

パークラフトを用いた可搬型スクリーンによるプロジェクションマッピング  
Projection mapping by the portability type screen using a papercraft

白木 厚司\* 大前 友哉† 中山 弘敬‡ 檜山 大輔‡ 角江 崇‡ 下馬場 朋禄‡ 伊藤 智義‡  
Atsushi Shiraki Tomoya Omae Hiroataka Nakayama Daisuke Hiyama Takashi Kakue  
Tomoyoshi Shimobaba Tomoyoshi Ito

### 1. はじめに

近年、プロジェクションマッピングについて関心が高まっている。プロジェクションマッピングとは様々な投影対象に対して映像を投影し、投影対象とマッチした映像を演出する技術のことをいう。プロジェクションマッピングの規模はスマートフォンによる手のひらサイズのものから、建造物に投影するものまで幅広く存在する。それは、プロジェクタで投影可能なものならば様々なものがプロジェクションマッピングの投影対象になるからである。

プロジェクションマッピングの中でも大規模な企画として、2012年12月に東京駅で行われた TOKYO HIKARI VISION[1]や東京ディズニーランドで 2014年5月から行われている Once Upon a Time[cite[2]]などが挙げられる。これらの企画は高輝度プロジェクタを複数台用いて投影を行っている。TOKYO HIKARI VISION では 46 台の高輝度プロジェクタが用いられた。このような大規模なプロジェクションマッピングを行う場合は、設営場所の確保や機材のレンタルといった問題から公共の場所で長期間続けることは難しい。Once Upon a Time のように自前の会場を用意している場合を除き短期間での開催となってしまう。また建造物を動かすことはできないため、同じ場所での上映が基本となる。

一般的に投影対象は平面であることは少なく、複雑な形状をしていることが多い。その場合は単純に投影してしまうと歪んで映ってしまう。そのため、歪みのない映像を投影するためには投影対象に合わせて投影前の画像を調整する必要がある。投影前の画像を投影対象に合わせて調整することで歪みのない映像を映すことができるが、このようにして調整された画像は同じ投影対象にしか使用できない。さらにプロジェクタの投影対象に対する向きや角度といった位置関係すら変更することはできない。そのため、建造物や大型の物体に投影を行うようなプロジェクションマッピングでは移動しての展示は困難であり、観る人に足を運んでもらうことになる。また、大型の投影対象をいつまでも同じ場所に設営するにはコストがかかるため、大規模なプロジェクションマッピングは短期間で行われることが多い。結果として、観客を限定してしまうという問題が生じ

る。そこで、大規模なプロジェクションマッピングは移動が困難であるというデメリットを解消するために、可搬性のある大規模なプロジェクションマッピングの実現を目指す。

### 2. 研究概要

本研究では、可搬性の高いスクリーンとしてペーパークラフトを用いる。ペーパークラフトとは、紙を素材として立体物を作成する立体模型・立体建造物の総称である[3]。紙を素材としているため比較的軽く、また、折りたたむことができるため可搬性が高い。

現在ギネスに登録されている世界最大の地球儀は直径約 13m、重量約 2.5t で、大規模なものであると言える[4]。しかし、非常に大きいため移動させるのは困難で、観る人に足を運んでもらうしかない。このような巨大な展示物をペーパークラフトで製作することで可搬性が高くなり、様々な人に観てもらえるようになる。そこで本研究では地球儀を題材とし、ペーパークラフトとプロジェクションマッピングの技術を利用した可搬型の大規模展示物の製作を行う。さらに、観察者のジェスチャを検出し、地球儀を回転させるなどの機能を持たせる。

### 3. 研究手法

#### 3.1 投影対象の製作

プロジェクションマッピングを行うには投影対象が必要となる。この投影対象をペーパークラフトの技術を用いて製作する。投影対象の製作方法は“折りたたみ可能な立体構造物及びその製造方法”[5]を使用する。この手法を使用した投影対象の製作方法を図 1 に示す。

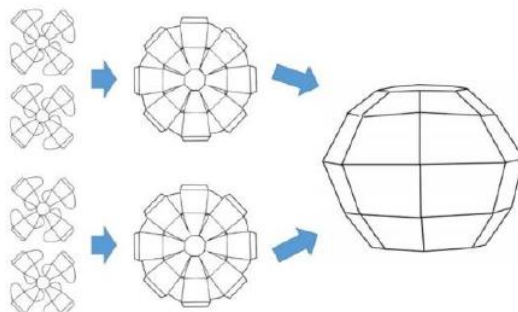


図 1 投影対象の製作方法

まず図 1 (左) のように 4 枚羽のプロペラ状のものを紙から 4 枚切り出す。これを 2 枚ずつ織り合わせることで図 1 (中) のような円形のもの 2 枚でき

\* 千葉大学統合情報センター, Institute of Management and Information Technologies, Chiba University

† 木更津工業高等専門学校専攻科 制御・情報システム工学専攻, Advanced course of Control and Information system engineering, Kisarazu National College of Technology

‡ 千葉大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Chiba University

あがる．この円形のをを接着し，上下から引っ張ることで図 1 (右) のような擬似的な球体が製作できる．

ここで製作する投影対象をより球体に近づけるための方法を検討する．球体に近づけるためには，球体を構成する面の数を増やせばよいので，球体の軸の分割数と高さの分割数を増やしていく．軸の分割数を変化させたときの球体の外観を図 2 に，高さの分割数を増やした時の球体の外観を図 3 に示す．図 2，図 3 とともに左から右にかけて分割数が増加している．本研究では基礎研究として軸の分割数が 12 分割，高さの分割数が 10 分割で展開時の大きさが約 20cm のものを製作する．



図 2 軸の分割数の変化による概観の変化

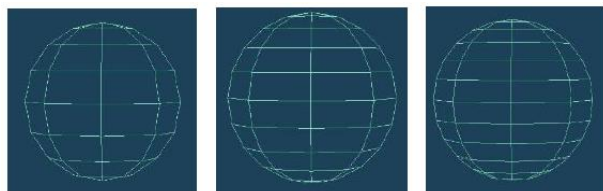


図 3 高さの分割数の変化による概観の変化

### 3.2 投影時の歪み処理

一般的に，プロジェクションマッピングを行う際に投影対象が平面であるということはありません．そして複雑な面に単純に画像を投影した場合，画像は歪んで映ってしまう．これは歪んで映った画像を人間の目で見ながらその場で投影元画像を変形させることで解消することができる．単純に画像を投影した場合と，画像を変形させて投影した場合の投影される映像の違いを図 4 に示す．

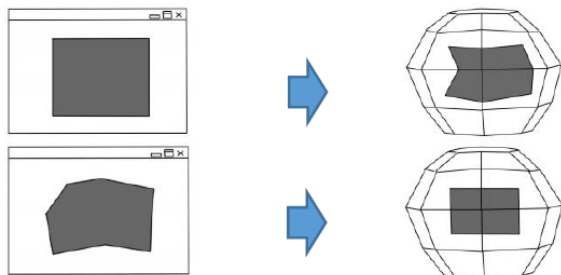


図 4 投影元画像の違いによる投影映像の違い

観客にこのような歪みのない映像を見せるためには画像をあらかじめ変形して投影することが重要である．この処理をプログラムで自動的に行うことで投影することで，常に歪みのない映像を投影することが可能となる．そのためにはあらかじめ投影対象の形状を把握する必要がある．投影対象を把握するためのキャリブレーションの流れを図 5 に示す．

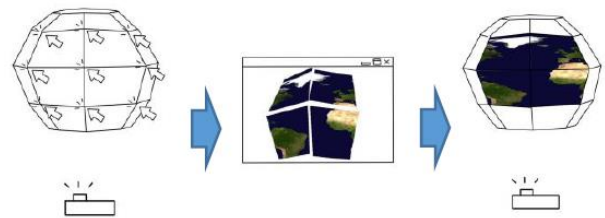


図 5 キャリブレーションの流れ

まず，プロジェクタから投影対象に投影されたマウスカーソルで投影対象の頂点をクリックする．次にクリックしたときのマウスカーソルの座標をもとに投影元の画像を変形する．最後に変形した画像をプロジェクタから投影することにより投影対象に歪みなく映る．

### 3.3 User Datagram Protocol 通信を用いた分割投影

球体に隙間なく投影を行うためには様々な角度から投影を行う必要がある．しかし，複数台のプロジェクタに 1 台の PC(Personal Computer)から配線して映像を投影することは，配線の煩雑さを考慮すると現実的ではない．そこで，クライアントとなる PC とプロジェクタとを 1 対 1 で接続し，クライアント PC とサーバ PC とで UDP(User Datagram Protocol)通信を行いながら連携をとるという手法を用いる．UDP 通信を用いた投影のイメージを図 6 に示す．クライアント PC はサーバ PC から送られてくる基準座標をもとに自分が投影する画像を抽出し投影する．サーバ PC は基準となる座標を送信するほか，接続された Kinect から送られてくるキャプチャ映像をもとにジェスチャを検出するための処理を行う．

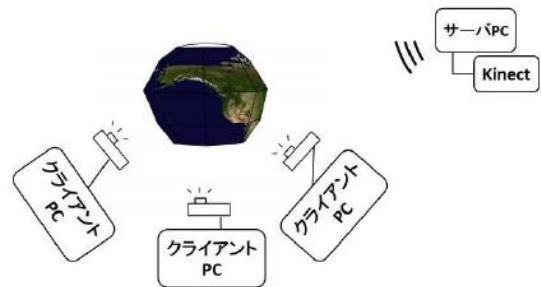


図 6 UDP 通信を用いた投影イメージ図

### 3.4 ジェスチャの取得

観客のジェスチャを検出して映像を変化させるために Kinect for Windows (以下 Kinect) を用いて観客の関節を検出する．Kinect とは，骨格追跡や音声認識の機能を搭載した NUI(Natural User Interface)を実現するモーションセンサーデバイスである [6]．Kinect を用いることで人間の関節の位置を簡単にリアルタイムで追従できるため，ジェスチャの検知が容易となる．本研究で検知するジェスチャの種類は右手をスライドさせる動作と左手をスライドさせる動作である．それぞれ，ジェスチャを検出した際に

手をスライドさせた方向に地球儀の映像を回転させるようにする。

## 4. 研究結果

### 4.1 投影結果

実際に製作した投影対象の撮影図を図 7 に示す。投影対象を上下から押すことで左のように折りたたみ状態になり、上下から引っ張ることで右のように展開状態になる。この物体に映像を投影し、撮影を行った。



図 7 製作した投影対象の撮影図

製作した投影対象にメルカトル図法の世界地図を投影した結果を図 8 に示す。本研究は基礎研究であるため、プロジェクタ 2 台での投影を行った。2 台のプロジェクタが投影する領域の繋ぎ目でも、問題なく映像が連続していることが確認できた。

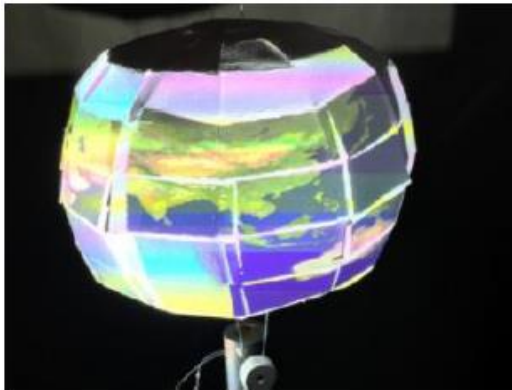


図 8 プロジェクタ 2 台による投影結果

続いて、ジェスチャ検知時に投影映像が変化の様子を図 9 に示す。左上、右上、左下、右下の順に見ていくと映像が右に流れていく様子が見える。これらの結果から、Kinect によるジェスチャ検知およびサーバ PC とクライアント PC 間での UDP 通信が機能していることが確認できる。

図 8、図 9 を見ると投影される映像に白く隙間が生じている部分がある。これは図 7 から見て取れるように、球体製作時に隙間が生じたことが最も大きな要因である。また、キャリブレーションを目視および手動で行っていることも要因の一つとなっている。

### 4.2 可搬性の考察

製作した投影対象の可搬性について検証する。製作した投影対象の重量を計測したところ 42g であった。実物の地球儀の重量を 20cm のもので 500g と仮

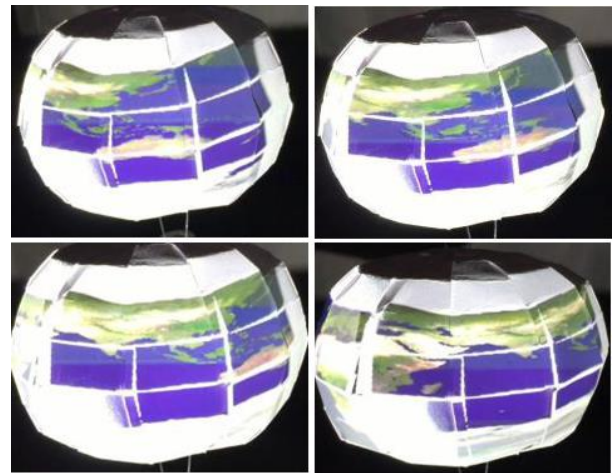


図 9 ジェスチャ検知時の映像の変化

定した場合、ペーパークラフトにより製作した投影対象の重量は実物の地球儀の約 12 分の 1 程度と軽量であることがわかる。20cm のペーパークラフトで製作した球体を、材質は変更せずに 13m の球体に拡大したときの重量を推定する。20cm の球体は半径が 10cm であり重量は 42g である。ペーパークラフトで製作した球体は中空であるため、単位面積あたりの重量で換算を行う。単位面積あたりの重量は約  $0.33\text{kg}/\text{m}^2$  であったため、13m の球体の重量は約 177kg となる。算出した重量は材質や製作方法を変更しないという前提であるが、実際に 13m の球体をペーパークラフトで製作した場合、自重によって潰れてしまうと推測される。そのため、潰れないようにするための骨組みなどが必要となり、これよりも重量は増加すると考えられる。しかしながら、2.5t と比較すると大幅な軽量化が見込め、可搬性が増したと言える。

ペーパークラフトで製作した投影対象と同サイズの通常の地球儀の重量を比較した結果を表 1 に示す。ペーパークラフトで製作した 13m の投影対象は補強のための骨組みなどを用いず単純な重量のみの数値である。しかし、ペーパークラフトで製作した投影対象は 20cm のものも 13m のものも実際の地球儀よりも大幅な軽量化が可能であることが確認できる。

表 1 ペーパークラフトによる投影対象と通常の地球儀の重量比較

	ペーパークラフト	通常の地球儀
直径 20cm	42g (実測)	500g
直径 13m	177kg (推定)	2,500kg

続いて、ペーパークラフトによる球体の大きさについての検証を行う。製作した投影対象は図 1 から 4 枚のパーツで成り立っていることがわかる。このことから折りたたみ状態にしたときの厚みは使用した厚紙 4 枚分程度になる。今回使用した厚紙は 1 枚の厚みが約 0.5mm であったため、完成品の厚みは約 2mm となる。実際に計測したところ、折りたたみ時の厚みは 3mm であった。これは折り目の部分が厚紙

の重なっている部分よりも厚みをもっているためである。

また、折りたたみ時の直径は展開時の直径よりもやや大きい 27cm であった。しかし組み立てを現地で行うことを仮定とした場合、パーツごとに分解した状態で輸送が可能であり、各パーツを折りたたむことで更に小さくすることが可能となる。このときの折りたたみ方の例を図 10 に示す。

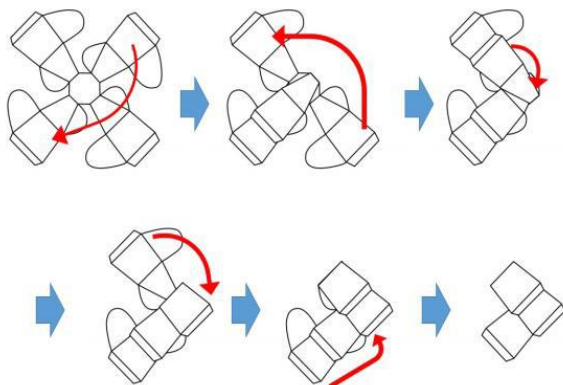


図 10 投影対象の折りたたみ方の例

図 10 を見ると 4 枚羽のプロペラだったパーツは 4 分の 1 近くまで縮小できていることがわかる。このとき、折り畳み回数は 5 回なので、厚みは 6 倍程度になると考えられる。製作した投影対象を分解し、図 10 のように折りたたむことで一つの巨大なペーパークラフトを分割して管理できるため、直径が 13m のペーパークラフトであったとしてもトラックなどでの輸送が可能になる。

これらの結果から、重量と大きさのどちらにおいてもペーパークラフトで製作することで可搬性が増すことを確認できた。

## 5. まとめ

本研究では、プロジェクションマッピングとペーパークラフトの技術を用いた可搬型大型地球儀の製作手法を検討し、基礎研究として 20cm の地球儀を製作した。また、UDP 通信により 2 台のプロジェクタから連続した映像を投影し、さらに Kinect を用いてジェスチャを検知することで投影する地球儀の映像を変化させる機能を実装した。

製作した投影対象と同サイズの地球儀で比較を行い、重量、大きさともに可搬性に優れていることが確認できた。さらに、13m の球体を同様の手法で製作した際の可搬性についてギネスに登録されている世界最大の地球儀と比較し、優位であることが確認できた。

## 6. 今後の課題と発展

13m の球体をペーパークラフトで製作した場合に起こりうる問題を検討していく必要がある。まずは、自重による倒壊が考えられる。この問題については、内部から伸縮可能な支柱などを骨組みとして組み込

むことで補強が可能となる。また、ペーパークラフトで製作した投影対象は球状に展開する際、上下から引っ張ることで球体に変形するが、このとき球体の上下の極には大きな負荷がかかるため、展開する方法についても別の方法を検討する必要がある。その方法として、電動や油圧で伸縮する支柱で内部から押し上げる方法が考えられる。支柱で押し上げることで力を面で伝えることができ、負荷が軽減されるという利点も生まれる。

図 8, 図 9 を見ると、複数台のプロジェクタから投影された光が重なり輝度が高くなった結果、投影画像の一部が見づらくなるという問題が起こった。これは、映像を投影しない側のプロジェクタからの光を白色で投影していたために起こった現象だと推測される。黒色の光、または輝度を下げた光を投影することで解消できると考えている。また、4.1 節で投影される映像に隙間が生じているという問題が挙げられた。この問題についてはペーパークラフトによる球体を製作する際の精度を向上させるほか、隙間が発生しないようなキャリブレーション方法を検討していく必要がある。

今後は上記の問題点を解消していくとともに、さらに大規模な投影対象を製作し、実際に大きな投影対象をペーパークラフトで製作したときにどのような問題が発生するのかを確認する。また、プロジェクションマッピングの特性を生かし、ピンチイン・ピンチアウトのジェスチャで地球儀の映像を拡大・縮小するなどの機能を増やし、インタラクティブ性、アート性の高いものを製作していく。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 26560081 の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- [1] “よみがえった東京駅”, <http://www.nippon.com/ja/views/b016/>, (最終アクセス日 2015/04/15).
- [2] “Once Upon a Time|東京ディズニーランド|東京ディズニーリゾート”, <http://www.tokyodisneyresort.jp/special/onceuponatime/>, (最終アクセス日 2015/04/15).
- [3] “JPA 一般社団法人日本ペーパークラフト協会”, <http://www.jpapercraft.com/>, (最終アクセス日 2015/04/15).
- [4] “DeLorme - Eartha, The World's Largest Revolving and Rotating Globe”, <http://www.delorme.com/about/eartha.aspx>, (最終アクセス日 2015/04/15).
- [5] 伊藤 智義, 中山 弘敬, “折りたたみ可能な立体構造物及びその製造方法”, 特開 2013-230820, (Nov.2013).
- [6] “Kinect for Windows - 東京エレクトロニクス株式会社”, <http://esg.teldevice.co.jp/product/microsoft/kinect/>, (最終アクセス日 2015/04/15).