

研究助成実施報告書

助成実施年度	2020 年度
研究課題（タイトル）	3D スキャン・デジタルファブリケーション技術を用いた複雑形状の設計・製作方法論の実践的研究
研究者名※	平野 利樹
所属組織※	東京大学 総括プロジェクト機構 特任講師
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団2020年度研究助成実施報告書

所属機関名 東京大学

申請者氏名 平野利樹

研究課題	3D スキャン・デジタルファブリケーション技術を用いた複雑形状の設計・製作方法論の実践的研究
<p>(概要) ※最大10行まで</p> <p>本研究は3D スキャン技術と Additive Manufacturing (付加製造) に着目し、3D スキャンの特徴の分析から、3D スキャンモデルの複雑形状のデータ加工、デジタルファブリケーションのためのデータの最適化まで、一連のプロセスを検証するものである。</p> <p>3D スキャン手法の比較分析においては、フォトグラメトリと光投影法の2手法に着目し、それぞれのスキャンプロセスや結果の違いをもとに、各手法の特徴の分析を行った。</p> <p>3D スキャンデータを用いた複雑形状のファブリケーション手法の検討においては、3D スキャンデータを組み合わせた複雑形状をデジタルファブリケーション加工データに変換する際の技術的課題を整理し、ディスプレイメントマッピングを用いた形状の近似最適化手法を考案した。</p> <p>上記のような検証をもとに、「情報量の膨大さの美学」という概念の考察を行った。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>情報量をいかに圧縮するかによって定義されてきたこれまでの建築の美学に代わり、膨大な情報量を圧縮することなく加工・制作することで生まれる新しい建築の美学を探求することが本研究の目的である。本研究では3D スキャンと Additive Manufacturing (付加製造) に着目し、新しい設計・製作方法論を実践的に研究することで、新しい建築の美学を探求する。</p>	

2. 研究の経過	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>1. 3D スキャン手法の比較分析</p> <p>1-1 比較対象手法の概要</p> <p>3D スキャン技術は、コンピュータの計算処理速度の向上やストレージ容量の増加により近年普及しつつあるが、物理空間上の物体の形状や細かな凹凸をデジタルメッシュモデルに変換することが可能である。3D スキャンにはいくつかの手法があるが、本研究では主にフォトグラメトリと光投影法に着目し、それぞれの特徴についての比較分析をおこなった。</p> <p>フォトグラメトリとは、スキャン対象物をさまざまな角度から写真撮影し、それをコンピューター内でデジタルモデルとして再構成する手法である。ベースとなる写真の撮影には特別な機材は必要なく、手持ちのスマートフォンなどで50~100枚程度の写真を撮影するだけでデジタルモデルが生成できる。</p> <p>光投影法は専用の機器からスキャン対象物に特定のパターンをもった光を投影し、それを機器のセンサーに</p>	

よって読み取り、投影部分の立体形状を再構成する手法である。

今回はフォトグラメトリと光投影法の比較にあたり、東京大学建築学科所蔵の建築模型をスキャン対象物としてスキャンを行った。

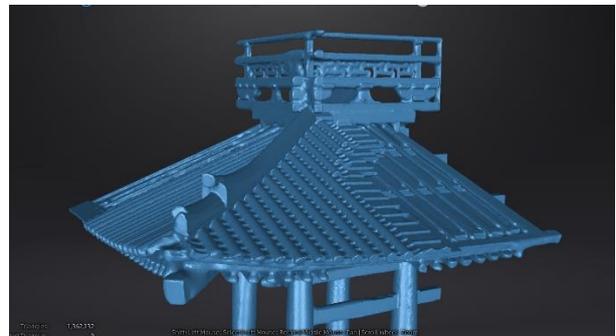
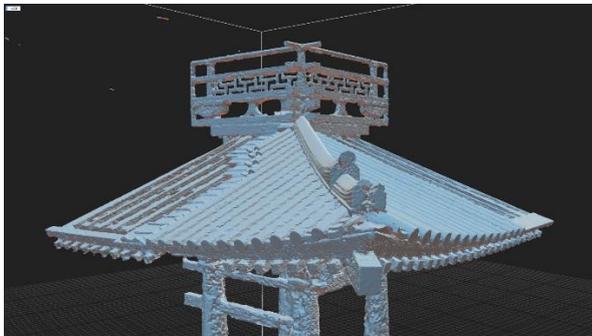
1-2 スキャンの詳細度

フォトグラメトリは、非常に細かいディテールもスキャンが可能である。それに対し、光投影法は若干粗さがみられた。実際は隅部が鋭利な形状であるが、光投影法でスキャンしたものはと角がとれたような形状となる。一方フォトグラメトリではエッジが立ったような形でスキャンができた。



フォトグラメトリ（左）と光投影法（右）における詳細ディテールのスキャン結果
たとえば隅部に小さなヒビ割れがある形状について、フォトグラメトリでは割れ具合まで詳細にスキャンできたが（左）、光投影法では割れ部分の形状が潰れてしまった（右）。また、数ミリ程度の細かな開口がある形状の場合、フォトグラメトリでは開口としてスキャンできたのに対し、光投影法だと開口がふさがってしまった。

1-3 ノイズの発生



フォトグラメトリ（左）と光投影法（右）のテクスチャ非表示スキャンモデル
フォトグラメトリでは平滑な表面でも、スキャン結果には細かい凹凸、ノイズがかなり発生する（左）。それに対して光投影法は、先述したディテールが粗いことの特徴のために、細かなノイズがあまり発生しない（右）。テクスチャなしでモデルを表示した場合に違いがわかりやすくなるが、フォトグラメトリの方がボコボコとした形状となっていることが観察される。

1-4 テクスチャ解像度

スキャンにあたっては、対象物の形状に加え、表面の色情報がテクスチャマップデータとして生成される。スキャンモデルのテクスチャマップの解像度については、フォトグラメトリのモデルが光投影法のものに比べて高いことがわかった。ただしフォトグラメトリの場合、マップの解像度は、元となる写真データの撮影

機材の解像度や、スキャン対象物とカメラとの距離によって異なる。

1-5 異なるスキャン過程によって生まれる特徴

フォトグラメトリの場合、写真撮影の過程と、3次元モデルに再構成するための処理の過程は分離されている。一方光投影法は、スキャン機器と処理を行うコンピューターは常に接続されており、撮影と再構成の過程が同時に行われている。これらの性質によって、以下の2点の特徴が確認された。

- (1) フォトグラメトリでは処理完了までスキャン結果が把握できないのに対し、光投影法は機器操作時にリアルタイムに画面上で大まかなスキャン結果を把握できる。
- (2) フォトグラメトリでは撮影と処理の過程が分離されているため、基本的にはどのような撮影機器も使用できる。

特に(2)に関連したフォトグラメトリの特徴として、一つの対象物のスキャンにあたって複数の撮影機器を使用できることが挙げられる。フォトグラメトリ、光投影法のいずれも、撮影機器が入り込めない箇所が対象物に存在すると、その箇所はスキャンモデルには反映されない。つまり、スキャン機器の大きさと同対象物の大きさ・形状との関係がスキャン結果に大きく影響する。光投影法においては、専用の機器を使用するため、その機器が入り込めない箇所があった場合に対処できない。一方フォトグラメトリでは、たとえば一眼レフカメラと iPhone で撮影した写真を組み合わせて処理をすることが可能である。つまり、一眼レフカメラが入り込めない箇所は補助的に iPhone などの小型撮影機器を使用することができる。



フォトグラメトリ（左）と光投影法（右）における内部空間のスキャン結果

図版の場合、フォトグラメトリでは外観は一眼レフカメラで撮影し、内部空間は iPhone を差し込むことによって撮影した結果、内部空間も比較的正確にスキャンできた（左）。一方の光投影法では、機器を内部に差し込むことができなかつたため、スキャンできていない（右）。

2. 3D スキャンデータを用いた複雑形状のファブリケーション手法の検討

2-1 ファブリケーション手法の概要

本研究では 3D スキャンデータをもとに設計した複雑形状を Additive Manufacturing（付加製造）と呼ばれるファブリケーション手法を用いて製作を行う一連の過程の考察を行った。Additive Manufacturing とは、3 材料を付加しながら形状を製作する手法で、3D プリントが代表的な手法である。一方、3D プリント手法において、大型物の印刷は現状まだ一般的ではないことから、本研究では、伝統工芸の手法の一つである張子技法に着目し、大型物の製作方法を検討した。筆者はロンドンデザインビエンナーレ 2021 に出展したインスタレーション「Reinventing Texture」（左）において、張子技法を用いて大型立体物を製作したが、本研究ではその製作手法を精査し、一般的な手法として発展させることを試みた。



「Reinventing Texture」展示風景（左）と、張子脱型の様子（右）

張子技法では、細かくちぎった紙を型に貼り合わせ、乾燥後脱型することで立体形状の製作を行う。つまり型の製作が必要になるが、「Reinventing Texture」においては設計データをもとに発泡スチロールをCNC切削したものを型として使用した。発泡スチロール型に和紙を合計5層重ね合わせることで比較的強固なシェル構造が製作できた（右）。ここで用いた手法はAdditive Manufacturingとして分類できる張子技法とSubtractive Manufacturing（除去製造）のCNC切削を組み合わせたものとして見る事ができる。

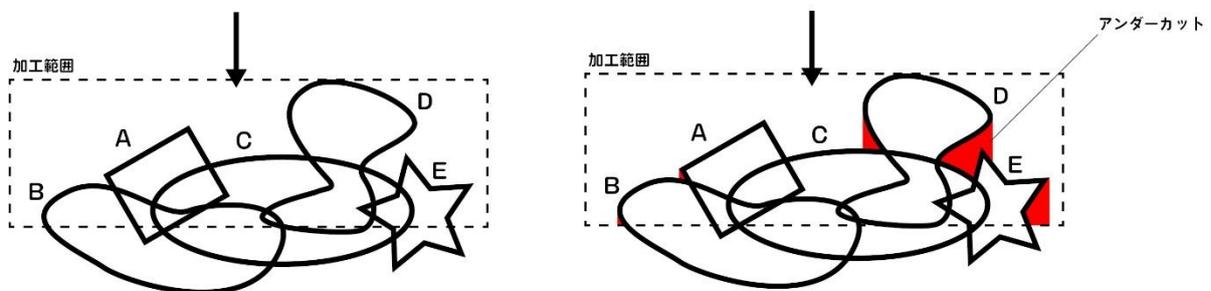
2-2 3D スキャンデータのファブリケーション最適化



3Dモデリングソフト上での3Dスキャンモデルの加工、組み合わせ

「Reinventing Texture」では、100以上もの3Dスキャンモデルを3Dモデリングソフト上で組み合わせることによって全体形状の設計をおこなった（左右）。

3DプリントやCNC切削などのデジタルファブリケーション手法において3Dモデルを加工データに変換する場合、モデルを一定の間隔で垂直・水平方向に輪切りにした断面輪郭線を抽出し、それをもとに工具経路（3Dプリンタの場合は材料射出ノズル、CNCの場合は切削のエンドミル）が生成される。3Dスキャンモデルを用いた複雑形状を加工データに変換可能なモデルとして作成する上で以下のような課題が見つかった。



3Dスキャンモデルの組み合わせによる複雑形状で発生するさまざまな課題

(1) 3Dスキャンモデルには、多くの穴やスキャン漏れがあり、塊（ソリッド）ではなく厚みのない面（サ

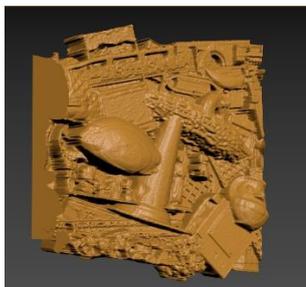
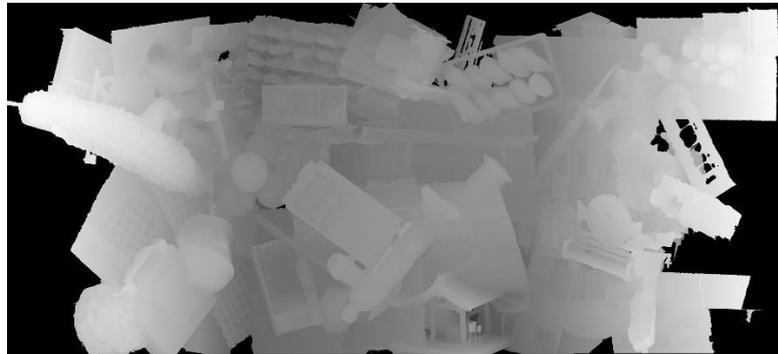
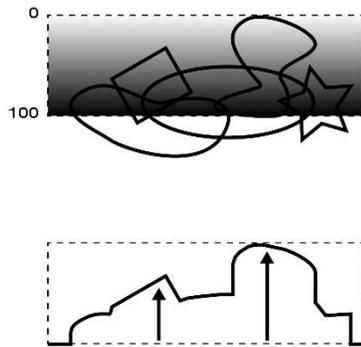
ーフェイス) となっている場合が多く、そのままでは3Dプリントなどで出力できない。

(2)多くの3Dスキャンモデルを組み合わせた場合、膨大なメッシュ数になってしまうことや、複数の3Dモデルが複雑に重なり合っているため、断面輪郭線が抽出できないエラーが多く発生する。

また複雑形状は多くの凹凸があり、3DプリントやCNC切削には適さない場合が多い。オーバーハングやアンダーカットと呼ばれる一部分が片持構造になっている状態や、ホールと呼ばれる中空構造の状態が該当する。3軸CNC切削では、このような形状は加工ができない。3Dプリントにおいては、サポート材と呼ばれる、プリント時の支持材を用いることで加工が可能となるが、大型の3Dプリンタにおいてはサポート材の使用は一般的ではない。また、張子技法においては脱型ができなくなってしまう。このような形状をいかに解消するかも大きな課題であった。

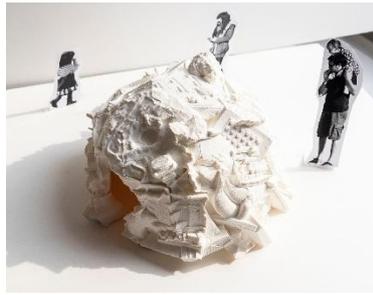
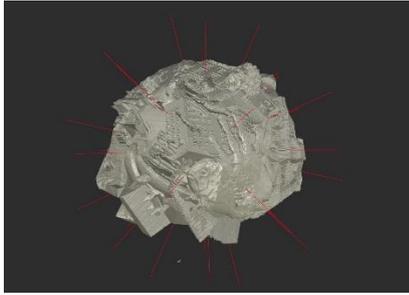
2-3 ディスプレイメントマッピングを用いた形状の近似最適化手法

上述した課題を解決する方法として、ディスプレイメントマッピングを用いた形状の近似最適化手法を考案した。これは加工データに変換できない複雑形状の複雑さをなるべく損なわないようにしながら、ファブリケーション可能な形状に近似させる手法である。本手法は以下のようなプロセスで成立している。



- (1)設計した複雑形状をいくつかの基本的な平面に分割する。
 - (2)各平面の法線上にカメラを設定し、Z深度画像（形状の高さ情報）をレンダリングする（左上、右上）。
 - (3)平面メッシュにレンダリングした画像のディスプレイメントマッピング（高さ情報画像をもとに面を押し出す機能）を適用する（左下）。
 - (4)ディスプレイメントマッピングを適用した平面を必要形状にカットする（右下）。
- この手法を用いることによって、2-2で挙げた課題が解決できた。

「Reinventing Texture」においては、6の基本平面に分割して最適化を行ったが、より複雑な全体形状として、切頂二十面体に分割し最適化を行う試みも行った。現在は各プロセスを半手動で処理しているが、今後は基本平面の分割からディスプレイメントマッピングの生成まで、自動的に処理ができるような方法を検討したいと考えている。



切頂二十面体をベースに分割し最適化を行ったモデル。合計 25 の平面に分割し、3D プリントで製作した。

3. 情報量の膨大さの美学

マリオ・カルポが指摘するように、平・立・断面図などの投影図はフィジカルなモノとしての建築が持つ膨大な情報量を 2 次元平面に圧縮変換したものである。情報量の圧縮は、図面の表記方法のみならず、建築の作られ方や美学をも規定してきた。たとえば工業化建材の使用は、寸法や性能にバラつきがないものが大量に入手できるため、図面上の簡単な記号として、容易に情報量を圧縮できる。モダニズムでは白く抽象化された表面を持った幾何学形態が建築の美学を定義していた。近年の複雑に連続する 3 次元曲面の建築なども、少ない制御点で自由曲面を数学的に表現できる NURBS を用いる点で、情報量の圧縮の美学の範疇に入る。翻って情報量の膨大さの美学とは何かを考えるのが筆者の関心である。カルポが投影図に替わる情報量を圧縮しない方法として挙げた 3D スキャンに本研究は着目したが、フィジカルなモノは膨大、もとい無限の情報量を持っている。より詳細な地図を作ることを追い求めた結果、地図自体が国土を覆う大きさになってしまったというボルヘスの寓話のように、モノが持つ情報をそっくりそのまま変換することは不可能である。3D スキャンではスキャン漏れによる穴や表面の反射によるグリッチといった変換漏れ、誤変換が発生するし、デジタルモデルをフィジカルなモノに出力する際も同様である。そのような不可能性の現れの中にこそ情報量の膨大さの美学があると考えている。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究の成果は以下の口頭発表や論考で発表を行った。

- ・ 建築学会デザイン科学数理知能小委員会・研究集会（口頭発表）
- ・ シンポジウム「模型をめぐる諸問題－東大所蔵模型を囲んで」（口頭発表）
- ・ 建築雑誌 2021 年 8 月号（論考寄稿）
- ・ Monumental Wastelands（論考寄稿）

ディスプレイメントマッピングを用いた形状の近似最適化手法については、今後国際学会などでの発表を検討している。

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究において張子技法の使用のために考案したディスプレイメントマッピングを用いた形状の近似最適化手法は、コンクリート 3D プリントなど、サポート材が一般化していない大型 3D プリントの領域でも活用できるため、より建築物に近いスケールでの複雑形状の製作が可能になることが期待される。今後同手法を発展させるとともに、より大型の試作を展開したいと考えている。