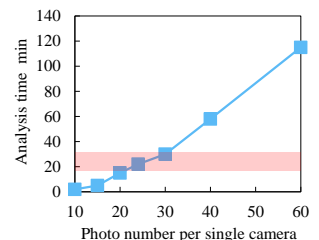


Fig.6 Analysis time

#### 4. 溶融金属積層と切削加工との連携システムの構築

本研究で使用した溶融金属積層装置を図7に示す。テーブル傾斜軸(B軸)と直進軸(X,Y,Z軸)がそれぞれ制御可能である。Z軸に溶接トーチを取り付け、NC制御によって溶接トーチの動きを制御する。底面が一边50mmの正方形で、高さが60mmの四角錐を目標形状とし、仕上げ後の造形物の厚さを2.7mm、削り代の厚さを2.7mmと想定して造形した。図8及び表2に造形した四角錐と造形条件を示す。

次にその造形物をSfMにより図9のように計測・モデリングし、実物との測定誤差を測定した。各側面の名称を同図中に定義する。三次元測定機で造形物の一面につき30か所を測定し、取得した座標データをGOM Inspectに入力する。この実測データをSfMで取得した三次元データと比較することで、実測値と計測データとの誤差が求められる。X軸、Y軸、Z軸方向の誤差の絶対値に対し、その平均値を誤差の代表値とした。図10に測定結果を示す。各面の誤差は0.20mm以内であり、SfMによって求めた三次元データの測定精度は妥当な範囲であるといえる。

次にモデリングの際に定めた造形物の原点を、武藤工業株式会社と共同開発した切削最適化ソフトウェアを用いて、切削後の目標形状が造形物に内包され、切削代が最適化されるよう三軸方向に原点修正を行った。図11(a)のようにX軸方向に81.521mm、Y軸方向に74.455mm自動修正し、造形物輪郭と目標形状をディスプレイ上で確認しながらZ軸方向に44.2mm修正したところ、図11(b)のように目標形状のCADモデルが造形物の三次元データに内包された。これは造形時の造形物中心をX軸方向に1.521mm、Y軸方向に-0.545mm、Z軸方向に2.0mm修正したことに等しい。また三次元データと目標形状を比較することで各側面の厚みの予測値を図15に示す。原点位置の修正後、表面粗さが $10\mu\text{m}$ になるように造形物の側面の上部40mmを切削加工した。切削加工を施した造形物を図12に示す。この造形物の仕上げ面の傾斜角度誤差を三次元測定機により測定した。測定結果を図14に示す。傾斜角度誤差の最大値は後面で $0.25^\circ$ である。三次元測定機は、測定面に対して斜めに接触すると測定点にずれが生じる場合がある。プローブ球の半径は2mmより傾斜角度 $22.6^\circ$ の斜面では0.15mmの誤差が生じるため、最大傾斜角度誤差 $0.25^\circ$ は誤差の範囲に収まる。

次に、造形物の頂点を通る断面で切断した面を図13に示す。造形物は中空であるが肉厚が一定でなく、頂点直下には空洞が確認できる。頂点部はビード間隔が小さく開先角度が狭い。これより溶融アークが開先面に十分入らない状態になるので、開先面が溶融せず融合不良になったと考えられる<sup>3)</sup>。次に四角錐の造形物側面壁の厚みを三次元測定機により測定した。図15に測定結果を示す。予測値と測定値の差は最大で0.67mmであり、原因としては、オーバーハング形状は垂直造形に比べて垂れが大きく、造形物側面壁が想定より厚くなったことが考えられる。また前面と後面との厚みの差が0.205mm、左側面と右側面の厚みの差が0.109mmであった。溶融金属積層造形物の表面は $\pm 0.5\text{mm}$ 程度であるので、許容範囲内に収まっている。これより本システムを用いて切削時の原点の修正した結果、各側面の厚みが均一になるよう仕上げ加工できたため、本研究における溶融金属積層と切削加工の連携システムは有効であるといえる。

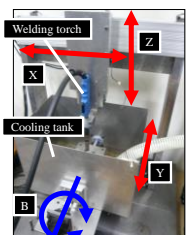


Fig.7 Using Wire and arc-based additive manufacturing machine

Table.2 Experimental conditions

Current <i>I</i>	A	60
Voltage <i>V</i>	V	15
Feed speed <i>F</i>	mm/min	100
Cooling method		Water cooling
Height	mm	60
Number of layers		22
Wire material		Equivalent of SS400
Wire diameter	mm	1.2
Shielding gas	Ar+CO <sub>2</sub>	80%+20%
Shielding gas flow rate	l/min	10



Fig.8 Four-sided pyramid

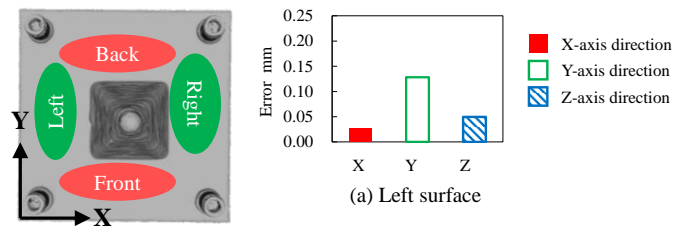


Fig.9 Three-dimensional shape data

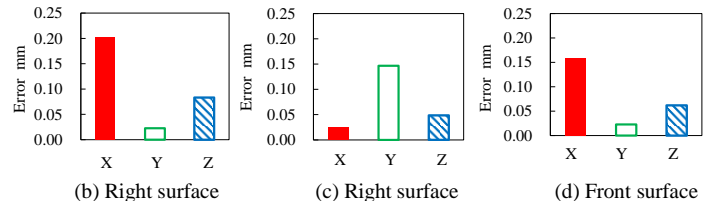


Fig.10 Comparison of inaccuracy

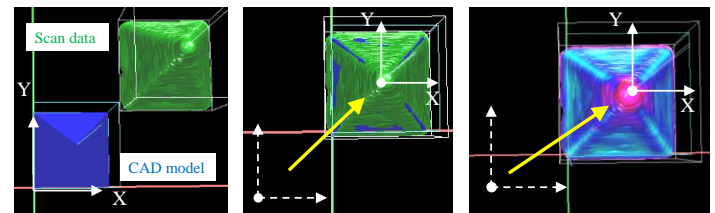


Fig.11 Modify of origin

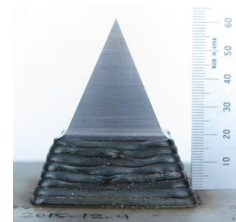


Fig.12 After finish cutting

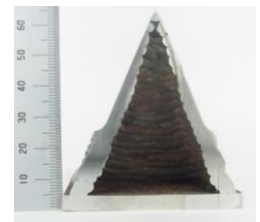


Fig.13 Sectional view

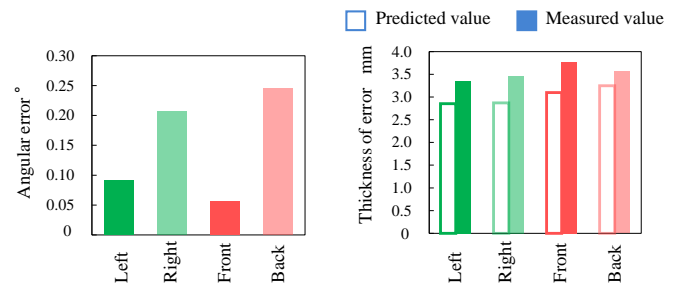


Fig. 14 Angular errors of inclined wall Fig.15 Thickness error of inclined wall

#### 5. 結言

- 1) Z座標がすべて異なるマーカ座標を設定したとき寸法誤差が最小となった。
- 2) カメラ一台あたり20枚以上の写真画像を用いると、寸法誤差が0.2%となった。
- 3) 本手法が提案するシステムを用いて四角錐を仕上げ加工した結果、各面の厚みは均一で、目標通りの形状を得ることができた。

#### 参考文献

- 1) 上岡利人, 阿部壮志, 石川修平, 笹原弘之, アーク放電を用いた溶融金属積層時の溶融池の冷却方法による積層特性への影響, 日本機械学会論文集(C編), 78, 785 (2012), 282-291.
- 2) 味岡収, 渡辺弘行, 画像解析による3次元形状復元についての再考, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2014)791.
- 3) 溶接学会, 溶接技術入門, (1978)150.