

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

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、精度の向上、材料の多種化、価格の低下、操作の容易さから急激に普及し、注目を集めている。特に医学分野では 3D プリンタで透明樹脂を用いて臓器モデルを作成し、手術に利用する試みが行われている。今後、この臓器モデルのコストが低くなれば需要は増加していくことが予想される。臓器モデルは透明樹脂で作成されるが、出力直後はサポート材、積層ピッチの影響で重要な内部の血管や患部を見ることが難しい。そのため、現在は手作業でサンドペーパーを用いて研磨し、その後に透明樹脂を塗布することで仕上げている。3D プリンタに関する研究は盛に行われているが、出力後の後処理に関する研究はほとんど行われていない。実際に手作業による研磨前と研磨後の肝臓モデルを図 1 に示す。この肝臓モデルは原寸大サイズであり作業にかかる時間は約 20 時間である。

そこで、本研究では手作業の研磨に代わり産業用ロボットを用いた自動仕上げシステムの開発を目指す。数多くある臓器モデルの中で最も需要のある肝臓モデルを研磨対象に選定した。本稿では、CAM システムによる曲面を考慮した研磨経路生成、工具選定のための研磨実験の結果を報告する。



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

システムの概略を図 2 に示す。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、研究室内の 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、エアースリンドラ、回転研磨工具) を取り付けている。

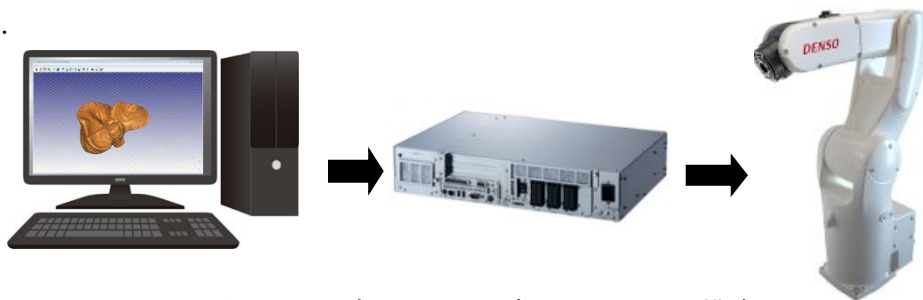


図2 ロボットによる磨きシステムの構成

3. 研磨工具の経路生成

ChubuCAM で対象モデルとの断面を作成し、それに沿って研磨点、法線・接線 (単位ベクトル) を準備し、研磨経路の生成を行う。現在は、研磨工具のピックフィードを常に一定に保つように経路を生成しているため、図3のように傾斜の大きな場所で経路が生成されず、磨き残しが発生しており、その解決が課題となっている。

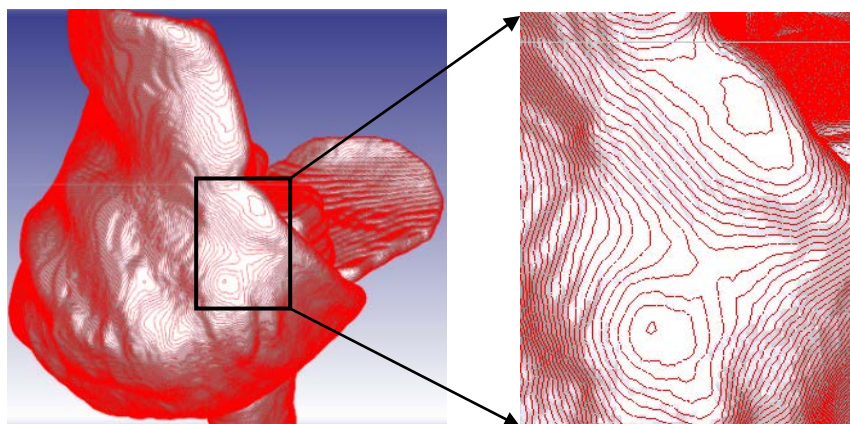


図3 Xに平行な工具経路 (ピックフィード: 0.3mm)

臓器モデルの表面形状に合わせてピックフィードを随時変化させ、工具経路間隔を指定値以下に維持することで磨き残しを防ぐことができると考えられる。平面加工時のピックフィードは法線、接線の外積ベクトルによって決めることができるが、曲面は一律に決めることができない。そのため、今年度の研究では以下の方法でピックフィードを決定している。

1. 平面時と同様に外積ベクトルを用いて仮に次の工具経路を生成する。
2. 1 本目の経路内のすべての研磨点と 2 本目の経路との最短距離を求め、最も大きな値をこの 2 本の経路間隔とする。

- 経路間隔が指定値よりも±10%以上だった場合は2で経路間隔となった研磨点とその接線ベクトルから平面を定義する。次いで、臓器モデルとの交線を求め、経路間隔が指定値と位置する交線上の点を求めることでピックフィードを決定する。

2つの凹凸で構成された自由曲面形状に対して上記の方法で経路生成を行った結果、図4のようになり、工具経路間隔を維持しながら経路の生成が行われていることが確認できる。しかし、臓器に対して行うと1本のパス中に傾斜が垂直に近い場所が多く存在し、ピックフィードが極めて微小になる、経路が複数に分かれるなどの問題もあり、経路生成法を完成するまでには至っていない。

曲面を複数の面に分け、その面に合った加工方法を選択する必要がある。本研究では、X, Y, Zでそれぞれ分割数を指定し格子状に分け、各格子の単位法線ベクトルから面に合った加工経路を決定した¹⁾。格子の法線は格子内の全メッシュの単位法線の平均をとっている。しかし、メッシュの大きさは一定でないため、面積の1番大きいメッシュの法線の大きさを1とし、各法線の大きさは面積に比例させる。得られた単位法線を球座標系に変換し、Z軸からの角度 $\theta(0 \leq \theta \leq \pi)$ 、X軸からの角度 $\varphi(-\pi \leq \varphi \leq \pi)$ で表す。

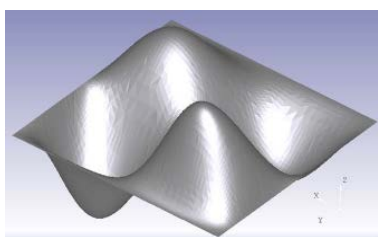
加工パスの選択は以下のようにする。

$$50^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$$

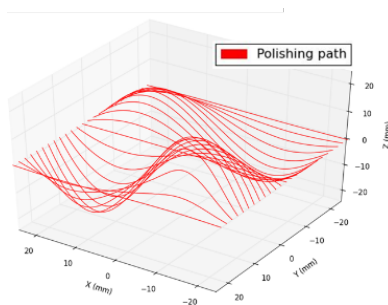
$$\theta < 50^\circ, 130^\circ < \theta \begin{cases} -135^\circ \leq \varphi < -45^\circ, & 45^\circ \leq \varphi < 135^\circ \\ \text{Otherwise} \end{cases}$$

上から順に等高線、Y軸平行走査線、X軸平行走査線の各加工を適応する。

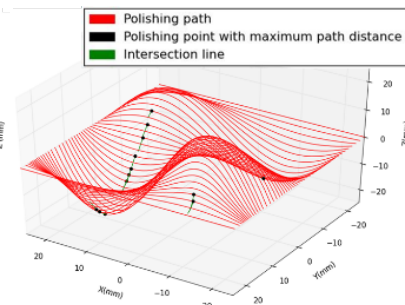
実際に臓器モデルに対して経路生成を行った結果が図5である。分割数はX:70, Y:108, Z:75で行い、このときのモデルサイズは、X=141.0, Y=216.9, Z=149.4mmであった。



(a) 自由曲面の例



(b) ピックフィード 2 mm



(c) 経路スペーシング 2 mm

図4 工具経路生成法の比較

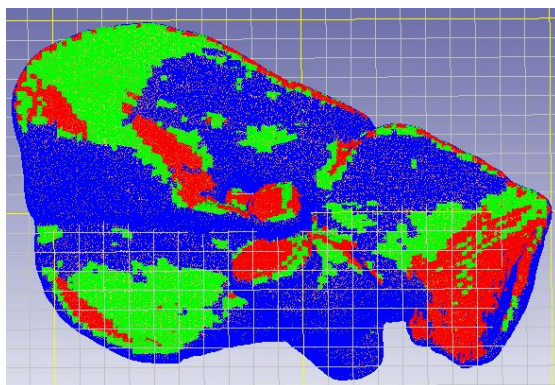


図5 分割による磨き工具経路生成

4. 磨きシステムによる研磨実験

臓器モデルに使用されている透明樹脂（材料：AR-M2）に関する研磨データがないため、複数の研磨工具で研磨を行い適切な工具の選定を行う。図6に示す球面の簡易形状は臓器モデル作成時と同様に、3Dプリンタ（Agillista3100, 材料：AR-M2（透明樹脂），積層ピッチ：20 μ m）で作成した。

研磨実験で最も良好な結果が得られた SAG 工具 (Zeeko Ltd) を用いる。SAG (Shape Adaptive Grinding) 工具は京都大学の Beaucamp 博士らによって開発されたもので、球状弾性工具の表面に、ダイヤモンド砥粒が埋め込まれたニッケルまたは硬い樹脂ペレットを張り付けた工具である²⁾。

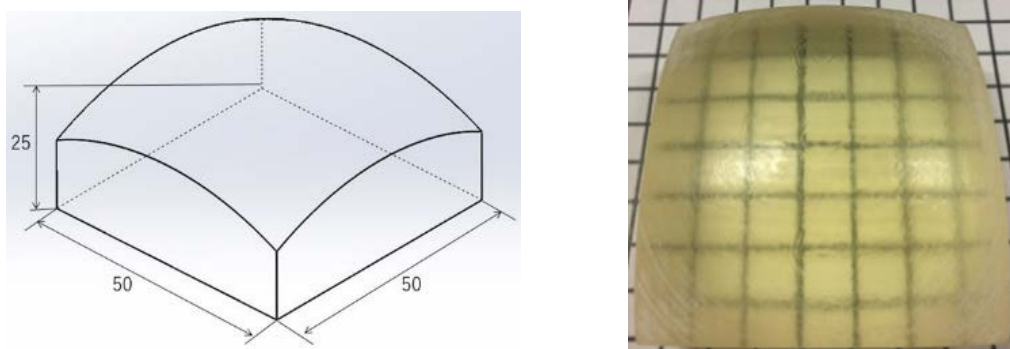


図6 磨き実験のための簡易曲面モデル

研磨は1段階目に SAG NBD (Nickel Bonded Diamond) 9 μ m (図7), 2段階目に SAG RBD (Resin Bonded Diamond) 3 μ m (図8) を用いる。研磨は一つの工具につき X \rightarrow Y \rightarrow X \rightarrow Y 軸走査線加工を行った。研磨条件は2段階とも同じであり、それを表1に示す。1段階目で積層ピッチとサポート材の除去ができているものの、研磨工具の送りマークが残っている。2段階目でその跡を除去できていることが確認できる。表面粗さ (Ra) は 1.67 から 0.30 μ m にまで仕上げることができた。

表1 磨きの条件

Spindle speed	6370 rpm
Depth of cut	0.3 mm
Feed speed	375.6 mm/s
Pick feed	0.3 mm
Angle	20°

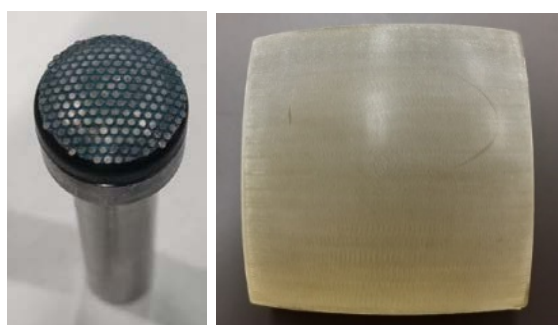


図7 SAG NBD 9 μ m 工具による磨き結果

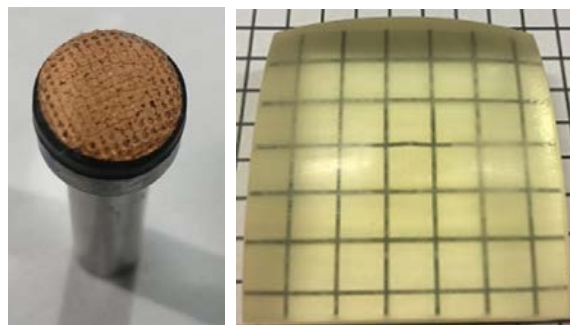


図8 SAG RBD 3 μ m 工具による磨き結果

5. おわりに

工具経路間隔を考慮した経路生成を行い、自由曲面において経路間隔を指定値以下に維持しながら経路生成が可能となった。この結果、曲面を分割して面に合った加工法を適応させることはできたが、研磨エリアが細かくなり過ぎ、今後は同じ加工法毎にエリアをまとめて効果的な磨きを実施する予定である。研磨実験では表面粗さ 0.30 μm まで仕上げることができ、SAG 工具が材料 AR-M2 の研磨に適していることが確認できた。

本研究に多大な協力をしている本学機械工学専攻の玉木良英君に感謝する。

参考文献

- 1) 長瀬重信, 朱疆, 吉岡勇人, 斎藤義夫: 分割領域毎の最適加工パスによる自由曲面加工の効率化, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演論文集 771-772
- 2) Beaucamp, A., Namba, Y., Charlton, P., Jain, S., Graziano, A., 2015, Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG), Surface Topography: Metrology and Properties, 3(2), pp. 024001-8.