

## 任意形状表面への自己補正投影システム

広岡 慎一郎<sup>†</sup> 齋藤 英雄<sup>†\*</sup>

<sup>†</sup> 慶應義塾大学理工学部情報工学科

\* 科学技術振興事業団，さがけ研究 2 1 「情報と知」領域

一般に市販されているプロジェクタにおいて，投影時に生じる歪みは投影画像平面と対象平面との間の Homography を利用して補正することが可能である．本稿では，任意の曲面を微細な平面の集合とみなし，各々の平面について同様の手法をとることにより，その表面形状に則して任意の画像を投影する手法を提案する．また，それを用いて，任意の曲面として開かれた白紙の本を想定し，本に格子パターンを投影している様子を撮影した画像のみを用いて，既存の平面デジタル画像を本の形状に合うように補正し，投影するシステムを提案する．このシステムにより，任意の画像をあたかも実際の本のコンテンツであるかのように投影することが可能となる．

## A Self-Correcting Projecting System for an Arbitrary Shaped Surface

Shinichiro Hirooka<sup>†</sup>, Hideo Saito<sup>†\*</sup>

<sup>†</sup> Department of Information and Computer Science, Keio University

\* “Information and Human Activity”, PRESTO, JST

In this presentation, we will show methods for rendering of an image on an arbitrary shaped surface by a general projector. We apply homography between a source image plane and a projected image plane to render the image on the surface. We divide the shaped surface into many small rectangular regions, and generate a corrected image by calculating this homography about each division rectangular region. By using it, we develop a system that rectifies and projects an arbitrary plane image so that the shape of the surface may be suited from an input image that the lattice pattern is projected on the surface. This system enables it to render arbitrary images as if it was the contents on an actual book.

### 1 はじめに

近年，稀書や美術工芸品などの後世に伝えるべき文化遺産について，その文書データや表面データといったコンテンツをデジタル化して永久保存しようという活動が活発に行われている [1][2]．このようなデジタルコンテンツ化はまた，ネットワークを介して広く利用の便を図ったりデータベース化と併せて研究資料としての価値を高めるなどの様々な効果も期待できる．しかし一方で，保存されたコンテンツはデジタル化されることにより物体本来の持つ現実感・臨場感

を喪失するというデメリットもある．これを解決する為に，プロジェクタを用いて保存されたコンテンツを白色物体に投影することによりその物体の再現を図る事が考えられる．これにより本来の物体を損なうことなく，実際に物体に触れることができその現実感を維持することができる．さらに同一の白色物体に異なるコンテンツを投影することで，仮想美術館を構築したり，新たに生成した画像を投影することで架空の物体を創り出すなどの応用も期待できる．

このように実世界に対し仮想世界の情報を融合する技術を拡張現実感と呼び，新たな情報提示の手段とし

て注目されている [3] ~ [5] . 拡張現実感を実現するものとしては、例えば Head Mounted Display のようなビデオスルーのウェアラブルインタフェースを利用する方法などがあげられる . プロジェクタにより仮想世界の情報を実世界に投影する場合 [5] には、これらの方法に対しユーザが特別な装置を装着する必要がなく、また、投影時の投影コンテンツと対象物体との位置合わせが簡単であるといったメリットがあげられる .

しかし、一般のプロジェクタは投影対象として平面のスクリーンのみしか想定していない . その為、一般のプロジェクタで曲面を持つ物体に投影しようとすると、その凹凸に応じて歪みが生じてしまう . そこで校正を行ったカメラ・プロジェクタによって三角測量を行い、対象物体の形状を測定することで投影時の画像と対象物体との位置合わせを行う必要があった [6][7] .

それに対し本稿では、一般のプロジェクタから任意の複雑な曲面形状を持つ物体表面に対しても、同様に投影することを考える . 特にここでは、投影対象となる任意曲面として開かれた白紙の本を想定し、あらかじめ平面デジタル画像として保存した文書データや画像データを、実際の本の表面上のコンテンツであるかのように自然な形で投影できるように補正し、生成した画像を投影することを目的とする .

そこで、曲面を多数の微細な平面の集合とみなし、そのそれぞれの平面についてプロジェクタの投影画像平面との Homography を求めることで、曲面に歪みなく投影できるような画像を生成する手法を提案する . 入力画像としては、投影対象となる本に格子パターンを投影した様子を撮影した画像を用い、その画像の情報のみからあらかじめ保存している平面デジタル画像を補正し本の表面に歪みなく投影する . この方法ではカメラ・プロジェクタの校正を行う必要がなく、画像からの 2 次元情報のみ注目すればよいので処理が簡単に行える . 大規模な装置を必要としないため、簡単にシステムを構築することができ、ユーザに複雑な動作を要求しないという長所もある .

また、実際に処理を行う制御用 PC と、プロジェクタから投影するための画像を格納した投影用 PC を LAN で接続することで、オンライン上で本の状態を受け取り、投影する画像を適宜、更新するようなシステムの構築を行う . このシステムにより、ユーザは任意の画像をあたかも実際の本のコンテンツであるかのように投影することが可能となると考えられる .

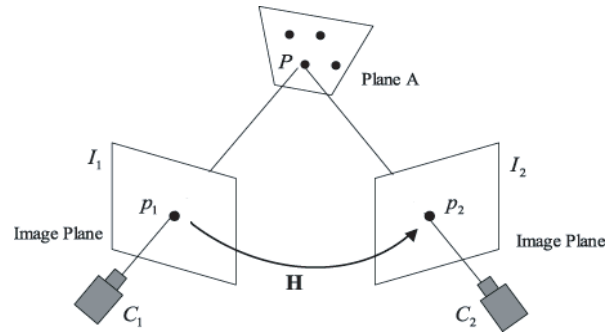


図 1: Homography

## 2 Homography

ここでは本手法で利用する Homography について説明する .

図 1 に示すように、2 台のカメラ  $C_1, C_2$  で 3 次元空間中にある 1 枚の平面  $A$  を見ているとする . この平面上にある全ての点は、2 枚の画像  $I_1, I_2$  間で次式の関係を満たす .

$$\tilde{p}_2 = H\tilde{p}_1 \quad (1)$$

なお、 $\tilde{p}_1, \tilde{p}_2$  は  $I_1, I_2$  間で対応の取れている点の斉次座標である . 行列  $H$  は Homography または平面射影行列と呼ばれ、3 次元空間中の各平面によって異なる値を有する .  $3 \times 3$  で自由度が 8 の行列なので、2 枚の画像間で 4 点以上の対応点から算出することができる . Homography を用いると対応点の探索が容易になる . このとき、片方の画像上で点を与えると他方の画像でも点として対応関係が与えられる . すなわち、1 対 1 の点の対応関係が与えられることになる .

Homography を利用して、プロジェクタから平面スクリーンに投影したときに生じる歪みを補正する研究はすでに複数行われている . Raskar ら [8] は、カメラとプロジェクタを互いに固定した装置を用いた自己補正プロジェクタを提案している . カメラとプロジェクタの位置は互いに校正してあり、カメラからスクリーンを撮影した画像を入力として、プロジェクタ-スクリーン間の Homography を求め、歪み補正を行う . また、Sukthankar ら [9] はカメラ-プロジェクタシステムにおける、より詳細な Homography の測定法を提案している . この手法では、単にプロジェクタ-スクリーン間の Homography を求めるだけでなく、投影したい原画像から、スクリーンに歪みなく投影できるように補

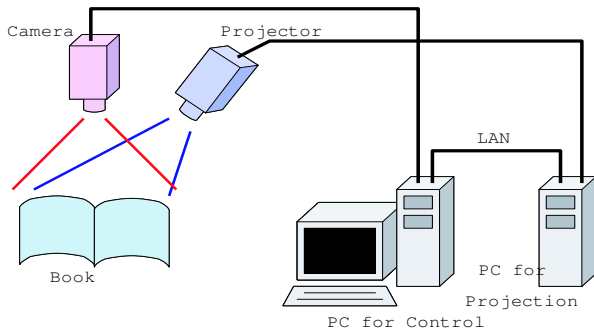


図 2: 本システムの概略図

正された画像へワーピングするための Homography もあらかじめ算出し、原画像から直接補正画像にワーピングする手法をとっている。本稿ではこれらの研究を参考にし、さらに投影対象を平面に限らず任意の曲面にも対応させるための手法を提案している。

### 3 構築システムの概要

システムの概略図を図 2 に示す。

開かれた白紙の本に対し、十分大きい直方体のフレームによってその上部にカメラ・プロジェクタが設置されている。カメラ・プロジェクタ・本の位置は互いに既知でなくても良いが、本がカメラの撮影範囲、及びプロジェクタの投影範囲内に収まっている必要がある。また、カメラ・プロジェクタはそれぞれ PC に接続されている。このうち、プロジェクタに接続されている PC は投影用 PC として、カメラに接続されている PC は制御用 PC として用いる。互いの PC は LAN によってネットワークを共有している。

このシステムにおいては次のような流れで処理を行う。まず、投影用 PC から正方格子パターンの投影を行う。これは後に投影画像平面と対象を分割した平面との間の Homography を求める際に、マーカーとして利用する為である。カメラは本に格子パターンが投影されている様子を撮影しており、制御用 PC でその間の画像を 1 枚保存し、これを入力画像として本稿で提案する手法によって補正画像の生成を行う。生成された画像は LAN を介して投影用 PC に送信され、プロジェクタによって投影される。これらの処理は常にオンライン上で行われているため、投影中に本の位置が

動くことなどによってその表面形状が変化しても、格子パターンの投影からの一連の処理を再び行うことで適宜補正画像が更新され、本の表面に即した画像の投影が行われることになる。

## 4 補正投影画像の生成

ここでは、先に示したシステム中において、撮影画像を入力として補正投影画像を生成するための具体的な手法を述べる。ここでいう補正投影画像とは投影したい任意の平面デジタル画像について、その時の本の表面形状に則して歪みなく（すなわち画像が実際のコンテンツであるかのように）投影できるようにワーピングした画像である。その為、まず前処理として、本の表面形状を複数の縦横比が既知の長方形とみなし、撮影画像中において本をその長方形のブロックに分割する。そして、分割したブロックを 1 つの平面とみなし、その分割平面とプロジェクタの投影画像平面との間の Homography を求める。次に投影したい平面デジタル画像について、投影先となる分割平面に対応する原画像中のブロックの対応をとり、先ほど求めた Homography に原画像から分割平面に正しく投影するための情報を加えた上で、ワーピングを行う。これを全てのブロックについて行い、合成してできた画像を補正投影画像として出力する。

以下に、この処理の過程について詳細を示す。

### 4.1 本の平面ブロックへの分割

通常、本の表面形状は任意の複雑な曲面をとっている。そこで本の表面を多数の微細な平面の集合とみなすことにより、その分割した各々の平面とプロジェクタの投影画像平面との間の Homography を利用することを考える。ここでは本を  $4 \times 8$  の 32 の長方形に分割し、各頂点に赤色でマーカーをつけた。このときの本の様子を図 3 に示す。入力画像中においては、このマーカーを抽出し、隣り合う 4 つの点を頂点とする四辺形を 1 つのブロック平面として扱う。

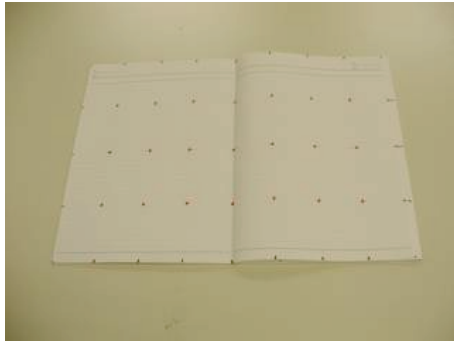


図 3: マーカーによる本の分割

#### 4.2 投影画像平面-対象平面間の Homography 算出

注目しているある対象平面ブロックについて原画像から補正投影画像にワーピングする為の Homography を算出する際に、その対象平面ブロックと投影画像平面との間の Homography が利用できる。そこで、まずこの Homography を算出する。

今、プロジェクタ・カメラ・対象平面の間には図 4 のような関係があり、式 (2) が成り立つ。

$$P = C^{-1}T \quad (2)$$

これにより、投影画像平面-撮影画像平面間の Homography  $T$ 、投影画像平面-対象平面間の Homography  $C$  を利用して、対象平面と投影画像平面との間の Homography  $P$  を取得することができる。

プロジェクタの投影画像平面とカメラの撮影画像平面との間の Homography である  $T$  の算出には、撮影時にあらかじめ本にマーカーとして照射していた正方格子パターンとの頂点の対応を用いる。図 5 に示したように、撮影画像中において前処理で分割したブロック平面中に投影されている格子点を 4 点選び、投影画像中の格子点との対応をとることでその分割平面における  $T$  を取得する。

また、撮影画像平面と投影対象の分割ブロック平面との間の Homography である  $C$  の算出には、分割平面が縦横比が既知の長方形であることを利用する。図 6 に示したように、撮影画像中において、前処理で本の表面を分割する際に用いたマーカーをその分割平面の頂点とし、4 つの特徴点として抽出する。また、分割

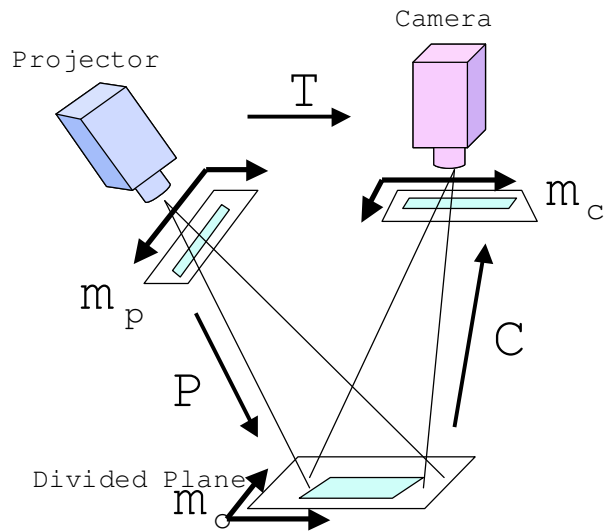


図 4: プロジェクタ・カメラ・対象平面間の Homography の関係

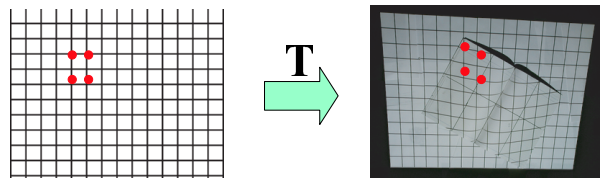


図 5: 投影画像-撮影画像間の対応点抽出

した平面は縦横比が既知の長方形であることに注目し、任意の大きさでその縦横比に従った長方形を作成、その 4 つの頂点を撮影画像中から抽出した特長点と対応させることで、その分割平面における  $C$  を取得する。

#### 4.3 原画像平面-補正投影画像間の Homography 算出

前節で求めた対象平面ブロックと投影画像平面との間の Homography  $P$  を利用して、その対象平面ブロックについて原画像から補正投影画像にワーピングする際に必要な Homography  $W$  を算出する。

今、原画像平面・プロジェクタ・対象平面の間には図 7 のような関係にあり、式 (3) が成り立つ。

$$W = P^{-1}S \quad (3)$$

よって、既に求めた投影画像平面-対象平面間

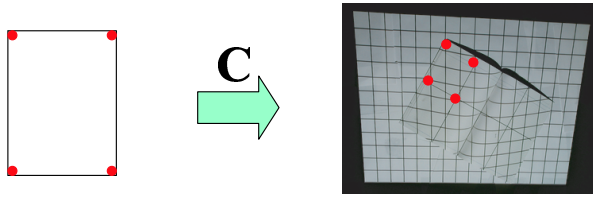


図 6: 撮影画像-対象平面間の対応点抽出

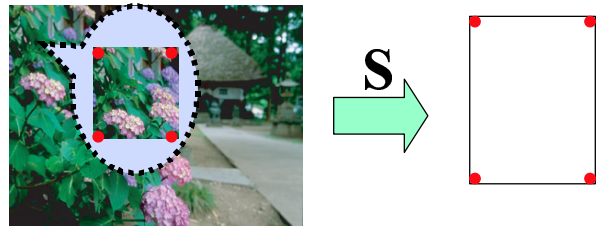


図 8: 原画像-対象平面間の対応点抽出

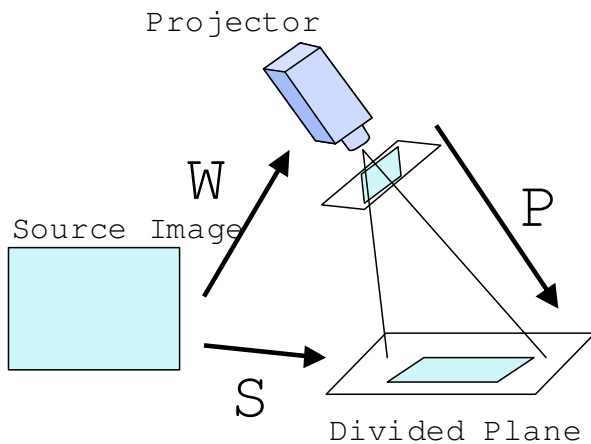


図 7: 原画像平面・プロジェクタ・対象平面間の Homography の関係

の Homography  $P$  と、原画像平面-対象平面間の Homography  $S$  を利用して、その分割平面における  $W$  を取得することができる。

ここで、原画像平面と投影対象の分割ブロック平面との間の Homography である  $S$  の算出には、本の表面を平面に分割するときの分割数が既知であること、また、対象分割平面が縦横比が既知の長方形であることを利用する。図 8 に示したように、まず、原画像について、本の表面と同じ分割数で分割し、その分割ブロックについて、注目するブロックが長方形となることからその 4 つの頂点を特徴点として抽出する。対象分割平面中の対応する特徴点としては、投影画像平面-対象平面間の Homography  $C$  を算出するときと同様に、任意の大きさに対象分割平面の縦横比に従って作成した長方形の 4 つの頂点を抽出する。そして両平面の特徴点の対応から、その分割平面における  $S$  を算出する。



図 9: 近似により生じる穴の内挿

#### 4.4 原画像から補正投影画像へのワーピング

分割した全ての平面ブロックについて、原画像平面と補正投影画像との間の Homography  $W$  を算出する。この  $W$  により、対象分割平面に対応する原画像中のブロックを、その分割平面に対し歪み無く投影できるような投影画像にワーピングすることができる。そこで、全ての原画像中のブロックに関し、そのブロックにおける  $W$  でワーピングする。そして、生成された画像を合成し、補正投影画像として出力する。ただし、このワーピングした画像の合成の際に、曲面を微細な平面の集合と近似しているために、分割平面ブロックのエッジ上に穴が生じてしまう場合がある。そこで、図 9 に示したように原画像から補正投影画像にワーピングする際に内挿による補間を行うことによって埋める処理を行う。

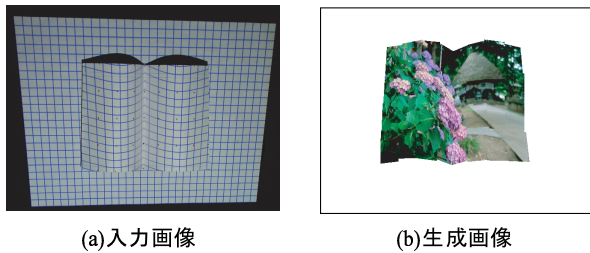
## 5 実験と考察

実験では、本システムの有効性を示すために、図 10 に示したような  $640 \times 480$  画素の画像を、市販されている B4 版のノートに、その表面形状に則した形に補正した投影画像を生成し、投影を行った。このとき、B4 版のノートは  $4 \times 8$  の長方形に分割を行った。また、撮





図 10: 原画像



(a)入力画像

(b)生成画像

図 11: 提案手法による画像生成

影時に用いた正方形パターンとしては、格子サイズ 10 画素の  $320 \times 240$  画素の画像を使用した。入力に用いた撮影画像は  $640 \times 480$  画素の画像を使用した。

まず、入力として用いた撮影画像と、この画像の情報を用いて本手法を適用することで生成した補正投影画像を図 11 に示した。これをノートに対し実際に投影した様子を複数の角度から撮影した画像を図 12 に示す。

定量的に結果画像を評価することが難しいが、異なる角度から見ても画像が本の曲面の凹凸に応じて歪みなく投影され、本の端でもエッジに沿って表示できていることが確認でき、ある程度の精度で期待した投影が行えていることがわかる。

ここで、本システムはオンライン上で構築されているため、本の位置の変化などに起因する表面形状の変

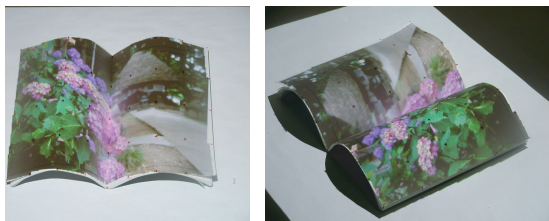
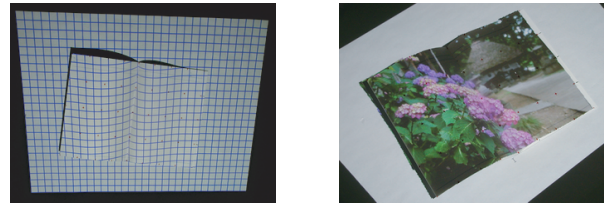
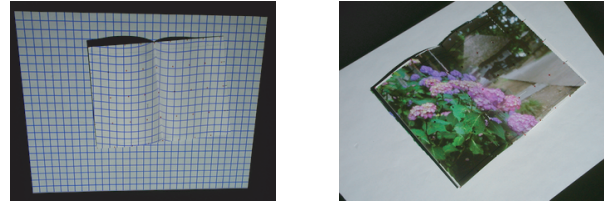


図 12: 生成画像の投影結果



(a) 入力画像 1

(b) 投影結果 1



(c) 入力画像 2

(d) 投影結果 2

図 13: ノートの位置による投影結果の比較

化がおきた場合でも、パターン光の投影から補正投影画像生成までの一連の処理をすることで、補正投影画像の更新が適宜行える。ノートの位置を動かした際に、再び処理を行い投影を更新したときの様子を図 13 に示す。ここでは、制御用 PC 中のアプリケーション上のボタンをクリックすることで補正投影画像の更新のための一連の処理をするようにしており、本の位置が変化した際にユーザがそれに応じて簡単に投影の更新を行える。もし、ユーザが本を読む際に、何らの操作を行うことも意識させないようにしたいならば、例えば一定時間ごとにこれらの更新の処理を行うことで、PC にノートタッチで本の形状に適切合わせた投影が行えるようにすることが考えられる。そして、更新する時間の間隔を短くすれば、ほぼリアルタイムで常に本の形状に応じた投影が行うことができる。しかし、この方法ではパターン光を投影する回数が増えてしまい、実際に本を眺める際に煩わしさが生じるというデメリットがある。一般に、本を閲覧する際には本が静止した状態のほうが読みやすく、読みにくい個所があったときなどは必要に応じて本を動かすことになる。すなわち、実際の本の位置変化についてはパースト的な特性を持つことになる。そのためこのような場合には、本システムのようにユーザが必要に応じて投影画像の更新処理の命令を与えるというシステムのほうが適していると考えられる。

また、本システムにおいてはワーピングする際の画



図 14: 原画像による投影結果の比較

像を差し換えることで、投影したい画像を任意に変化させることもできる。図 14 に、本の位置が固定されている状態で、投影したい原画像のみを変化させたときの投影結果を示す。これは本システムにおいては原画像自体の情報が必要としないことを意味している。このことを利用すれば、将来的には、例えばユーザの本のページをめくるような動作を入力画像から受け取って、投影画像を次ページの画像に切り替えたりするなど、より臨場感のある再現が行えるようになると考えられる。

次に、提案手法の正当性を示すために、次のような実験を行った。ここまでの実験では、ノートを  $4 \times 8$  に分割し、32 個の長方形ブロックの集合と近似して処理を行った。それに対し、ここではノートを分割なし（すなわちノートの表面を 1 つの平面とみなす）、 $1 \times 2$ 、 $2 \times 4$ 、 $4 \times 8$  に分割の 4 通りで近似した際に、それぞれ提案した手法に従って補正投影画像を生成し、投影したときの結果を比較した。そのときの結果を図 15 に示す。ここで、分割なし、すなわち本の表面を 1 つの平面であるとみなして本手法を適用したときは、本の表面が複雑な曲面の形をとっていることから画像が歪んで投影されたり、本の外側にはみ出して投影されているのが見て取れる。一方で、本の分割数を増やしていくことで、徐々に本の表面形状に即した表示がなされている。特にこの様子は本のエッジ部分で顕著に見ることができる。これは、本手法では、本の表面形状が曲面であるときに、それを多数の微細な平面の集合と近似して処理を行うため、分割数を増やすほど分割平面の集合が実際の表面形状に近づき、投影の精度も上がっていくことは自明である。

しかし、一方で平面の分割数を増加させると扱うデータもそれに応じて増加し、処理が長くなるという問題がある。また、画像の解像度による分割数の制限により実

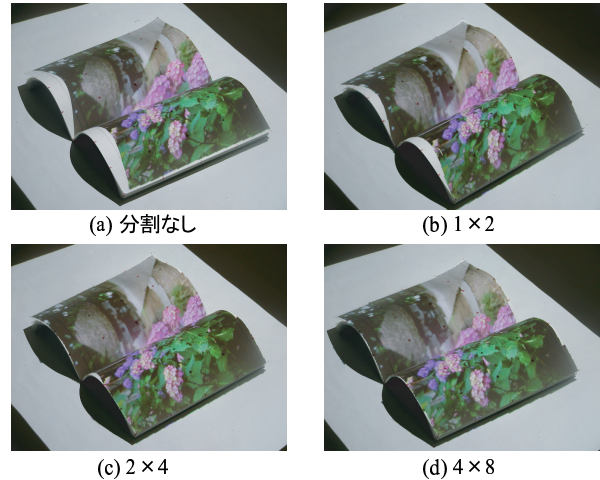


図 15: 平面分割数による投影結果の比較

際は微細な平面への分割は難しい。本手法では撮影画像中において、全ての分割したブロック内に Homography 算出のための特徴点が 4 点以上存在していなければならぬ。そのため、分割数の大きい投影対象について全ての分割平面内に特徴点が含まれるときには、より高解像度の投影画像・撮影画像が要求されることになる。また、このような場合には、特にカメラに対し勾配の大きい傾きを持つ分割平面が撮影画像中で占める割合が極端に小さくなり、画像の分解能の問題から Homography 算出の精度に影響してくることも考えられる。

そこで将来的には、例えば 3 角パッチを利用した 3 次元計測をとりいれるなど、マーカーを用いず本の表面形状を分割する手法を考案したい。マーカーの排除を行うことで、先ほど挙げた解像度との兼ね合いの問題も解決するほか、マーカーのつけることのできない複雑な形状物体への投影や、投影時に本上にマーカーが残るといった問題の解決も図ることができると考えられる。

## 6 おわりに

本稿では、平面のスクリーンを対象として画像を投影することを想定した一般的なプロジェクタについて、Homography による画像処理のみを用いて、任意曲面である本の表面に対してもその表面形状に則して表示できるように、画像を補正し、投影することを目的と

し，そのために必要な手法の提案とシステムの構築を行った．今後は，対象物体の分割時にマーカーを用いずに分割することで，より複雑な対象物体に投影できたり，高画質な補正画像を生成するための手法を考案していきたい．

## 参考文献

- [1] 池内克史，倉爪亮，西野恒，佐川立昌，大石岳史，高瀬裕：”The Great Buddha Project-大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.7, No.1, pp103-113, 2002.
- [2] 櫻村雅章，斉藤英雄，恩田憲一，楊華，小沢慎治：”稀覯書のデジタルアーカイビングに於ける画像処理技術の応用”，信学技法，PRMU97-77，pp41-48，1997.
- [3] 門田光司，伊賀聡一郎，安村通晃：”拡張現実感を利用した点字入力支援システムの試作”，第76回情報処理学会ヒューマンインタフェース，情報メディア合同研究会研究報告，98-HI-76，98-IM-33，pp.73-78，1998.
- [4] 神原誠之，大隈隆史，竹村治雄，横矢直和：”ビデオシーンスルー型拡張現実感のための実時間ステレオ画像合成”，電子情報通信学会論文誌，Vol.J82-D-II, No.10, pp.1775-1783, October 1999.
- [5] J.Underkoffler, B.Ullmer, H.Ishii : ”Emancipated Pixels: Real-world Graphics In The Luminous Room”, Proceedings, SIGGRAPH '99, pp385-392, 1999.
- [6] 向川康博，西山正志，尺長健：”スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現”，電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J84-D-II, no.7, pp.1448-1455, September 2001.
- [7] 東城賢司，日浦慎作，井口征士：”プロジェクタを用いた3次元遠隔指示インタフェースの構築”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.7, No.2, pp.169-176, June 002.
- [8] Raskar R., Beardsley P. : ”A Self-Correcting Projector”, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.504-508, December 2001
- [9] R. Sukthankar, R. Stockton, M. Mullin : ”Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems”, Proceedings, International Conference on Computer Vision, pp.247-253, 2001.