JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	階層的プロジェクションマッピングによる大規模バルーンアート制作支援
Author(s)	吉田，匠吾；彭，以琛；謝，浩然；張，家銘；宮田，一乘
Citation	画像電子学会誌，49(1)：25-32
Issue Date	2020
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/17041
Rights	Copyright (C) 2020 画像電子学会．吉田 匠吾，彭 以琛，謝 浩然，張 家銘，宮田 一乘，画像電子学会誌，49(1)，2020，pp.25-32．
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

IIEEJ 論文

階層的プロジェクションマッピングによる大規模バルーンアート制作支援

吉田 匠吾*† 彭 以琛*† 謝 浩然† 張 家銘‡ 宮田 一乘† (正会員)（*共同筆頭著者）

†北陸先端科学技術大学院大学，‡台湾国立交通大学

Layered Projection Mapping for Large-Scale Digital Fabrication of Balloon Art

Shogo YOSHIDA†, Yichen PENG†, Haoran XIE†, Chia-Ming CHANG‡, Kazunori MIYATA† (*Member*)

†Japan Advanced Institute of Science and Technology, ‡National Chiao Tung University

〈**あらまし**〉 近年 3D プリンタを利用するデジタルファブリケーションの研究が注目されているものの，大規模な造形手法は依然として挑戦的な課題である．この課題を解決するため，本研究では階層的プロジェクションマッピング技術を提案する．提案技術により，専門的スキルを持たない一般ユーザでも手軽に大規模な造形物の制作が可能となる．提案手法は造形物の構成要素に依存しない汎用性が有するが，本論文では特にバルーンアートに注目して提案技術を検証した．提案手法の流れは，制作対象となる 3 次元モデルの分割，階層ごとのキャリブレーション，深度計算及び数字の投影である．また，楽しさを演出するために投影する数字の動画エフェクトを適用した．提案システムを使用して，複数のユーザが楽しく協力し，様々な色やサイズのバルーンを用いて大規模なバルーンアートを完成させることができた．

キーワード：バルーンアート，デジタルファブリケーション，プロジェクションマッピング，制作支援

<Summary> Large-scale digital fabrication is still a challenging issue due to the spatial and material limitations of common 3D printers. In this work, we propose the layered projection mapping approach, an interactive system that helps common users fabricate in large-scale. To verify our system, we utilize balloon art as a case study from its economical and practical aspects. The whole framework is composed of two parts: offline depth calculation and interactive projection guidance. In offline calculation, we first decompose the target 3D model using approximate pyramidal decomposition, then divide the decomposed parts into layers with individual calibrations. In projection guidance, the system provides fabrication guidance with depth differences between the target shape and the current work in real-time progress. Instead of projection of color gradients in previous work, we use the high contrast black and white projection of the numbers in consideration of balloon textures. To increase user immersion, we propose a shaking animation of projected number with significant depth differences. In our case studies, the unskilled participants can build a large-scale balloon art using the proposed system.

Keywords: balloon art, digital fabrication, projection mapping, fabrication guidance

1. はじめに

安価で使用できる高機能なモデリングツールの登場や，3D プリンタの低価格化などによりデジタルファブリケーションを体験することが容易になってきている．また，LITALICO ワンダー[1] のように電子工作教室を通してデジタルファブリケーションを体験できる取り組みも行われており，デジタルファブリケーションはより身近なものになっている．

近年，コンピュータグラフィックス及びヒューマンコンピュータインタラクションの分野において，様々なデジタルファブリケーション技術の研究が行われている．例えば，多軸ロボットアームを用いた造形技術 [2]，自由にビーズで形状をデザインできるシステム [3] や，空気力学の事前計算によるグライダーのデザイン支援システム [4]も提案されている．しかし，これらの研究は全て小規模のデジタルファブリケーションを想定している．

プロジェクションマッピング技術はアートやゲーム，教育や支援など様々な分野で活用されており，広く世間に普及している．しかしそのほとんどは，プロジェクタと投影対象が固定されており，投影距離や角度があらかじめ決まっている．つまりどちらか片方の位置がずれることで，映像の破綻が起きてしまう．これに対し，投影対象の移動に応じて，投影映

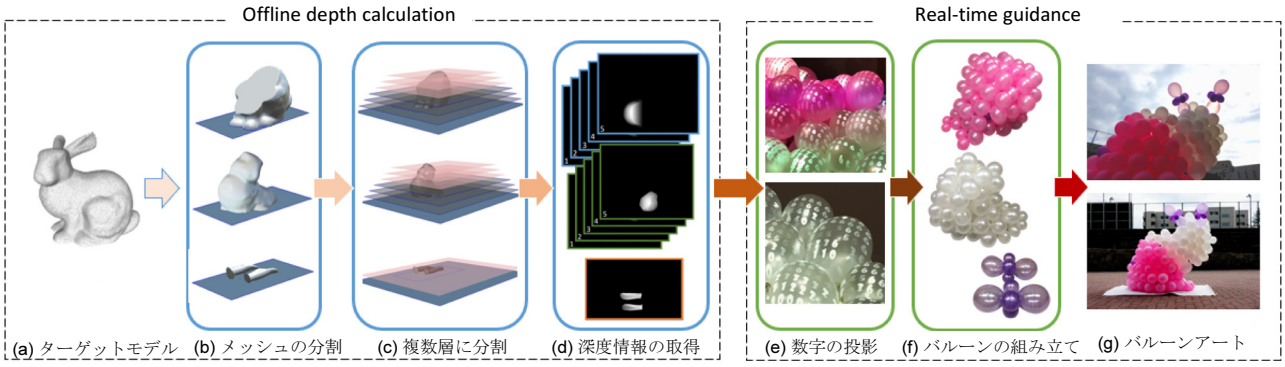


図 1　提案システムのフレームワーク

Fig.1　Framework of the proposed system

像も追従するダイナミックプロジェクションマッピングの研究 [5]もある．本研究は，プロジェクションマッピング技術を用いてデジタルファブリケーションの支援システムを目指す．

プロジェクションマッピングを活用したデジタルファブリケーションの支援にはプロジェクタカメラシステムが不可欠である．これらのシステムでは，カメラとプロジェクタの両方をキャリブレーションする必要がある．また，造形物の 3 次元情報を推測するため，深度カメラを利用することが多い．既存研究では，システムのキャリブレーションは造形前に一回のみ実施する [6,7]．しかし，造形物が大規模である場合，投影距離が縮小するにつれ深度カメラの赤外線照射範囲及びプロジェクタの投影範囲も縮小してしまうため，対象モデルの縮尺と深度マップの範囲に差異が生じてしまい，制作物を適切なサイズで制作できなくなってしまう．この課題の解決法として，対象モデルを一定の高さごとに分割する提案があるが，膨大な作業時間や手間を必要とする [8]．

これらの課題に対し，本論文では一定の高さごとに適切なサイズで投影を行う階層的プロジェクションマッピング技術を提案する（**図 1**）．階層的プロジェクションマッピングを用いることで，ユーザに制作手順を示すことができ，また投影方向の前後の移動による投影映像の変化も生じることはない．本論文の目的は，誰でも手軽に大規模な造形物を制作できる手法を提案することである．提案手法では，深度センサを使用して作業スペースと制作対象となる 3 次元モデル（図 1 (a)）の深度マップを取得し，制作対象の制作手順を提示する．はじめに，3 次元モデルを複数のパーツに分け（同図 (b)），それらをさらに複数層に分割する（同図 (c)）．つづいて，複数層に分割したパーツの深度マップを生成し（同図 (d)），各層において適切なサイズで映像を投影するために層ごとにキャリブレーションを行う．さらに投影対象の質感や形状の影響を受けないよう，アニメーション付きのモノクロの数字を投影する（同図 (e)）．投影された数字にしたがいバルーンを配置し，パーツを組み立てる（同図 (f)）．それらを組み合わせることでバルーンアートが完成する（同図 (g)）．

提案手法を用いることで，誰でも手軽に大規模なスケールでの娯楽や知的教育に活用でき，共同作業による協調性の向上や，ユーザ同士の緊張感の緩和などの効果が期待できる．本論文では，提案手法の適応事例として，実際にバルーンアート制作を行う．バルーンアートは子どもから大人まで楽しめる娯楽であり，かつ安価で安全に行うことができる．しかし，大規模なバルーンアートを行うには，完成図を想像しながら作業を行わなければならず，加えて複雑な配置手順もユーザが決めなければならないため，大規模なバルーンアートの制作支援は不可欠である．

本提案で期待する貢献は，誰でも簡単に，かつ少人数での大規模なバルーンアートの制作を実現可能にすることである．3 章は手軽で大規模な造形物を制作できる手法の提案及び階層に応じた投影範囲較正システムの提案，4 章はバルーンを用いたアート制作の応用事例の評価を示している．

2.　関連研究

2.1　プロジェクションマッピング

プロジェクションマッピングには，プロジェクタと投影対象を固定した静的プロジェクションマッピングと，投影対象の移動に応じて映像が追従する動的プロジェクションマッピングがある．特に後者に対し，様々な研究が行われている．Miyashita らは，ハイスピードカメラを用いて物体に仮想 3D コンテンツを投影することでテクスチャを貼り付ける動的プロジェクションマッピングシステムを提案した [5]．Piper らは，Illuminating Clay と名付けた，地形解析のために粘土を用いたタンジブルインターフェースとデジタル表現を組み合わせる研究を行っており，粘土の形状に応じてリアルタイムに 3 次元空間の計算結果を表示している [9]．しかし，これらはいずれも投影対象の移動が狭い範囲で制限されており，プロジェクタの投影方向に大きく動くことを考慮していない．

2.2 デジタルファブリケーション

現在，3 次元モデルや玩具などを手軽に制作できるようになった．その中で，よりユーザに扱いやすいデザインシステムの開発や，新しいデジタルファブリケーションの方法を追求する研究が行われている．Prevost らは， 3D モデルの重心を再構成させることで，バランスの取れた 3D モデルを出力できるシステムを提案した[10]．このシステムを活用することで，躍動感にあふれ，かつ適切なバランスを持つ 3D モデルを，簡単に制作できるようになった．Rivers らは，彫刻対象にカラーグラデーションを投影することで，彫刻の経験がないユーザでも簡単に美しい彫刻を行うことができるシステム[6]を提案した．しかし作業スペースや彫刻対象，投影映像のキャリブレーションは 1 回しか実施されず，大規模な造形には適用できない．また，色が混在してしまうことから，バルーンなどのカラフルな素材にカラーグラデーションを投影すると視認性が低下してしまう．他にも RoMA[11]やおもちゃの制作[12]などがあるが，いずれも小規模の制作を想定している．

大規模なデジタルファブリケーションについて，大規模なバルーンアートを制作する事例がある[13]．しかし階層的キャリブレーションや深度計算などについて十分な説明や議論が行われていない．鷹見らは，分割した 3D モデルの深度情報を投影し，手持ち型工具を用いた作業による建築用 3D 積層技術を提案した[8]．しかし 1 章でも述べたように，制作物が高くなるにつれ，投影映像と制作物の位置及び大きさの差異が生じる．そのため目標形状の分割や，制作物の土台となるやぐらの移動が余儀なくされる．他にも，スマートウォッチを活用した Crowdsourced Fabrication[14]や，ペットボトルを連結させロボットアームなどの製作を行う Trussformer[15]がある．本提案手法はオブジェクトの配置手順を映像で実空間に投影するので，ユーザはバルーンの複雑な配置手順を考えることなく，投影されるガイドにしたがうことで協同しながら効率的に制作することができる．

3. 提案手法

本研究では階層的プロジェクションマッピング技術により，大規模なバルーンアートの制作支援システムを提案する．

提案システムのフレームワークは，1）3 次元モデルの分割及び深度マップの生成，2）作業時の実空間で行うインタラクティブプロジェクションマッピングのプロセスである．前の段階では，実空間に合わせた仮想空間を確立し，3 次元モデルをいくつかのパーツに分割する．分割したパーツをさらに複数層に分け，深度マップを生成する．後の段階では，AR 技術による実空間での制作手順の情報を投影する手法を採用する．すなわち，制作中の実物体の深度情報と，仮想空間内の 3 次元モデルの深度情報との差を利用し，制作手順の情報を生成する．本提案手法を用いて，制作対象の構成要素となるオブジェクトを組み合わせることで，大規模ファブリケーションを実現する．また，オブジェクトの配置位置に応じて，色の変化やアニメーションの再生を行う．

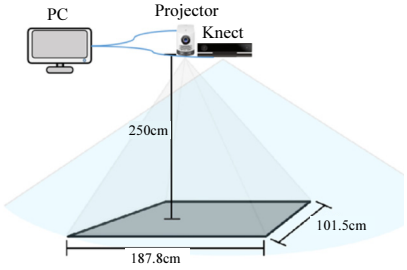
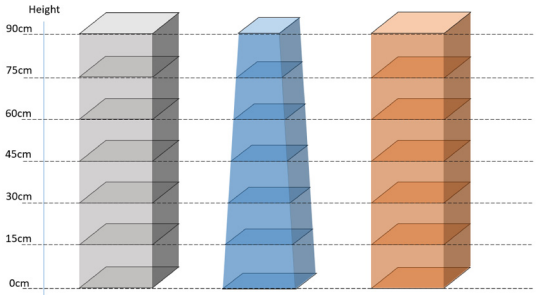


図 2 実験環境

Fig.2 Experiment environment



(a) Target 3D model (b) Without layering (c) Ours

図 3 ターゲット 3D モデル(a)及び既存手法(b)と提案手法(c)の投影結果の比較

Fig.3 The comparison of target 3D model(a), the projection results of the existing approach(b), and our proposed approach(c)

3.1 システム構成

本作業環境の構築には，レーザープロジェクタ（LG HF80JG, 2000 lumen）及び深度センサ（Microsoft Kinect V2，解像度 512×424）を使用する．実験を行う部屋のスケールに合わせ，プロジェクタを床面から約 2.5m の高さに設定し，プロジェクタに隣接するよう深度センサを配置する．バルーンアートに用いるバルーンは，デュアルノズル電動エアーポンプ（AGPtek）を使用して膨らませる．その後ベルクロテープを使用しバルーンを貼り合わせる．システム構成を**図 2** に示す．

3.2 階層的キャリブレーション

プロジェクタの投影範囲と深度センサの赤外線照射範囲は，機器から遠ざかるにつれ拡大するため，作業位置が上がると投影する画像と取得する深度マップは小さくなる．誤差を極力減らすため，3 次元モデルの深度マップの高さを，分割したパーツの最大の高さ（約 90cm）に合わせた 15cm ごとの 6 層に分け，層ごとにキャリブレーションを行う．キャリブ

レーションの方法として，まず計算機内にて仮想作業スペースを構築する．次に，深度センサの赤外線照射範囲を深度センサの解像度（512×424）で投影された映像の面積で割った結果をサイズと位置の比率（Ratio）として算出する．映像をRatio 倍し，サイズのキャリブレーションを行う．また，サイズのキャリブレーション後の映像投影範囲の上辺及び左辺を，深度センサの赤外線照射範囲の上辺と左辺に合わせ，位置のキャリブレーションを行う．

仮想の直方体を設置し，その様子を実空間に投影する（**図 3**）．実空間では，50cm 四方の正方形が描かれた白板を用いて，計算機内に設置した投影される直方体の断面のサイズが，その正方形に合わさるようサイズ調整を各層にて行なった．サイズ調整は目視で行い，各層にて直方体の断面が白板の正方形のサイズと一致するよう投影映像をスケーリングする．

実空間に深度センサとプロジェクタを配置しているように，仮想作業スペースを構築する際，計算機内にて仮想の深度センサとプロジェクタの投影範囲を設定している．しかし実空間に設置されている各機器の投影方向や角度，範囲は一致しておらず，計算機内にて設定した仮想の深度センサとプロジェクタとも一致していない．仮想空間と実空間の各機器を投影方向や角度，範囲を一致させるには，新たなアルゴリズムを考案する必要がある．また，リアルタイムに深度計算を行い，常に計算機内と実空間の作業スペースが一致した環境を構築しようとしても，深度センサの解像度の限界やノイズにより実空間を正確に認識することはできない．そのため，階層的キャリブレーションが必要であり，一定の間隔で階層を設け，1 層ずつ位置合わせを行うことで，計算機内と実空間の作業スペースの一致を図った．

3.3 深度計算

計算機内にて，深度マップの計算のために投影映像と深度センサが重なる領域に 3 次元モデルを配置した．また，深度センサの赤外線照射範囲と計算機内の仮想作業スペースの一致には，レイ・トライアングルの交差判定アルゴリズム [16] を採用する．計算結果を**図 4** に示す．垂直の黒い線は光線を示し，赤の点はターゲットメッシュとの交差点を示す．本手法では深度マップの解像度に対応する 512×424 本の光線を使用した．また，3 次元モデルに対する計算はデスクトップ PC（Intel i7 - 4790 CPU 3.60GHz, RAM32GB）を使用し，MATLAB を用いた並列計算にて，約 35 秒の計算時間を要した．

3.4 メッシュの分割

投影された制作手順に沿ってパーツを完成させる作業は，3D プリント技術の積層法 [8] に似たプロセスを採用する．実際に作業を行う空間は，プロジェクタの投影範囲内であるピラミッド状の空間内である．本研究では近似ピラミッド分解法 [17] を採用する．投影範囲の制限，及び投影の際パーツの突出した部分による影の発生が起こらないことを考慮し，3D モデル（スタンフォードバニー）を上半身，下半身，左耳，右耳の 4 パーツに分割した．結果を**図 5** に示す．

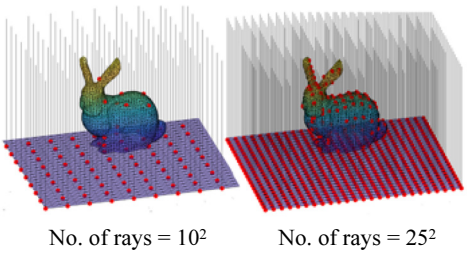


図 4 深度マップ計算のための交差点算出

Fig.4 Ray-tracing approach for depth map calculation

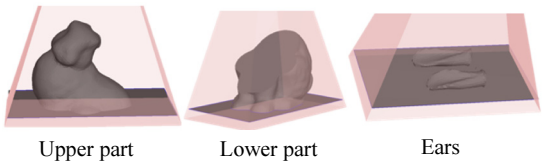


図 5 4 パーツに分割された 3 次元モデル

Fig.5 Four decomposed models from the target model

3.5 深度差の計算

まず，床面の凹凸などによる影響を無くすため，何も置かれていない状態で作業スペースの深度差を取得する（**図 6** (a)）．次に，この深度マップをリアルタイムで取得する深度差から減算することで補正された深度差を取得する（同図 (b)）．また，補正した制作中の深度差と生成した 3 次元モデルの深度差を計算し（同図 (c)），数字に置き換え投影した（同図 (d)），一部を拡大）．なお，図 6 左の 2 つのカラーバーは，床面の凸凹を含めた作業空間の深度差及び生成した 3D モデルを含めた，床からの深度差を示している．

3.6 深度差による数字の投影

効果的な深度差の可視化を検証するために，カラーグラデーション及び数字の投影テストを行なった（**図 7** (a)）．Canny 法を用いてエッジ検出を行ない，カラーグラデーション及び数字の視認性を確かめた．

既存研究で使用されるカラーグラデーションに比べモノクロの数字の視認性が良いことを確認した．また，実際にバルーンに対しカラーグラデーションと数字を投影した結果，バルーンの色に影響されないことも確かめられた．加えて，

カラーグラデーションの投影でのエッジ検出は，バルーンの丸みを帯びた形を検出しているが，数字の投影でのエッジ検出では数字の形のみの検出が確かめられた．つまり風船の色や形ではなく純粋に数字のみを視認することができる．そのため，モノクロの数字を投影することとした．本手法では，グリッド状に並べられた数字を投影対象の深度差の表示やオブジェクトの配置範囲の投影に使用する．配置する高さに応じて 0 から 9 までの数字を投影する（図 6（d））．投影する数字は，オブジェクトの高さが目標の高さに比べ低いときは 0 から 5，適切であれば 6，高いときは 7 から 9 の範囲の値とする．なお，投影される数字は深度差に応じてリアルタイムに変化する．ユーザはこのガイド情報を参考に，オブジェクトの配置範囲や高さを確認しながら，手作業にてオブジェクトの個数の増減やサイズの変更を行う．また，設置範囲外から大きくずれた位置にオブジェクトを配置している場合，大きなずれをユーザが直観的に理解でるよう適切な数字である 6 から大きく離れた 0 と 1, 9 の 3 つの数字が揺れるアニメーションが再生され（図 7 （b）），オブジェクトを正確な位置に配置しようという動機付けを試みた．

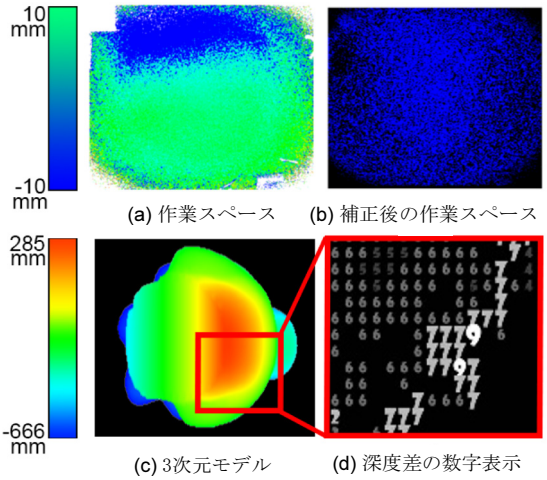


図 6　深度差の計算結果

Fig.6　Calculation results of depth differences

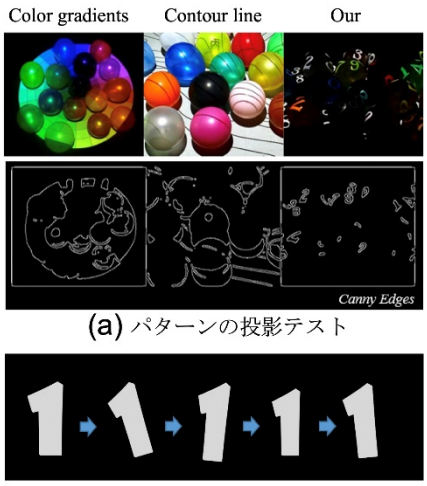


図 7　深度差による数字の投影

Fig.7　Projection of numbers based on depth difference

4.　システムの活用例及び実験結果

4.1　バルーンアート制作手順

本研究では，大規模制作支援の例として，バルーンアートの制作 [13] を行う．なお，制作事例の対象を「スタンフォードバニー」とし，ターゲットの高さを投影範囲の制限及び作業を行いやすさを考慮して 150cm に設定した．

バルーンアートの制作プロセスを図 8 に示す．まず，ユーザは好きな色のバルーンを選択し空気ポンプを用いて膨ませる．次に，作業スペースに投影された数字に沿ってバルーンを配置し，ベルクロテープで固定する．1 層目のバルーンを配置し終えたら，それらを一度作業スペースから外し，次の層のパーツを制作する．これらの作業を必要回数繰り返す．また完成したパーツ同士の固定にもベルクロテープを用いる．

4.2　実験結果

4.2.1　既存研究とのシステムの比較

提案手法の有用性を確かめるために，バルーンを用いた 3 層からなる半球の制作を 3 手法で行う（図 9）．映像の投影範囲の制限により最大で半径 40cm の半球の制作を目標とした．一方で，バルーンの直径を 15cm と定めていたため，実際には，底面が半径 40cm の円，高さが 45cm の擬似半球の制作となる．第一の手法は，3 次元モデルを分割せずカラーグラデーションを使用する手法である [6]．第二の手法は，3 層に分割した 3 次元モデルとカラーグラデーションを使用し，層ごとに分割した 3 次元モデルを投影する手法である．ここで，各層の高さは 15cm に設定する．第三の手法は，本研究の提案手法と同じように 3 次元モデルを 3 層に分割し，作業スペースにモノクロの数字を投影する．表 1 に示すように，使用したバルーンの個数とベルクロテープの長さ，作業時間を記録した．なおバルーンは弾性材料であるため，ある程度の形状変化が生じてしまう．

制作したバルーンアートの実測値を図 10 に示す．高さ 40cm に設定された図中の黒い半円の値を目標に，3 つの半球を制作した．緑，青，赤のグラフは，順に第一の手法，第二の手法，第三の手法を表す．実験の結果，提案手法である赤のグラフが最も目標に近いことが確認でき，目標に近い半球を制作することができた．一方で，第一と第二の手法を用いた場合，制作した半球の高さに誤差が生じ，第一と第二の手法のいずれも設定した高さより約 10cm 高くなった．これは，

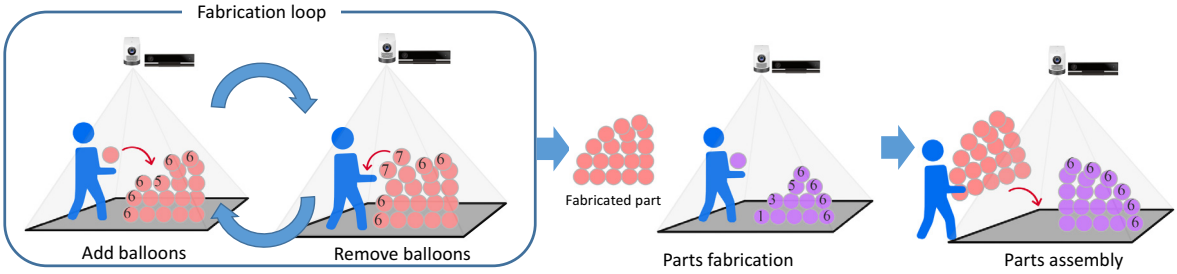


図 8　バルーンアートの制作プロセス

Fig.8　Fabrication process in balloon art creation

図 9　3 つの手法を用いて制作した半球

Fig.9　The results of the hemisphere fabrication with three approaches

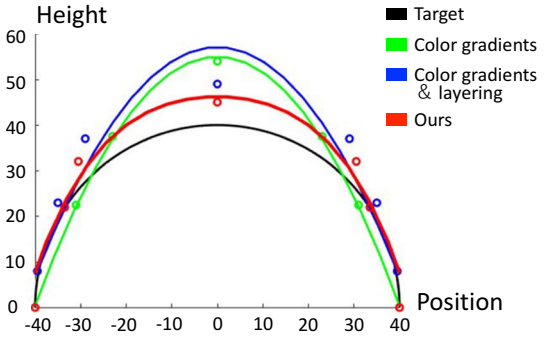


図 10　3 つの手法を用いて制作した半球の実測値

Fig.10　Comparison of fabricated hemispheres with three approaches

カラーグラデーションの色の変化が滑らかであり，どの高さまでバルーンを配置するかの明確なガイドがないため，ユーザが適切な高さにバルーンを配置できていなかったと考えられる．

4.2.2　バルーンアートの制作

成人男性 3 名を対象に，提案手法を用いた実験を行った．245 個のバルーンと全長約 8.5m のベルクロテープを使用し，約 3.5 時間でバルーンアートを制作した．考案したモノクロ数字の投影は，3.5 節で示したように，カラーグラデーションを使用する研究 [6] と比べ視認性の向上や，投影対象の形状や質感との高い適合性を確認した（図 7（a））．またユーザが数字のアニメーションに反応し，生き生きとした様子で作業を行っている様子から，アニメーションは動機付けのみならず，作業に対する退屈感を軽減し楽しさを与える可能性があることも確かめられた．バルーンアートの制作結果を図 11 に示す．

4.3　議論

4.3.1　インタラクション中の気づき

制作中に積み重ねたバルーンの揺れや重みによって，投影する数字がバルーンからずれ，本来投影されるべき場所に数字が投影されていない現象が確認された．しかし目標とする深度データには変わりはなく，また投影された数字の視認性が良いこと，バルーンをベルクロテープで固定しているため大きなズレは起こらなかったことから，ユーザは問題なくバルーンを組み立てることができた．

物理シミュレーションを活用すれば，バルーンの自重による崩れを予測できると考えられる．配置されたバルーンを認識し，リアルタイムで予測した形状を投影することで，配置するバルーンに隣接するバルーンにどのような影響を与えるのかを確認しながら制作を行うことができる．また予測した

表 1　各手法で使用したバルーン数，テープ長及び作業時間

Table 1　Usages of balloons, velcro tapes and time costs for each approach

手法	バルーンの個数	テープの長さ(cm)	作業時間(秒)
Color gradients	37	99	25
Color gradients & Layering	48	127.5	30
Shaking number & Layering (Ours)	61	145	35

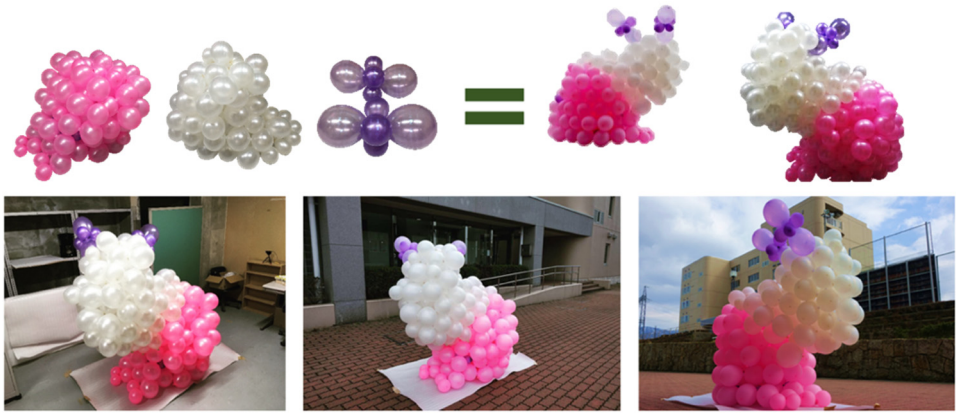


図 11　提案手法による大規模バルーンアートの制作結果

Fig.11　Fabrication result of the large-scale balloon art using the proposed approach

情報を活用し，あえて正しい形状よりも縮小された形状を投影しながら制作を行うことで，バルーン同士の押し出しや自重による崩れによって正確な形状が形成される，といったことも可能になる．

4.3.2　位置合わせ

各層の高さや投影位置は目視で行なっているため，そのプロセスは煩雑かつ正確性に欠ける．今回行なった実験では厳正に計測し位置合わせを行なっているが，一般ユーザがどこまで正確に位置合わせを行えるかは定かではない．提案手法を手軽に使用するには，マーカまたは特徴点の認識などを行い位置合わせのプロセスを簡易化及び自動化が必要である．

4.3.3　複雑な形状への対応

提案手法では，1 台のプロジェクタを使用しているが，複数の使用により作業スペースを拡張し，また複雑な形状に対しより詳細に映像を投影できる．詳細な映像投影が可能になることで，制作手順の詳細化や，正確性の向上につながると考える．また，制作するパーツや部位に応じて，使用するバルーンのサイズを変えることでより詳細な形状の再現が可能になる．例えば，制作物の中心部は大きなサイズのバルーンで構築し，ユーザから見える部分を小さなサイズのバルーンで構築することで，複雑な形状をより詳細に制作することができる．加えて，レンガやペットボトル [18] などの堅牢な素材を制作物の構成要素にすることで，柔らかい素材の変形による計測誤差を減少させることができる．

5.　まとめ

本論文では，大規模なデジタルファブリケーションを簡易化する手法として，モデルを各層ごとに分割し，実空間とのキャリブレーションを各層に実施する階層的プロジェクションマッピング技術を提案した．またアニメーションを付加したモノクロ数字の投影は視認性が良く，加えてユーザの行動の動機付けやエンタテインメント性の向上に繋がることも示唆された．応用例として，大規模なバルーンアート制作の結果を示した．

今後の課題として，深度計算に GPU を用いることでさらなる短縮が見込まれる．また提案システムを用いたバルーンアート制作には成功しているが，システムの使用感などを明らかにしていない．投影された情報のわかりやすさやシステムの使いやすさ，今後もバルーンアート制作を行う際システムを活用したいかなど，客観的評価を行うためアンケート調査を実施する必要がある．

本論文ではスタンフォードバニーのみの制作を行っているが，より形状が複雑なオブジェクトにも挑戦し，提案手法の有用性やさらなる課題を見つけ行きたい．また，実際にバルーンアート制作業者との議論を重ね，本システムの改善を目指したい．

謝　辞

この研究は JSPS 科研費助成金 JP17H06574 及び台湾高等教育スプラウトプロジェクト助成金 107-2200-001 の助成によって行われた．本研究の遂行にあたり，謝大釗氏及び陳迺雲氏に多大な協力を得た．また，本論文を執筆するにあたり，査読者の皆様から的確なご指摘をいただいた．ここに感謝の意を表する．

参考文献

1)　LITALICO ワンダー, https://wonder.litalico.jp (2019).

2)　C. Dai, C.C. L. Wang, C. Wu, S. Lefebvre, G. Fang, Y.-J. Liu: “Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion”, ACM Trans. Graph., vol. 37, no. 4, pp. 134:1-134:14 (2018).

3)　Y. Igarashi, T. Igarashi, J. Mitani: “Beady: Interactive Beadwork Design and Construction”, ACM Trans. Graph., Vol. 31, No. 4, pp. 49:1-49:9 (2012).

4) H. Xie, T. Igarashi, K. Miyata: “Precomputed Panel Solver for Aerodynamics Simulation”, ACM Trans. Graph., Vol. 37, No. 2, pp. 17:1-17:12 (2018).

5) L. Miyashita, M. Ishikawa: “Midas Projection: Markerless and Modelless Dynamic Projection Mapping for Material Representation”, ACM Trans. Graph., Vol. 31, No. 6, pp196:1-196:12 (2018).

6) A. Rivers, A. Adams, F. Durand: “Sculpting by Numbers”, ACM Trans. Graph., Vol. 37, No. 6, pp. 157:1-157:7 (2012).

7) A. Hattab, G. Taubin: “Rough Carving of 3D Models with Spatial Augmented Reality”, ACM Symposium on Computational Fabrication (SCF '19), No. 4, pp. 4:1-4:10 (2019).

8) 鷹見洋介, 吉田博則, 小渕祐介, 五十嵐健夫: “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”, 22nd Workshop on Interactive Systems and Software (2014).

9) B. Piper, C. Ratti, H. Ishii: “Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis”, Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 355-362 (2002).

10) R. Prévost, Emily Whiting, S. Lefebvre, O.-S. Hornung: “Make It Stand: Balancing Shapes for 3D Fabrication”, ACM Trans. Graph., Vol. 32, No. 4 (2013).

11) H. Peng, J. Briggs, C. Wang, K. Guo, J. Kider, S. Mueller, P. Baudisch, F. Guimbretière: “Roma: Interactive Fabrication with Augmented Reality and a Robotic 3D Printer”, Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, paper 579 (2018).

12) L. Zhu, W. Xu, J. Snyder, Y. Liu, G. Wang, B. Guo: “Motion-Guided Mechanical Toy Modeling”, ACM Trans. Graph., Vol. 31, No. 6, pp. 127:1-127:10 (2012).

13) H. Xie, Y. Peng, N. Chen, D. Xie, C.-M. Chang, K. Miyata: “BalloonFAB: Digital Fabrication of Large-Scale Balloon Art”, ACM CHI Conference on Human Factors in Computing System(CHI 2019), Late Breaking Work, Glasgow, pp. 164:1-164:6 (2019).

14) B. Lafreniere, T. Grossman, F. Anderson, J. Matejka, H. Kerrick, D. Nagy, L. Vasey, E. Atherton, N. Beirne, M. Coelho, N. Cote, S. Li, A. Nogueira, L. Nguyen, T. Schwinn, J. Stoddart, D. Thomasson, R. Wang, T. White, D. Benjamin, M. Conti, A. Menges, G. Fitzmauric: “Crowdsourced Fabrication”, Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 15-28 (2016).

15) R. Kovacs, A. Ion, P. Lopes, T. Oesterreich, J. Filter, P. Otto, T. Arndt, N. Ring, M. Witte, A. Synytsia, P. Baudisch : “Trussformer: 3D Printing Large Kinetic Structures”, Proc. of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 113-125 (2018).

16) T. Moller, B. Trumbore: “Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection”, Journal of Graphics Tools, vol. 2, no. 1, pp. 21-28 (1997).

17) R. Hu, H. Li, H. Zhang, D.-C. Or: “Approximate Pyramidal Shape Decomposition”, ACM Trans. Graph., Vol. 33, No. 6, pp. 213:1-213:12 (2014).

18) R. Kovacs, A. Seufert, L. Wall, H.-T. Chen, F. Meinel, W. Müller, S. You, M. Brehm, J. Striebel, Y. Kommana, A. Popiak, T. Bläsius, P. Baudisch: “Trussfab: Fabricating Sturdy Large-Scale Structures on Desktop 3D Printers”, Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 2606-2616 (2017).

（2019 年 7 月 19 日 受付）
（2019 年 11 月 2 日 再受付）

吉 田 匠 吾

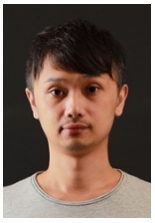
2018 年 熊本県立大学総合管理学科卒業. 2018 年より北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に在学中. ユーザインタラクションとプロジェクションマッピングに関する研究に従事.

彭 以 琛

2017 年 広東工業大学アニメーション制作学科卒業. 2018 年より北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に在学中. ヒューマンコンピュータインタラクションとプロジェクションマッピングに関する研究に従事.

謝 浩 然

2006 年 安徽大学応用数学科卒業. 2015 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了, 博士（知識科学）. 2014-2016 年 日本学術振興会特別研究員. 2015-2018 年 東京大学情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻特別研究員・特任助教. 2018 年より北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科助教. ユーザインタフェースとコンピュータグラフィックスに関する研究に従事.



張 家 銘

2002 年 国立台湾芸術大学デザイン学部ビジュアルコミュニケーションデザイン卒業. 2006 年 ロンドン芸術大学インタラクティブメディア学修士修了. 2016 年 ノッティンガム·トレント大学インタラクションデザイン学博士号取得. 2015-2016 年 アールト大学メディアラボ客員研究員. 2016-2018 年東京大学情報理工学系研究科博士研究員. 2018 年より国立交通大学コミュニケーションテクノロジー学部助教.インタラクションデザイン（UI 及び UX）に関する研究に従事.

宮 田 一 乗 （正会員）

1984 年 東北大学・応用物理学科卒. 1986 年 東京工業大学大学院・総合理工学研究科・物理情報工学専攻修士課程修了. 同年, 日本アイビーエム（株）東京基礎研究所入社. 1998 年 東京工芸大学芸術学部助教授. 2002 年より, 北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター教授. 2012 年 同大学知識科学研究科教授を経て, 2016 年より同大学先端科学技術研究科教授. 博士（工学）. コンピュータグラフィックス及びメディア表現に関する研究に従事. 情報処理学会, 芸術科学会, 画像電子学会, ACM, IEEE 各会員.