

東京大学 / Nature Architects 株式会社 / エレファンテック株式会社  
宮城大学 / 科学技術振興機構 (JST)

## 折紙シートが自動で望みの立体に ——インクジェットプリンタでパターンを印刷、加熱により自動変形——

### 発表のポイント

- ◆ 最大で十万本以上の折り目と数万個の面を持つ折紙を自動で折る技術を開発しました。
- ◆ これまで、あらゆる多面体を折れる折紙を設計する手法は存在しましたが、設計された複雑なパターンを簡単に製造する手法は存在しませんでした。今回、実質的にあらゆる多面体を自動で折れる製造手法を、世界で初めて実証しました。
- ◆ 汎用の UV プリンタと熱収縮するシート状の素材があれば実現できるため、加熱するだけで好きな形に変形するプロダクトとして幅広く応用できると考えられます。



お湯につけるだけで平面から立体へ自動変形した帽子

### 発表概要

東京大学大学院工学系研究科の鳴海紘也特任講師、川原圭博教授、大学院総合文化研究科の館知宏教授、大学院情報理工学系研究科の五十嵐健夫教授、宮城大学事業構想学群の佐藤宏樹准教授、Nature Architects 株式会社の須藤海氏、エレファンテック株式会社の杉本雅明氏らによる研究グループは、熱収縮性のシートに折紙のパターンを印刷し、そのシートを加熱することによって、与えられた多面体を自動的に折る技術を開発しました。これまでも折紙構造を自動で折る「自己折り」(注1)の技術は複数提案されてきましたが、自動で折れる折り線や面の数は最大で 100 程度しかなく、作れる形状に大きな制約がありました。本研究では、インクジェット印刷の解像度を活用することにより、従来の 1200 倍以上の解像度を実現し、最大で十万本以上の折り目と数万個の面を持つ折紙を自己折りすることに成功しました。折紙の研究分野では、理論上あらゆる多面体を 1 枚の紙から折れることが知られています。しかし、そのような折紙パターンを手で折ると数時間から数十時間の作業が必要になります。本研究成果により、それらの非常に複雑な折紙パターンを数秒から数分で自己折りすることが可能になりました。これにより、実質的にはどんな立体形状でも 2 次元の製造プロセスと自動変形により実現できることが明らかになりました。

## 発表内容

### 〈研究の背景〉

近年、3D プリンタの発展によりさまざまな 3 次元形状を手軽に製造できるようになりました。その一方、ファブリケーションの研究分野では、縦・横・高さの 3D の印刷に加えて、形状や機能などの時間的な変化 (+1D) を印刷により実現する「4D プリント」(注 2) と呼ばれる技術が注目を集めています。また、2 次元の折紙を自動で折る自己折りの研究分野も、3D プリンタが普及する以前から注目されていました。4D プリントや自己折りの造形上の利点として、単純に 3 次元の形状を 3D プリントするよりも造形時間が短い場合が多く、サポート材と呼ばれる造形時の廃材が発生せず、保管や運搬に有利であることが挙げられます。そのため、4D プリントや自己折りは環境にやさしい次世代のファブリケーション手法として期待されています。

しかし、既存の自己折り手法には課題がありました。例えば、従来の自己折り手法で実現できる折紙は単純なものに限られており、実用的な形状を自動で折ることは困難でした。また、設計面でも限界があり、既存の自己折り研究で利用される折紙パターンの多くは、複雑な形状を実現できないか、変形後にテープやノリでたくさんの辺を固定しなければいけないという問題を含んでいました。さらに、せっかく印刷で造形しているにも関わらず、印刷の利点であるフルカラーでの装飾などを同時に実現している例もありませんでした。

### 〈研究の内容〉

そこで本研究グループは、工場や FabLab (注 3) などで使用される汎用的な UV プリンタに着目しました。UV プリンタは、家庭で使用されるインクジェットプリンタと同じように 2 次元の模様を描くための装置です。プリントヘッドから細かいインクの液滴を飛ばし、そのインクを紫外線で硬化させることにより、紙のパッケージ・樹脂のプロダクト・金属の製品などさまざまな物体を装飾するために利用されています。UV プリンタに用いられるインクジェットプロセスは、従来の 4D プリントや自己折りの研究で使われてきた造形手法、例えば Fused Deposition Modeling (FDM) 方式 (注 4) の 3D プリンタなどに比べて、短時間・高解像度での印刷が可能です。

造形の手順は図 1 のとおりです。まず、ユーザの望む 3 次元のモデルから 2 次元の折紙パターンを計算します。このとき、トップコートのパターン・表面のパターン・裏面のパターン・接着用パターンなど、異なる機能に対応する印刷データを複数作成しています。また、パターンの中には、表面か裏面のどちらかにわざと印刷を施さず、シートを露出させている場所が存在します (図 2)。次に、印刷パターンを熱収縮シート (ポリオレフィンのフィルムやポリエステル布など) に印刷し、パターンが印刷されたシートを約 70 度から 100 度の範囲で加熱します。すると、シートが露出する部分が熱により収縮する一方、シートが露出していない部分の収縮はインク層により抑えられます。この結果、目標としている折紙の形状が完成します。なお、インクジェット印刷の精細さを活かして露出部の幅を 0.1 mm 程度のオーダーで変化させると、それぞれの折り目の角度を 0 度から 180 度の範囲で制御することができます。また、最小で長さ 3 mm 程度の折線パターンを折ることができます。この結果、自己折りできる折紙の解像度として既存研究の 1200 倍以上を達成し、数万個の面を持つ折紙を自己折りすることに成功しました。

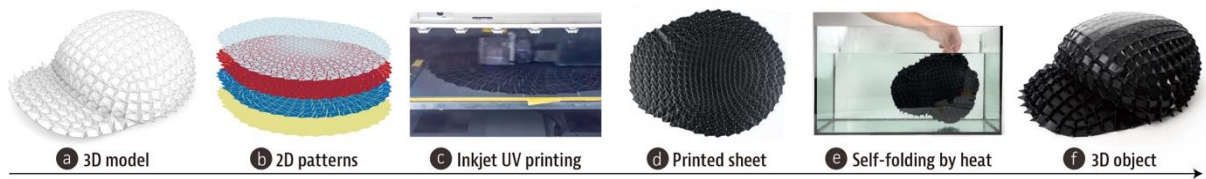


図 1：提案の流れ

多面体 (a) を入力すると、ソフトウェアが自動的に印刷パターン (b) を生成する。UV プリンタ (c) でパターンを印刷したシート (d) を約 70 度から 100 度で加熱する (例：温水に浸す) (e) と、入力した多面体が自動で折れる (f)。

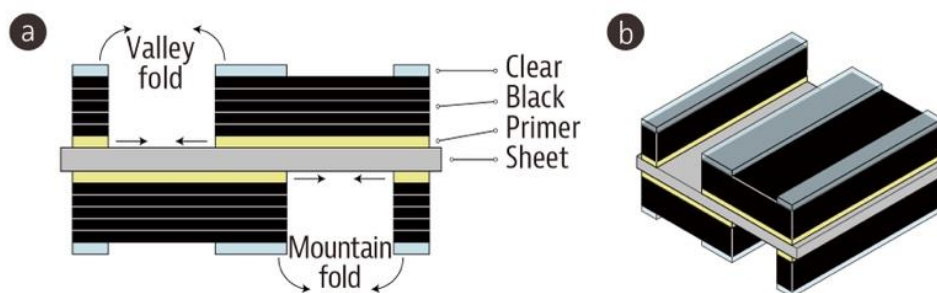


図 2：シートの模式図

トップコートとして機能するクリア、変形を制御する黒、インクとシートを接着するプライマの層が印刷された構造の断面図 (a) と、その俯瞰図 (b)。

また、本研究グループは設計ソフトウェアも実装しました。これまで、本研究グループは折紙の設計ソフトウェアを複数提案しています。例えば、舘らは折紙設計ソフトウェア Origamizer を開発し、入力した任意の多面体を 1 枚の紙だけで折れることを証明しました。また、須藤らは折紙プロダクトの設計ソフトウェア Crane を開発し、折紙パターンの変形シミュレーション・ある制約条件を課した状態での折紙パターンの形状探索・最終的な製造方法に合わせた厚み付けなどを実現しました。今回の研究では Origamizer や Crane を拡張し、ユーザが自分で設計した折紙を印刷用のパターンに変換する機能 (順問題) と、ユーザが入力した多面体に折れるような印刷パターンを自動計算して出力する機能 (逆問題) の両方を実現しました。これにより、工学などの分野で利用されてきたさまざまな折紙パターン (図 3) と、ユーザが自由に入力した 3 次元形状 (図 4) の両方を、大きな後処理の必要なしに自動で折れることを示しました。特に、ユーザが入力した任意の多面体を自己折りした成果は世界初です。

Name 2D origami size	3D model	2D model	2D photo	3D photo
Ron Resch pattern 267 facets 130 mm x 130mm				 3 cm
Miura folding 36 facets 140 mm x 130mm				 2 cm
Yoshimura pattern 80 facets 108 mm x 64mm				 2 cm
Waterbomb pattern 330 facets 280 mm x 130 mm				 2 cm
Hypar 188 facets 130 mm x 130mm				 3 cm
Flasher 67 facets 149 mm x 128 mm				 1 cm
Curved crease 2 facets 105 mm x 105 mm				 3 cm
Disk 15 facets 145 mm x 145 mm				 2 cm

図 3 : 従来から工学で利用されてきた折紙パターンの自己折り事例



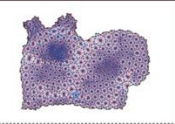




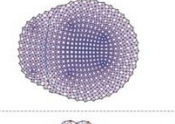




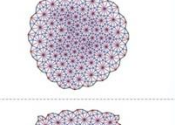



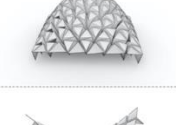
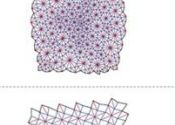



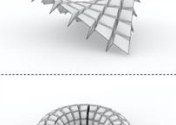
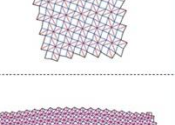




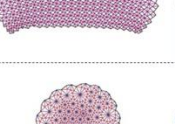





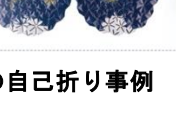

Name 2D origami size	3D model (input)	3D model (origami)	2D model	2D photo	3D photo
Bunny 4299 facets 610 mm x 420 mm					 5 cm
Cap 3426 facets 474 mm x 402 mm					 5 cm
Hemisphere 991 facets 272 mm x 280 mm					 3 cm
Mountain 1045 facets 271 x 286 mm					 3 cm
Saddle 312 facets 126 mm x 121 mm					 2 cm
Torus 1770 facets 212 mm x 491 mm					 3 cm
Earth 832 facets 143 mm x 144 mm					 2 cm

図 4 : ユーザーが自由に入力した 3 次元形状の自己折り事例

さらに、UV プリンタがもともとはフルカラー印刷のための装置であることを利用して、形状と装飾を 1 回の印刷で同時に実現できることも示しました。これにより、プリーツのような構造と色の付いたノースリーブジャケット（図 5）、さまざまな色や模様を個別に印刷できる花束のギフト（図 6）、お湯をかけることによって変形しメッセージが読めるようになるインタラクティブなポストカード（図 7）など、複数のアプリケーション事例を示しました。



図 5 : ファッションプロダクト

(a) 形と色を 1 度に印刷したノースリーブジャケット。(b) 3426 個の面で構成される帽子。

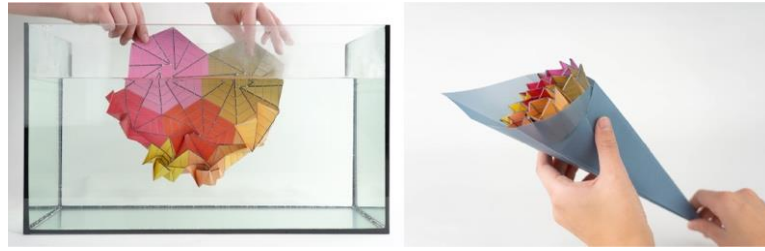


図 6：花束のギフト

既存の手法とは異なり、さまざまな色や模様を1枚ずつ別々に印刷できる。

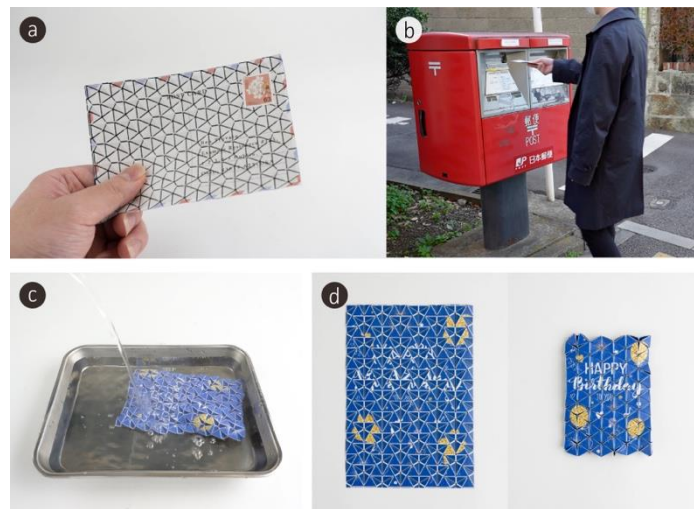


図 7：インタラクティブなポストカード

送った段階では何かが書いているかわからないが、お湯をかけることでメッセージの内容がわかる。

#### 〈今後の展望〉

前述の通り、本手法は単純に 3D プリントを行う場合に比べて、2 次元の印刷で 3 次元の形状を実現できることから造形時間が短く、サポート材が一切発生しないことから環境負荷が小さく、変形前の状態で保管・運搬できることから省スペースを達成できます。つまり、本手法は、身の回りのあらゆる 3 次元形状を、環境にやさしい 2 次元の方法で造形できる可能性を提示したものです。また、今後の展望として、手作業で折るのが難しい宇宙空間などでの変形などが期待されます。本研究グループは、本手法がものづくりの新たな技術として確立し、さまざまな産業やデザインに活用されることを期待しています。

#### 〈その他資料〉

プレスキット

[https://drive.google.com/drive/folders/1GpQgIDEBfvKAKAjgH6QE0IRm\\_kop3lyt?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1GpQgIDEBfvKAKAjgH6QE0IRm_kop3lyt?usp=sharing)

研究紹介動画

<https://drive.google.com/file/d/18KheHC15ykcIB0yyHmRqo2oy67h0ezcg/view?usp=sharing>

## 発表者

東京大学

大学院工学系研究科

鳴海 紘也（特任講師）

小山 和紀（修士課程）

野間 裕太（博士課程）

川原 圭博（教授）

大学院総合文化研究科

館 知宏（教授）〈大学院工学系研究科 兼任〉

大学院情報理工学系研究科

五十嵐 健夫（教授）

宮城大学事業構想学群

佐藤 宏樹（准教授）

Nature Architects 株式会社

須藤 海（取締役 CRO；研究職として参画）

エレファンテック株式会社

杉本 雅明（取締役副社長；研究職として参画）

## 論文情報

〈雑誌〉 ACM Transactions on Graphics（国際会議 SIGGRAPH2023 で発表）

〈題名〉 Inkjet 4D Print: Self-folding Tessellated Origami Objects by Inkjet UV Printing

〈著者〉 Koya Narumi\*, Kazuki Koyama\*, Kai Suto, Yuta Noma, Hiroki Sato, Tomohiro Tachi, Masaaki Sugimoto, Takeo Igarashi, and Yoshihiro Kawahara (\* joint first authors)

〈DOI〉 10.1145/3592409

〈URL〉 <https://doi.org/10.1145/3592409>

## 研究助成

本研究は、「JST ACT-I（課題番号：JPMJPR18UN）」、「インクルーシブ工学連携研究機構 価値交換工学」、「JST AdCORP（課題番号：JPMJKB2302）」の支援により実施されました。

## 用語解説

（注 1）自己折り：折紙を人手や機械からの外力で折るのではなく、素材自体が変形する内力で折る技術。ロボットの自動組み立て (Felton et al., A method for building self-folding machines, Science, 2014) などに応用が期待されている。

（注 2）4D プリント：印刷により、3次元の形状だけでなく、形状や機能の時間的変化を実現しようとするビジョン。マサチューセッツ工科大学 (MIT) の Skylar Tibbits により 2013 年頃に提唱された。

（注 3）FabLab：地域の住民がものづくりのために自由に利用する前提で、さまざまなファブリケーション装置が置かれたワークショップ。世界中に存在し、日本でも鎌倉など各地で利用されている。

（注 4）Fused Deposition Modeling (FDM) 方式：現在最も普及していると考えられている 3D プリンタの印刷方式。加熱したノズルからプラスチックを押し出し、積み上げて硬化することによって造形する。印刷後に造形物をもう一度加熱するとプラスチックが歪む性質を利用して、意図的に変形を起こす研究 (An et al., Thermorph, CHI, 2018) が存在する。

## 問合せ先

〈研究に関する問合せ〉

東京大学 大学院工学系研究科  
特任講師 鳴海 紘也 (なるみ こうや)

〈報道に関する問合せ〉

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

宮城大学 事務局企画入試課企画広報 G (担当：中木)

科学技術振興機構 広報課

〈JST 事業に関する問合せ〉

科学技術振興機構 国際部  
佐藤 正樹 (さとう まさき)