

作業者の身体性に基づく大型構造物の設計及び施工手法

鷹見 洋介 永田 康祐 堀田 憲祐 米田 一晃 小淵 祐介 五十嵐 健夫

概要. デジタルファブリケーション技術が普及しつつある現在において、建築では未だ人手の作業が主であり作業員への負担が解消されない状況にある。負担軽減のために適切な作業指示や工具の自動化が考えられるが、現在の設計手法では建築物のデザインにおいて作業員個人の身体性が考慮されておらず、それらによる作業負担軽減に限界がある。本研究では、設計・施工両方において計画的に作業負担を軽減するため、作業員の身体性を考慮した大型構造物の設計・施工手法を提案する。本手法では、作業員の身体に負担の少ない動作パターン数種類に作業内容を限定し、設計においてこれらのパターンを用いて構造物建設の施工プロセスを生成する。限定された作業員の動作パターンに基づいて設計・施工するため、作業員への負担軽減だけでなく、作業が標準化され作業内容の把握や指示が容易となる。提案手法の検証として、発砲ウレタン材からなる棒状の骨組みを手作業で空中に描いていく実験的な建築工法に応用し、建築スケールのモックアップの設計・建設を行った。

1 はじめに

近年のデジタルファブリケーション技術の発展は著しく、3D プリンタやレーザーカッターなどを用いて試作品や模型、部品の全自動製作が実用レベルで可能になったため、機械工学や医学など様々な分野において幅広く用いられている。建築においても実用化されているデジタルファブリケーション技術もあるが、機械のスケールやコスト、設置環境など大型構造物の全自動製作には多くの問題が残されており、未だ人手による作業が主で個々の作業員への作業負担が大きいままである。近年熟練の職人が減っている中、一人一人への作業負担を軽減することが重要な課題である。

作業員の負担軽減は、例えば適切な作業指示を与え作業効率を上げる、工具の自動化を進め人手による作業を減らすなど現場における工夫で実現することができる。しかし、現状の設計手法は作業員個人の身体性を考慮して大型構造物のデザインを決定することは困難であり、それゆえ前述の現場での工夫による作業負担の軽減には限界がある。従って、設計段階においても作業負担を計画的に軽減することが求められる。

そこで本研究では、作業員個人の身体性を考慮した設計・施工手法を提案する。作業内容を作業員の身体に負担の少ない動作パターン数種類に限定し、設計においてこれらのパターンを用いて大型構造物の形態を達成するための作業内容を決定する。これ

により建設作業が標準化され、作業員の負担軽減だ

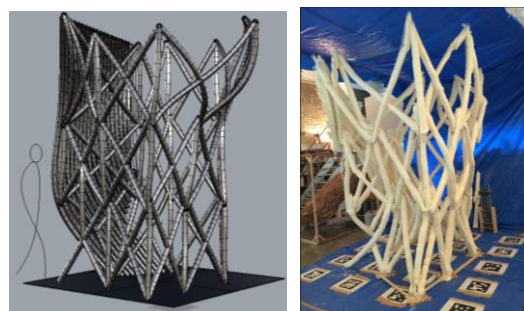


図 1. 提案手法による設計と実際に建設したモックアップ

けでなく、作業の把握・指示を容易に行うことができる。

本稿は大きく分けて 1) 作業動作パターンの記録 + 設計 2) AR による施工の視覚的指示システムの 2 つの構成となっている。1) 初めに作業員は行う動作パターンを数種類記録する。設計でこれらの動作パターンから生成される形状によって目標とする大型構造物の形状を構成する。2) AR の指示として、立ち位置と工具の設置する場所、作業内容となる動作パターンを作業員近くに設置されたディスプレイに映し出す。動作パターンから生成される形状は決まっているため、作業員は形状の 3 次元位置や姿勢を知る必要がない。また、多人数の作業員への共有が容易である。

提案手法の検証のために、3Doodler[1]のように、発砲ウレタン材の骨組みを手作業で空中に描いていく実験的な建築工法によってモックアップの建設を行った。この工法のために新たに手持ち型建設工具を開発した。工具は発砲ウレタン材によって常に一

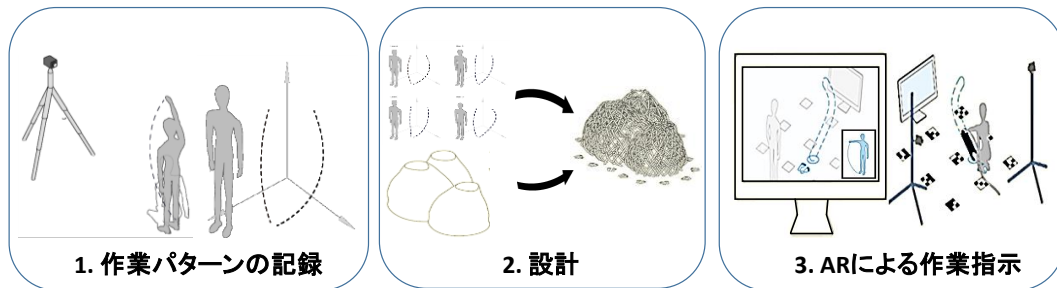


図 2. 提案手法の概要図。(1)水色の実践はモーションの軌跡、赤の破線はモーション形状。(2)1 で得られたモーション形状をもとに作業内容を設計。(3)ARの指示に従ってモーションを行う。足元とモーション、その開始地点が表示される。

定の太さの棒状を形成するように物理的かつ機械的に制御されており、作業者の能力に依存せず施工を行うことができる。また、検証で用いた作業指示システムの構成は、AR マーカとカメラ、指示を映すディスプレイの 3 点と、建設作業としては非常に簡易的なシステムとなる。

本実験的工法は、あくまでも身体の動きを生かした設計と施工という考え方を示す例として採用したものであり、そのまま実際の建築物に適用することは難しい。従って、本論文は、実用上の問題を解決する技術という工学的な側面を追求したというよりも、新たな表現方法としての価値を追求したものであると考えている。ただ、事前にかさばる部材を用意せず現地で材料を射出しながら人手で造形していくという建築手法には、野外での簡易的な設営などの場面において実用的な価値もあると考えられ、本論文はその基礎的検討とも位置づけられる。

本稿では、3 章でモデルの設計手法について、4 章で施工時における作業指示システム、5 章で開発した工具について述べる。5 章では提案手法を用いて建設されたモックアップの結果と考察について報告し、6 章で本研究の総括を述べる。

2 関連研究

近年、建築分野においてデジタルファブリケーション技術が使われてきており、複雑な形状の建築が容易になってきている。特に 3D プリンタによる建築物の全自動製作[5, 7]が行われており、建築の無人施工が可能となってきている。しかし、現状ではスケールやコスト、機材の設置場所など問題が多く残されている。これらの問題に対処した研究が吉田ら[10]による人間と機械の協調作業による積層造形技術である。割り箸をプリント材とし、工具を持った人間が 3D プリンタのノズルの代わりとなることで、多くの機材を必要とせずとも建築物の 3D プリントが可能となる。本稿も同じく人間と機械の協調作業による建築だが、積層造形という 2 次元的な積み重ねによる建築でなく、直接 3 次元空間上に建築が行えることが大きな利点である。

本研究は FRONT による Sketch Furniture[7]に大きな刺激を受けている。これは希望の家具の形状を空中に手で描き、そのときの軌跡をキャプチャすることでバーチャル上に表示したり 3D プリントしたりできる。Willis ら[11]は手に持った赤外線ペンの軌跡をキャプチャし、そのデータから 3 次元物体に近似された 3D モデルの断面図をレーザーカッターで出力している。本稿では、これらの研究と同様に人間の手の動きをキャプチャしそれをファブリケーションに用いる。しかし、関連研究が自由に 3D モデルを生成していることに対して、本稿では目標とする 3D モデルを建設するための施工プロセスを生成する。

目標とする形状に対して、複数の決められたパターンを組み合わせる研究はいくつか行われている。Xu ら[13]は入力画像から輪郭線を全て文字で表現するアスキーアートを生成するシステムを開発した。これは入力画像の輪郭線をポリラインに近似しグリッド状に分割した後、グリッドごとのポリラインに近い文字を割り当てる。建築において、目標とする形状に対して、形状が異なる数種類のパネルを組み合わせる研究がある[9, 12]。目標とする形状と完全に一致するためには全て形状の異なるパネルが必要となるが、限定された形状のパネルのみで構成することで、精度は落ちるがパネル自体の製作コストを大幅に削減できる。本稿はこれらの研究と同じ設計理念に基づいて、作業動作をパターン化し目標とする形状に近似できる手法を提案している。

HCI の分野において、AR による指示システムの研究は長くされており、近年に至るまで様々な研究がある[6]。近年の研究では、Gupta ら[4]は、ディスプレイ上に組み立て手順とリアルタイムでスキャンされた現状のレゴを映し出し、ユーザがインタラクティブに組み立てられるレゴの組み立て支援システムを構築している。Rivers ら[3]は、塑造の指示システムとしてプロジェクトを用いており、粘土をスキャンしその形状と目標とする形状を比較して、加工すべき場所を加工内容とともに粘土に直接投影している。これらの研究をふまえた上で、提案手法に必要な

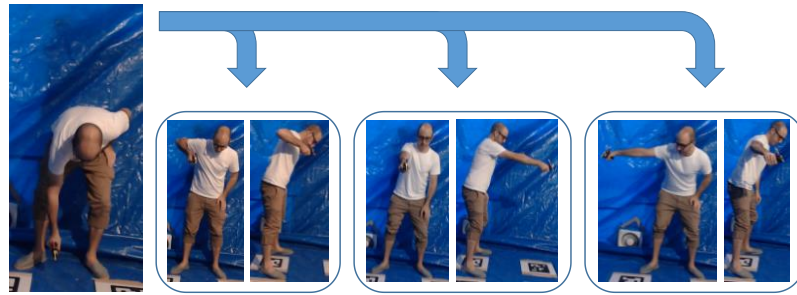


図 4. モーション. 左は地面から垂直に腕を引っ張り上げる. 中央は腕を前方に回しながら立ち上がる. 右は腕を右に回しながら立ち上がる. 身体の手前から前方に腕を回す分, 中央のモーションの角度は大きくならず, 右のモーションとの差分が生まれる.

な作業指示の内容と建設現場に適する指示出し方法の観点から, 本稿では, 作業指示システムとしてカメラと外付けディスプレイによる AR を採用した.

3 身体性に基づく大型構造物の設計

今回は, スプレーから吹き出す発砲ウレタン材を用いて, 骨組みを空中に描いて生成するという実験的な工法を行う. この工法では円柱の棒材を製作し, 棒材同士を発砲ウレタン材で接着して骨組みを形成する. 提案手法では吹き出しの際の作業者の動き (以下モーションと呼ぶ) を数種類に限定し, 作業内容の標準化を図る. 設計では, モーションから得られる部材形状 (以下モーション形状と呼ぶ) を目標となるサーフェスモデルに対して UV グリッド状に割り当てていき, その際の立ち位置や作業開始地点を計算していく. この章では, 限定したモーションについて, そしてモーションによる設計手法について説明する.



図 3. 発砲ウレタン材の棒材. 左は製作途中, 右は固まった状態

3.1 モーション

モーションを決定する上で, 常に同じような形状製作が期待される再現性を最重要視する. さらに, スプレーの吹き付けは必ず地面からスタートすることも条件に加える. また再現性の向上のために, 作業者は立ち位置を固定し, 足を動かさない動きに限定する. これらをふまえ, 入力するサーフェスモデルの形状に近似できるモーションを決定する.

モーション形状は, モーションが曲線を描く場合においても, スプレーの開始地点と停止地点を結んだ直線に沿った円柱となる. すなわち, 地面垂直に

対して傾いた円柱の棒材が生成される (図 3). 従って, ある動きによる棒材の傾きを一定にするために, 工具を持つ腕の最終位置が再現性を持って決定できる動きを考える.

本稿では, 図 4 の 3 種類を作業内容であるモーションと定義する.

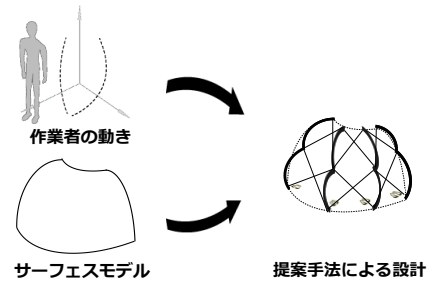


図 5. モーションとサーフェスモデルから UV グリッド状のモデルが生成される. 黒の太線がモーション, 細線がモーション後に製作する対角線の棒材である.

3.2 モーションに基づく大型構造物の設計

上記の通り, 入力のサーフェスモデルに対し, 3.1 での作業動作をもとにブレースで補強された UV グリッド状のモデルを生成する. UV セルの左右の縦線に相当する棒材をモーションによって製作する. 後にその 2 本を目印として, 開始地点と停止地点を結ぶ対角線となる棒材を製作する. 従って, 目標となるサーフェスモデルへ, UV グリッド状に沿ってモーション形状を適切に配置する

配置の方法は以下のプロセスに沿って行う. 1) モーション形状を配置する場所として, サーフェスモデルの地面に接するエッジを複数のセグメントに分割する (このとき分割数は強度や意匠的な要素などの外部的要因によって決定する). 2) モーション形状を 1 で得られたセグメントに配置していく. その際, モーション形状のベクトル m の地面に対する角

度と、モーション形状の始点・終点それぞれの高さにおけるセグメント上のサーフェスモデルの点を結ぶベクトル p の地面に対する角度をとり、差分が最小値となるモーション形状を選択する。3) 水平方向に分割数と同じだけのモーション形状が配置された後（モデルの1層分となる）、垂直方向にモーション形状を配置できるか調べる。できる場合には、1層下に配置されたモーション形状の終点をもとに上記の配置を行う。

今回は CAD ソフト Rhinoceros とそのプラグインの Grasshopper でモーションに基づく大型構造物の設計を実装した。

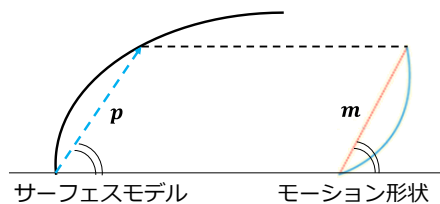


図 6. モーション形状の選択. p と m の地面に対する角度の差分をとり、最小値となるモーション形状を選択する。

4 AR による作業指示システム

AR による作業指示システムの概要図と UI を図 7 に示す。位置計測は ARToolKit[2]に用いられる AR マーカをカメラで検出して行う。作業指示として、行うモーションと立ち位置、モーションを開始する地点をディスプレイに AR で表示する。事前にモーションを身体の正面と右との 2 方向からそれぞれ撮影し、その動画をモーションの作業指示として与える。動画を作業現場にて切り換えることで、体の動きだけでなく腕の振りを 3 次元的に理解できるようにする。

このシステムの流れとして基本的に立ち位置と工具を置いてモーションを開始する地点を確認し、そこで行うモーションを動画で確認した後作業を行う。立ち位置は赤い四角で表示されており、作業者は足裏に板をつけ、板とディスプレイ表示されている四角を合わせて立ち位置を確認する。工具を置く地点は赤い点で表示されている。モーションは上記の通り動画で指示するが、モーションによる工具の軌跡も AR で表示する。これは作業者がモーションの再現練習を行う際の指標として用いる。

カメラを 2 台、AR 表示用のディスプレイを 1 台用意する。カメラは作業者の頭上を見下ろす視点と作業者の正面を映す視点の 2 台があり、見下ろすものは足元を確認するため、正面を映すものはモーションの練習における鏡の役割を持つ。作業者はこれらのカメラを切り替えながら作業場所と作業内容を把握する。

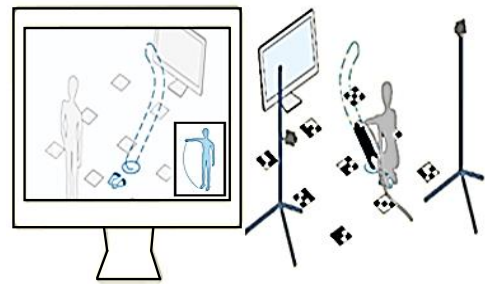


図 7. AR による作業指示システムの概要図（上）と UI（下）。UI の右下にモーションを指示する動画がある。

5 モックアップ建設

提案手法の検証として、2.4m×2.4m×3.0mのモックアップを建設した（図 8）。この建設には、発泡ウレタン材をスプレーで吹き出して骨組みを形成する実験的な建築工法を用いている。発泡ウレタン材は噴出されるとその場で大きく膨らみ固まる。発泡ウレタン材同士はよく接着し、別途接着剤を必要としない。また、発泡ウレタン材は非常に軽い素材となっているため、大型構造物ながら人間の手で容易に持ち上げることができる。また、今回の工法のために工具を開発した。設計では作業員 2 人のモーション 3 種類を用いた。このとき、モーション間に作業員の区別はせず、同じモーションでも別のものとして扱い設計を行った。

この章では工具の説明をした後、パビリオン建設について述べる。

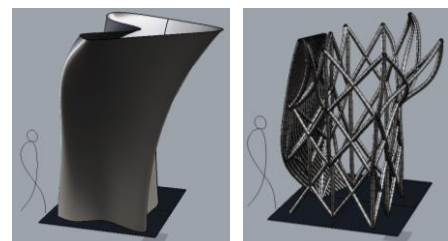


図 8. パビリオンの CAD モデル。左はサーフェスモデル、右はモーション形状を配置したモデル。

5.1 工具

開発した工具は手持ちスプレーであり、トリガーを引くことで一定量の発泡ウレタン材が噴出される。そのまま吹き付けると四方八方に飛び散ってしまう

作業者の身体性に基づく大型構造物の設計及び施工手法

ため、噴出をコントロールする必要がある。そこで噴出口付近に 3 枚のメッシュを囲むように設置し、発泡ウレタン材が極力メッシュ外に飛び散らないようにする。工具を用いる際にはメッシュ 3 枚を地面に固定し、メッシュ 3 枚を張った状態で工具を動かす。棒材が形成されたらメッシュを地面から切り離す。

常にメッシュが張った状態なため、作られる形状は円柱となる。この円柱の半径は吹き付け量に応じて変わるため、これを均一にするために工具の動かす速度を制御する必要がある。そこで、作業者の工具を動かす速度をロータリーエンコーダーで検出し、それに応じてメッシュの送り出す速度が一定になるようステッピングモーターで制御する。今回は半径 7cm の円柱の棒材を製作するために秒速 4cm の速度で制御される（制御速度は数度の実験によって経験的に設定された値である。）



図 9. 工具。左の工具がスプレーの本体となり、右のスプレー缶は発泡ウレタン材となる。スプレーの先にメッシュを出す装置がついている。

5.2 建設プロセス

目標とする形状は、1 層あたり 8 モーションが配置され、それが高さ方向に 3 層分設定される。建設は目標とする形状の上の層から下の層に向かって行われる。1 層できるたびに建設された構造物を持ち上げ複数の台座の上に置き、その下から付け足していく。これにより、1 層のたびに施工現場がリセットされ、地面を開始地点とするモーションを建設通して常に行うことができるようになる。

工具を持った作業者は AR による作業指示システムを用いて施工を進める。このシステムのために、事前に作業平面をグリッド状に分割し AR マーカを配置する。カメラは作業者の傍らに設置されており、施工の進行に合わせて作業者とともにカメラを移動させる。ディスプレイは作業者から常に見える位置に設置し、必要に応じて移動させる。

5.3 結果

3 日間通して建設を行った。消費した発泡ウレタン材は 36L である。1 層あたりにかかった時間は約 2 時間程度であり、3 層分では計 5, 6 時間の施工時

間となった。ただし、施工自体に時間がかかるわけではなく、これは発泡ウレタン材やメッシュ、ノズル（発泡ウレタン材がノズル内で固まるため基本的に使い捨て）の交換・供給に時間がかかってしまっていたためであり、この作業の効率を上げれば全体の施工時間を縮められる。

今回の検証で建設されたモックアップは内側に座屈してしまい、目標とする形状と比べ大きくずれてしまった。これは目標とする UV グリッドの形状が座屈しやすいためである。1 層あたりのモーション数を増やして密度を上げることで解決できる。

AR による作業指示システムで与える指示は簡易的だが明快で、今回の建設においても有効に働いていた。しかし、構造物が建設されていくにつれ、物理的にカメラの設置可能場所が限られてしまったため、AR の指示が明快に理解できる視点にカメラを設置できないことがあった。そこで正面に映す視点のカメラを撤去し、頭上を見下ろす視点カメラのみでシステムを運用させた。モーションを確認するための鏡代わりとなるカメラは撤去されたが、必要な指示は頭上を見下ろす視点のカメラから与えられるので、大きく影響は出なかった。

6 まとめと今後の課題

本稿では、作業者の身体性に基づく大型構造物の設計・施工手法について提案した。作業内容を作業者の身体に負担の少ない動作パターン数種類に限定し、これらのパターンに基づいて設計を行う。これにより設計段階で作業内容を標準化することができる。また、動作パターンで生成される形状が決まっているため、作業者は建設材の 3 次元位置や姿勢を知る必要がない。そのため容易な作業内容の把握・指示が可能となる。提案手法を用いて、発泡ウレタン材を用いた骨組みの工法によって大型構造物の建設を行った。

今回の検証実験は、提案手法によってモックアップ建設が可能かどうか主に主眼が置かれており、モックアップが座屈してしまい目標とする形状よりずれてしまったが、建設自体は可能であることは検証できた。しかし、作業負担の評価について不十分であった。今後実際の建設工法との比較を行い、建設時間や目標とする形状との誤差などの定量的評価に加え、作業内容について実際の作業者にアンケートをとって定性的評価を行うことを考えている。また、各モーション、各作業で生成された形状の誤差範囲、傾向をそれぞれ計測することを考えている。それらを実際の施工におけるモーションの誤差を吸収するために用いて、最終的に建設される大型構造物に大きな誤差が発生しないようにする。



図 10. 建設工程. 左から 1 層目, 2 層目, 3 層目. 上の段は現場の上から, 下の段は現場の横からの撮影.

今回の工法では直線的な円柱による骨組みを形成したが, 将来的に曲線の形成が可能となれば, より目標とするサーフェスモデルに近い骨組みを形成することが可能となる. これは工具の開発が進むこと, 発泡ウレタン材の材料を変更することで実現できる. また, 形状が一致しない部分については, 逆にサーフェスモデルのジオメトリを変更することで対応することを考えている. これは, 記録したモーション内の頻度が偏ってしまい, 作業員間の負担に差が広がったときに有用であると考えられる.

AR システムは作業員とディスプレイを切り離しているが, 作業員において常時ディスプレイを見る必要がなく, 作業員に負担をかけない簡易的なシステムである. しかし, 様々な工具や建設材などが置かれ雑多になりやすい作業現場においてカメラとディスプレイの設置場所は限定される場合が多い. このシステムは, プロジェクトによる足元の投影指示やヘッドマウントディスプレイなどのウェアラブルデバイスで代用可能であり, 今後これらと現行システムを比較しながら, より良い指示システムの実装を考えている.

参考文献

- [1] 3Doodler <http://the3doodler.jp/> (2015 年 8 月 31 日 確認.)
- [2] ARToolKit. <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/> (2015 年 8 月 31 日 確認.)
- [3] A. Rivers, A. Adams, F. Durand. Sculpting by Numbers. *ACM Trans. Graph.* 31, 6, 157:1–157:7, 2012.
- [4] A. Gupta, D. Fox, B. Curless, M. Cohen. Duplo Track: A Realtime System for Authoring and Guiding Duplo Block Assembly. *Proc. UIST '12*, pp. 389–402, 2012.
- [5] B. Khoshnevis. Contour Crafting. <http://www.contourcrafting.org/> (2015 年 8 月 31 日 確認.)
- [6] D.W.F. van Krevelen, R. Poelman. A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *The International Journal of Virtual Reality*, 9, pp. 1–20, 2010
- [7] E. Dino. D-Shape. <http://www.d-shape.com/> (2015 年 8 月 31 日 確認.)
- [8] FRONT. Sketch Furniture. 2006. <http://www.frontdesign.se/category.php?id=81&product=191> (2015 年 8 月 31 日 確認.)
- [9] H. Pottman, A. Schifner, P. Bo, H. Schmiedhofer. Freeform surfaces from single curved panels. *ACM Trans. Graph.* 27, 3, 76, 2008
- [10] H. Yoshida, T. Igarashi, Y. Takami, J. Sato, M. Araki, M. Miki, K. Nagata, K. Sakai, S. Igarashi. Architecture-Scale Human-Assisted Additive Manufacturing. *ACM Trans. Graph.* 34, 4, 88, 2015
- [11] K.D.D Willis, J. Lin, J. Mitani, T. Igarashi. Spatial Sketch: Bridging Between Movement & Fabrication. *Proc. TEI '10*, pp. 5–12, 2010.
- [12] M. Eigensatz, M. Kilan, A. Schifner, N. J. Mitra, H. Pottman, M. Pauly. Paneling Architectural Freeform Surfaces. *ACM Trans. Graph.* 29, 4, 45, 2010
- [13] XU, X., ZHANG, L., AND WONG, T.-T. Structure-based ASCII Art. *ACM Trans. Graph.* 29 (July), 52:1–52:10, 2010.