

Flushner 適用のための統合編集ツールによる総所要時間短縮と作業負荷低減

櫻井 瑛一朗* 真鍋 宏幸*

概要. FDM方式(熱溶解積層方式)3Dプリンタの課題に, 製作物の大きさに対して印刷時間が長いことがある. 我々が提案してきた Flushner [4] では, “Print-Pause-Print” プロトコルを用いて, 印刷途中に段差を設けたプレートを挿入することにより, 3D オブジェクトの印刷時間を短縮する. 印刷時間を短縮できる一方, 準備として CAD でのモデル編集と G-code 編集を手作業で行う必要があり, 作業時間が長くなる問題があった. そこで我々は, この作業を CAD やテキストエディタを操作せずに実現できる Flushner 統合編集ツールを作成した. 実験の結果, 提案ツールは G-code 編集や 3D モデル編集などの作業時間を手作業より大幅に短縮し, 総所要時間は通常 3D プリントよりも短くなった. さらに作業負荷では, 手作業より一貫して低い負荷を示し, 多くの尺度で通常印刷に近い負荷水準であった.

1 はじめに

ラピッドプロトタイピングは, 製品開発の初期段階でアイデアを迅速に具現化するために用いられる手法である. ここで作製されるプロトタイプは, デザインの評価やフィードバックの収集に利用される. 3D プリンタは, プロトタイプを製作するために用いられる一般的なツールの1つとなっており, コストの劇的な低下により, 産業界だけでなく家庭でも使用されることが期待されている.

しかし, 3D プリンタの大きな課題として, 製作物の大きさに対して印刷時間が長いことが挙げられる. この問題を解決するために, 製作物のデザインを見直すことで, 高速印刷を可能にする手法がある. WirePrint [2] や On-the-fly print [3] では, 製作物をメッシュ状にし, 印刷体積を減らすことで時間の短縮をした. 一方で, これらの製作物での用途は, 大きさや形の確認までにとどまり, 実際に使用することや, それによる使用感のフィードバックを得ることは困難である. Scrappy [5] では, インフィルの代わりに既存オブジェクトを 3D プリント内部に埋め込むことで印刷時間を短縮する. しかし, この手法では, 製作物表面部の印刷時間を短縮することはできない. Platener [1] は, 3D プリンタとレーザーカッターで製作物のパーツを分担して作り, 最後に組み立てを行うことにより印刷時間を短縮した. しかし, モデルを簡略化させる必要があることや, パーツ各々に連結部分が必要であるという問題点がある.

これを解決する手法として我々は Flushner [4] を提案してきた. Flushner では, “Print-Pause-Print” プロトコルを使用し, 印刷途中に段差を設けたオ

ブジェクトを挿入する. これにより, 表面部分やサポート, インフィルなど 3D プリンタで印刷する部分の体積を削減し, 3D オブジェクトの印刷時間を短縮できる. また, 3D プリントと組み込む段差オブジェクトの境界が面揃いになっている“面一”を実現することができ, モデルの簡略化を必要としない.

3D オブジェクトの印刷時間を短縮する Flushner であるが, 準備段階で CAD やテキストエディタでの編集を手作業で行う必要があった. 具体的には, オブジェクト挿入部分のくり抜きとクリアランスを考慮した 3D モデルの編集と, 一時停止コマンドを含む G-code の編集である. これらは多くの時間を要し, 総所要時間は通常の 3D プリントよりも長くなってしまったことがあった.

2 統合編集ツール

本研究では, 先行研究である Flushner [4] を CAD やテキストエディタの操作をせずに編集できる Flushner 統合編集ツールを作成した. この統合編集ツールには 2 つの機能がある.

1 つ目は, ユーザがインポートする 3D モデルファイルに Flushner を適用することである. 統合編集ツールはプレートに置換可能な平面を検出し, ユーザはその平面からプレートに置換したい平面を選択する. この際, プレートの厚さや段差の深さ, 段差の幅などのパラメータを変更することが可能である. その後, ツールは 3D プリンタで印刷するモデルである STL ファイルと, レーザーカッターで製作するプレートの設計図である DXF ファイルをエクスポートする.

2 つ目の機能は, スライスされた G-code への一時停止と通知音の追加である. ユーザは上記でエクスポートされた STL ファイルをスライサソフトでスライスする. スライスされた G-code ファイルをこの統合編集ツールにインポートし, 使用する 3D

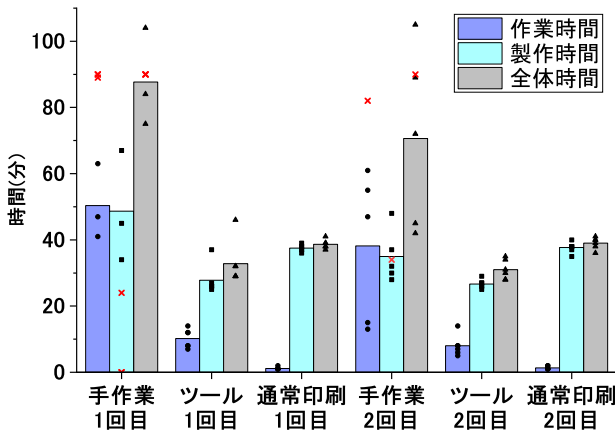


図 1. 実験での各時間と被験者の個々データ。

プリンタを選択する。選択された 3D プリンタに適合するコマンドが追加され、G-code ファイルがエクスポートされる。

3 実験

Flushner 統合編集ツールを Rhino8 の Grasshopper により実装した。そして、Flushner 統合編集ツール使用/不使用時の作業時間および作業負荷を評価する実験を行った。PC で作業している時間を作業時間、3D プリンタやレーザーカッターを動かしている時間を製作時間、製作開始から終了までを全体時間とし、それぞれを記録する。被験者は CAD の 1 つである Fusion360 の使用経験がある 6 名である。被験者には、あらかじめ用意した 2 種類の基本モデルを、3 条件（手作業：Flushner を Fusion360 で手動編集、ツール：Flushner 統合編集ツールで編集、通常印刷：Flushner を適用しない通常の 3D プリント）で各 1 回ずつ製作させ、1 人あたり計 6 試行を行った。各試行ごとに製作開始から 1 時間半後の時点で、3D プリンタの待ち時間のみで完成する見込みがなければ製作を打ち切り、リタイア扱いとした。また、1 つ製作するごとにアンケートに答えさせ、最後にインタビューを行った。

3.1 時間評価

実験での時間評価を図 1 に示す。多くの被験者は、3D プリンタの造形中にプレートの図面調整と、レーザーカッターでのプレート作製をしていた。なお、図面調整はレーザーカッターの仕様に合わせてするための作業であり、手作業・ツールの両方で必要となる。この重複時間があるため、作業時間と製作時間の合計は、全体時間と必ずしも一致しない。それぞれの棒グラフは被験者の平均時間を表しており、その計算にはリタイアした被験者は除いている。また、プロットは各被験者のデータを表しており、赤いバツ

		Mental	Physical	Temporal	Performance	Effort	Frustration
1回目	手作業	6.00	4.83	4.83	5.17	6.33	5.50
	ツール	1.83	1.50	1.83	1.17	2.00	1.50
	通常印刷	1.17	1.33	1.33	1.33	1.00	1.83
2回目	手作業	5.17	4.67	4.50	3.50	5.67	4.17
	ツール	1.83	1.67	1.33	1.00	1.67	1.33
	通常印刷	1.00	1.33	1.17	1.17	1.17	1.00

図 2. NASA-TLX での作業負荷評価。

プロットはリタイアした被験者のデータを表している。今回の実験において、手作業の 1 回目では 3 人が、手作業の 2 回目では 1 人の被験者がリタイアした。一方、ツールと通常印刷では 1 人もリタイアした被験者はいなかった。

1 回目では、作業時間において、手作業 > ツール > 通常印刷が全被験者で一貫していた。また、全体時間においては、5 人の被験者で手作業 > 通常印刷 > ツールという序列が成り立っていた。学習効果が期待される 2 回目では、作業時間と全体時間において上記の序列が全被験者で一貫した。このことから我々が作成した統合編集ツールは、Flushner の準備に必要な作業時間を短縮し、全体時間を通常印刷よりも短くすることが示された。

3.2 作業負荷

NASA-TLX を用いた作業負荷の評価を行った。被験者は全尺度において 7 段階評価で回答した。このうち、Performance は反転処理をしており、数値が高いほど被験者の達成感が低いことを表している。全 6 尺度において単純平均化したものを図 2 に示す。

全 6 尺度において、ツールは手作業より低く、通常印刷に近い負荷水準を示した。同様の傾向は学習効果が期待される 2 回目でも再現されている。このことから我々が作成した統合編集ツールは、Flushner の準備に必要な作業の負荷を、通常印刷と同程度まで低減することが示された。

3.3 被験者による主観評価

アンケートでは、ツールは手作業より簡単かつ高速で仕上がりに、手作業で見られた面一精度のばらつきや挿入部の層間接着不良がほぼ起きないことを評価する被験者がいた。また、通常印刷は容易だが単調でつまらなく、手作業とツールは創作感があると評価する声があった。

4 まとめ

CAD や G-code の手動編集を必要とせずに Flushner を適用できる Flushner 統合編集ツールを提案し、作業時間と作業負荷の観点から評価した。その結果、作成した統合編集ツールを用いることで、Flushner は通常印刷と同程度の作業負荷で作業時間を短縮した。これにより、3D オブジェクト製作に要する総所要時間を短縮できることを示した。

参考文献

- [1] D. Beyer, et al. Platener: Low-Fidelity Fabrication of 3D Objects by Substituting 3D Print with Laser-Cut Plates. CHI '15, p. 1799–1806.
- [2] S. Mueller, et al. WirePrint: 3D Printed Previews for Fast Prototyping. UIST '14, p. 273–280.
- [3] H. Peng, et al. On-The-Fly Print: Incremental Printing While Modelling. CHI '16, p. 887–896.
- [4] E. Sakurai and H. Manabe. Flushner: A 3D Printing Technique That Inserts Stepped Objects to Achieve Surface Uniformity and High Speed. CHI EA '24.
- [5] L. W. Wall, et al. Scrappy: Using Scrap Material as Infill to Make Fabrication More Sustainable. CHI '21.