

# 3D プリンタ臓器造形モデルの透明化用磨きシステムの開発

竹内 芳美

玉木 良英 (中部大学)、荒木 大輔、香西 達弘 (カツラヤマテクノロジー)

現在、3Dプリンタが試作の迅速化や複雑形状の創成に活用されているが、樹脂や金属粉末を平面基板の上に積層させて作るため、積層ピッチが表面凹凸として残存する。医療用に作成された臓器造形モデルは材料がアクリルであり、表面の段差や凹凸のために患部や血管などが不透明になり、それを医療従事者が人手で磨き仕上げをしているのが現状である。本研究は、臓器造形モデルの磨きの高能率化と自動化を目的とし、そのために小型多関節ロボットによる自動磨き法の研究と臓器造形モデルの保持装置の開発をするとともに、それを用いた透明化技術を研究開発しようとするものである。

## 1. はじめに

近年 3D プリンタは、材料の多種化、価格の低下、さらに複雑な形状を容易に造形可能であることから、ラピッドプロトタイピングをはじめとして多分野で活用されている。特に医療分野では、手術支援のために、透明樹脂で造形した臓器モデルを用いる取り組みが行われている。臓器モデルは、手術方法の検討、手術内容の説明、モデル内部の血管や患部の位置を確認しながら手術を行うために用いられ、より質の高い医療提供が期待されている。

画像処理技術の進歩により、CT や MRI 画像のような 2 次元画像から 3 次元立体形状の臓器モデルを 3D プリンタで造形する技術は確立されている。しかし、表面には、積層造形特有の積層段差が生じており、視覚的な透明度が著しく低下し、内部の血管や患部を見ることができない。そのため、積層造形後には後処理加工が必要となる。現在は、一般的に人手で研磨を行い、図 1 に示すように内部が見える状態まで仕上げている。この研磨作業は大変な時間と労力が必要であり自動化が望まれている。

本研究は、AR-M2 (アクリル樹脂) を対象として、産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化を目指すものである。これを実現するため、産業用ロボットの CAM システムの開発を行った。基礎実験として、研磨時間と表面粗さの関係から研磨条件の検討を行うとともに、開発した CAM を用いた肝臓モデルの研磨を行った結果について報告する。

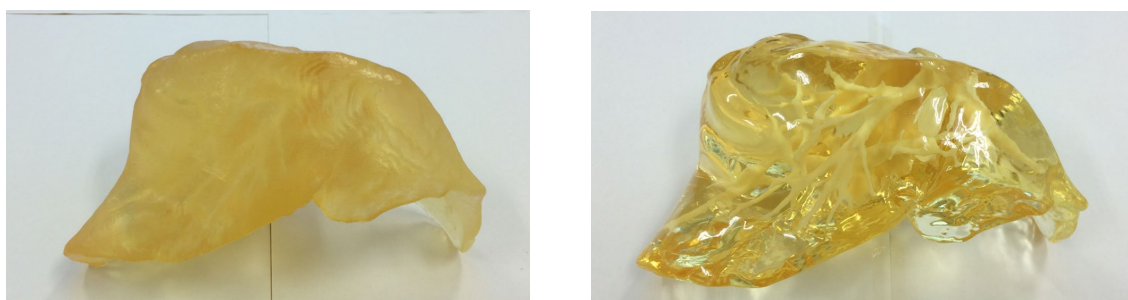


図 1 研磨の前後の肝臓の臓器モデル

## 2. 磨きシステムの構成

図2はシステムの概略である。X線CTスキャンデータから作られた臓器データ（STLデータ）を元に、研究室のCAD/CAM（以下、ChubuCAMと称する）を用いて研磨経路を生成する。研磨経路データは、接続インターフェースであるORiN2を使用してPCからロボットコントローラ（RC8）に転送し、ロボットで研磨を行う。

実験に使用した装置は、デンソーウェーブ（株）の垂直多関節ロボット（VS-060）であり、アーム全長：605mm，最大可搬質量：4kg，位置繰返し精度： $\pm 0.02\text{mm}$ である。6自由度をもつことで、任意の姿勢や位置を取ることが可能である。

ロボット先端には研磨ユニット（エアースピンドル，エアースリンダー，回転研磨工具）を取り付けている。



図2 ロボットによる磨きシステムの構成

## 3. 研磨条件の検討

手磨きでの状況を調べるため、3Dプリンタ（キーエンス：AGILISTA-3100）を用い、材料のアクリル樹脂（AR-M2）を積層ピッチ  $20\mu\text{m}$  で造形した平面を供試材とした。熟練作業者がスポンジ研磨材3種（ $\#120\sim 180$ ， $\#320\sim 600$ ， $\#800\sim 1000$ 相当）を使用し、3段階に分けて研磨したものをそれぞれの研磨後に表面粗さ（Ra）を測定した。測定には小坂研究所のサーフコーダ SE1700を用いた。研磨前は  $10.85\mu\text{mRa}$  であったものが、 $\#120\sim 180$  で研磨後は  $1.45\mu\text{mRa}$  に、 $\#320\sim 600$  で研磨後は  $0.71\mu\text{mRa}$ ， $\#800\sim 1000$  で研磨後は  $0.42\mu\text{mRa}$  であったことから  $0.4\mu\text{mRa}$  程度までにまで仕上げる必要がある。

本研究では、自動磨きのために昨年の研究報告で説明した SAG 工具（半径：5 mm）を研磨工具に使用し、研磨条件のいっそうの検討を行う。手磨きと同様に、まず平面の磨きを行う。図3に示す3種類の SAG 工具（粒径： $40\mu\text{m}$ ， $9\mu\text{m}$ ， $3\mu\text{m}$ ）を使用して最適な研磨条件の検討をする。SAG 工具は、滞留時間が表面粗さに最も影響することが報告されているため、研磨条件は、工具傾斜  $40^\circ$ ，工具回転速度 6090 rpm，工具オフセット 0.4 mm，ピクフィード 0.2 mm とし、送り速度だけを 100，50，25，10，5 mm/s と変化させ、図4に示すように積層段差と垂直に工具を送って研磨を行った。1回の研磨では  $8\times 8\text{mm}^2$  のエリアを研磨する。図5は研磨にかかった時間と表面粗さの関係についてまとめたものである。



図3 SAG 工具（粒径  $40\mu\text{m}$ ， $9\mu\text{m}$ ， $3\mu\text{m}$ ）

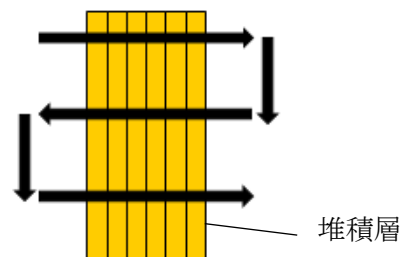


図4 工具経路

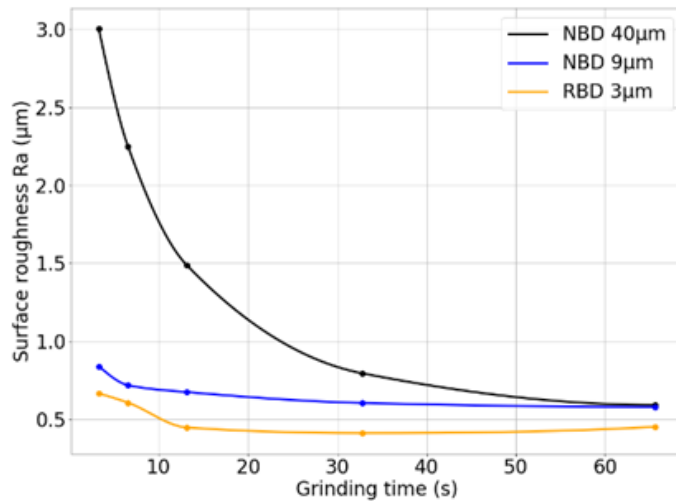


図5 SAG 工具による研磨時間と面粗さの関係

図5から各SAG工具の最適な送りは、NBD 40 μm で 15 mm/s, NBD 9 μm で 50 mm/s, RBD 3 μm で 5 mm/s とした。RBD 3 μm に関しては、25 mm/s より速度を遅くしても Ra は変化していないが、表面の光沢と視覚的な透明度が非常に高いために 5 mm/s とした。

## 4. CAM システムの構築

### 4.1 工具中心点の算出

本研究では、3次元CG技術を利用した逆オフセット法を用いて、工具中心点を算出した。PyOpenGLは、Zバッファ法を用いることで格子状に配置された各ピクセルには最上面の高さ情報が記録され、対応する色で染められるため、陰面消去した画像が描画される。そのため、図6のように、STLの三角ポリゴンの頂点を球に、辺を円筒形に、三角ポリゴンを板形状に置換し、工具半径分だけ膨張した形状を描画し、ピクセル間の点(工具中心点)をつなぐことで磨き工具経路を生成できる。

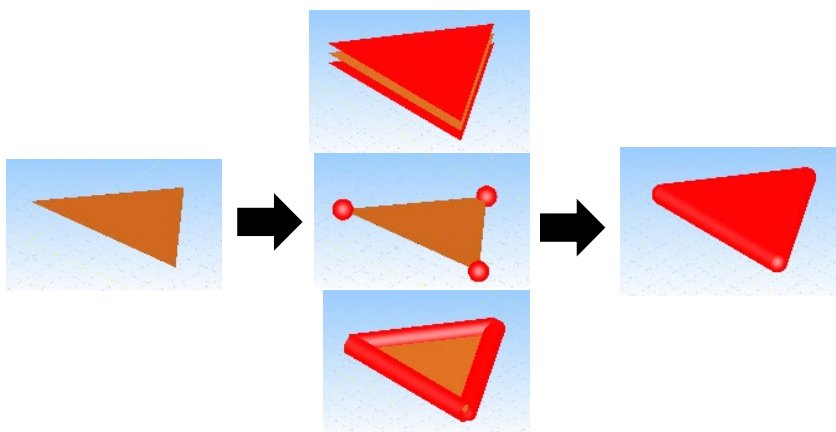


図6 ポリゴン形状の膨張

### 4.2 工具姿勢の決定

一般的に5軸加工を行う際は、工具姿勢を工作物表面に対して一定に保つことで良好な仕上げ面が得られる。しかし、肝臓モデルの表面は細かな凹凸で構成されているため、急な工具姿勢変化の連続となり、現実的な方法ではない。そのため、1本の経路中で干渉、ロボットの可動範囲、工具のデッドポイント(工具傾斜  $0^\circ \leq \theta < 5^\circ$ ,  $90^\circ < \theta$ )の3点を考慮した上で工具姿勢を維持した経路を生成する。そこで、図7のように、2次元C-Spaceを用いて工具姿勢を決定した。最初に $\theta$ が

90° になるまで 3 要素の判定を行い、次に  $\Delta\phi$  回転させ、これを共通の工具姿勢が得られるまで繰り返す。得られなかった場合は全 C-Space で最も多い動作可能点をその経路上の工具姿勢とし、動作不能点を通る場合は最も近い動作可能点をその経路点の工具姿勢とする。

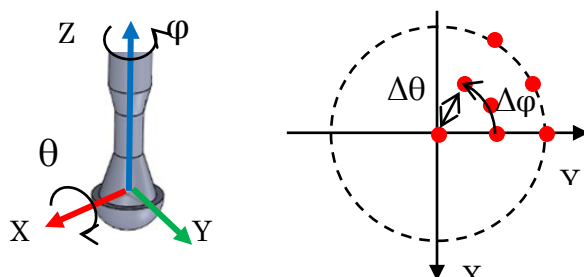


図7 工具姿勢と 2次元 C-Space

## 5. 肝臓モデルへの適応

### 5.1 肝臓モデルの研磨経路生成

開発した CAM システムを用いて、図 8 に示す肝臓モデルに研磨経路を生成した。しかし、この経路だけでは、実際にどれだけの範囲が研磨されるのか、判断するのは困難である。そこで、工具モデルの球部分とモデル間で接触判定を行い、接触点を記録し色付けすることで、図 9 のように視覚的に研磨可能領域が分かるようにした。

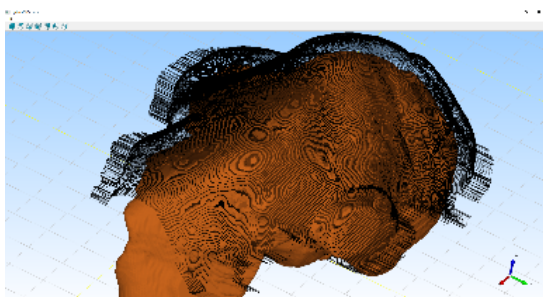


図8 生成された研磨工具経路

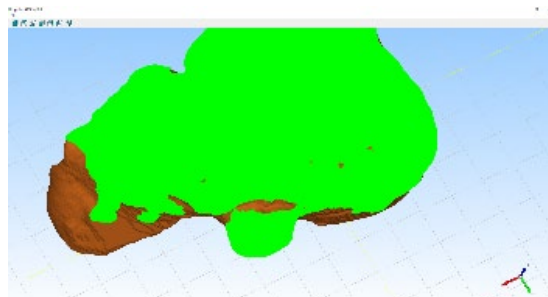


図9 色分けされた研磨領域

### 5.2 研磨実験

肝臓モデルの固定には、野村マイクロ・サイエンス（株）の UMS（アムス）を用いた。この材料は融点が 36° と低いため、湯煎して液体にし、臓器モデルの一部が浸るように固定具に流し込み、冷却硬化させる。その後に研磨を行った。研磨工具は NBD 40  $\mu\text{m}$  を使用し、研磨は工具回転速度 6090 rpm, 工具オフセット 0.3 mm, ピックフィード 0.2 mm, 工具送り速度 15 mm/s の条件下で、Y 軸平行走査線加工で行った。

しかし、UMS は研磨中に徐々に冷却用の水に溶解、加工が 8 割程度終了した時点で、モデルが外れた。研磨前と途中まで研磨を行った肝臓モデルを図 10 に示す。図 10(b)を見ると、システム上で研磨可能領域として表されたうちの一部分しか研磨されていない。これは、ロボットの前方に設置したモデルと CAM 上の原点・位置合わせが上手くいっていないためと考えられる。

研磨前と研磨出来た部分の表面粗さを 3D 形状測定機（キーエンス VR-3200）を用いて測定したところ、研磨前で 12.23  $\mu\text{m}$  であり、研磨後は 1.34  $\mu\text{m}$  となり、表面粗さの向上を確認できた。



(b) 研磨前



(a) NBD 40 $\mu$ m による研磨後

図 10 研磨前後の臓器モデル

## 6. 結 言

- (1) 研磨時間と表面粗さの関係からアクリル樹脂に対する SAG 工具の最適な研磨条件を求めた.
- (2) 開発した CAM システムによって複雑形状である肝臓モデルの研磨経路が生成可能であることが確認できた.
- (3) 経路ごとに、ロボットの可動範囲を超えない範囲で工具姿勢変化を替えないようにし、各径路では適切な姿勢になるような研磨経路を生成して仕上げ作業を可能にするシステムを開発した.

本研究を進めるにあたりご協力を頂いた株式会社デンソーウェーブ，京都大学助教授の Dr. Beaucamp Anthony，名古屋大学准教授の鈴木教和氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) Beaucamp A. et al: Finishing of Additively Manufactured Titanium Alloy by Shape Adaptive Grinding(SAG) , Surface Topography: Metrology and Properties , Vol.3 , No.2 (2015) pp. 024001-1-9
- 2) 乾正知：ポリゴン表現に基づく CAM, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 4 (2003)pp.1048-1052
- 3) 青山一郎，森重功一：カッティング作業における操作性を考慮した産業用ロボットの動作計画, 精密工学会誌, Vol. 75, No. 8 (2009) pp. 1010-1014