

プロジェクションマッピングを用いた建設用 3D 積層造形技術

鷹見 洋介 吉田 博則 小淵 祐介 五十嵐 健夫*

概要. 本研究では, 機械と人間が協調作業する次世代型デジタルファブリケーション技術として, プロジェクションマッピングによる作業指示と手持ち型工具による作業を組み合わせた新しい 3D 積層造形技術について提案する. 提案では, 入力した 3D モデルを元に, プロジェクタから作業場所ごとに作業内容を指示する施工指示図をプロジェクションマッピングによって投影し, それにしたがって作業者が手持ち型工具によって積層造形を行う. これにより作業者が専門的な知識がなくとも施工を行うことができ, 作業員全員で作業内容を直感的に理解し共有できる. 施工指示図は数種類の色で構成されており, それらの色の意味を把握するだけでよい. 作業中, 深度センサを用いてリアルタイムで形状を検出し, 目標とする形状との差分を計算した後, 施工指示図をリアルスケールで投影する. 提案手法を割り箸のような棒材を積み重ねて建築するという実験的な手法に応用して, 実物大のパビリオンを建設し, 当システムの実現可能性を検証した.

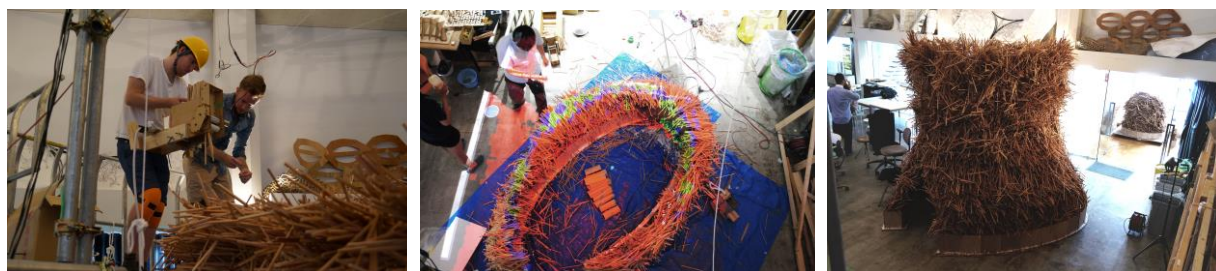


図 1. 提案手法を用いてパビリオンを建設している様子. 左: 手持ち型工具から棒材を落として積層している様子. 中央: プロジェクションマッピングによる作業場所と作業内容の指示. 右: パビリオンの完成図

1 はじめに

近年, 安価な 3D プリンタやレーザカッターなどのデジタルファブリケーション技術が普及し, 従来専門的な知識や機材が必要だったモノづくりを誰でも簡単に行えるになっている. しかし, 専門知識や経験がなくとも複雑な形状を簡単に作られるようになった一方で, これらの機材は加工面積に限られており, 建築物のような, 大きな構造物の製作には向いていない.

一方, 大型で一品物の製作物である大規模建築物の施工は, 設計図をもとに人手で行われている. 一般的な建設現場においては, 現場監督が設計図を理解し, 意思伝達の手段として図面を用い監督者が作業者に指示を出して建設が進む. しかし図面に記載されていない部分については作業者の経験と勘により現場で納められることも多く, また設計変更が多い場合は作業者すべてに変更箇所が伝わらない場合

もある. 建設現場での作業内容を明確に標準化するシステムの例はなく, 現場監督と作業者の意思疎通に依存しているのが現状である.

本研究では, 上記のような問題意識のもと, 建築スケールのデジタルファブリケーション技術として, プロジェクションマッピングを用いて, 建設すべき場所および作業内容を指示し, それにしたがって作業者が手持ち型工具によって 3D 積層造形を行う手法を提案する. 提案手法では目標とする建設物の 3D モデルが視覚的な情報として, リアルタイムかつリアルスケールで投影されるため, 建設現場において作業内容を直感的に共有できる. また色情報によって作業内容を作業する場所に直接指示することで, 作業内容の指示の標準化を計っている.

提案手法に似た手法としてヘッドマウントディスプレイの使用が考えられる. しかし, 本研究では作業者のほかに現場監督などの建設作業を行わない人を含めた多人数の作業を想定しており, 複数人に対して作業内容を同時かつ簡易に共有できる手段としてヘッドマウントディスプレイは適切でない. その理由として, 人数と同等の台数が必要, リアルタイムトラッキングを行うためのキャリブレーションが

Copyright is held by the author(s).

*Yosuke Takami, Hironori Yoshida, Yusuke Obuchi, Takeo Igarashi, 東京大学

容易でない、などが挙げられ、本研究の目的にそぐわない。

本稿では、具体的な応用例として、提案手法を、割り箸のような棒材を指示に従ってばらまき、さらに接着剤を散布して予定された形状を構築するという、次世代の建築用 3 次元プリントを目指した実験的な積層工法にもとづく建築物に適用した例について詳しく説明する。

ウェアラブルコンピュータと拡張現実感技術を組み合わせることによって、現実世界における作業者の作業を支援する方法は古くから提案されている[11]。本研究の独自性は、単なる個別の部品の組み立てでなく、より大規模な構造を一括して 3D 積層造形により建築物を作成することにある。

本稿では、まず提案手法の概要について述べる。また提案手法および手持ち型工具を実際に使用し、パビリオンを建設した際の結果を報告し、提案システムの実用性について議論する。

2 関連研究

HCI の分野においてデジタルファブリケーションが注目されており、機械と人間の協働作業という観点から近年様々な提案がなされている。例えば MIT の Rivers ら[1] は一般的な木工工具である Router とコンピュータビジョンおよびサーボモータによる制御を組合せ、人間の不正確な工具の操作でも予定された正確なパスに沿うよう加工できるインテリジェント工具を開発した。Zoran ら[2] も同様なシステムによって彫刻用ドリルによる 3 次元加工をアシストするシステムを開発した。

また、プロジェクションマッピングを用いた視覚的情報による製作支援も考えられる。例えば、Alec ら[3] は粘土細工の製作支援として、目標形状の 3D モデルを入力し、深度センサで粘土の形状をスキャンしながら、プロジェクタから加工すべき場所の指示を与えるシステムである。精度を高めるためにあえてリアルタイムで行わず、作業者がある程度加工が済んだ時点で深度センサのスキャンを行い、プロジェクタから新たな指示を投影するシステムとなっている。本研究と同じように深度センサのスキャンやプロジェクタの投影は 1 方向でしか行わないが、Rivers らは粘土自身を回転させて全体的な製作を行うシステムにした。似たような研究では、Matthew ら[4] がプロジェクションマッピングを用いて油絵のデッサン支援を行うシステムを開発した。Gupta ら[5] はレゴブロックの組み立て支援として、KINECT を用いて組み立て途中の形状をスキャンし、その形状自身と組み立て指示をディスプレイに映すシステムを構築した。

デジタルファブリケーション技術は建築デザイン分野においても新しい造形を提案できる強力なツールとなっている。近年、教育機関や設計事務所に 3D プリンタやレーザカッター等の機材が盛んに導入されている。特に 3D プリンタは無人施工技術として研究され、直接建築物をプリントすることが可能となってきた。Dini らによる D-Shape[6] は、石膏粉末による積層型 3D プリンタを大型化し小規模建築物のプリントを可能とした。また Khoshnevis らによる Contour Crafting[7] は溶融積層型の建築用プリンタでコンクリートを用いている。しかしどちらもプリンターノズルが移動できる範囲内での建築しか行えず、また一度に多くのノズルを運用することは難しいため、どうしても規模が大きくなりコストがかかる。

これらの研究を元に、本研究ではデジタルファブリケーションの特色であるデータから製作までの一本化を計りつつ、手持ち型工具とプロジェクションマッピングという簡易な構成による、人間の自立的な動きをコンピュータでアシストするデジタルファブリケーション技術の開発を目指している。

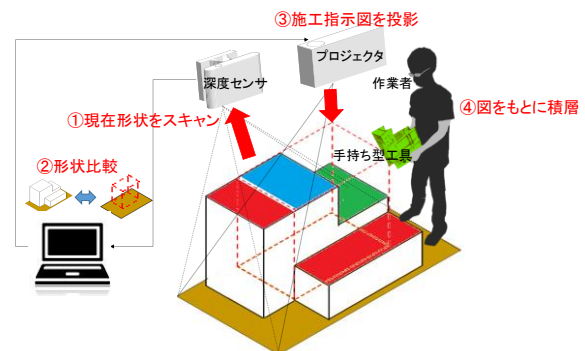


図 2. システムの概要図。ここでは、茶色は地面、白色は現在形状、赤色の破線は目標形状を示す。緑色は現在形状が目標形状より低い位置にあり積層が必要、青色は現在形状と目標形状が一致しており積層が完了している、赤色は現在形状が目標形状より高く積まれていることを示す

3 システム

提案手法の構成を図 2 で示す。本研究では、プロジェクタで作業場所ごとに作業内容を指示する施工指示図をリアルタイムで投影することで、作業者が視覚情報をもとに直感的に施工を行えるようにしている。具体的には以下の通りである。1 深度センサを用いてリアルタイムで現在形状をスキャンする。2 現在形状と目標形状を比較する。3 2 の結果をもとに施工指示図を決定し、現場に投影する。4 作業者がその施工指示図をもとに施工を行う。ただし、深

度センサは通常の 3D グラフィックスへの復元のように様々な方向から建設物をスキャンするわけではなく、1 つの場所に固定して建設物のある一定方向の表面上のみをスキャンすることとする(今回はプロジェクタの投影方向と同じになるように深度センサを固定する)。この章では建設物の形状の内部表現を説明した後、プロジェクタで投影する施工指示図について説明する。

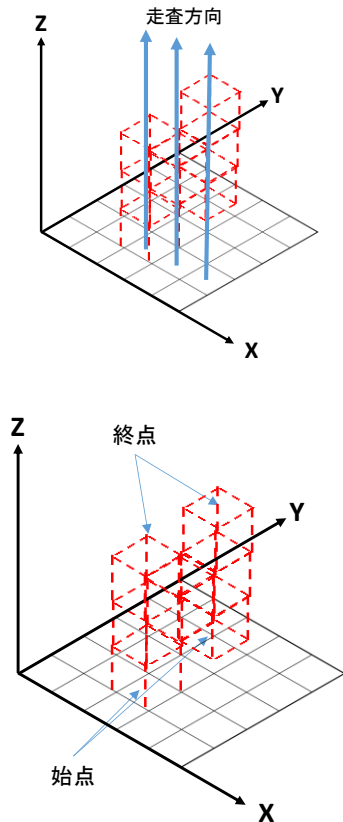


図 3 ボクセル表現と目標形状の領域. 赤の破線は目標形状をボクセルで表現したものである. 上図は形状比較を行う際の走査方向で, 下図は目標形状の領域を示す始点, 終点のボクセルを表している。

3.1 形状の内部表現

提案手法では深度センサ(KINECT のようなデプスカメラ)を用いる。そこから得られるデータは深度センサを原点とする 3 次元座標のポイントクラウドである。このポイントクラウドをボクセルで近似し、建設物の形状を決定する。ボクセルの位置は(x, y, z) の 3 次元座標で表現し、座標ごとにボクセルが存在するかどうかの判定を行ってボクセルを設置する。ここで、 xy 平面は地面と平行とし、 z は地面からの高さを示すこととする($z=0$ は地面と同じ高さとする)。

後述する現在の形状と目標形状比較のために目標形状の領域を知る必要がある。目標形状の領域とは、

ある x 座標と y 座標において、ボクセルが連続して z 軸方向に並んでいる時に、その連続の始点から終点までのボクセル全てを指す(図 3)。全ての x 座標と y 座標の組み合わせにおいて、その始点の z 座標と終点の z 座標を求めることで、目標形状の領域全てを示すことが出来る。

3.2 施工指示図

提案手法では、作業場所ごとにそれぞれの作業内容を指示する施工指示図は、スキャンした形状と目標形状を比較した結果をもとに複数の色で表現する。作業者はそれらの色の意味を把握するだけで提案手法を活用することが出来る。

前述の通り、深度センサは固定しており、建設物のある一定方向の表面しかスキャンできない。積層が進み、深度センサから陰になる部分がどうしても存在してしまうため、それを考慮した制約条件として、建設物は必ず下から上へ積層され、挿入・抜かはないという前提を設ける。この前提をもとに現在形状をスキャンし形状比較を行う。

形状比較は現在形状と目標形状を比較し、現在形状で過不足の部分を検出することを目的としている。形状比較の方法として、ある x 座標と y 座標の組み合わせにおいて z 軸方向に走査し、スキャンした形状のボクセルが目標形状の領域内に存在するかどうかの判定で行う。領域内に存在しない場合とする場合に場合分けし、そこから細かい場合分けを行う。

(1) 現在形状が目標形状の領域内に存在する。

この場合の状況は図 4 の(b), (c) の 2 つある。下から上へ積層されるという仮定より、スキャンしたボクセルの中で z 座標が最大のボクセルが終点の z 座標を下回っていたら積層すべき高さが足りないとみなし、同じだったら積層すべき高さを満たしているとみなす。基本的に提案手法を用いて建設作業する時は、全ての x 座標と y 座標の組み合わせにおいて、スキャンしたボクセルの z 座標が積層すべき高さを満たすように作業を行う。

(2) 現在形状が目標形状の領域内に存在しない。

この場合の状況は図 4 の(d), (e), (f) の 3 つある。スキャンしたボクセルの中で z 座標が最大のボクセルが 0 の時は地面とみなす。スキャンしたボクセルの z 座標が 0 より大きい時、積層されない場所に積層がされているとみなす。ここでさらに細かい場合分けを行う。スキャンしたボクセルが目標形状の領域の直下にある場合とそうでない場合である。後者の場合には建設物をそこから除外すればよいが、前者の場合は目標形状と異なる結果となるが、誤差が最小になるように後述するチェックプロセスを設けて対応する。

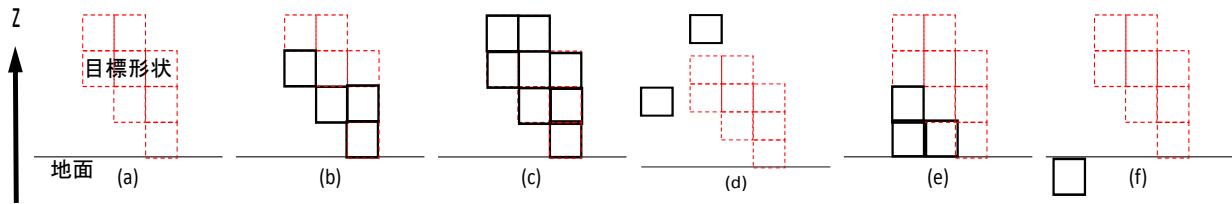


図 4. 矢印方向を z 軸とする「図の四角のうち、目標形状を赤の破線、スキャンしたボクセルを黒の実線で表す。図の直線は地面を表す。(a)目標形状のみの図。スキャンしたボクセルに対して、(b)積層すべき高さが足りない、(c)積層すべき高さが満たされている、(d)目標形状の領域外かつ直下でない、(e)目標形状の領域外かつ直下にある、(f)地面という判定がされる

3.3 その他のユーザインタフェース

現在の形状と目標形状の差異を 3D グラフィックスで確認出来るビューアを用意した(図 5)。作業員は基本的にプロジェクションマッピングされた指示図をもとに作業すればよいのだが、目標となる形状がどういう建築物か意識しながら作業を進めるほうが効率的なので、指示図の色とボクセルの色を一致させたビューアを実装した。

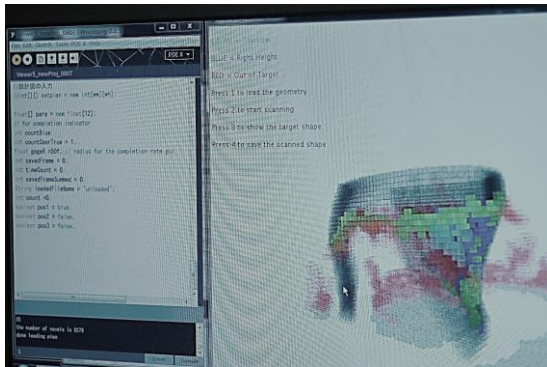


図 5. ビューア。目標形状は黒の半透明。その他の色は 4 章で述べる。

4 ケーススタディ:パビリオン建設

提案手法の検証のため図 6 に示すようなパビリオン(幅 2m 奥行き 3m 高さ 3m)を建設した。一般的な 3D プリンタが粒度の細かい砂状もしくは液状の素材を流し込み固着させるのに対して、本パビリオンは長さ 200mm, 5mm 角の棒材 (図 7) 80000 本および一般的な木工用ボンドを混ぜて落とすことで建設を行う。ランダムに組みあがる棒材によって空隙が生じ、材料密度が低く軽い建築物を達成できる。また 1 層で約 150-200mm の厚さで積層でき、効率的な施工ができる。

単管パイプで構成したやぐらを製作し、プロジェクタと深度センサを床面からの高さ 3.5m で設置し、幅 2m, 奥行き 1.5m, 高さ 3m の投影・スキャン空間を確保した。今回の建設で用いた機材は、深度センサとして ASUS 社の Xtion Pro Live[8], プロジェクタとして BenQ の MX823ST[9] である。本パ

ビリオンで用いた棒材は空隙による離散的な面を有しているため、形状測定および評価を 1 辺 5cm のボクセルで近似し行っている。Xtion Pro Live の精度は 2cm 前後であり、今回のパビリオンの精度を考えると問題のない数値である。また、MX823ST の投影範囲は地面で対角約 6.9m であるが、地面から 2m の高さでは対角約 3.0m となっている。建設する形状よりも小さな投影・スキャン空間であるため、形状を分割し、やぐらを逐次移動しながら建設した。施工指示図で、様々なパターンを試しながら、主に使った色として、図 4 の場合分けより、(b) が緑、(c) が青、(d) が赤、(e) が白、(f) が黒である。

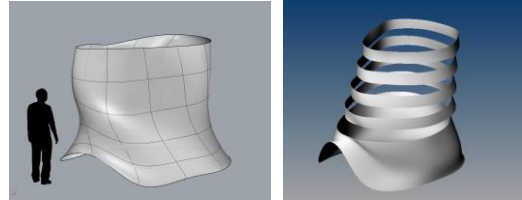


図 6. 本パビリオンの目標形状。左: 最終的な目標形状。右: 最終的な目標形状を 20cm の層で切り分け、下から順に層を完成させながら積層作業を行う。

4.1 建設手順

まずは深度センサ・プロジェクタのキャリブレーション[10]を行う。次に目標とするパビリオンの 3D モデルを入力する。3D モデルは設計した面をボクセル近似した。図 6 左に示すように最終的な目標形状を図 6 右に示すように 20cm の層で切り分け、1 つの層が完成したら次の層に進む、を繰り返して積層作業を進める。ただし、積層作業が進むにつれ、パビリオンが高くなり、プロジェクタの投影範囲が狭まってくるために、目標形状を分割し、それぞれ指定された場所で投影出来るようにやぐらを移動する必要がある。本パビリオンで高さ方向に傾斜がついた部分は棒材を傾斜角度に合った角度で落とす必要がある。この傾斜角度を確認するために白い大きめの板(1m×1m)を用いて高さ方向の形状を必要であれば確認する(図 9)。

プロジェクションマッピングを用いた建設用 3D 積層造形技術



図 7. パビリオン建設の推移. 左上から右下へと順に時系列が進んでいる

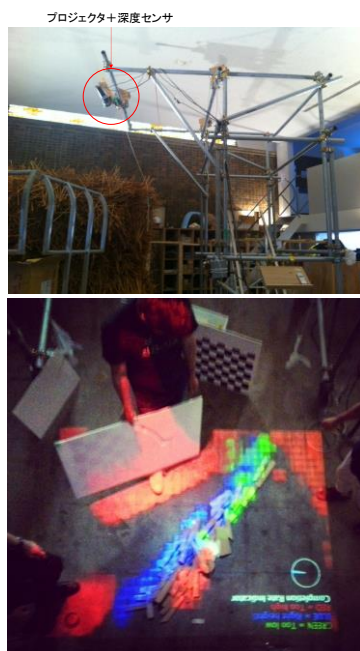


図 8. 提案システムを積んだやぐら. 下図はプロジェクションマッピングで施工指示図を投影している

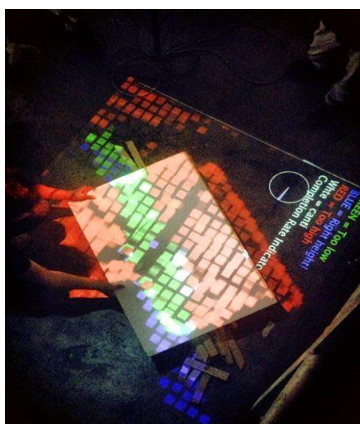


図 9. 白い板で高さ方向の形状を確認している図

4.2 結果

今回の建設では作業者にはどのような形状のパビ

リオンを作るのか伝えず、ビューアや作業の中で理解してもらうように促した. それにより, 作業を通して, 作業者は基本的に積層すべき高さが足りないことを示す色と積層すべき高さが満たされたことを示す色の 2 色のみに着目していた.

今回の建設を通して, 提案手法にいくつかの問題があり, 主な問題点として長期的な建設過程が見えないという点が挙げられる. 当初最終的なパビリオンの形状を目標形状としていたのを, 作業者の使用感として短期的な目標がほしいという要求があり, 解決策として図 6 右に示すように最終的な目標形状を分割して短期的な目標形状を設定した. また, 建築物が斜め上方に立ち上がっていく場合などには, その立体形状に合わせて棒材を落とす角度や方向を調整しなくてはならないが, 建築対象への投影だけでは, 目標形状を立体的に理解できないという問題もあった. そこで現場では, 白い大きめ(1m×1m)の板を用意し, それに施工指示図を投影することで, 立体形状の把握を行った. この方法は, z モニタ[12]のように, 手軽に「何もない空間」における目標立体形状の把握には有効であり, 今後積極的に利用していく仕組みを入れていることを検討している.

5 まとめと今後の課題

本稿では, プロジェクションマッピングによる作業指示と手持ち型工具による作業を組み合わせた新しい 3D 積層造形技術について提案した. 作業者を含めた現場にいる人がどのように建設が行われていくのか視覚情報から直感的に理解でき, 最終的な形状を知らなくても投影された建設すべき場所を指示する図をもとに建設を行える. 提案手法を用いて実際に大型のパビリオンを, 作業者間で特に事前知識を共有することなく建設することに成功した.

本手法の問題点としては, 作業者が立体的に目標形状を理解しにくいため, 手持ち型工具の角度や方向をどのように調整すればよいのかわかりにくいこ

とにあった。今回はボードを用いてこの問題に対処したが、今後は手持ち型工具をインテリジェンス化し、手持ち型工具を通して施工内容をプロセスごとに作業者に指示するインタフェースを実装する予定である。具体的には、手持ち型工具の位置を自動検出し、その場所での積層作業で棒材を落とす角度や方向を作業者に指示する、あるいは自動で送出を制御するシステムを実装する予定である。また、積層する場所を間違えたり、棒材を正しい角度や方向で落とせなかったりと施工ミスが発生した際、その誤差が積み重なり、出来上がった建設物の強度が下がる可能性がある。そこで、施工ミスを考慮して目標形状を計算し直すシステムを実装することを考えている。手法として、前の目標形状と新たな目標形状間の形状差分を最小化することを目指して、新たな目標形状の生成とそれに対する構造シミュレーションを行うことが考えられる。最も形状差分が小さく、かつ構造的に十分強度な建設物となる形状を新たな目標形状とすればよい。このシステムは作業の区切り目ごとに実行することを考えている。

謝辞

今回のパビリオン建設において、永田氏、杉田氏、Rod 氏、Berwick 氏、Osman 氏、Clement 氏、Xu 氏、Xiong 氏、Saraya 氏、Jin 氏がパビリオンの形状設計、棒材をばらまく工具の製作、建設作業を行っていただき、無事パビリオンを完成することができました。心より厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] A. Rivers, I.E. Moyer, F. Durand. Position-Correcting Tools for 2D Digital Fabrication. *ACM Trans. Graph.* 31, 4, 88:1–88:7, 2012.
- [2] A. Zoran, R. Shilkrot, J. Paradiso. Human-computer Interaction for Hybrid Carving. *Proc. UIST '13*, pp. 433–440, 2013.
- [3] A. Rivers, A. Adams, F. Durand. Sculpting by Numbers. *ACM Trans. Graph.* 31, 6, 157:1–157:7, 2012.
- [4] M. Flagg, J.M. Rehg. Projector-Guided Painting. *Proc. UIST '06*, pp. 235–244, 2006.
- [5] 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.
- [6] D-Shape(2014 年 8/20 確認). <http://www.d-shape.com/tecnologia.htm>.
- [7] Contour Crafting(2014 年 8/20 確認). <http://www.contourcrafting.org/>.
- [8] Xtion Pro Live(2014 年 8/20 確認). http://www.asus.com/jp/Multimedia/Xtion_PRO_LIVE/.
- [9] BenQ MX823ST デジタルプロジェクタ取扱説明書 (2014 年 8/20 確認). ftp://220.228.13.50/projector/manual/MW824ST/MX823ST_MW824ST_JP_20140310.pdf.
- [10] 奥富 正敏 他. デジタル画像処理. 15 カメラキャリブレーション, pp 255 - 256 CG-ARTS 協会, 2004.
- [11] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, B. MacIntyre. Recent advances in augmented. *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.21, no.6, pp.34–47, 2001.
- [12] 山本吉伸, 仁木和久, "Z モニタ -- ユーザの能動性を支援するインタフェース環境 --", つくばソフトウェアシンポジウム 96 予稿集, pp.5–8, 1996. http://www.submit-asap.org/home/yoshinov/etl/public_html/projects/hhc/zmon/sld010.html