

造形時の姿勢と射出量の速度を考慮した 3D プリンティングロボット に関する研究

A Study on 3D Printing Robot Considering Posture and Speed of Injection Volume during Modeling

○高山 司希^{*1}, 平沢 岳人^{*2}, 中村 優介^{*3}, 中尾 洋祐^{*1}

○Hiroki TAKAYAMA^{*1}, Gakuhiro HIRASAWA^{*2}, Yuusuke NAKAMURA^{*3}, Yousuke NAKAO^{*1}

*1 千葉大学大学院 融合理工学府 博士前期課程

Graduate Student, Graduate School of Sci. and Eng., Chiba University.

*2 千葉大学工学研究院 教授

Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University

*3 千葉大学工学研究院 助教/講師

Research Associate and Lecture, Graduate School of Engineering, Chiba University

キーワード：3D プリンター, ロボット加工, 機械制御, 六軸加工機, 建築生産, 部材加工

Keywords: 3D Printers, Robot Machining, Machine Control, Six-axis Machining planning, Building Production, Parts Machining

1. はじめに

1.1. 研究背景

昨今、問題となっている職人不足、材料消費、施工時間の最小化などに対処すべく、建築現場において様々なロボット技術が導入されている。ロボットによる 3D プリント技術もその一つである。3D プリンターは、建設業において複雑な曲面などデザイン性の高い形状を製造できるだけでなく、材料を現地に運ぶだけで済み、建設時の CO2 排出量の削減や、自動化施工による省人化などの効果が期待されるため、構造物の部材や小規模な建築物の製作に利用する事例が増えている。現在、多くの場面で用いられている 3D プリンターは三軸動作による積層方式採用している(図 1)。三軸積層方式は、移動軸が x y z の三軸で構成されており、材料を真下方向に射出し平面を作り出す。そのプリンター方向に積層することで立体物を作り出すという仕組みである。しかし、材料を真下方向に射出していくため、オーバーハングした形状または宙に浮いたような形状に対しては、造形時にサポート材と呼ばれる型枠の役割を果たす材料を同時に造形していく必要がある(図 2)。材料消費や造形時間の点で課題があり、さらに表現出来る形

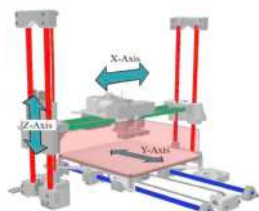


図 1 三軸積層方式



図 2 サポート材でのプリント

状に制約があると考えられる。

1.2. 研究目的

そんな三軸積層方式の 3D プリンターの短所を補ったのが、六軸積層方式による 3D プリンターである。六軸腕型ロボットは、x y z の移動軸に加えて各軸回りの回転動作を行えるという、高い動作自由度を持っている。その特性を活かすことで材料の射出方向に変化をつけることが出来る(図 3, 図 4)。樹脂材料と腕型ロボットを用いることで多方向造形、サポート材を用いない造形、三次元曲線パスによる造形など、従来の 3D プリンターに比べ、広い範囲の作品の生成が可能になる。本研究では、以前より、六軸加工機を用いた 3D プリントを行ってきた。しかし、これらは機械の姿勢制御が主で、エクストルーダーの速度制御(射出量の制御)が行われていない。つまり、フィラメントは一定量出るか出ないかの二択しかなかった訳である。これでは、どうしても作品の完成度や作品の幅に制



図 3 六軸積層方式

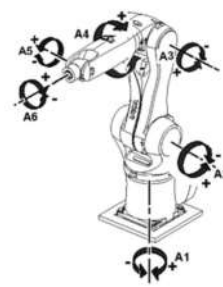


図 4 六軸の各軸

約が生まれる。例えば、図のように、明らかに側面が厚い部分と薄い部分が生じている。これを一定の厚さで生成できれば、より美しい作品ができるはずである。このように六軸加工機を持つ自由度の高い姿勢制御とエクストルーダーの速度制御を組み合わせることでさらに美しく自由度の高い生成物を作ることが本研究の目標である。

2. 研究手法

これを実現するにあたって、まずはソフトウェアの整備から始めた。以前は Rhinoceros/Grasshopper を用いて、パスを生成し、これを直接、六軸加工機に流していた。また、速度制御に関しても、アルディーノを用いていたがこれは、一度 USB にデータを移し、この USB をパソコンに繋ぐことでエクストルーダーを制御していた。ただ、これでは、速度制御が難しく、姿勢制御と連動させることも難しい。そこで、roboDK を介してデータのやり取りを行うことにした。これにより、姿勢制御に応じた、速度制御が可能になった。(図 5)

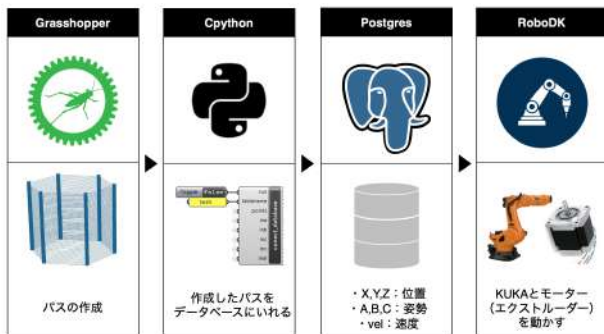


図 5 3D プリントまでの流れ

3. 3D プリントによる作品の生成

3.1. 三軸による 3D プリント

今回、最初に行った 3D プリントは三軸による 3D プリントであった。これを行った理由としては、今まで、本研究室で行ってきたものとは異なる手法 (roboDK を用いる) で六軸加工機を動かすため、ソフトウェアが上手く作動するかのテストを行いたかったためである。これは姿勢制御のみであったが上手く制御することができた。しかし、フィラメントを射出する際の気泡が目立ち、綺麗なプリントとは言い難かった。(図 6,7)



図 6 三軸プリント (横)



図 7 三軸プリント (上)

3.2 三軸によるパスの切り返し

今回、三軸によるパスの切り返しをテーマに小さなオブジェの生成を行ったが、ここで問題となってくるのが、エクストルーダーの射出量の制御である。オブジェの端の部分が、丸みを帯びている。(図 8) これは、切り返し際に、わずかではあるが、ロボットが停止するためである。これを回避するためには、端の部分で射出量を抑える制御が必要である。これを意識して行ったのが〇〇である。これにより、丸みを小さくすることができた。具体的には、一番端とその一つ後ろの射出量を通常の半分にした。これは、システムがロボットに反映されるまでのラグを考慮したものである。(図 9,10)



図 8 切り返しプリント



図 9,10 エッジの射出量制御

3.3 六軸による半球のプリント

美しいプリントを行う、もしくは狙い通りのプリントを行うにあたって、非常に重要な要素としてあるのが、パスの最適化である。これは半球のプリントである。(図 11) これが失敗した時のプリントであり、パスはこのようになっていた。失敗した原因としてあげられるのは、フィラメントを積層させる際に、上の層が下の層に乗っていないことが挙げられる。これを防ぐために考えた 1 つの案が、上に行けば行くほど、積層幅を詰めるというものであった。1 回目では厚み 1.5mm で一定であったが (図 13)、2 回目のプリントは、上にいくほど幅を詰め、最終的には 0.5mm 程度の幅になっている。幅は、一層ごとに、0.03mm ずつ詰めていった。これにより出力したパスがこれで、完成した生成物はこれである。無事に最初のイメージ通りの生成物をプリントすることができた。(図 12, 図 14)



図 11 半球 (失敗)



図 12 半球 (成功)

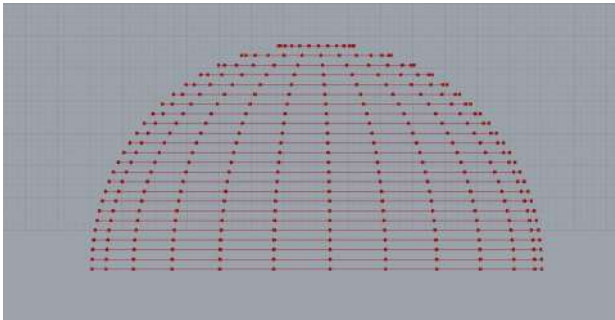


図 13 半球の積層パス (失敗)

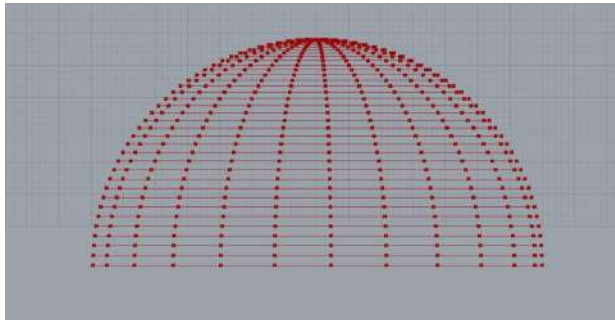


図 14 半球の積層パス (成功)

3.4 オーバーハング形状の造形物の生成

はじめにでも述べたが、オーバーハング形状の生成物をサポート材なしでプリントすることは三軸加工機では難しい。材料を真下方向に射出していくため、オーバーハングした形状または宙に浮いたような形状に対しては、造形時にサポート材と呼ばれる型枠の役割を果たす材料を同時に造形していく必要がある。ただし、近年では、樹脂材料や金属材料による 3D プリンティングが行なわれており、材料の出力後 即座にその場に留まる性質を応用し、より多様な形態の実現方法が提案されている。当研究室では、昨年度樹脂材料を用いて産業用六軸腕型ロボットによる表現技法に関する研究 3)4) が行なわれており、今回の制作においては、より一層、オーバーハングを意識した作品を作ることで、今後、作品の幅を広げていくことを目標にする。

図 15 は今回生成した大きく張り出した形状を持つ 3D プリントである。これを 3D プリントするにあたって幾つかの問題が生じた。まず、ロボットのハンドが真横に向くような姿勢となるため、いずれの場所においても、ロボットが加工範囲外にならないか、念入りにシミュレーションを行った(図 16)。また、パスの生成に関しても、問題なく積層できるように、積層幅を大きすぎず、小さすぎないように注意した。また、ロボット自体の速度においても、ハンドが真横の姿勢になった際も、前のフィラメントに次のフィラメントを積層できるよう、普通よりも速度を落として、プリントを行なった。



図 15 オーバーハングな形状

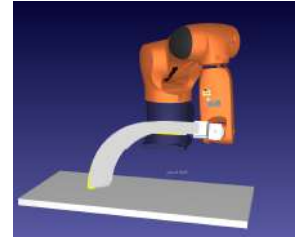


図 16 roboDK によるシミュレーション

3.5 オーバーハング形状の造形物の生成 (2)

3.4 では六軸加工機の特性を生かしたサポート材なしでのオーバーハング形状の 3D プリントを行なったが、姿勢制御に加えて、エクストルーダーの速度制御を行なった。

(図 17) 以下に示すのがその制御の結果である。3.4 においては一定のパルス幅 (=速度を決める) で制御しているが、3.5 に関しては、パルス幅を変えている。これにより、造形物の内側のフィラメントの射出量は少なく、造形物の外側のフィラメントの射出量は多くすることができ、内側でも外側でも一定の厚さでプリントを行うことが可能になる。図 18 が実際にプリントされた作品である。一見すると、あまり 3.4 と大差がないように思える。しかし、図 19 を見ると、その差は歴然である。(図 18)左が、速度制御なし、右が速度制御ありである。(図 19,20) これを見ると、曲率の大きい外輪のところで、精度に差が生まれているのがわかる。左は、所々でこぼこしていたり、隙間があったりする。それに比べて右は一定の厚みを維持している。速度制御による効果が確認できた。内輪に関しては、それほど大きな差は見られなかった。次回作では、より速度制御の成果を反映できる作品の生成を心がけたいと思う。



図 17 オーバーハングな形状 (速度制御有り)



図 18 生成物

0	19
1	19
2	19
3	19
4	19
5	19
6	19
7	19
8	19

0	24
1	28
2	32
3	36
4	40
5	36
6	32
7	28
8	24

図 19,20 速度制御の変化 (左:なし、右:あり)

3.6 オーバーハングな形状の応用

今回の研究において最後に挑戦したのは、図 21、図 22 のような形状を持つ 3D プリントである。正確にはまだプリ

ントは行えておらず、シミュレーションをしながらパスや速度制御に問題がないか精査している段階である。この造形を従来の三軸積層方式によって行おうとすると、材料的にも時間的にも大きな無駄が生じる。また、サポート材が作られるところにも生成したい作品があるので、そもそも、サポート材を作ることが難しい。それを六軸の場合は効率よく、プリントを行うことができる。上から見ると、図 22 のようになっている。これをもとにシミュレーションを行おうとすると、さまざまな体制をとりながらも、なんとかプリントできることが確認された。(図 23,24)六軸であったとしても、加工範囲外になる場面も多く、そうなった際に、どのようにして、加工範囲内に納めるかは今後の課題である。今回は、通常より、400mm 底上げし、加えて、ツールの角度を上¹⁰° 傾けることで回避した。さらに、このプリントの大きなテーマは、速度制御にもある。直線から曲線に入る際に、急激に、角度を変える箇所がある。おそらくここでは、エクストルーダーの射出量の制御が重要になってくる。外輪では多くのフィラメントを出し、内輪ではフィラメントを抑える必要が出てくるであろう。具体的にどのような制御を行う予定かという、積層幅 1.5mm の時のエクストルーダーの速度を「19」とし、これを基準に、積層幅が、0.5mm 大きくなるごとに速度を、19,18,17...として射出量を増やし、0.5mm 小さくなるごとに、19,20,21...として射出量を減らした。実際のプログラムの結果を図 25 に示す。あとは、最後の確認をして、ロボットを作動させるのみである。いい結果になることを望む。

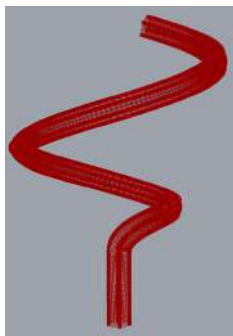


図 21 モデリング (立面)



図 22 モデリング (上から)

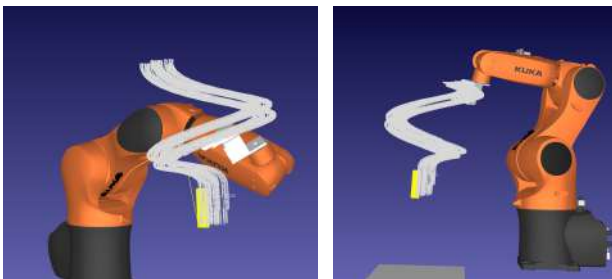


図 23,24 シミュレーションの様子

272	15.7	1385.3	-76.1	115.1	88.1	13.4	21.5
273	-0.3	1401.3	-75.1	111.9	86.9	9.8	20.0
274	-16.3	1385.3	-75.5	115.1	86.9	12.3	14.0
275	-0.3	1369.3	-76.4	151.5	88.6	49.2	16.0
276	15.7	1385.2	-74.9	115.8	84.5	14.3	22.5
277	-0.3	1401.1	-72.6	115.8	83.1	13.9	20.5
278	-16.3	1385.2	-73.4	115.7	83.3	13.2	14.0
279	-0.3	1369.3	-75.7	116.3	86.2	14.0	16.5
280	15.7	1385.1	-73.8	115.9	80.8	14.8	23.0
281	-0.1	1400.9	-70.1	116.0	79.4	14.5	20.5
282	-16.2	1385.0	-71.4	116.0	79.7	13.7	14.0
283	-0.3	1369.2	-75.1	115.9	82.7	13.9	16.5
284	15.8	1385.0	-72.7	116.1	77.1	15.3	23.0
285	0.1	1400.4	-67.6	116.2	75.7	15.1	20.5
286	-16.0	1384.6	-69.4	116.1	75.9	14.3	14.5

図 25 書き出したプログラム (右端が速度データ)

4. まとめ

4.1 成果

今回、「造形時の姿勢と射出量の速度を考慮した 3D プリンティングロボットに関する研究」と題して、様々な 3D プリントを行い、主流の三軸による制御に止まらず、六軸による姿勢制御を行なった。六軸でプリントを行うことにより、サポート材が必要なくなり、材料の削減や時間短縮だけでなく、作品の精度や自由度を上げることが可能になる。今回の研究ではその姿勢制御を活かして、例えば、家具や建築材料といった、実用的なものを生み出すという段階まで持っていくことはできなかったが、今回得た知見やノウハウを活かして、建築業界に 3D プリントという新たな選択肢を提示できるように研究を進めていきたい。また、もう 1 つ重要なテーマである、エクストルーダーの速度制御であるが、この制御ができることは確認できた。

4.2 課題

今後、この六軸による 3D プリントを進めていくにあたって、より多くの複雑な制御が必要になってくるだろう。中でも、エクストルーダーの速度制御は大きなテーマである。4.1 成果でも記したが、速度制御ができることは確認できたが、まだまだ、問題はある。例えば、速度制御に若干のラグがあるところである。どうしても、プログラム上の急激な速度変化にロボットが対応しきれず、フィラメントが出過ぎたり、逆に出てこなかったりする。ただ、これはある程度しょうがない部分だと思うので、このラグを考慮して、今後は 3D プリントを進めていこうと思う。

【参考文献】

- 1) 仲遊人, 寺田 泰地, 加戸 啓太, 平沢 岳人: ロボットを用いた 3D プリンティングに関する研究 その 1 六軸を用いた積層造形, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp161-162, 2021. 9
- 2) 寺田 泰地, 仲遊人, 加戸 啓太, 平沢 岳人: ロボットを用いた 3D プリンティングに関する研究 その 2 家具の造形, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp163-164, 2021. 9
- 3) 坂上 肇, 中村 允哉, 穴吹 拓也, 金子 智也, 松永 成雄, 福見祐司: 建設用 3D プリンターにより製造したシェル型ベンチの設計と施工, 大林組技術研究所報, No84, 2020
- 4) 寺田 泰地: ロボット 3D プリンタによる積層方向を意識したパス生成に関する研究, 千葉大学大学院融合理工学府創成工学専攻建築学コース 2021 年度 修士論文