

小規模空間の 3D スキャニングと動きのセンシングを 組み合わせた設計・制作手法

Design/Production Method Combining 3D Scanning with Sensing of Movements in a Small-Scale Space

山下 健
YAMASHITA Ken

The author works on the study concerning a design/production method using sensing of human movements. Not like a normal design, for the information obtained by sensing, the angle and length of a component are inconsistent by fluctuation of human movements. I can assume enormous time and cost in case of a production by manual processing however I aim at automating the process and simplifying the work by design with assumption of digital fabrication. I produced a work to exhibit in the Ganseiji Tombs Art Exhibition held in Ikeda-chō, Gifu. I tried a method to design a structure by expressing the shape with hand movements to the vertical site imported to a computer while scanning 3D. Aiming at design and production method for architectures or interiors, I report the design/production method in producing the structure about 2.5 meters x 3 meters.

1 はじめに

設計者やデザイナーでも比較的容易に、プログラミングを設計に利用できる環境 (Rhinceros+grasshopper, ArchiCAD+GDL, Revit+Dynamo など) が整ってきたこともあり、設計に用いる情報技術として、従来の CAD や BIM だけでなく、デザイン手法としてコンピューショナルデザインが近年広がりを見せている¹⁾。本論ではコンピューショナルデザインを「設計に手続き (プログラミングなど) を持ち込むことで、設定した条件を満たすための計算をコンピュータを用いて行い、プロセスの手続きと可変な結果を保持したデザイン手法」と定義する。

筆者はコンピューショナルデザインの中でもセンシングを用いた設計・制作手法に関する研究を行っている。従来の CAD では、GUI を通して線などを描くことから、手描きの線が持つ勢いや強弱、勢いなどから生み出される無意識の動きなどはなく、身体的な感覚が切り離され整理された情報になる。しかし、センシングを用いることで、動きの情報を取り込むことが可能となり、デジタルデータに身体的感覚を反映させることができるのではないかと考える。通常的设计とは異なり、センシングで得られる情報は、人の動きがもつゆらぎによって、部材の角度、長さなどが一定ではない。

手加工を前提とした制作では膨大な時間と費用が見込まれるが、デジタルファブリケーションを前提として設計することで加工の自動化、施工の容易化を目指す。コンピューショナルデザインとデジタルファブリケーションの組み合わせについては建築史家のマリオ・カルポも次のように可能性を述べている。「コンピュータをベースにしたデザインと製造の垂直的な統合によってデジタル技術をもった手工職人という新たな様態が生じ、機械的なテクノロジーが疎外してきたもののほとんどを、再び結び合わせることができる」²⁾。

センシングを通してデジタルデータに再度身体的感覚を取り込むことで、あいまいさを許容したデザインができるのではないかと考える。

本論はセンシングを用いた設計・制作手法に関する研究の一環で、簡易な 3D スキャニングと指の動きのセンシングを組み合わせることで構造物の設計・制作を行った研究報告である。

2 研究目的

本研究は、人の動きのセンシングで得られる情報をもとに生成される、部材角度や長さが一定でない複雑な形状の設計・制作手法を明らかにすることを目的とする。アルゴリズムックデザインなどコンピューショナルな手法を用いたデザイン・設計では複雑な形状を生み出すことは容易になってきたが、同時に複雑な形状を実現させるための施工方法も検討する必要がある。近年コンピューショナルな設計手法と合わせてデジタルファブリケーションを活用した施工方法の研究もなされている³⁾⁴⁾。そこで本研究では、デジタル工作機械を活用した単純な施工方法を検討し、必要な部材をコンピューショナルデザインを用いて生成するなど、コンピューショナルデザイン（設計）とデジタルファブリケーション（施工）を一体的に扱うことで設計に施工方法のフィードバックを可能にし、全体の形状は複雑なまま施工の容易化を目指す。これにより人の動きが持つゆらぎやあいまいさを許容したデザイン、複雑なものを単純化せずに複雑なまま扱うデザインの可能性を探ることができるのではないかと考える。

3 これまでの検証について

これまでセンシングを用いたオブジェクト生成方法についていくつか検証を行ってきた。

3-1 センシングを使用したオブジェクト生成方法初期検討

設計には Rhinoceros(以下、RH) およびプラグイン Grasshopper(以下、GH)、firefly を利用し、手の動きのセンシングには Leapmotion(以下、LM) を用いた。まず LM が手指の骨格情報を取得し、firefly を介して GH 上に任意の間隔で手の指先(1本)の軌跡データを生成する。軌跡データをもとにオブジェクトがつくられるプログラムを作成した。

1本の指先の動きをセンシングし、動きの軌跡にオブジェクトを生成する方法(図1)や動きの範囲にボリュームを生成する方法(図2)、軌跡をもとにパターンオブジェクトを生成する方法(図3)の3つのオブジェクト作成方法を試みた。

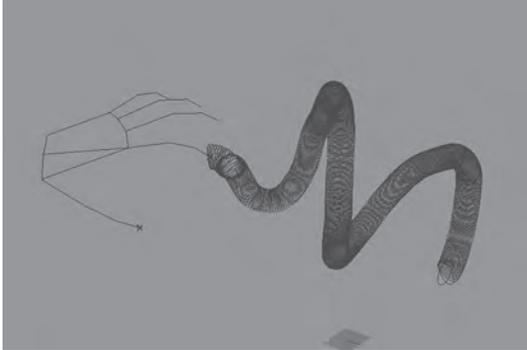


図1 動きの軌跡のオブジェクト

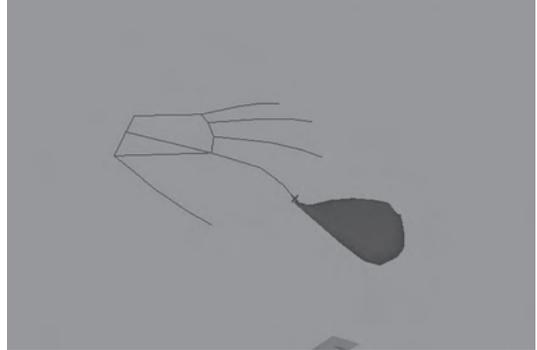


図2 動きの範囲のポリウムオブジェクト

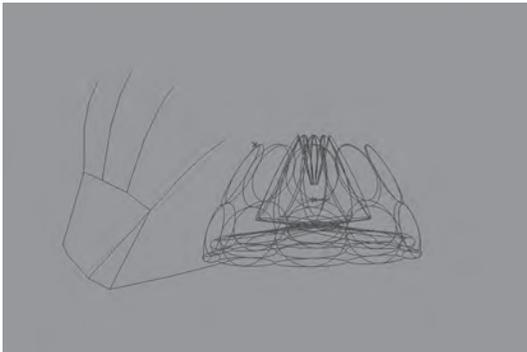


図3 軌跡をもとにパターンオブジェクト

これらはリアルタイムでオブジェクトを生成する手法としたが、無意識に手を動かすと、センサーのセンシング範囲をすぐに外れてしまう問題があった。動きの軌跡にオブジェクトを生成する方法は、動きと生成されたオブジェクトの関連性は認識しやすかったが、簡単な動作からオブジェクトを生成させるパターンオブジェクトなど、少しの動きで瞬時にオブジェクトが生成されるものは、意図した形状になっているのか認識しづらかった。

3-2 手の動きの軌跡をもとに形状を変形させた照明器具の設計・制作

動きと生成されたオブジェクトとの関連性が認識しづらかったことから、すでにあるオブジェクトを、動きの軌跡に合わせて変形させる方法を試し、照明器具の制作を行った（図4, 5, 6, 7）。設計には RH および GH、firefly を利用し、手の動きのセンシングには Kinect for Windows(以下、KN)を用いた。以前センシングに使用した LM のセンシング範囲より大きいサイズの照明器具を想定したため、範囲の大きい KN を使用することとした。まず KN が手指の骨格情報を取得し、firefly を介して GH 上に任意の間隔で手の甲の軌跡データを生成する。軌跡データに合わせてオブジェクトが変形するプログラムを作成した。



図4 基本形状のモデリング

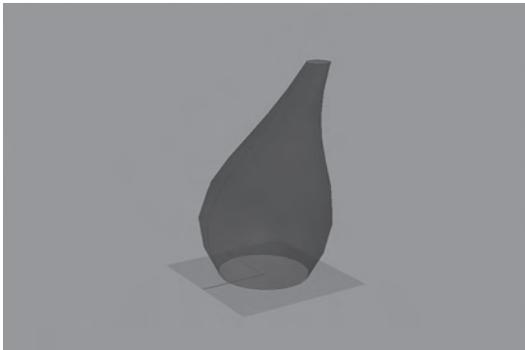


図5 手の動きで変形



図6 オブジェクト生成



図7 完成した照明器具

基本形状と変形後の形状が存在することで、動きがどのような変化を与えたのかが認識しやすく、意匠面でも、1から形状を生成するのではなく基本形状に変化をかける方法のため、きれいなものができたと考えられる。センシングデータをもとに変形をかけるため不定形な形状となるが、加工データを生成し、組み上げることができた。手の甲1点の軌跡データの活用にとどまっているので、複数のセンシングデータを利用する方法およびインテリアデザインや建築設計への展開を目指すためにも、もう少し大きい構造物の設計・制作方法を検討する必要がある。

4 3D スキャニングとセンシングを組み合わせた設計・制作手法

これまでの検証ではいずれもセンシング範囲に制限があり、またセンシングで得たデータのサイズ(寸法)を変更せず使いたが、センシングの範囲に制作物が限定されてしまう問題点があった。センシングの範囲を広げる方法としてはセンシングデバイスを複数台用いて、連動させることで範囲を広げる方法が考えられる。しかし対象の空間や敷地が広がれば広がるだけデバイスが増え、複雑になってしまうことが予想される。対象の敷地を3D スキャンし、PCに取り込んだ仮想の敷地に対して手の動きを用いて構造物の形状を表現することでセンシング範囲の制限を解決する方法を検証する。

4-1 願成寺古墳群美術展 2017 出展作品

岐阜県池田町にて開催された願成寺古墳群美術展に出展する作品（図8、9）として制作を行った。岐阜県最大級の群集墳による凹凸が印象的な敷地に新たに仮設の凹凸の構造物をつくることを目的とし、建築やインテリアの設計・制作手法を目指すため、2.5メートル×3メートルの構造物にすることとした。



図8 横からの見え



図9 背面からの見え

システム概要

3D スキャンには Google の Tango が搭載されたタブレット phab2PRO/Lenovo およびスキャンアプリの Matterport Scenes を使用した。

設計には RH および GH、firefly を利用し、手の動きのセンシングには LM を用いた。まず LM が手指の骨格情報を取得し、firefly を介して GH 上に任意の間隔で手の指先(5本)の軌跡データを生成する。軌跡データをもとに構造物がつくられるプログラムを作成し、接合部加工データを生成する構成とした。

設計・制作は次の通り進めた。敷地の 3D スキャンを行い、敷地をデジタルデータ化した。次に RH にスキャンデータを取り込み、サイズ調整を行った。サイズ調整された仮想の敷地に対して5本の指の動きで形状を表現し、センシングにより動きの軌跡を取得。取得した軌跡データから構造物および構造物の加工データの生成を行った。加工データをもとに部材加工（主にレーザー加工）、を行い、事前に部分的な組立をし、現地で組み上げを行い設置した。

4-2 敷地の 3D スキャニング

構造物を設置する敷地の 3D スキャニングを行った。3D スキャンにもいくつか方法があり、建設業界ではレーザースキャナーがよく用いられている。測定範囲は数十メートルかつ精度も範囲誤差数ミリメートルと広範囲かつ高精度であるが、低価格化が進んでいるとはいえ数百万円してしまう。建築工事は予算も大きく、また 3D スキャナーのレンタルなどを利用すれば従来の現地調査に比べて低コストで済むことが報告されているが⁵⁾、それでも数十万円のコストがかかってしまい、一定規模以上のプロジェクトでないと使用することはコスト的に難しい。簡易なスキャン方法とし

て対象物を複数の角度から撮影した写真をベースに対象の 3D モデルを生成する方法がある。様々な角度から写真を撮る必要があるため、建築など比較的大きい範囲の 3D スキャンにはドローンの空撮を用いてスキャンを行っている。レーザースキャナーに比べて精度が低いため、地質調査の測量などでは地上からスキャンできる範囲はレーザースキャナーを用い、地上からのスキャンが難しい箇所は空撮を用いて、組み合わせてスキャンを行っている。建築だけでなくインテリアの設計への展開も目指しているため、高コストでない 3D スキャンを用いることとした。ある程度の範囲のスキャンが必要になるが PC に接続して使用するものはスキャン範囲が狭いものが多いため、タブレットやスマートフォンを利用したスキャナーを候補とした。iPad に取り付けて使用する Structure Sensor およびスキャンアプリの Canvas を用いる方法と Google の Tango が搭載されたスマートフォン phab2PRO/Lenovo およびスキャンアプリの Matterport Scenes を使用する 2 種類をテストした。どちらも深度センサーは赤外線ベースの方式を用いており、赤外線を多く含む日光の下でのスキャンは適していないため、敷地のスキャンを行う前に日光下でのスキャンテストを行った。Structure Sensor では部屋の中は問題なくスキャンすることはできたが、日光下ではほぼスキャンすることができなかった。一方、Tango では日光下でもスキャンを行うことができ、スキャンのずれは数 mm~ 十数 mm 程度であることが確認できた(図 10、11)。データもカラー情報をもった点群でデータ形式は CAD に取り込むことが可能でカラー情報を持つ ply のため、敷地の 3D スキャンに用いることとした。



図 10 テスト場所

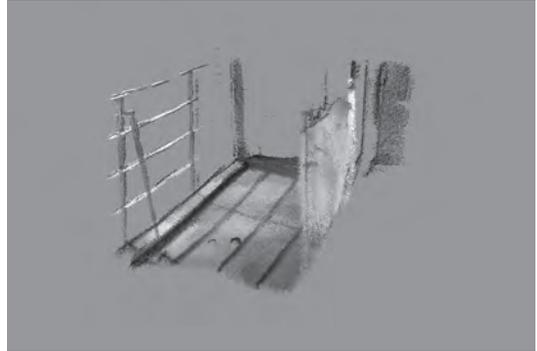


図 11 スキャン結果

Tango の特徴を簡単に説明する。Google が開発した AR(拡張現実)技術である。カラー画像をとる RGB カメラ、対象物との距離を測定する深度センサー、モーショントラッキングに用いるトラッキングカメラ、ジャイロセンサー、加速度センサーなどを用いて、次の 3 つの機能が特徴となっている。

- 1.Motion Tracking：デバイスの軌道や回転の状態を記録する。
- 2.Area Learning：Motion Tracking で得た情報を連続的に取得し、ずれを補正する。
- 3.Depth Perception：デバイスから対象物の距離を測定する。

スキャン可能な範囲は 4 メートル程度のため、スマートフォンを対象の敷地にかざして歩き回る

ことで対象の範囲の 3D スキャンを行った。約 7 メートル×12 メートルの範囲をスキャンし、所要時間は 12 分程度であった (図 12、13)。



図 12 敷地



図 13 敷地の 3D スキャン

4-3 コンピュータショナルデザイン (設計)

4-3-1 仮想の敷地に対して指の動きで形状を表現およびセンシングによる指の動きの取得

敷地の 3D スキャンで得た点群データを RH に取り込み、敷地のサイズを実寸のサイズになるよう調整を行った。敷地に対して制作する建造物の形状を左手の 5 本の指の動きで表現し、センシングで指の動きの軌跡データを取得することとした。具体的には LM を用いて指の骨格情報を取得し、firefly を介して GH 上に 20ms の間隔で手の指先 (5 本) の座標点を生成し、生成した点を結び軌跡のデータを作成した。敷地の上に、センシングしている左手を表示させ (図 14)、ディスプレイに表示されている画角と実際の左手およびセンサーの位置を合わせて、仮想の敷地に対して指の動きで建造物の形状を表現した。20ms の間隔で指先の座標の位置に点を生成するため、表現した際の動きの速度によって軌跡の線分の長さが異なり、動きがゆっくりであった箇所は線分が短く、早く動かしした箇所は線分が長くなっている (図 15)。



図 14 仮想の敷地に対して手で表現



図 15 5 本の指の軌跡

4-3-2 指の軌跡データから構造物の基本形状を作成

RH 上のスキャンされた敷地に対して手の動きで形状を表現しているため、敷地に接してほ
しい端部なども敷地に接地していない。構造物を安定させるためにも、必要な箇所は敷地に接地す
る必要があることから、地面に接してほしい各点の z 軸の値のみ修正し、必要な箇所を接地させた
(図 16、17)。



図 16 端部など敷地に接していない



図 17 Z 軸のみ修正し、接地

各指の軌跡の頂点同士を結ぶ線分を生成し、指の軌跡を元にした構造物の基本形を作成した (図
18、19)。



図 18 軌跡をもとに構造物の生成



図 19 上から見た図

4-3-3 加工ツールの検討

不定形の形状を実際に組み上げるうえで問題になるのは接合部である。自由な角度をもつ接合部
をデジタル工作機械加工で制作するには 3D プリンタを用いるのが容易であるが、制作時間、コス
トを考慮すると難しい点もでてくる。そこで板材の加工で接合部を作成することとした。板材の加
工にはレーザー加工機もしくは CNC が候補となる。構造物のサイズから接合部のサイズは数十ミ
リメートル程度になることが想定されることからレーザー加工機を用いることにした。レーザー加
工機を用いることで加工時間の短縮も期待できる。

4-3-4 材料の検討

今回の目的は手法の検証のため、材料にはレーザー加工や単純な手加工が行いやすいものとし、接合部には合板、フレームには角材を使用することにした。接合部の数が多い場合、施工誤差も多少出てくることが予想されるため、一定の柔軟性をもつ木材が適していると考えた。

4-3-5 ディテールの検討

設計には GH および Python を用いることで、1つのディテールを検討すれば、すべての接合部に反映されるようにした。

全体の形状は複雑なまま、施工の容易化を検討するため、主要部材である角材にはスリットのみ加工とすることにした。スリット加工も簡易にするため角材に対してすべて垂直に入るものとし、角度の調整は接合部側で行う。

接合部は各頂点の中心に円形のプレートを設け、円形プレートに角材とつなぐための接合プレートを差し込んでいる構成とした(図 20)。円形プレートがすべて XY 平面に対して水平に配置され、接合プレートが直交して組まれることで角材のスリットがすべて角材に対して垂直に入るようになる。円形プレートと接合プレートはお互いにスリットを入れ、接着剤を塗布し、はめ込む方法をとした。接合プレートと角材は、接合プレートに接着剤を塗布し、角材のスリットに差し込んだ後、2か所ビスうち固定する方法とした(図 21)。

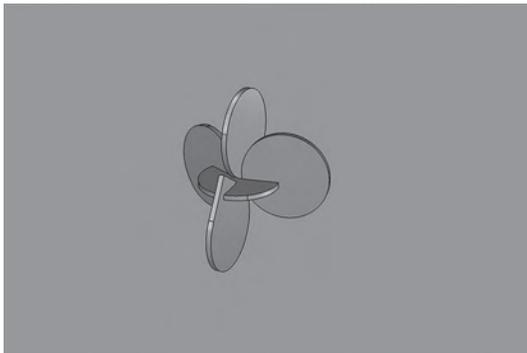


図 20 円形プレートと接合プレート

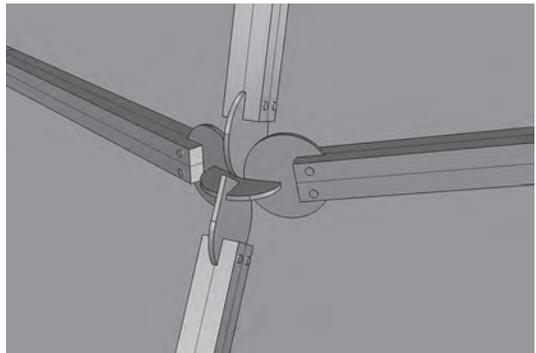


図 21 接合プレートと角材

4-3-6 パラメータの設定

設計を進めるうえで、各種値を変数パラメータとして設定する必要がある。今回は次のパラメータを設けた。

- ・使用材料に関するもの：角材断面寸法、円形プレートの厚さ、接合プレートの厚さ
- ・接合部に関するもの：円形プレート半径、接合プレート半径、円形プレートと接合プレートの飲み込み寸法、角材の接合プレートの飲み込み寸法

角材の長さも変数となっているが、上記のパラメータによって自動的に長さが決まってくる。

角材にも太さがあるため接合部の中心から材のベクトル方向へある程度オフセットさせないと部

材同士が干渉してしまう。接合部も過度に大きくしてしまうと意匠面での印象が大きく変わることから、3Dモデルを確認しながら接合部に使用する円形プレートおよび接合プレートの半径パラメータの調整を行った。角材同士が干渉しているかの判定をかけ、干渉がなくなるよう調整を行った。接合部に対する角材の入射角によっては角材をだいたいオフセットさせることが必要になり接合部が大きくなってしまいが、部材の干渉具合を確認し、一部角材については干渉する部分を切り欠いて対応することで接合部のサイズを大きくならないようにした。接合部の円形プレートと接合プレートについても角材の入射角によっては噛み合う位置があまりに端になる場合もあった。噛み合う位置が中心から一定の距離以上の場合には接合プレートの半径の長さを1辺とした正方形が接合プレートに追加されるようにし、部材同士の噛み合いが確保されるようにした(図22、23)。

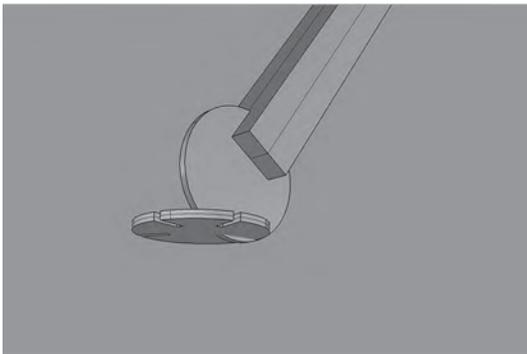


図22 噛み合う位置が端すぎる

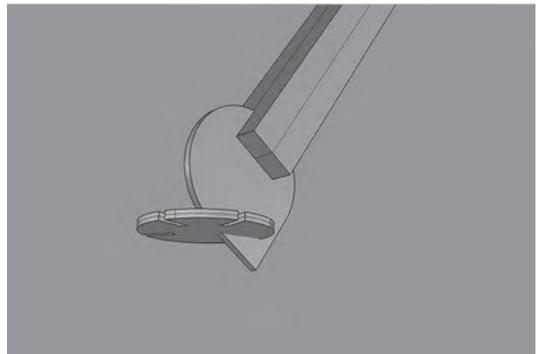


図23 接合プレートの修正

定めたルールに従って形状が生成されるため、上記の部材の干渉や接合プレートのように当初想定していなかった問題もおこる。問題を解決するためにも、簡単なチェック機能を設けることや、すべてを厳密にするのではなく全体のバランスを見て一部例外を設けることも重要になってくる。

4-3-7 部材のナンバリング

スムーズな施工のためにすべての部材にナンバリングを行い、接合する相手の部材番号も表記した(図24)。ナンバリングについては加工用のデータに行くことはもちろん、3Dモデル上にも行った(図25)。不定形な形状の検討とともに加工用データの生成も行うコンピューショナルデザインの手法では、従来の平面図のような2Dの図面で表記することは難しくなってくるため、施工時の参照用に3Dモデルにもナンバリングが必要となる。



図 24 ナンバリング及び組立て補助情報

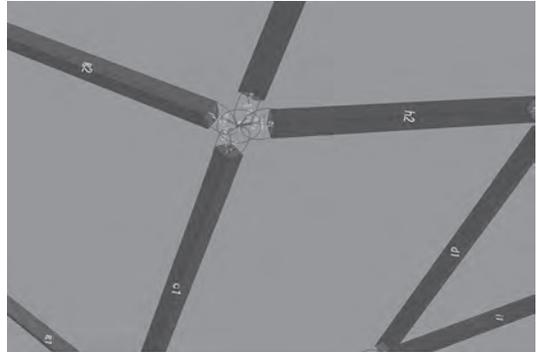


図 25 3D モデル上のナンバリング

部材同士の組立時に間違いが起こらないよういくつかの組立補助情報を加工用データに付加した(図 24)。円形プレートと接合プレートを付ける際、接合プレートの向きを間違える可能性があるため、地面に対して上になる方向を示したラインを付加した。接合プレートの形状も円形が基本になっているため、角材のスリットに差す位置がずれてしまう可能性があることから、角材の木口がくる箇所にガイドのラインを付加した(図 24)。

ナンバリング及び組立補助情報の付加はとても重要な工程である。設計に用いた GH のスクリプティングの 1/3 は情報を付加させるために作成した。従来の CAD の GUI を通じて 1 つ 1 つ入力してモデリング及び作図しているわけではなく、記述したアルゴリズムに従って形状が生成されているため、1 つ 1 つの部材がどこに使用され、どのように取りつくのかについてすべての箇所の形状を事細かく把握していないことから、組立時の確認用に必須となる。

どのように組み立てるのか、どの順番で組み上げていくのかといった施工方法を具体的に検討することで、設計時に必要な情報の付加を行うことが可能になり、部材加工時に情報が付加されることで、施工が容易になる。

4-3-8 加工データの取り出し

接合部については各部材に必要な情報を表示し、レーザー加工機が読み込める形式で書き出しを行った。角材は機械加工ではなく切断及びスリット加工、ビスの穴あけを手加工で行うため、切断長さについては部材番号と合わせて Excel 形式で表を書き出した。スリット加工及びビスの穴あけについては治具データを作成し、治具加工データを取り出した。

4-4 デジタルファブリケーション(施工)

4-4-1 部材加工

接合部の円形プレート及び接合プレートはラワン合板 2.5mm を用い、レーザー加工を行った。部材の量産を行う前に、一部接合パーツの試作を行い、部材同士のはまり具合の確認を行った。接合には接着剤も用いるが、はまり具合が緩い場合は強度も落ちてしまうため、あらかじめスリットのサイズを調整するパラメータを用意しておいた。試作の結果を踏まえスリットのサイズを調整し、

部材の量産を進めた。使用したラワン合板は厚さが2.5mmと薄く、レーザー加工を進めていくと加工途中にそりが発生し、うまく切り抜くことができなくなるため、そりが発生しづらい厚い合板にビスで固定し、レーザー加工を行った。取り出した加工データをもとに、ナンバリングや組立時の補助情報などは彫刻加工として設定することで、部材の切り出しとともに部材への情報印字も一括で済ませることができる(図26、27)。



図26 データを取り出し、レーザー加工



図27 カット済みパーツ

角材には1×1材(19mm×19mm)を用い、取り出したExcelの表をもとに丸鋸で切断加工を行った。切断加工後、治具を用いてスリット加工及び穴あけ加工を行った(図28、29)。



図28 バンドソーで角材へスリット加工



図29 加工後の角材

4-4-2 施工

事前に部分ごとにある程度まで組み立て、設置場所で組み上げることにした。レーザー加工機で切り出した接合パーツを組み立てることから進めた(図30、31)。各部材にナンバリング及び組立補助情報を印字しておいたことから、接合部の組立は容易に行うことができた。組立時に一部パーツを間違えてつけてしまうことがおきたが、間違えた部材のデータを取り出し、再度レーザー加工を行うことで速やかに修正することができ、修正の容易さもデジタルファブリケーションの強みだと考えられる。

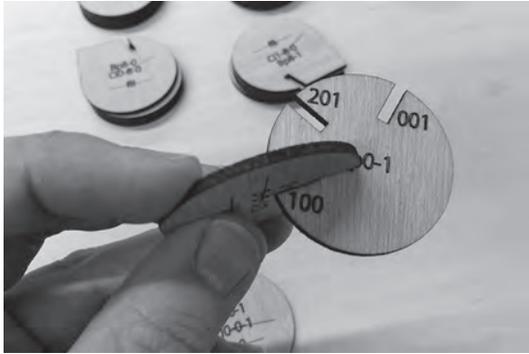


図 30 接合パーツの組立



図 31 組立後の接合パーツ

接合部の組立後、角材と組み合わせ一定の大きさのユニットまで組み上げを行った（図 32、33）。

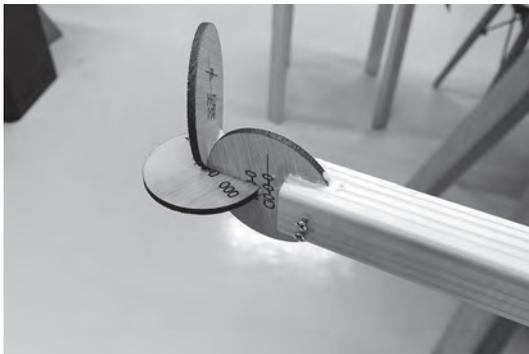


図 32 接合パーツと角材の組立

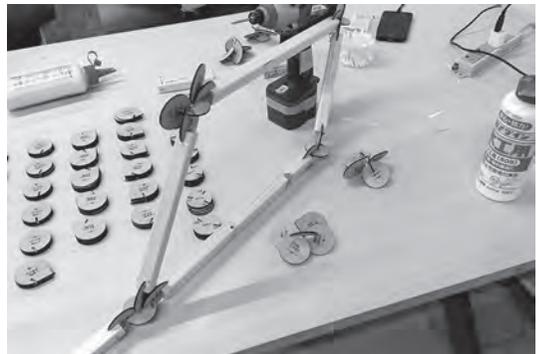


図 33 行ごとのかたまりで組立

あらかじめ組み上げたユニットとユニット同士をつなぎ合わせる角材を現地に搬入し、現地での組み上げを行った。設置位置に関しては PC の画面を確認しながら位置合わせを行い、敷地の勾配に合った設置を行うことができた。フレームの完成後、広がり防止のために最前面と最背面のフレームの両端の対角をワイヤーでつないだ。事前にユニットまで組み立てていたため、現地作業時間は 3 人で 1 時間程度であった（図 34、35、36、37、38、39、40）。



図 34 現地での組み上げ 1

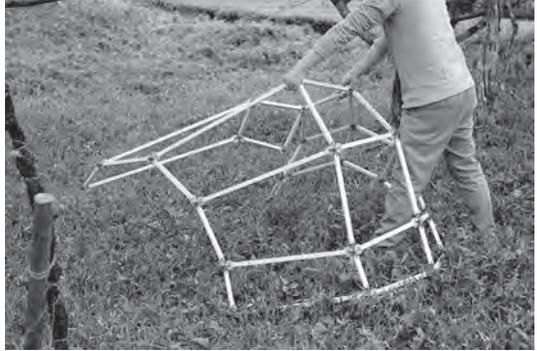


図 35 現地での組み上げ 2



図 36 現地での組み上げ 3



図 37 縦横の角材が組まれた接合部



図 38 完成



図 39 正面からの見え



図 40 後方からの見え

5. まとめ

動きのセンシングをもとにした不定形な形状の実現には、課題となる接合部の作り方や、施工の容易性を担保するナンバリングなど、設計段階でディテールを含めた施工方法を一体的に扱うことが重要であると確認できた。

仮定の敷地に対して形状を指の動きで表現する方法に関しては、ディスプレイに表示されている画角と、実際のセンサーおよび手の位置関係が合っていることが重要であった。制作面では指の動きのセンシングデータから構造物をつくることはできたが、恒久的な設置を想定していなかったこともあり、構造的に接合部の強度が足りていなかった。建築やインテリアへの展開を考えたとき、一定の強度が必要となることから、強度のある接合部の設計・制作方法の検討を進めるとともに、インテリアデザインへの展開として屋内に設置する構造物の制作も行っていきたい。

指の動きのセンシングにより生成された形状は、大まかなには意図したものに近いものだったが、1つ1つの指の軌跡に関しては、意識的でない動きをしており、自分の動きにもかかわらず制御しきれていない形状がフレームとして形作られた。従来の CAD の GUI を使用したモデリングに比べて、直感的に形状を作り出し、大まかな形状は意図に沿ったものになりつつも、意図的でない形状が生み出されることに面白さや可能性を感じた。しかし、デザインおよび設計に使用していくためには、センシングデータをもとに生成した形状を最終形としてそのまま用いるのか、出来上がった形状に対して全体のバランスなどを考慮して修正を行うのか考える必要がある。建築やインテリアにはもちろん用途、設置環境、構造など様々な要件を満たす必要があるため、生成された形状を最終形とするのではなく、諸条件を取り込んだものにしていく必要があり、意匠面でも動きから生み出される形を活かしつつ全体のバランスを考慮したプロセスを検討していきたい。

参考文献

- 1) コンピュータショナルデザインって何ですか? (後編), pdweb, http://www.pdweb.jp/column/arc/arc03_2.shtml, (アクセス日 2017 年 11 月 4 日)
- 2) マリオ・カルポ『アルファベットそしてアルゴリズム 表記法による建築-ルネサンスからデジタル革命へ』鹿島出版会、2014 年、p148
- 3) Pavilions, T_ADS, <http://t-ads.org/?cat=27> (アクセス日 2017 年 9 月 1 日)
- 4) Research, Gramazio Kohler Research, <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/316.html> (アクセス日 2017 年 9 月 1 日)
- 5) (一財) 建築コスト管理システム研究所・新技術調査検討会「3D スキャナーの活用について」『建築コスト研究』No.88、2015 年、p42-48