Functgraph の応用と機能生成の考察

Application of Functgraph and consideration of function generation

黒木 優人, 渡邊 恵太

Yuto KUROKI, Keita WATANABE

明治大学 先端数理科学研究科

Meiji University, Graduate School of Advanced Mathematical Sciences

【要約】

我々は、3D プリンタに搭載しているアクチュエータを利用し、人が介入せずに部品をプリントやサポート除去、組み立ておよびビルドプレート上でアクチュエートを実現する Functgraph を研究している.本手法は 3D プリンタが立体物を造形するだけでなく、機能生成まで可能にする装置としての可能性を示した.一方で、これまでは示したアプリケーション例は限定的であった.そこで本研究では、本手法の性質や特徴をさらに深めるためにアプリケーションを探索する.本稿では、本手法を用いたサンドイッチの製造装置の生成を試作し、特に切る・重ねるといった機能の実現性ついて考察する.

キーワード: 3D プリンティング,ファブリケーション, FDM3D プリンタ, ロボティクス

[Abstract]

We have been developing Functgraph, a system using actuators installed in 3D printers to print, de-support, assemble and actuate parts on a build plate without human intervention. The system has showed a possibility of 3D printer as a function generator. However, there had only been limited examples of applications, so more advanced applications were needed to be considered. In this paper, we made a sandwich manufacturing device as a more advanced application example with Functgraph and considered the effectivity of Functgraph based on this application prototype.

Keywords: 3D printing, Fabrication, FDM 3D Printer, Robotics

1. はじめに

熱溶解積層方式(FDM)3D プリンタは, XYZ の3軸に それぞれモータを持つヘッドからフィラメントを半液状に して押し出してオブジェクトを積層する. 我々は, 3D プリ ンタに搭載されているアクチュエータを利用し, 人が介 入せずにオブジェクトをプリントからサポート除去, 組み 立ておよびビルドプレート上でのアクチュエートを実現 する Functgraph を研究している[1][2].本来, 3D プリン タはプリントするためだけの装置として利用するが,本 手法はプリントしたオブジェクトを組み立てからアクチュ エートまですることで,機能生成を可能とする装置として の可能性を示した.一方,これまで示したアプリケーシ ョンは限定的であり,本手法で生成できる・できない機 能についての議論が不十分であった.

そこで本研究では、本手法の性質や特徴をさらに深 めるためにアプリケーションを探索する.本稿では、本 手法を用いてサンドイッチを作るアプリケーションを試作 し、設計する上で生じる制約を明確にし、切るや重ねる などの機能の実現性について考察する.

2. Functgraph とその課題

Functgraph とは、3D プリンタが出力したオブジェクト を組み立てたりアクチュエートすることで、様々な機能を 生成することを可能にした研究である.本手法でヘッド にアタッチメントを取り付け、組み立てやアクチュエート を可能にするためのエンドエフェクタとその他5つのプリ ント手法を開発し、3つのアプリケーションを試作した. しかし、試作したアプリケーションでは Functgraph の可 能性を十分に示すことができず、提案手法の性質や特



図 1 設計に基づき人の介入なしに自己生成したサンドイッチ を加工環境, パン, きゅうりの材料を乗せることでサンドイッチ までの加工を自動で行う.

徴について議論が足りない課題が残った.

3. サンドイッチ加工生成機の生成と試作

3.1. 応用対象の探索と決定

本研究では Functgraph のアプリケーションとしてサン ドイッチ加工生成環境を試作する. 今回, サンドイッチ 加工生成を対象としたのは, 人の作業として料理は比 較的複雑であり, 食事は日常不可欠な活動のためであ る. サンドイッチはその中でも, 制約や工程の少なさ, 食材の自由さや実現性などから決定した. 今回のサン ドイッチはハムときゅうりを2枚のパンで挟み, 最後に2 つに切り分ける加工をおこなう.

3.2. サンドイッチ加工装置の概要

Functgraph の手法に基づき,エンドエフェクタの取付 可能にした 3D プリンタ上で,自己生成したエンドエフェ クタを用いて,サンドイッチを加工するための環境を自 己生成する.図1が自己生成されたサンドイッチ加工環



図 2 食材をセットした後

境である. ここに図2のように,所定の場所にパン,ハム,きゅうりを配置する. その後は次の順番に動作し,サンドイッチの加工生成を行う.

- 1,パンを一枚取り、料理場に置く
- 2, ハムを一枚取り, パンの上にのせる
- 3, きゅうりを輪切りにし, ハムの上にのせる
- 4, パンを1枚取り, きゅうりの上にのせる
- 5,半分に切る

これらの工程の中で共通する目的を持つ動作を機能 として捉える.1と2は「移動」,3と5は「切る」,4は「重 ねる(のせる)」の3つの機能によってサンドイッチが完成 する.同じ機能でも対象物が違えばオブジェクトは変わ るため個々に設計する必要がある.

3.3. 応用対象の設計実装

組み立てる物はハムとパンをそれぞれ運ぶタイプの エンドエフェクタ,きゅうりとサンドイッチをそれぞれ切る タイプのエンドエフェクタの計4つである.形状に違いは あるがエンドエフェクタの構造と組み立て方は全て同じ であるため、ここではサンドイッチを切るエンドフェクタを 例に組み立てについて説明する.



図 3 サンドイッチを切るエンドエフェクタ, 左2つは右のよう に繋がり, 真ん中のパーツを直角にすることで完成する.

エンドエフェクタは図3中央のようなパンを切る刃のパ ーツとアタッチメントに取り付けるための図3左のパーツ (以下,ジョイントと呼ぶ)の2つのパーツから構成される. まずヘッドのアタッチメントにジョイントを取り付け,その 後に刃のパーツと合体し引き上げて図3右の様にする. 刃のパーツを水平にするために引っ掛けながらヘッドが 弧を描くように動くことでジョイントに固定され,エンドフ



図 4 矢印の陽光にナイフを起こして組み立てる

ェクタは完成する(図4).

2つのパーツで設計した理由は運ぶタイプと切るタイ プで異なる.運ぶタイプでは、ビルドプレートから引き上 げる際に形状によって引き上げる力が足りない.最も軽 い力で引き上げられ、プリント可能な方向で造形したた めである.切るタイプでは、一体だと刃が下方向になり プリントができないことと、刃の部分をなるべく鋭くプリン トするために立てるようにプリントした.

3.3.1. パンのエンドエフェクタ

組み立て後は図5右の赤丸に囲われた部分に置く. エンドエフェクタのパンが乗る部分の裏側には溝があり, 赤枠部分にはエンドエフェクタがずれないように溝には まる様な突起がある.



図 5 左:パンを運ぶエンドエフェクタ. 右:赤い丸の部分に エンドエフェクタを保管する場所.

3.3.2. ハムのエンドエフェクタ

重ねられたハムの間にエンドエフェクタが差し込めるように2本の棒の先端は鋭利で上に乗る(図6左). ハムは 棒と棒に橋渡しした状態で乗るため,棒同士の間の部 分のハムを押し込むことで落とせる. 図6右のようにエン ドエフェクタを外せるオブジェクトがあり,組み立て後は ここに保管され再利用ができる.



図 6 ハムを運ぶエンドエフェクタ. 右:エンドエフェクタを 外して保管する場所.

3.3.3. きゅうりのエンドエフェクタ

きゅうりを切るとき転がらないようにするため, きゅうりを 置く台と刃は V 字の形状である(図7左). 保管するオブ ジェクトには組み立て後の形でエンドエフェクタを付け 外しできる構造があるため再利用ができる(図7右).



図 7 左:きゅうりを切るエンドエフェクタ. 右:エンドフェクタを 外して保管する場所.

3.3.4. サンドイッチを切るエンドエフェクタ

サンドイッチを切るには平たい刃では切れないためノ コギリのようにギザギザの形状で設計した(図8左). 保管 するオブジェクトはきゅうりと同じである(図8右).



図 8 左:パンを切るエンドエフェクタ、右:エンドフェフェクタを 取り外して保管している様子

4. サンドイッチ加工生成機の作動結果

4.1. パンの移動

パンを取るエンドエフェクタを取り(図9左上),下から 一枚取った後(図9右上),パンを乗せたまま置かれる (図9左下).その場できゅうりやハムを乗せた後,再度 パンを取るエンドエフェクタを取り,図9右下のようにパ ンを取った位置の上にある台にのせる.使い終わったら 元の位置に戻す(図9左上).



図 9 パンの移動の一連の様子. 左上, 右上, 左下, 右下の 順でアクチュエートし, 新たに作るときは左上に戻る.

4.2. ハムの移動

ハムを上から1枚取った後(図10左),移動してハムを 落とす(図10右).落とした後は元の場所にエンドエフェ クタを戻す(図6右).



図 10 左:ハムを一枚差し込んで上から取っている様子. 右:ハムをパンの上に乗せた様子.

4.3. きゅうりを切る

きゅうりを一枚切った後、切られた薄い方のきゅうりを



図 11 左:きゅうりに刃を入れている様子. 右:きゅうりをサン ドイッチに乗せている様子.

サンドイッチにのせる必要がある. きゅうりをのせている 台は V 字なため薄いきゅうりは転がらずにその場に留ま り, 切った直後にサンドイッチの方向にエンドエフェクタ を動かすだけできゅうりはサンドイッチの上に落ちる. 切 り終わった後エンドエフェクタは図7右に戻される.

4.4. サンドイッチを切る

サンドイッチを切る台はパンを設置しているオブジェクトと一体である. 切る途中で具がずれないように囲いがある. エンドエフェクタの刃はサンドイッチに対して垂直で前後に動かしながら徐々に下に移動する. 台にはエンドエフェクタの刃が入る溝があり,一番下まで切ればサンドイッチが切れる. 完了後は図8右に戻される.



図 12 サンドイッチを切っている様子.

4.5. パンを重ねる

具材をパンに乗せ終えた後は切る台に運ぶ.パンを 移動するエンドエフェクタを取り付けた後、台にある棒を 倒すことでパンを落とせる構造が出来上がる.パンを取 った後、倒した棒にパンを当てながらエンドエフェクタを 動かすことでパンが重ねられる(図13左).その後はエン ドエフェクタを戻し、サンドイッチを切るエンドエフェクタ を取り付け、先ほど倒した棒を再び立てることでサンドイ ッチを切ることができるようになる.



図 13 パンを乗せている様子.

4.6. 完成したサンドイッチについて

目的通りのサンドイッチを完成することができた. 断面 が本来の包丁で切るよりも荒いことやきゅうりは輪切りで なく斜め薄切りの方が良いなど改善点は多少あるもの の,食べる分には問題なく美味しくいただけた.



図 14 完成したサンドイッチ

5. 応用対象の考察

試作したアプリケーションを元に機能の考察をする.

5.1. 移動

5.1.1 対象物の把握

プレート上のどこに何があるかを3Dプリンタは把握で

きず、ヘッドの経路は途中で変更できないため、アプリ ケーションが正常に機能しているか関係なく動き続ける. そのためプレート上のものを移動する時、どこに何があ るかを正確に把握でき、運び途中で落とさず確実に対 象物を取る/離すことができる設計が求められる.ヘッド にセンサを取り付けて検知したりカメラで監視するなど プレート上を把握する機材を付加することで、障害発生 時に再試行するなどアプリケーションとして成功する確 率が向上する.

5.1.2. 物を取る/離す

エンドフェクタの設計だけでなくプレート上のオブジェ クトと共同で動作することで、対象物を取る/離す機能を 設計する必要がある.人間の場合は重なったパンを取 る時一番上から掴んで取れるが、Functgraph の場合エ ンドエフェクタ自身が把持したり吸着することは困難であ る.そのためプレート上のオブジェクトと相対的にエンド エフェクタを動かすことで物を取る/離すを実現しなくて はならず、オブジェクトの肥大化や設計の複雑化などが 起こる.エンドフェクタに動力与える様な新たなアクチュ エータをヘッドに取り付けて規格化し、それに合わせて エンドエフェクタの設計することで、これらの課題を解決 できる可能性がある.

5.2. 切る

5.2.1. 刃の精度

試作したアプリケーションでは一方向からの圧力と前後に動かすことで生じる摩擦によってサンドイッチやきゅうりを切断した. 切る対象によって刃の鋭さが求められるが,現在の FDM3D プリンタの造形精度では不十分である. 今後の造形精度の向上を期待したいが,包丁の様に造形してから研ぐことで鋭くしたり,せん断など切り方を変えることも考えられる.

5.2.2. 切られた側の位置の把握

物を切った後に形状が変わって予測がつかない動き をする場合がある。例えばきゅうりを薄く切った時、切ら れたきゅうりが転がったり倒れたりすることがある。試作 したアプリケーションでは薄いきゅうりが転がらず倒れて もパンの上に乗せられる様にきゅうりの台を V 字にした。 この様に切るに限らず物が変形することにより生じる動 きも予測した設計が必要になる。

5.2.3. 同時に複数の動作をする

三次元に動くヘッドは1つしかないため、複数の動作 を同時に行うことは不可能である。例えばサンドイッチ は具材がバラバラにならないように抑えながら切る必要 があるが、切るエンドエフェクタを装着するとサンドイッ チを抑えることはできない。そこでサンドイッチの周りに 囲いをつけることで具材がはみ出ないように設計した。 このように、プレート上のオブジェクトの形状で複数の動 作を発生させない設計が必要である。これに対し、ヘッ ドが2つあれば設計が簡素化できたり作業効率やプリン ト速度の向上が期待できる。

5.3. 重ねる

正確に重ねるにはエンドエフェクタが重ねる対象物が ずれない様に持つか、ずれたとしてもオブジェクト側に 補正する機構や形状を含めて設計する必要がある.ま た、移動の節で述べたようなヘッドにセンサとアクチュエ ータがあれば正確に重ねることも期待できる.

6. 議論

今回の応用例から Functgraph の可能性について議 論する.

6.1. プレートの狭さ

ヘッドの導線を確保しなくてはならないため、オブジ ェクト同士で空間を設ける必要がある. 試作したアプリ ケーションではパンを設置する場所の上にサンドイッチ を切る場所を設けるなどコンパクトに設計したが、プレ ートが広ければ広いほど導線が確保しやすくオブジェク トも簡素化しやすくなる.

6.2. 3D プリンタのトルク

使用した 3D プリンタはプリントだけをする使い方を前 提としているため、アプリケーションのアクチュエートを するには各モータのパワーでは不十分な場合がある.

6.3. Functgraph としての未来

-般的な 3D プリンタは, 食器やケースなど形状その ものが機能として意味を持つ道具やフィギュアの様な見 た目に価値がある造形物など、静的なオブジェクトを印 刷することは得意である. これは現状の 3D プリンタで創 り出している価値は「モノ」重視であると考える. 筆者は 3D プリンタで「コト」を創り出す装置として振舞うことで 3D プリンタとしての価値は広がり、新たな日常に繋がる と考える. 本研究でもサンドイッチを作るために包丁や まな板などモノを作るのではなく、サンドイッチを作るた めのオブジェクト群で目的を叶えるためコトとして生成し た. このようにコトをベースとして使うことで 3D プリンタの 使用目的に変化が起こると期待する.また、スマートフ オンのアプリストアのようにユーザはダウンロードしたデ ータを再生することで, ユーザは実世界で様々な恩恵 を受ける.同じコトを生成するアプリケーションでも開発 者によって様々に差別化できる. 例えば同じサンドイッ チを作るとしても、今回試作したアプリケーションではハ ムときゅうりを具材としたが、卵やカツを具材としたサンド イッチを作るなど違いを生み出せる.この様に, Functgraph によって 3D プリンタはスマートフォンの様な 実世界におけるプラットフォームとして使われる.

7. おわりに

サンドイッチのアプリケーションを試作し、機能を元に した考察と Functgraph の可能性を考察した. 今後はサ ンドイッチ以外のアプリケーションを試作し,引き続き Functgraph の性質や特徴を深めていく.

参考文献

- 1. Shohei Katakura, Yuto Kuroki, Keita Watanabe. A 3D Printer Head as a Robotic Manipulator. Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. Pages535-548 DOI:https://doi.org/10.1145/3332165.3347885
- Shohei Katakura and Keita Watanabe. 2018. PrintMotion: Actuating Printed Objects Using Actuators Equipped in a 3D Printer. In The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings (UIST '18 Adjunct). ACM, New York, NY, USA, 137–139. DOI: http://dx.doi.org/10.1145/3266037.3271627