

ヘッド固定ステージ可動形プリンティングシステムによる 立体表面への積層造形の検討

Investigation of layered molding on a three-dimensional curved surface
by a fixed head and movable stage type printing system

清田 真子¹, 俵 稜輔², 田沼 千秋³, 田中豊¹

Mako KIYOTA¹, Ryosuke TAWARA², Chiaki TANUMA³, Yutaka TANAKA¹

¹法政大学, ²法政大学院, ³法政大学マイクロナノテクノロジー研究センター

¹Hosei University, ²Graduate School of Engineering and Design, Hosei University,

³Research Center for Micro-Nano Technology, Hosei University

【要約】

材料押出ノズルを固定し造形ステージを可動式にしたプリンティングシステムを用いて、立体曲面への積層造形に成功した。造形ステージは、6自由度の可動を可能にするために、傾斜直動形パラレルメカニズムを用いた。直線移動では、X,Y軸の位置決め精度は1mm以内、それぞれの軸での回転精度は、1°以内に制御した。本報告は、検討に用いた積層造形モデル並びに、造形ステージの位置姿勢の制御精度について述べる。

キーワード: 積層造形, 3Dプリンティング, パラレルメカニズム, 位置決め精度, MEX

【Abstract】

Using a printing system with a fixed material extrusion nozzle and a movable modeling stage, we succeeded in layered modeling on a three-dimensional curved surface. The modeling stage uses a slant direct drive parallel mechanism to enable movement with 6 degrees of freedom. In linear movement, the positioning accuracy of the X and Y axes was controlled to 1 mm or less, and the rotation accuracy on each axis was controlled to 1° or less. This report describes the additive manufacturing model used in the study and the control accuracy of the position and orientation of the modeling stage.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, parallel kinematic mechanism, positioning accuracy, MEX

1. 緒言

積層造形法(Additive Manufacturing: AM)は、3Dモデルデータに基づいて、材料を1層ずつ積み重ねて3次元の構造物を製作する製造プロセスである。積層造形法は鋳造や切削加工などの製造工程と比べ、低コストでより複雑な形状を製作することが可能であり、今後の発展が期待される技術である[1]。

近年、ロボットマニピュレータを用いて、造形用ヘッド、あるいはステージを多自由度で可動させる方式が提案されている。Chengkaiらはシリアルメカニズムを用いて造形ステージを多自由度で可動させ、平面ステージ上に複雑な構造物を積層造形している[2]。回転方向の可動範囲が加わることで、積層方向を変化させながら造形することが可能であり、複雑な形状の積層造形を実現することが出来る。

本研究では、傾斜直動案内形パラレルメカニズム[3]を用いて立体物を載せたステージを多自由度で可動させ、ステージ上部に固定されたMEX(Material Extrusion)方式の造形用ヘッドにより、立体表面上に沿って積層造形を行うプリンティングシステムを提案した[4]。パラレルメカニズムはシリアルメカニズムに比べて

剛性が高く、高精度に造形が出来ると考えられる。これまで可動機構に用いた傾斜直動形パラレルメカニズムによる造形ステージの可動範囲及び、位置決め精度を検証した[5]。本報告では本プリンティングシステムを用いて曲面に沿って積層造形を行った結果並びに可動ステージの位置姿勢の制御精度について報告する。

2. プリンティングシステム

図1に本研究で提案したプリンティングシステムの構成図を示す。造形ステージはパラレルメカニズムによって6自由度で可動し、MEX(Material Extrusion)方式の造形用ヘッドは上部のフレームに固定され、直径1.75mmの樹脂フィラメントを230℃~240℃の温度で溶解して押し出した材料を積層し立体を造形する。フィラメントの直径を0.3mm~0.35mmで安定して吐出するため押出速度は1.97mm/sとした。

造形ステージの座標系はステージ面をX-Y平面とし、垂直高さ方向をZとする。造形開始時には造形ステージの水平を保つため、キャリブレーションを行い、キャリブレーション後のステージ中心位置をこの座標系の原点である造形原点とする。造形原点はベースから613

mm の高さであり、すべての動作の開始位置である。

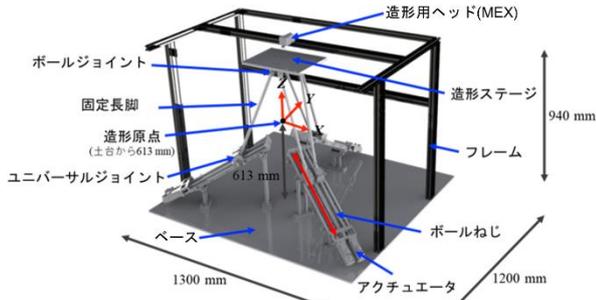


図 1. プリンティングシステム構成図

3. パラレルメカニズム

3.1 パラレルメカニズムの構成

図 2 に傾斜直動形 6 脚パラレルメカニズムの構成模式図を示す。造形ステージはボールジョイントを介して 6 本の固定長の脚によって支持され、それぞれの固定長脚はユニバーサルジョイントによってアクチュエータに固定される。さらにこれら 6 つのアクチュエータは傾斜角度 30° の案内ガイド上を直線駆動する。これらの機構から、造形ステージは 6 自由度で運動する。造形ステージの大きさは長辺が 350 mm、短辺が 260 mm の長方形で、固定長脚の長さは 500 mm である。

造形ステージ中心の X, Y, Z 座標とそれぞれの軸周りの回転角度によって表されるステージの姿勢情報を MATLAB/Simulink を用いて自作した動作シミュレータの逆運動学計算により 6 つのアクチュエータの駆動量に変換する。さらに求めた駆動量を G-code の形式に変換し、これを指令として与えることでパラレルメカニズムを制御する。

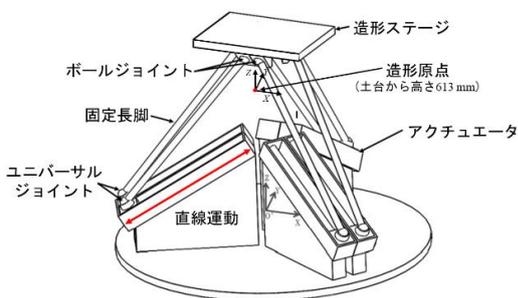


図 2. パラレルメカニズムの構成模式図

3.2 可動範囲

造形ステージの直線運動時のステージ中心の可動範囲を測定した。可動範囲は MATLAB/Simulink を用いてシミュレーションを行った後、実機においても可動可能であることを確認した。測定は、実際に造形を行う高さである $Z = 30 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$ の範囲で行った。図 3 に測定した可動範囲を示す。

ボールジョイントの可動制限は $\pm 30^\circ$ 、ユニバーサルジョイントの可動制限は $\pm 90^\circ$ であり、これらのジョイ

ンの制限からステージの可動範囲が決定する。加えて、Z 軸方向の可動範囲は上部に固定した造形ヘッドの高さによっても制限される。

可動範囲はステージ高さが高いほど広がった円錐台が積み重なったような領域となり、 $Z = 150 \text{ mm}$ の高さで最大半径 160 mm の円領域が得られた。

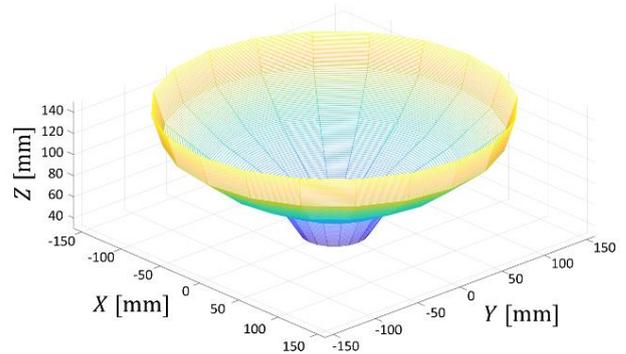


図 3. 造形ステージ中心の可動範囲

同様に MATLAB/Simulink を用いて、造形ステージの回転範囲を求めた。回転範囲は高さ $Z = 30 \text{ mm}, 60 \text{ mm}, 90 \text{ mm}, 120 \text{ mm}, 150 \text{ mm}$ の位置でそれぞれ測定した。回転範囲も同様に、ボールジョイント及び、ユニバーサルジョイントによる可動制限によって決定する。図 4 に高さ $Z = 150 \text{ mm}$ における造形ステージの回転範囲を示す。

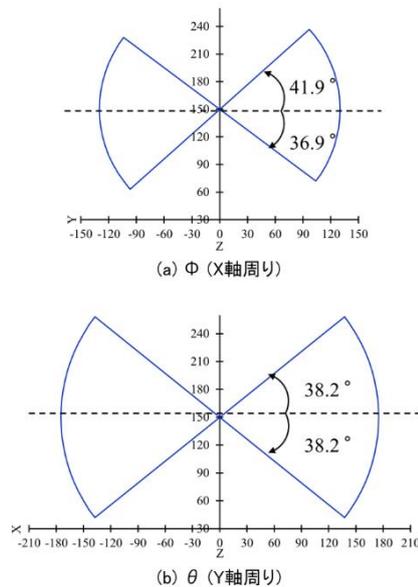


図 4. 造形ステージの回転範囲 ($Z = 150 \text{ mm}$)

造形ステージを、X 軸を中心軸として回転させた場合、高さ Z が 150 mm の地点で回転角度が最大となり、正回転時は 41.9° 、負回転時は 36.9° であった。Y 軸を中心軸として回転させた場合も同様に、高さ Z が 150 mm の地点で回転角度が最大となり、正回転時、負回転時ともに 38.2° であった。X 軸を回転の中心軸と

した場合、正回転と負回転で回転可能な角度が異なるが、Y 軸を中心軸とした場合では正回転と負回転で回転可能な角度に差は見られなかった。これはアクチュエータが X 軸に非線対称に配置され、Y 軸には線対称に配置されているパラレルメカニズムの構造に起因していると考えられる。

3.3 位置決め精度

レーザ変位計及び傾斜センサを用いてパラレルメカニズムの位置決め精度を測定した。変位計から照射されたレーザビームを造形ステージ上に固定されたアルミ製ターゲットによって反射させ、その変位を計測する。

まず X, Y 軸方向にステージを直線移動させた時の精度を測定した。高さ Z = 150 mm 地点においてそれぞれの軸方向に可動範囲限界まで 10 mm ずつ移動し測定した。図 5 に測定結果を示す。

測定の結果、移動量が増えるほどズレが大きくなり、X 軸に比べて Y 軸におけるズレが大きくなった。また X 軸においては正方向にズレが生じ、移動量が大きくなり、Y 軸においては負方向にズレが生じ、移動量が小さくなる傾向が見られた。

造形実験は X, Y 軸方向に±38 mm 以内、Z 軸方向に 135 mm~145 mm の範囲で造形する。この範囲における位置決め精度は測定結果から 1 mm 以内のズレであった。

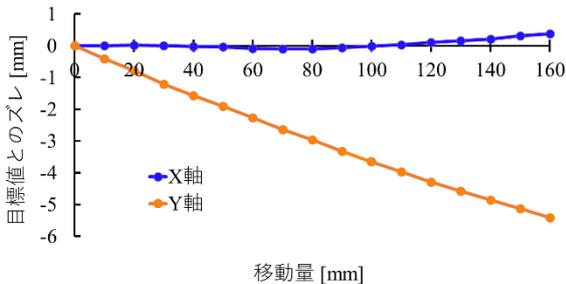


図 5. 造形ステージ位置決め精度測定結果 (X, Y 軸)

次に Z 軸方向に造形ステージを 150 mm 地点まで直線移動させた時の位置決め精度を測定した。図 6 に測定結果を示す。

測定の結果、移動量が大きくなる程ズレが大きくなり、最大で 3.5 mm のズレが生じた。造形時には、測定結果から得られた位置決め精度のズレを考慮して補正を行う。

次に X 軸, Y 軸周りに造形ステージを回転させた時の回転精度を測定した。高さ Z = 150 mm 地点においてそれぞれの軸周りに -15° から 15° まで回転させ、5° 毎に測定した。図 7 に測定結果を示す。

測定の結果、X 軸, Y 軸周りともにズレは 1° 以内であった。また X 軸周りの回転では回転方向と反対方向にズレが生じ、Y 軸周りでは回転方向と同方向に誤差が生じ、それぞれの軸周りにおいて対照的なズレの傾向が見られた。

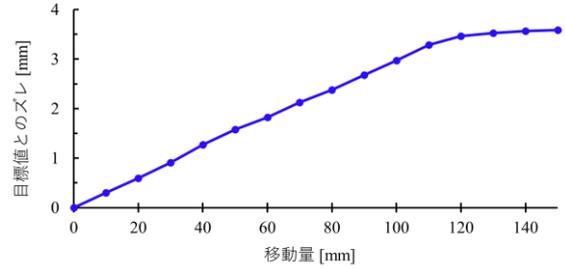


図 6 造形ステージ位置決め精度測定結果 (Z 軸)

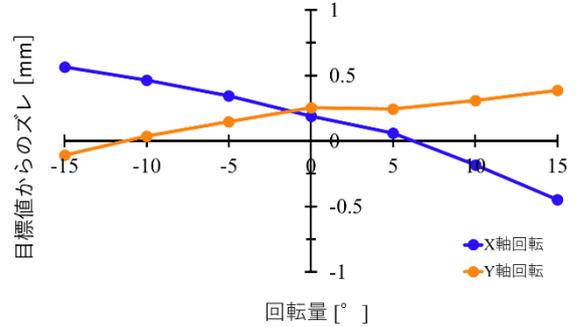


図 7. 造形ステージ回転精度測定結果

4. 造形実験

プリンティングシステムを用いて、立体曲面への積層造形実験を行った。曲面を含む土台上に球冠形状のメッシュ構造物を造形した。土台は半径 37.4 mm、高さ 60 mm の円柱上部に、半径 75 mm の球体を上部から 10 mm の地点で切り取った球欠を乗せた立体形状である。造形したメッシュ構造は半径 37.4 mm のフレーム部分と、球面に沿った縦横 19 本ずつのワイヤによるメッシュ部分から構成されている。またメッシュの間隔は 4 mm とする。図 8 に土台の寸法、図 9 に造形物の模式図を示す。

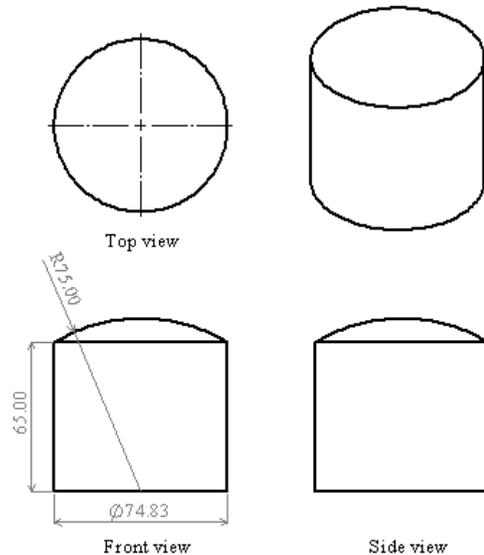


図 8. 造形用土台の寸法図

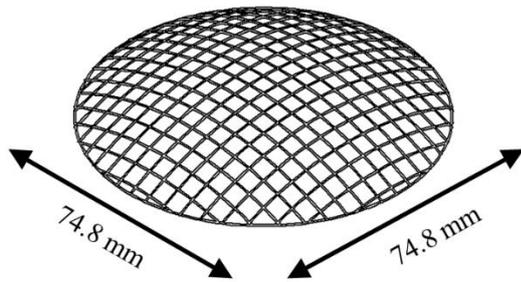


図 9. メッシュ構造の模式図

フレーム部分は造形ステージを 15000 pulse/sec の速度で制御し、正 20 角形の近似円を造形する。メッシュ部分はステージを 20000 pulse/sec の速度で制御し、造形ステージの必要回転角度は、フレームの半径 r_m と造形土台の球欠半径 r_t から求めることができる。メッシュの間隔を m , n 本目のワイヤとフレームの交点座標を C_n とするとワイヤの弦の長さ L_n は式(1)から求めることができる。またそれぞれのワイヤの半径 R_n は式(2)から求めることができる。

$$L_n = 2\sqrt{r_m^2 - C_n^2} \quad (1)$$

$$R_n = \sqrt{r_t^2 - C_n^2} \quad (2)$$

これらの式から求めた L_n と R_n の値から式(3)によって造形ステージの必要回転角度 θ_n が導かれる。

$$\theta_n = \sin^{-1}(L_n/2R_n) \quad (3)$$

造形時の回転角度 θ_n は $-28.5^\circ \sim 28.5^\circ$ とした。実際に造形した結果を図 10 に示す。造形の結果、フレーム部分が実際の目標サイズよりも 1 mm ほど小さく造形された。また、メッシュ部分ではフィラメントにうねりのある箇所が見られ、吐出量が安定していないことがわかった。

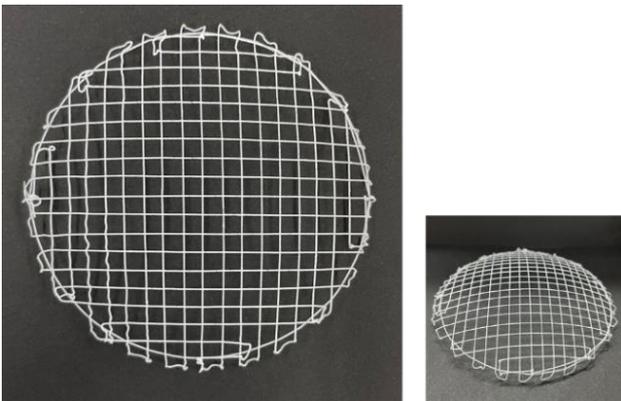


図 10. メッシュ構造の造形結果

また、フィラメントの間隔を 5 つの地点で測定し、評価を行った。図 11 に測定点と結果を示す。

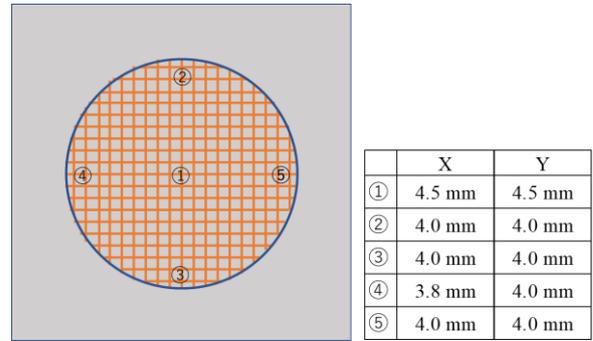


図 11. フィラメント間隔の測定地点と結果

測定の結果、外側の測定点②～⑤ではおおよそ 4 mm の間隔であり、目標通りに造形できた。一方で、中心の測定点①では 0.5 mm ほど誤差があった。

5. 結言

傾斜直動案内形平行メカニズムを用いて立体物を載せたステージを多自由度で可動させ、ステージ上部に固定された積層造形ヘッドにより、立体表面上に沿って積層造形を行うプリンティングシステムを提案した。また、可動機構である平行メカニズムの可動範囲及び、位置決め精度の測定結果を示した。加えて曲面上に球冠形状のメッシュ構造物を造形した結果について報告した。造形精度には課題が残り、造形精度を高めるために、平行メカニズムの精度の検証や造形プログラムの調整が必要となる。

本研究の一部は関東経済産業局の平成 27 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「工業製品製造に適した革新的な多次元制御方式による 3D プリンタの技術開発」による補助支援を受けて行われた。関係者に謝意を表す。

参考文献

1. T. Igarashi, "Additive Manufacturing," Seikei-Kakou, **28**(7), pp. 288-294, (2016).
2. Chengkai, D., Charlie, C.L., Wang, C., Wu, S.L., Guoxin, F., and Liu, Y., "Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion," ACM Transactions on Graphics, **37**(4), (2018).
3. J. Yamada, G. Minorikawa, Y. Tanaka, C. Tanuma, "Design and prototyping of parallel mechanism for fixed head type 3DPrinter," The Japan Society of Mechanical Engineers, (2017).
4. R. Tawara, Y. Inoue, H. Nakazima, C. Tanuma, Y. Tanaka, "Development of Additive Manufacturing Method by Slant Direct Drive Parallel Mechanism," JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2A1-D07, pp.1-3, (2021).
5. R. Tawara, M. Tono, Y. Iguchi, C. Tanuma, Y. Tanaka, "Evaluation of Positioning Accuracy for Additive Printing System Using Parallel Mechanism," Proceedings of JSPE Semestrial Meeting, (2022).