

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K19788

研究課題名(和文) 先進的プログラム構築方法論に支えられた高機能な3D印刷造形技術の開拓

研究課題名(英文) Developing highly functional 3D-printing technologies supported by advanced programming methodologies

研究代表者

上田 和紀 (Ueda, Kazunori)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10257206

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：熱可塑性樹脂を用いた積層型3D印刷の部品化・組合せ技術の確立を目標に、モジュール結合による大規模構造物および機械部品の構築技術の開発および実証を行った。まず3Dプリンタの寸法限界を超える造形を可能にすべく、日本建築の継手・仕口技法に基づく相互結合技法を確立した。棒材の追掛け大柱継ぎを中心とする諸技法を組み合わせることで、相互接続可能な二次元トラスおよび三次元トラス(スペースフレーム)の3D印刷技術を開拓し、オープンソース公開をするとともに、引張試験と曲げ試験を行い特性を定量的に評価した。また実証実験として、構造部品と機能部品のほぼすべてを3D印刷した実用レベルの白板用大型プロッタを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、3Dプリンタの寸法限界を任意スケールで超えることのできる3D印刷物のモジュール化および相互結合技術を確立したことにある。特に、日本建築の伝統構法で培われた継手・仕口技術を3D印刷に本格的に導入し、数mm角の細い棒材を強固に接続する技法を実証的に確立させるとともに二次元および三次元構造物のモジュール化に応用することで、提案技法の高い汎用性と実用性を示した。これによって、3D印刷物における部品化、再利用性、寸法拡張性、機能拡張性、修理可能性、高速印刷可能性などの多様かつ重要な利点を確立させることができた。

研究成果の概要(英文)：We have shown that the 'Tsguite' (joint) technology used in traditional Japanese construction turns to be highly useful and practical in making small 3D-printed modules that can then be assembled to build arbitrarily large structures made up of bars and trusses. Of numerous variations of the Tsguite technology, we focused on Okkake Daisen Tsgui, one of the most widely used methods for joining beams and columns, and studied how it could be scaled down in such a way that it could be printed with desktop FDM 3D printers. The practicality of the design was demonstrated by tensile and bend tests of thin square bars with Okkake Daisen Tsgui joints. We applied our idea to design 2D truss modules and 3D truss (space frame) modules that could be interconnected with each other, based on which we built a fully functional plotter for a large whiteboard mostly built from 3D-printed structural and mechanical components. The thing files have been made open-source and publicly available.

研究分野：計算機ソフトウェア

キーワード：3D印刷 部品化・組合せ技術 造形パラダイム 高水準モデリング 継手・仕口 スペースフレーム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

3D プリンタ,特に熱可塑性樹脂を用いた積層型プリンタの普及により,複雑かつ多様な形状の物体を,高い寸法再現性で容易に制作できるようになった.また通常の加工技術と異なる additive manufacturing (積層造形技術)の特徴として,素材の廃棄を最小限にとどめることが可能となった.これらの特徴は,モノリシックな(一体造形による)模型製作への応用を大きく拡大させてきた.

一方,3D 印刷の課題として,印刷速度の低さや造形失敗の確率が小さくないことが挙げられる.また3D 印刷は,造形におけるソフトウェア技術の役割を大幅に拡大させる技術であるが,現状ではソフトウェアによる造形の利点が十分に活かされておらず,特に造形物の部品化・組合せ技術,カスタマイズ技術などが未普及であった.また模型製作にとどまらない実用品への応用は進みつつあるものの,大多数は部品製作への応用であり,部品の統合技術は未開拓であった.

### 2. 研究の目的

3D プリンタの普及により,多様な機能を実現するための「ものづくり」は,IT(情報技術)と一体となった広範囲な展開が見込まれる.高度な構造と機能をもつ造形物の実現には,ソフトウェア技術,あるいはソフトウェア的な「考え方」の役割がますます拡大すると期待される.先進ソフトウェア技術と高精度な3D 印刷技術の連携を大幅に深めることによって,造形技術を工学的に大きく進化させ,真に実用になる機能部品やその複合体としての機器を,家庭を含むあらゆる現場で容易に実現できるようにすることを最終目的とする.

これに向けて本研究では,熱可塑性樹脂を用いたデスクトップ積層型プリンタを前提に,プログラミングやソフトウェア工学等の分野におけるさまざまな知見,すなわち部品化,再利用,自動合成などの技術を,3D プリンタによる高品質かつ最適なものづくりに結びつける方法を実証的に探求する.3D 印刷による造形物の物理特性を適切に考慮した部品化と組合せの技術をソフトウェア技術と造形技術とのすり合わせによって開拓し,これを核として高スケーラビリティ,高機能,高速,高歩留まり,拡張容易性等の特徴を備えた新たな造形パラダイムの確立を目指す.

### 3. 研究の方法

本研究は3つの柱から構成する.1つめは高機能造形物実現のための基礎固め,2つめは高機能部品の設計論,最後は部品の組合せによる上位構造と機能の構築方法論である.

- (1) プリンタの実用的精密制御技術:民生用低価格3D プリンタで,適切な部材組合せに必要な0.05mm前後の寸法精度を安定確保するための技術を実験的に確立する.またこれを通じて素材や印刷パラメタの及ぼす影響を把握する.
- (2) 機能部品の設計技術:大多数の人工物は構成要素に分解できる.本項目では,機能部品すなわち意味のある機能(保持,弾性,伝達等)を担う構成単位に対する設計論を検討する.またこれらの機能の試作を通じてその特性や実用性を評価する.
- (3) 部品の組合せ技術:3D 印刷はモノリシックな造形が特徴とされるが,多くの限界が存在する.造形物を構成要素に適切に分解して出力して組み合わせる技術は,スケーラビリティ,機能,印刷速度,改造・再利用容易性などさまざまな利点をもつと期待でき,それを実証的に探求する.

### 4. 研究成果

#### (1) はじめに

低コストの積層型3D プリンタは,複雑な形状を高い再現可能性で実現できることから,従来の加工技術ではカバーできなかった多くの応用を獲得しつつある.これまでの技術動向は,機能部品でも模型などの非機能部品でも,主としてモノリシックな造形を目指すものであったが,モノリシックな造形にはさまざまな本質的限界がある.このためモジュラーな部品設計が下記の観点から有力な選択肢となってくる.

- スケーラビリティ:一体造形の明白な限界は,プリンタの寸法からくる印刷可能サイズの制約と,容易に数時間以上におよぶ印刷時間である.さらに,第一層の固着不良やフィラメントのもつれを含むさまざまな原因による印刷失敗の可能性の増大も,時間と資源の損失を伴う大きな問題となる.
- 機能性:積層型3D 印刷物は本質的に異方性をもつ.また,印刷方向は印刷の容易さと品質に大きく影響する.このため,多くの機能部品は異なる特性(積層方向,弾性,積層ピッチ,色など)をもつ構成要素の組合せによって,より高い機能を実現できる可能性がある.
- 印刷速度:3D 印刷は多大な時間を要するが,モジュール化と多くの低価格プリンタを用い

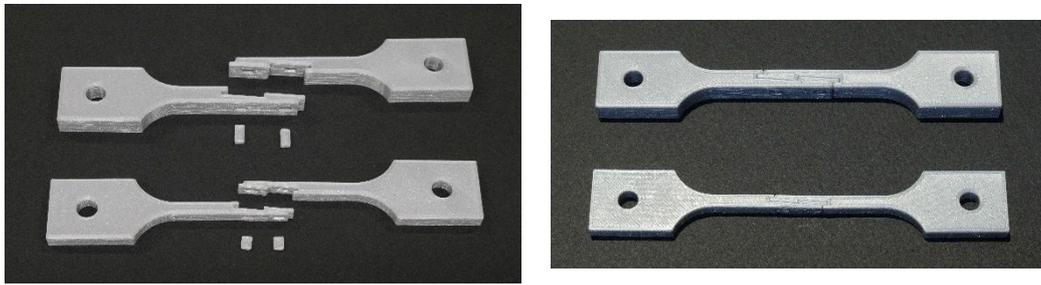


図 1: 4mm および 6mm 角の追っ掛け大栓継ぎ (構成要素 (左) および組立て後 (右))

- た並列印刷によって制作時間の削減を図ることができる。また標準部品の備蓄も可能になる。
- 拡張性: モジュール化は制作物の修理や機能拡張を容易にする。またソフトウェア開発分野で有効性が示されているアジャイル開発をものづくり分野に導入することができる。

複数の構成要素の組合せ方法には、連結、回転、摺動、弾性支持などさまざまな形態がある。本研究ではこれらの印刷方法の検討および試作を経て、最終的には、(栓などの補助部品ではなく) 庄たる構成要素どうしを標準的な印刷方法で相互連結する技術を中心に追求を行った。特に、ネジ、接着、溶着などを用いず 3D 印刷物だけで強固な連結を実現することを目指した。ネジは緩み、接着剤は劣化し、溶着は分解を困難にするためである。

このために参考にしたのは、日本建築の伝統構法に見られる組木技法の 3D 印刷への応用である。伝統構法による建築物は、ボルト、釘、金具を用いないにもかかわらず、大地震に非常に強いことが知られているだけでなく、分解や修理にも有利な構造となっている。

## (2) 3D 印刷部品の連結方法

日本建築における組木(または木組み)は、二つの部材を直線状につなぐ継手と異なる角度でつなぐ仕口に分類されるが、いずれも多数の技法が考えられている。継手については、互いに似た形状をもつ「金輪継ぎ」「追っ掛け大栓継ぎ」および「尻銕み継ぎ」が、他の継手と比べて強度の点で優れることが知られている。

美観と強度の両面で利点をもつこれらの技法だが、3D 印刷への応用はこれまで深く検討されてこなかった。そこで本研究では、さまざまな代案の試作と評価を通じて、建築物における柱や梁の継手の 1/20 (4mm~6mm 角) のスケールで真に実用になる連結方法とパラメタの検討を行った。

結果として選定した技法は追っ掛け大栓継ぎと呼ばれるもので、建築では金輪継ぎとともに良く知られた技法であるとともに、高い引張強度とリーズナブルな曲げ強度をもつ。追っ掛け大栓継ぎは図 1 のように中央にフック、根元に溝をもつ先細り型の継手である。図 1 に示す 3D 印刷版では、印刷可能性や強度を考慮してパラメタを設定している。金輪継ぎとの比較では、3D 印刷が容易であることと、込み栓が必須ではないことが重要な選定理由となった。

実用性を確認するために、4.8mm 角の 3D 印刷棒材の追っ掛け大栓継ぎに対して引張試験を行った。強度が求められる用途にとって最小スケールに近いサイズである。素材は PLA と PETG を使い、0.4mm ノズル、積層ピッチ 0.2mm、インフィル 80%でいくつもの試験片を作成した。高負荷時の変形の様子を図 2 に、荷重-変異特性の例を図 3(左)に示す。サンプルによる変動はあるが、およそ 150N 以上の引張強度が確保できることが確認できた。最終的な破壊は、込み栓が外れるか、PLA の場合は継手部分の破断によって起きることを確認した。また、継手の空隙の調整が非常に重要で、強度に大きく影響することも判明した。

曲げ試験も実施した。荷重側間隔 20mm、支持側間隔 80mm の 4 点曲げ試験を行い、図 3(右)の結果を得た。予想通り PLA の方が高い剛性を示したが、より小さな変異で破壊が起きた。また、y 軸方向の剛性が z 軸方向の剛性の 1/2~2/3 であることも判明した。



図 2: 引張り試験 (4.8mm 角)

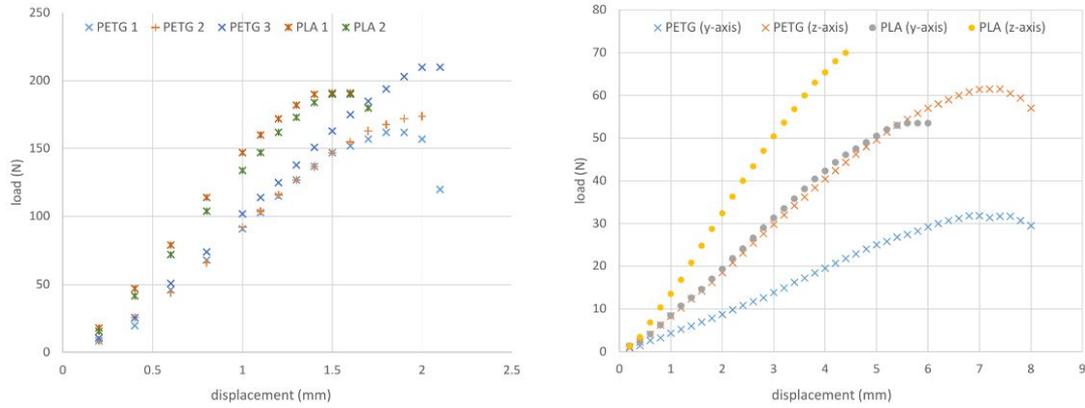


図 3: 追っ掛け大柱継ぎ (4.8mm 角) の引張試験 (左) および曲げ試験 (右) 結果

### (3) 2次元トラスとその応用

棒材の連結技法開発の一つの目的は、任意の長さに拡張可能なトラスモジュールの設計にあった。トラスは強度-重量比に優れた構造であり、多くの用途への活用が期待できる。

鍵となるアイデアは、部材を節点で接続せずに部材の中央で接続する点である。これによって、4本の部材が集まる節点の印刷が大幅に単純化された。理想的なトラスと異なり、節点がピン結合ではないが、これは PLA または PETG 部材の弾性によって十分カバーされる。

このトラスモジュールの実用性の検証目的を兼ねて、大きな白板(縦 1.5m × 横 2.4m) に板書するプロッタの設計制作を行った。駆動メカニズムには CoreXY を採用した。上下の水平レールにはアルミフレーム材を用いたが、垂直レール(1.5m)はユニットサイズ 50mm の PETG トラスを多数接続して構築した。白板に平行な前面トラスはプロッタヘッドのレールも兼ね、それと直角をなすトラスを背面に組み合わせて白板に垂直な方向の剛性を確保した。図 4 に動作中のプロッタを示す。



図 4: 3D 印刷したレールおよびヘッドをもつ白板プロッタ

プロッタヘッドは、電子部品と駆動ベルトを除く 70 を超える部材のほぼすべてを 3D 印刷し、ネジをまったく用いずにプラグや楔など多様な方法で相互結合した。長時間の試運転を通じて、相互連結以外に回転や摺動等の部品間インタフェースも 3D 印刷によって実用レベルで実現可能であることを確認した。

垂直レールは 20mm 角のアルミフレーム材の半分以下の重量に抑えつつ、プロッタ用途に十分な剛性を確保した。ねじり剛性は高くないが、ヘッドの加速度を適切に制御することで対処した。本実験を通じ、3D 印刷によるトラスが、高度に拡張およびカスタマイズの可能な構造部品として、金属や木材の代替となりうることを実証した。

### (4) 3次元トラス

3次元トラス(スペースフレームとも呼ばれる)は、中柱を設けずに大きな空間をカバーする手段として広く用いられている。最も一般的なスペースフレームの構成要素は、幾何学的には正 8 面体の半分および正 4 面体からなる。

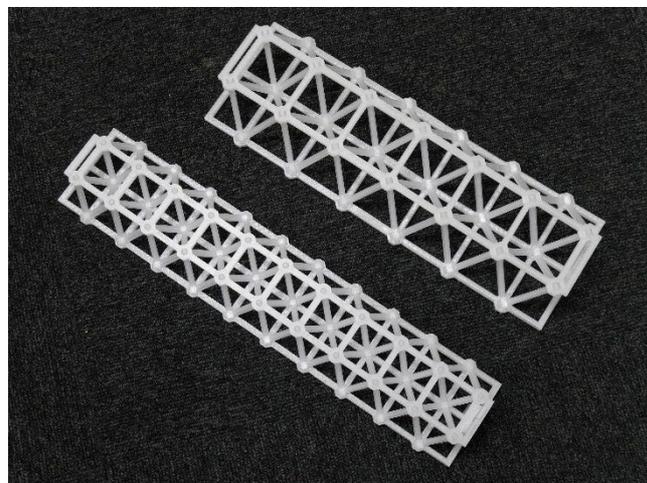


図 5: 3D 印刷して組み立てたスペースフレーム (ユニット長 35mm および 50mm)

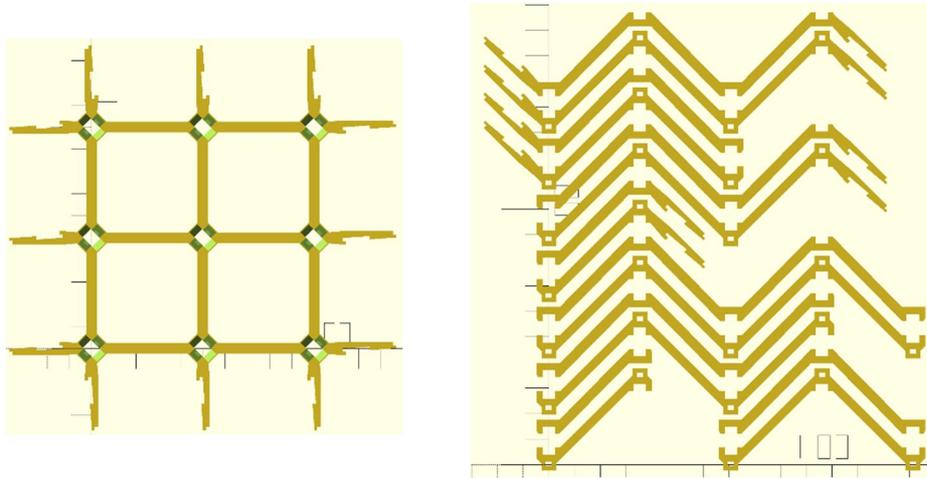


図6: スペースフレームの水平部材モジュール(左)および斜め部材モジュール(右)

3次元トラスの節点は8本の部材が集まり、(2次元トラスの場合と異なり)それらが同一平面上にないため、部材を堅固に連結する印刷方法は自明でない。また、部材の印刷方向を部材の長手方向とすることは必須である。そこで2次元トラスと同様に、部材の相互接続には追っ掛け大栓継ぎを用いることとしたが、これに加えて各節点に集まる8本の部材が異なる3枚の平面に属するという問題に対処する必要があった。

この問題に対して以下の方式を採用することとした。

- 同一平面上の部材(水平層の4本と、斜めの2本が2組)は一度に印刷
- 2組の斜め部材どうしは相欠き継ぎで接続
- 斜め部材と水平部材どうしは長ぼぞ込み栓打ちで接続

これによって、任意の大きさに拡張可能なスペースフレームモジュールの設計に成功し、試作と評価を行った。図5に試作例を、図6に組立前のモジュール例を示す。図5のトラスのユニット長は50mmおよび35mmで、部材は4.8mm角(継手部分は若干変更)、素材はPETGである。頂点が凹型の斜め部材は、ぼぞをもつ斜め部材と水平部材とを込み栓で締結することによって、全方向への動きが制限される。

これらの試作フレームに対して4点曲げ試験を行った。ユニットサイズ35mmで2×7ユニットのフレームの長手方向中央に350Nの荷重を加えたとき、変位は14mmとなったものの破壊せず、荷重を除けばほぼ復元することが確認できた。さらに大きな荷重を加えて破壊させる実験も行った。壊れたモジュールだけの追加印刷と交換によって全体が復元できることを確認し、材料効率や持続可能性の点からの提案技法の利点が確かめられた。

#### (5) まとめと今後の課題

本挑戦的研究は、3D印刷の部品化と組合せ技術を軸に多様な展開方向を構想し提案した。研究期間の前半は3D印刷技術の機械および材料特性の理解につとめながら、組合せ技法に関する多様な技術要素の試作を行い、有望な研究方向を探索した。後半は、特に有効性が高くかつ国際的貢献が期待できる技法として、日本建築で培われた部材連結技術を軸に据えて研究を展開して、スペースフレームのように3次元的な強度確保を目的とする構造物のモジュール化への応用が可能なことを実証した。その成果は、カスタマイズ可能なscad形式プログラムとしてGitHubおよびThingiverseからオープンソース公開した。

一連の研究の最終目標は3D印刷とソフトウェア技術の融合であるが、本研究期間内にソフトウェア技術者のものであり、3D印刷に反映できた点で、道筋は緒についたと言える。計算の世界にたとえると基本演算の一部が概念的および物理的に実現し、さらにその応用可能性を物理的に示すことができた段階である。今後は、モジュール化や再利用をはじめとするソフトウェア工学の諸技法、および組合せ最適化および制約充足技法などの情報側の技術と、複雑な3D印刷物構成技術との真の融合を目指して、さらに研究を継続する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ueda Kazunori	4. 巻 -
2. 論文標題 Interlocking 3D-printed bars, trusses and space frames to build arbitrarily large structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 engrxiv.org	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.31224/2338	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

OpenSCAD files for modular things <a href="https://github.com/k-ueda/scad">https://github.com/k-ueda/scad</a> Modular 3D printing <a href="https://www.ueda.info.waseda.ac.jp/3dprint/">https://www.ueda.info.waseda.ac.jp/3dprint/</a> Customizable "Okkake Daisen Tsugi" joint <a href="https://www.thingiverse.com/thing:5392796">https://www.thingiverse.com/thing:5392796</a> Customizable and extensible truss <a href="https://www.thingiverse.com/thing:5394703">https://www.thingiverse.com/thing:5394703</a> Customizable and extensible space frame <a href="https://www.thingiverse.com/thing:5397974">https://www.thingiverse.com/thing:5397974</a>
---

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------