

音を用いた3Dプリンターの フィラメント詰まりの頑健な検出

高橋 敬^{1,a)} 岩村 雅一^{1,b)} 南谷 和範^{2,c)} 黄瀬 浩一^{1,d)}

概要: 家庭用の3Dプリンターにおいて主流の印刷方式は熱溶解積層法であり、材料のフィラメントをノズルで溶かし、ギアで押し出ししながら立体物を積層する。この印刷方式では、ノズルにフィラメントが詰まることで印刷が正常にできなくなる、フィラメント詰まりという異常が発生する。この異常に対して、従来研究では、フィラメント詰まり時に発生する特有のクリック音に着目した。そして、プリンターの動作音の周波数を解析することで、動作音にクリック音が含まれるか判断し、フィラメント詰まりを検出する手法を提案した。しかし、この手法ではプリンターを動作させる環境音のノイズが大きい場合、クリック音検出の精度が下がるという問題がある。そこで、本研究では、フィラメント詰まりの検出を環境音ノイズに頑健に行う手法を提案する。提案手法では、前処理としてプリンターの動作音にハイパスフィルターをかけることで環境音ノイズを軽減する。そして、動作音波形とクリック音波形とのテンプレートマッチングにより、動作音にクリック音が含まれるか判断することで、フィラメント詰まりの検出を実現する。クリック音が含まれる動作音を用いて、クリック音検出の精度を検証した。実験は環境音が大きい場所と小さい場所で行った。その結果、従来手法よりも提案手法の方が精度良くクリック音を検出できることがわかった。

1. はじめに

近年、宇宙開発、医療、建築など幅広い分野で3Dプリンターが注目を浴びている [1–3]。それに伴い、家庭用の3Dプリンターが大手通販サイトなどで販売されるようになっていく。家庭用の3Dプリンターでは、熱溶解積層法という印刷方式が主流である。熱溶解積層法は、熱可塑性樹脂を糸状にしたフィラメントといわれる材料を用いて立体物を作成する。ノズル部分でフィラメントを加熱し、ギアで押し出ししながらプリントプレート上に積層する。プリントプレートに積層されることで、フィラメントが冷却され固まる。図1に家庭用3Dプリンターの例として Prusa Research 社の Prusa i3 MK3S の図と熱溶解積層法の概要図を示す。熱溶解積層法には、印刷の材料であるフィラメントが他の印刷方式で使用される材料と比べて安価であるといった利点や、フィラメントの原材料として用いられる ABS や PLA は一般的なプラスチック製品に広く使われて

いるため、市販物に近い質感で造形物を製作可能であるという利点がある。

家庭用3Dプリンターの実用例として次のような例がある。昨今のコロナ禍において、家庭用3Dプリンターを用いて自作のコロナ対策キットが作成できるサービスがある。Prusa Research 社では、自社の3Dプリンターでフェイスシールドや立体マスクなどのコロナ対策キットを自作できるように3Dデータの無料公開を行っている [4]。また、IKEA の ThisAbels というプロジェクトでは、体に障害を抱える人の日常生活の困難を解消し、クオリティ・オブ・ライフを高める取り組みが行われている [5]。このプロジェクトでは、既存の家具がより使いやすくなるように、家具に取り付けるアタッチメントを開発し、3Dプリンターで自作できるように3Dデータをweb上で公開している。これらの実用例のように、ユーザーは3Dプリンターを使うことで様々な恩恵を受けることができる。

しかし、熱溶解積層法の家庭用3Dプリンターでは、フィラメントの材質や印刷環境、印刷する3Dモデルを変えるごとに、ユーザー側でプリンターの設定を細かく調節する必要があるため、印刷ミスが起こりやすいという問題がある。また、プリンターの価格を抑えるために温度センサーなどの簡単なセンサーしかついていないため、印刷ミスやプリンター本体の異常を検出する機能が少ない。そして、

¹ 大阪府立大学 大学院工学研究科 知能情報工学分野

Osaka Prefecture University

² 大学入試センター 研究開発部試験基板設計研究部門

a) kei@m.cs.osakafu-u.ac.jp

b) masa@m.cs.osakafu-u.ac.jp

c) minatani@rd.dnc.ac.jp

d) kise@m.cs.osakafu-u.ac.jp



図 1 家庭用 3D プリンターの例 (Prusa i3 MK3S)*1 と熱溶解積層法の概要図

印刷完了までに非常に時間がかかるため、ユーザーが印刷の状況を監視することは困難という問題がある。印刷時に異常が発生した場合、印刷を中止して最初から印刷をし直す必要がある。異常の発見が遅れると、時間とフィラメントが無駄になる。また、プリンター本体の不具合を放置しておくとも故障につながる。そのため、印刷時に発生する異常を早期に自動で検出する必要がある。

印刷時に発生する異常に、フィラメント詰まりというものがある。これはノズル部分にゴミ等が付着したり、温度の設定ミスによりフィラメントが十分に溶けないことが原因で発生し、ノズル部分にフィラメントが詰まり印刷ができなくなる。フィラメント詰まりが発生すると、フィラメントが送り出せずギアが正常に回転しないことで、特有の音（クリック音）が発生する。

Lambos ら [6] は、クリック音が毎回同じような音であることに注目した。プリンターの動作音の周波数成分を解析し、動作音中にクリック音が含まれるか判断することで、フィラメント詰まりの検出を行う手法を提案した。しかし、印刷を行う環境音が多い場合は動作音にノイズが含まれるため、Lambos らの手法のクリック音の検出精度が下がる。プリンターを動作させる環境が静かな場所とは限らず、環境音が多い騒がしい場所での印刷も想定されるため、環境音が多い場合でもフィラメント詰まりを検出できる必要がある。

本稿では、上記の問題を解決するために、フィラメント詰まりの検出を環境音のノイズに頑健に行う手法を提案する。クリック音は、プリンター固有の音であるので毎回同じような音が発生する。そこで、提案手法では動作音波形とクリック音波形のテンプレートとのテンプレートマッチングを行うことで、動作音に含まれるクリック音の検出を実現する。入力する動作音を周波数領域へと変換するのではなく、動作音の波形からクリック音の検出を行うため動作音にノイズが含まれる場合でも影響を受けずに検出できる。

以降、2 節で関連研究、3 節で提案手法を説明し、4 節で提案手法を検証する実験の概要と結果を示す。最後に、5 節で結論を述べる。

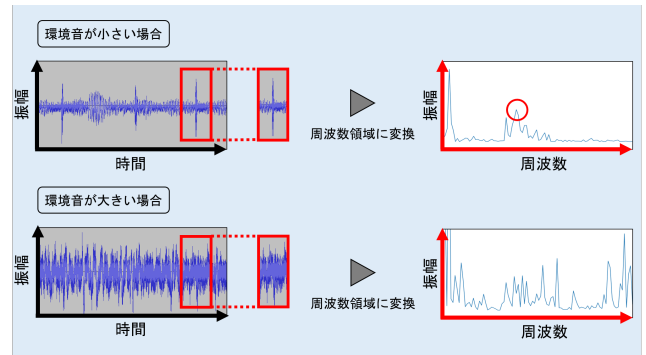


図 2 Lambos らのクリック音検出手法

2. 関連研究

Lambos ら [6] は、フィラメント詰まりが発生した際に生じるクリック音が毎回同じような音であることに注目し、プリンターの動作音にクリック音が含まれるか判断することで、フィラメント詰まりの検出を行う手法を提案した。Lambos らの手法では、プリンターの動作音から音声クリップを切り出し、切り出した音声クリップを周波数領域へと変換する。Lambos らの手法の概要図を図 2 に示す。図 2 の左側の信号は入力する動作音の波形、右側の波形は周波数領域へと変換した結果である。動作音の波形は実際に録音を行ったもので、周波数領域への変換結果は実験において実装して出力した結果である。

周波数領域への変換は、Goertzel アルゴリズム [7] を用いて動作音から周波数成分の取り出しを行う。Goertzel アルゴリズムは特定の周波数の存在やそれらがいくつ存在するかを検出するのに用いられる離散フーリエ変換の一種である。周波数成分を得る他のアルゴリズムに比べて計算量が少なく高速に演算ができる。

Goertzel アルゴリズムを用いてクリック音を含む音声クリップを周波数領域へ変換した場合、図 2 上のように特定の周波数にピークが現れる (赤で囲った部分)。クリック音は使用するプリンターによって異なるため、ピークが現れる周波数も使用するプリンターに依存すると考えられる。Lambos らの手法では、周波数 445Hz にピークが現れた場合、動作音中にクリック音が存在していると判断する。

しかし、図 2 下のように印刷を行う環境音が多く、切り出した動作音にノイズが含まれる場合、Goertzel アルゴリズムを用いて周波数領域へと変換したとき、ノイズの影響により 445Hz 部分にピークが現れない。このため、Lambos らの手法ではクリック音の検出精度が、印刷を行う環境音のノイズに影響を受けやすいという問題がある。

そこで本稿では、動作音波形とクリック音波形のテンプレートとのテンプレートマッチングにより、動作音に含まれるクリック音検出を行う手法を提案する。動作音の波形

*1 <https://www.prusa3d.com/wp-content/uploads/2018/03/MK3.png>

からクリック音の有無を判断することで、環境音のノイズの影響を軽減する。

3. 提案手法

3.1 概要

クリック音は、フィラメント詰まりによりギアが正常に回転せず押し戻されることで発生する。そのため、フィラメントの材質や印刷する 3D モデルに依存せず毎回同じような機器固有の音が発生する。そこで、提案手法ではプリンターの動作音波形とクリック音波形とのテンプレートマッチングから、動作音に含まれるクリック音の検出を行う。

提案手法の概要を図 3 に示す。初めに、マイクでプリンターの動作音を録音し識別器へと入力する。前処理として、入力された動作音に対してハイパスフィルターをかけることでノイズを軽減する。ハイパスフィルターによるノイズの軽減により動作音中のクリック音波形が顕著に現れるため、テンプレートマッチングが可能になる。提案手法では、ハイパスフィルターの閾値を実験的に 2000Hz に設定した。次に、動作音に含まれるクリック音を検出する。図 3 右の波形において赤枠の部分がクリック音が発生している箇所である。識別器において、動作音中にクリック音が検出された場合クリック音が発生していると判断し、フィラメント詰まりの検出を実現する。

3.2 クリック音検出

識別器でのクリック音検出について詳細を述べる。クリック音検出の概要を図 4 に示す。まず、図 4 左のように、プリンターの動作音波形に対してクリック音波形のテンプレートを走査させる。テンプレートは次のように作成した。プリンターを詰まらせた状態で動作をさせ、発生したクリック音を録音する。録音した音声にはクリック音が 50 個含まれていた。ここから、ランダムに 10 個のクリック音を抽出する。クリック音波形の振幅が最大となる時点が、テンプレートの中央になるように時間幅 1 秒で抽出した。作成したテンプレートを入力した動作音に対して 0.001 秒ごとにずらしながら、二つの波形の類似度を計算する。テンプレートと比較する部分が正常の動作音波形の場合、二つの波形の類似度は低くなり、クリック音波形の場合二つの波形の類似度は高くなる。0.001 秒ごとに算出した類似度の値をプロットしたグラフが図 4 の中央部のグラフである。検出できるクリック音に偏りが出ないように 10 個のテンプレートを用いて、テンプレートごとに類似度を 10 回算出する。図 4 右に、テンプレートごとに求めた 10 個の類似度グラフの平均の類似度グラフを示す。クリック音が発生している部分ではグラフの赤枠で囲った部分のようにピークが現れ、クリック音が発生していない正常な動作音の部分では顕著なピークが現れない。識別器で

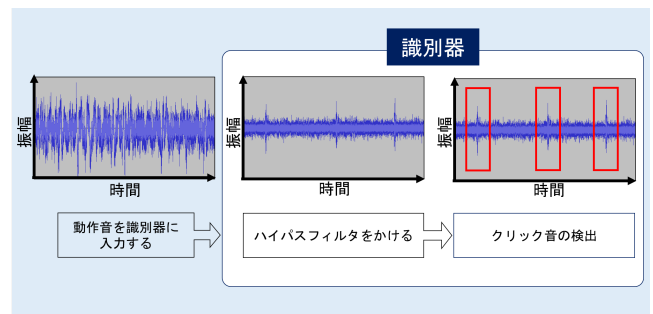


図 3 提案手法の概要図

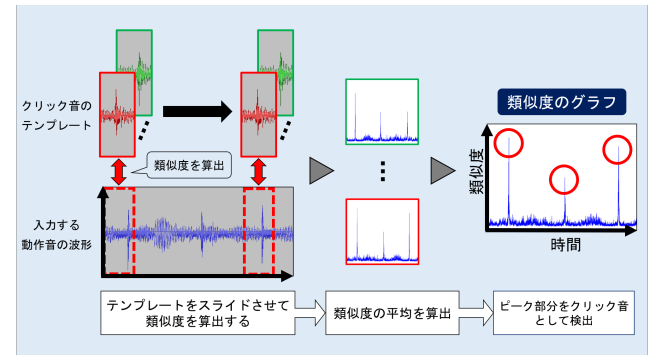


図 4 クリック音検出の概要図

は、平均の類似度グラフのピーク部分検出し、検出されたピーク点が閾値を超えていた時、クリック音が発生している部分であると検出する。

4. 実験

4.1 実験条件

本実験では、3D プリンターに Prusa Research 社の Prusa i3 MK3S [8] を使用した。フィラメント [9] は、Prusa Research 社の PLA フィラメントを使用した。実験は人のいない会議室とサーバー室で行い、会議室は環境音の小さい場所、サーバー室は環境音の大きい場所を想定した。会議室内の騒音値は 35.3dB で、騒音の基準 [10] で静かな場所にあたり、サーバー室内の騒音値は 82.5dB で、騒音の基準で極めてうるさい場所にあたる。実験では、あらかじめフィラメントを強制的に詰まらせた状態でプリンターを動作させクリック音を発生させた。印刷する STL ファイルは図 5 の 3D モデルで、プリンターのテストプリントを行う際に使われる 3D モデルである [11]。STL ファイルは PrusaSlicer [12] を用いてスライスをして G コードへと変換した。3D モデルの動作時間は 19 分 43 秒であった。マイクで録音した動作音からランダムに 1 分間を抽出して識別器に入力した。マイクは単一指向性、周波数特性 100Hz～18000Hz、感度 -42 ± 3 dB、のコンデンサーマイクを使用した。動作音の録音はプリンターから約 5cm 離れたところにマイクを設置し、サンプリングレート 8000Hz、モノラル形式で行った。録音した音声ファイルは WAV ファイル形式で保存した。

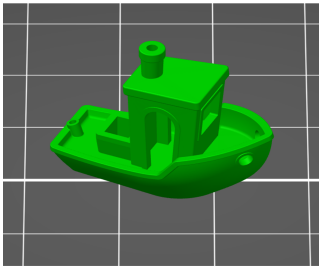


図 5 3D プリンターに入力した 3D モデル

4.2 既存手法と提案手法の実装

既存手法と提案手法はそれぞれ Python を用いて実装した。

Lambos らの手法では、1 分の wav ファイルを soundfile モジュールで読み込み、math ライブラリで Goertzl アルゴリズムを構築する。読み込んだ音声ファイルを 0.1 秒ごとに分割し、分割した音声クリップを Goertzl アルゴリズムによって周波数領域へと変換する。本実験で使用したプリンターから発生するクリック音は 212Hz の周波数成分にピークが現れる。そこで、212Hz にピークが現れるかどうかでクリック音の有無を判断するように実装した。

提案手法でも既存手法と同様に、音声ファイルの読み込みは soundfile モジュールを用いた。ハイパスフィルタは numpy の fft 関数と ifft 関数を用いて実装した。類似度のピーク部分は scipy の argrelmax を用いて検出を行い、類似度の値が 0.25 となる点を、ピーク点の閾値とした。

4.3 類似度指標に関する実験

類似度指標に関する実験では、入力した動作音の波形とクリック音波形のテンプレートとの類似度算出に 4 種類の指標を用いて、各指標ごとのクリック音検出精度を検証した。クリック音検出には提案手法を用いて、テンプレートは 10 個使用した。指標には Sum of Absolute Difference(SAD), Sum of Squared Difference(SSD), Normalized Cross-Correlation(NCC), Zero-means Normalized Cross-Correlation(ZNCC) を用いた [13]。各指標は以下のように定義される。 f はクリック音のテンプレート、 g は入力する動作音、 d_t はテンプレートの走査位置、 μ_f, μ_g は f と g の振幅の平均値を示す。また SAD と SSD は 2 つの波形の違いの累積値を求めているので、類似度を求める際は SAD と SSD の逆数を用いる。

$$S_{SAD}(d_t) = \sum |g(d_t + i) - f(i)| \quad (1)$$

$$S_{SSD}(d_t) = \sum (g(d_t + i) - f(i))^2 \quad (2)$$

$$S_{NCC}(d_t) = \frac{\sum \{g(d_t + i) f(i)\}}{\sqrt{\sum (g(d_t + i))^2} \sqrt{\sum (f(i))^2}} \quad (3)$$

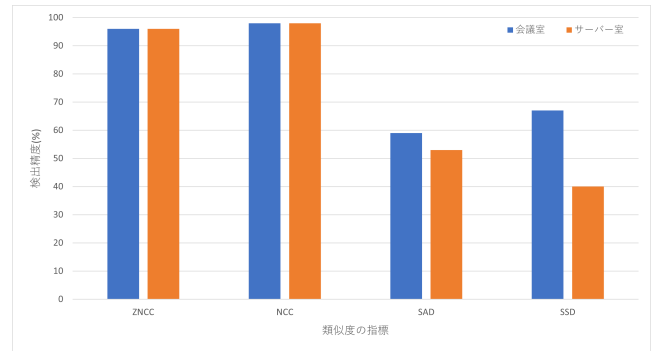


図 6 類似度指標ごとの検出精度

$$S_{ZNCC}(d_t) = \frac{\sum \{(g(d_t + i) - \mu_g)(f(i) - \mu_f)\}}{\sqrt{\sum (g(d_t + i) - \mu_g)^2} \sqrt{\sum (f(i) - \mu_f)^2}} \quad (4)$$

またクリック音の検出精度は以下の式で定義する。

$$\text{検出精度 (\%)} = \frac{\text{検出されたクリック音の回数}}{\text{動作音に含まれるクリック音の回数}} \times 100 \quad (5)$$

図 6 に各類似度指標を用いた提案手法での検出精度の結果を示す。ここで、縦軸はクリック音の検出精度を表している。類似度指標に ZNCC, NCC を用いた場合 90%以上の精度で検出ができており、サーバー室内でも会議室内と同程度の精度で検出ができることから、環境音のノイズに影響を受けにくい指標であることがわかる。一方で類似度指標に SAD, SSD を用いた場合検出精度が下がり、サーバー室内での検出精度が会議室内での検出精度に比べて下がっていることから、環境音ノイズの影響を受けることがわかる。また ZNCC での検出精度と NCC での検出精度を比較すると、NCC での検出精度の方が 2%高いことがわかる。

4.4 使用するテンプレートの種類に関する実験

使用するテンプレートの種類に関する実験では、クリック音波形のテンプレートを 1 個から 10 個まで増やしたときのクリック音検出の精度を検証する実験を行った。ここで類似度の算出には 4 つの類似度指標のうち最も検出精度が高かった NCC を用いた。図 7 に会議室での実験結果、図 8 にサーバー室での実験結果を示す。縦軸はクリック音の検出精度、横軸はテンプレートの種類を表しており、走査させるテンプレートの順番をランダムに 10 回入れ替えた時の平均の検出精度と標準偏差をプロットしている。図 7, 図 8 よりテンプレートを増やすにつれて検出精度が上がっていることがわかる。また、テンプレートを 10 個用意すると検出精度にブレが出ず 95%以上の精度で検出が

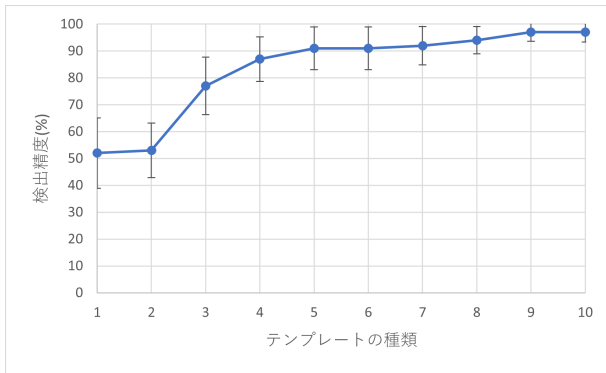


図 7 会議室内での検出精度

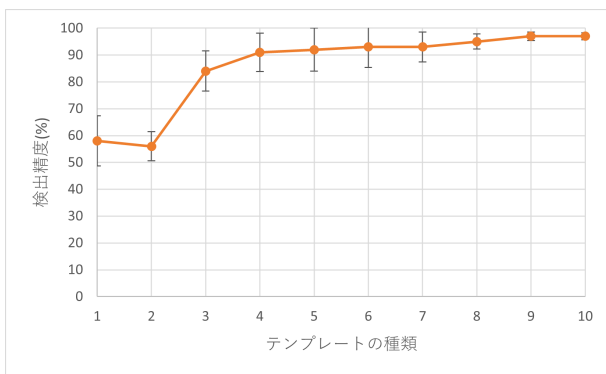


図 8 サーバ室内での検出精度

できることがわかる。図 7 と図 8 の比較から会議室とサーバ室のどちらの環境でもテンプレートを増やすことで検出精度が向上することがわかった。

4.5 ハイパスフィルタの有用性に関する実験

ハイパスフィルタの有用性に関する実験では、会議室とサーバ室で録音した動作音に対してハイパスフィルタをかけなかった場合の提案手法での検出結果と、閾値 2000Hz でハイパスフィルタをかけた場合の提案手法での検出結果からハイパスフィルタの有用性を確認する。

実験結果を図 9 に示す。実験結果より会議室とサーバ室のどちらの環境でも、ハイパスフィルタをかけた場合の検出精度が、ハイパスフィルタをかけなかった場合の検出精度を上回った。これより、提案手法において 2 つの波形を比較する前処理で、入力した動作音にハイパスフィルタをかけることの有用性が確認できた。

4.6 既存手法との比較

既存手法との比較では、Lambos らの既存手法と提案手法とのクリック音検出の精度を比較する実験をした。実験では、類似度の算出には 4 つの類似度指標のうち最も検出精度が高かった NCC を用いた。用意するテンプレートの種類は 4.4 節の実験結果より 10 種類と設定した。図 10 に比較結果を示す。縦軸は検出精度を示している。図 10 から会議室内とサーバ室内、どちらの環境でも既存手法よ

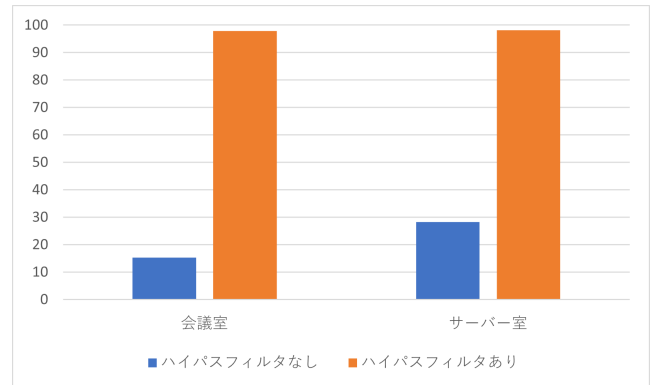


図 9 ハイパスフィルタをかけなかった場合とかけた場合の検出結果

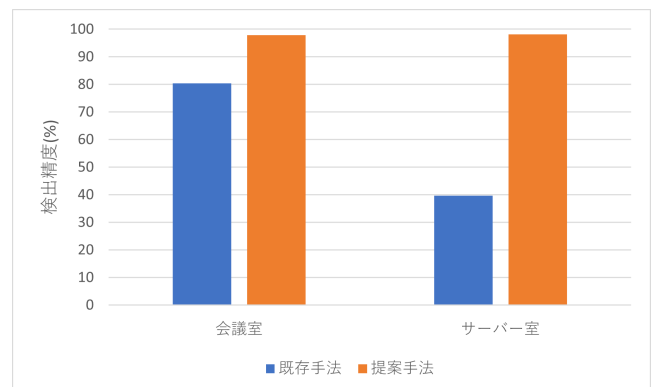


図 10 既存手法と提案手法との精度比較

り提案手法の方がクリック音検出の精度が高いことがわかる。既存手法では、サーバ室での検出精度が会議室での検出精度に比べて下がっているが、提案手法では、会議室での検出精度とサーバ室での検出精度が同程度であることがわかる。これより既存手法よりも提案手法の方が環境音のノイズに頑健であることがわかる。

提案手法で検出ができなかったクリック音は、用意したテンプレートではカバーできなかったクリック音と考えられる。より汎用的なクリック音テンプレートの作成方法を検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本稿では、環境音のノイズに頑健なフィラメント検出の手法を提案した。提案手法では、動作音の波形とクリック音波形のテンプレートとの類似度からクリック音の有無を判断し、フィラメント詰まりの検出を行う。実験結果から類似度の指標に NCC を用いると 98% の精度でクリック音の検出ができることが分かった。クリック音テンプレートを 10 種類用いて類似度の平均を求めると、検出の精度にブレがなく高精度にクリック音検出ができることが分かった。提案手法においてハイパスフィルタをかけることの有用性を確認できた。また、既存手法とのクリック音の検出精度を比較した結果提案手法の方が精度が高く、環境音のノイズに頑健であることが分かった。

今後の課題としては、より汎用的なクリック音テンプレートの作成方法の考案が挙げられる。また、実験に使用したプリンター以外のプリンターでの検出精度を検証する必要があると考えている。

謝辞 本研究は、JST RISTEX 「SDGs の達成に向けた共創的研究開発プログラム」 令和元年度採択課題「共創的支援を促進する視覚障害者のための3D造形物配信・出力エコシステムの構築」(JPMJRX19I7)の一環で実施された。

参考文献

- [1] Neil Leach. 3D printing in space. *Architectural Design*, Vol. 84, No. 6, pp. 108–113, 2014.
- [2] Qian Yan, Hanhua Dong, Jin Su, Jianhua Han, Bo Song, Qingsong Wei, and Yusheng Shi. A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, Vol. 4, No. 5, pp. 729–742, 2018.
- [3] Izabela Hager, Anna Golonka, and Roman Putanowicz. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*, Vol. 151, pp. 292–299, 2016.
- [4] 3D PRINTED FACE SHIELDS FOR MEDICS AND PROFESSIONALS. <https://www.prusa3d.com/covid19/>.
- [5] ThisAbles. <https://thisables.com/en/>.
- [6] Nikolaos Lambos, George-Christopher Vosniakos, and George Papazetis. Low-cost automatic identification of nozzle clogging in material extrusion 3D printers. *Procedia Manufacturing*, Vol. 51, pp. 274–279, 2020.
- [7] Efficiently detecting a frequency using a Goertzel filter. <https://netwerkt.wordpress.com/2011/08/25/goertzel-filter/>.
- [8] Prusa 3D. <https://www.prusa3d.com/>.
- [9] PRUSA RESEARCH OFFICIAL JOSEF PRUSA SHOP. <https://shop.prusa3d.com/en/>.
- [10] 日本騒音調査 騒音値の基準と目安. https://www.skklab.com/standard_value.
- [11] Thingsgivers 3DBenchy. <https://www.thingiverse.com/thing:763622>.
- [12] PrusaSlicer. <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>.
- [13] 中京大学 橋本研究室 基本的なテンプレートマッチング. <http://isl.sist.chukyo-u.ac.jp/Archives/tm.html>.