

複数投影における鮮明な投影像表示のための モデルベース多重焦点制御

長瀬 百代^{†1} 岩井 大輔^{†1} 佐藤 宏介^{†1}

本報告では、複数台の 프로젝터를使用する投影型複合現実感 (MR: Mixed Reality) 環境において、 프로젝터・投影対象の幾何学的情報に基づき、対象上で影のない鮮明な投影像表示を実現する多重焦点制御手法について述べる。投影型 MR 環境では、 프로젝터の焦点ボケ及び対象面の傾斜による投影像の空間分解能低下と、遮蔽物による投影像の影という 2 種の問題を解決する必要がある。空間分解能低下の問題については、 프로젝터及び対象の幾何学的情報を基に対象表面に投影された画素の拡がりを算出し、その面積が最小となる 프로젝터より映像を投影するよう選択することで解決する。投影像の影の問題については、対象上の各点が各 프로젝터から影となるかどうかを判定し、影となる 프로젝터를上述の選択対象から除外することで解決する。複数投影システムを 3×4 枚のミラーアレイを用いて構築し、実機による実験を行い、対象が移動する場合においても、動的に多重焦点制御と影除去を行い、鮮明な投影像を表示し続けることができることを確認した。

Model-based Multi-Focal Control for High Resolution Projection in Multi-Projector Environment

MOMOYO NAGASE,^{†1} DAISUKE IWAI^{†1} and KOSUKE SATO^{†1}

This paper presents a model-based multi-focal projection method in multiprojector environment. The Shapes of the objects to be projected as well as position and orientation of the projectors are calibrated in advance. For each small patch of the object's surface, the proposed method selects a projector which projects the finest image onto the patch based on the geometric information. In addition, shadow removal is integrated into the proposed multi-focal projection method. The result of an experiment shows that the proposed method is particularly useful in interactive systems where the projection object is usually moved and tracked by an attached tracking sensor.

1. はじめに

仮想情報を実対象上に直接重畳表示させる投影型複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術は、近年の 프로젝터の小型化・低価格化に伴い、インタラクティブシステムの表示技術として広く利用されてきている。特に、従来対象として用いられてきた白色平面スクリーンだけでなく、立体の実物体上へも投影像を重畳することが可能であることから、ユーザは周縁にあるあらゆる実物体を介して仮想コンテンツとインタラクションを行うことができる。

立体対象への投影像重畳を利用したこのようなインタラクティブシステムとしては、車などのプロダクトデザイン作業時に投影像によって実モデル (モックアップ) に陰影情報を重畳表示し、実モデルを視覚的に変形させるデザイン支援システムが提案されている¹⁾。また、白い本のページの開閉状態を外部に取り付けられたカメラ画像より認識し、各ページに画像を投影することで、ページをめくる度に動的なコンテンツがページ上に表示される、インタラクティブな本が実現されている²⁾。Raskar らによって提案された Dynamic Shader Lamps では、立体対象への描画システムが実現されている³⁾。このシステムでは、ユーザは描画対象とペンを模したツールを把持する。6 自由度の位置姿勢情報を取得できる磁気センサが双方に取り付けられており、ユーザの動作 (対象を回転させる・ペンで対象に触れる等) がリアルタイムにセンシングされ、それによってユーザは対象表面に自由に絵を描くことが可能となっている。

このように、 프로젝터를用いた立体実物体への映像重畳により、様々なインタラクティブ応用が可能となるが、以下に示すような投影型 MR 技術に内在する 2 点の問題によって、表示される画像の画質が劣化してしまう。1 点目は投影像の空間分解能低下であり、2 点目は投影像の影である。1 点目の空間分解能低下は、投影像の焦点ボケと対象面の傾斜という 2 種の要因により引き起こされる。 프로젝터は高輝度を実現するために、元来、レンズ口径が広く設計されており被写界深度が狭く、焦点ボケが生じやすい。このため、奥行きのあるシーンに対して一様に鮮明な像を投影することは困難である。また、対象面と 프로젝터光軸とが成す角度、つまり投影光の入射角が垂直でない場合、投影像は広がるため、対象面の傾斜によっても投影像の空間分解能が低下する。2 点目の投影像の影は、対象と 프로젝터との間にユーザの手や他の対象が入ると、それらが投影像を遮ることで生じる。

^{†1} 大阪大学 大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

本報告では、複数投影環境において、これらの問題を解決する多重焦点制御手法を提案する。提案手法の主たる新規点は、投影対象の形状データや、プロジェクタと対象との位置姿勢関係といった幾何学的情報を予め較正により取得しておき、それに基づいて対象面上の各点毎に映像を投影する最適なプロジェクタを選択する点にある。近年広く用いられているプロジェクタ-カメラフィードバック系による制御に比べて、提案手法では対象が移動した際にも再度較正を行う必要がなく、動的に最適プロジェクタ選択と投影像生成を行うことができる。なお、本報告では、プロジェクタの光学系として広く採用されている屈折レンズ系について議論する。

本報告ではまず 2 節にて、投影像の空間分解能低下や影の問題の解決を目指した従来手法について述べ、提案手法の位置付けを示す。次に 3 節にて、投影像の焦点ボケ及び対象面の傾斜による空間分解能低下を解決する多重焦点制御の提案手法について述べる。さらに、影除去及び複数プロジェクタからの投影画像の境界領域でのブレンド処理に関して述べる。4 節では、実機を用いた実験を行い、提案手法の有効性を示す。試作したシステムでは、 3×4 枚のミラーアレイと 1 台のプロジェクタを用いて、実質的に 12 台の複数プロジェクタを実現している。実験結果をうけて、5 節にて考察を行い、6 節にて今後の課題を述べ、本報告をまとめる。

2. 関連研究

投影型 MR の短所である、投影像の空間分解能低下及び遮蔽物による投影像の影の問題に対して、様々な研究がなされてきている。

前節で既に述べたように、プロジェクタは高輝度を実現するために、元来レンズ口径が広く設計されており、被写界深度は狭い。このため、焦点ボケが生じやすく、対象が合焦面から少しでも離れると、途端に投影像の空間分解能が低下してしまう。この問題に対して、合焦距離の異なる複数台のプロジェクタより、奥行きのある対象表面の各点毎に、最もピントの合うプロジェクタを選択し、鮮明な映像を投影表示するシステムが提案されている⁴⁾。この研究では、事前にプロジェクタより対象に対してドットパターン画像を複数枚投影し、その様子をカメラで撮影することで対象上の各点にて投影像がどの程度ボケるのかを計測する。この処理を全てのプロジェクタに対して行った後、各点毎に最もボケの小さな映像を投影することのできるプロジェクタを選択する。これにより、円筒状スクリーンのような従来投影像の焦点ボケが生じやすかった対象上で鮮明な映像の投影表示を可能としている。しかしながら、対象が変更（もしくは、移動）するたびに、複数毎のドットパターン画像を全てのプロ

ジェクタから再投影する必要があるため、この手法は投影対象が動的に移動するインタラクティブシステムには適さない。

これに対して小山田らは、ドットパターン画像のような特殊な較正用画像を用いず、投影された映像コンテンツを撮影したカメラ画像から、直接焦点ボケ量（点拡がり関数）を推定する手法を提案している⁵⁾。この研究では、1 台のプロジェクタからの投影像を、投影前にその点拡がり関数に基づいて事前補正することで、鮮明な映像の投影表示を実現している。また Zhang らも同様に、投影像の点拡がり関数を解析することで、投影画像を事前に補正して鮮明な映像を投影表示する方法を提案している⁶⁾。しかしながら、これら 1 台のプロジェクタによる多重焦点制御では、投影対象面が合焦面から離れすぎる場合には対応できない。この問題に関しては、絞りを符号化することで映像の高周波成分を保持したまま投影することのできるプロジェクタが提案されている⁷⁾。しかしながら、1 台のプロジェクタを使用している限り、インタラクティブシステムにおいて頻繁に生じる、遮蔽物による投影像の影の影響を解決することはできない。

投影像の影に関しては、プロジェクタからテクスチャや陰影効果を白色の静止立体物に対して投影するシステムにおいて、あるプロジェクタから影となる領域に対して、他の影とならないプロジェクタから映像を投影することで、影領域を除去する手法が提案されている⁸⁾。同様のコンセプトに基づき、投影シーンを撮影したカメラ画像の背景差分結果を用いて影領域を抽出し、画素単位でプロジェクタの切り替えを行うことで、動的に影を除去するシステムも提案されている⁹⁾。Jaynes らも同様に、対象面上に生じる人物の影を動的に除去することを目的としたマルチプロジェクション技術を提案している¹⁰⁾。また、複数枚のミラーによって実質的にレンズ口径を広げる合成開口法をプロジェクタに適用することで、生け垣のような複雑な物体の後方にある対象上に、影のない映像を投影表示する手法も提案されている¹¹⁾。このように、複数台のプロジェクタを用いることで、投影像の影領域を除去することは可能となる。しかしながらこれらの従来研究では、多重焦点制御については考慮されていない。

表 1 に、従来研究と本研究との比較を示し、本研究の位置付けを明らかにする。上記のように、多重焦点制御と影除去に関して、これまで様々な研究がなされてきているが、著者らが知る限りこれらの問題を統一的に扱うことはなされてきていなかった。本報告では、較正により予め取得した投影対象の形状データやプロジェクタの位置姿勢といった幾何学的情報に基づいて、これらの問題を統一的に解決する手法を提案する。従来広く採用されてきた、プロジェクタ-カメラフィードバック系のような観測ベースの処理ではなく、モデルベースの処理であることから、対象の 6 自由度の移動量が既知であれば、動的に対象の各点に対して最適

表 1 代表的な研究例と本研究の比較

	投影方式	動的	影除去	焦点合わせ	対象形状
Bimber2006 ⁴⁾	マルチ	×	×		未知
小山田 2007 ⁵⁾	シングル		×		未知
Sukthankar2001 ⁹⁾	マルチ			×	未知
Jaynes2004 ¹⁰⁾	マルチ			×	未知
提案手法	マルチ				既知

なプロジェクトを選択し、投影像を生成することが可能となる。

3. 投影対象とプロジェクトの幾何モデルに基づく多重焦点制御

提案する多重焦点制御では、投影対象表面の各点について、システム内の複数台のプロジェクトの中から、その点に最も鮮明な映像を表示できるものを投影用プロジェクトとして選択する。具体的には、その点に投影される画素の拡がり最小となるプロジェクトを選択する。この際に、遮蔽による影によって、この点に映像を投影できないプロジェクトは選択対象から排除する。

提案手法では、全てのプロジェクトの内部パラメータ及び投影対象に対する位置姿勢が既知であると仮定する。また、投影対象は剛体でその形状と初期位置姿勢は既知であり、さらにその 6 自由度の移動量も計測可能であると仮定する。これらの前提条件により、投影対象上の各点とプロジェクトとの幾何的な位置姿勢関係が、オンラインで算出可能となる。

以下、本節では提案する多重焦点制御の具体的な処理内容について述べる。まず 3.1 にて、焦点ボケと対象面の傾斜による投影像の空間分解能低下を解消するプロジェクト選択手法について述べる。次に 3.2 にて、対象上の各点について、各プロジェクトからの映像がその手前の物体によって遮られて影となるのかどうかを判定する方法について述べ、3.1 で述べる最適プロジェクト選択にこの影判定を統合する。最後に 3.3 にて、複数台のプロジェクトからの投影像が接する境界領域において生じる色ズレを解消するための、投影像のブレンド処理について述べる。

3.1 焦点ぼけと解像度低下の検出

鮮明な画像を投影するには、焦点ボケと投影対象面の傾斜による空間分解能低下を最も引き起こさないプロジェクトから映像を投影すればよい。つまり、対象物体とプロジェクトの幾何的な関係から、投影画素の対象上での拡がりを算出し、その拡がり最小となるプロジェクトを選択する。以降、本報告では投影画素は円形で、かつ画素内での輝度の減衰がないもの

と近似して議論を進める。

はじめに、焦点ボケを幾何的に考察する。プロジェクトから一定間隔離れた所に合焦点があり、その前後では像が焦点ボケを引き起こす。まず、プロジェクトから無限小の点をプロジェクトの光軸と垂直な平面に投影すると仮定する。このとき、プロジェクトの投影レンズから合焦点までの距離を u_f 、投影レンズから投影対象面までの距離を u 、投影レンズの半径を r 、対象面上の投影点の半径を R とすると、

$$R = \left| r \left(\frac{u}{u_f} - 1 \right) \right| \quad (1)$$

が成り立つ。次に、プロジェクトから半径 r_p の円形の画素を投影した場合、対象面上での投影画素の半径は、

$$R = \left| r \left(\frac{u}{u_f} - 1 \right) \right| + \frac{r_p u}{v} \quad (2)$$

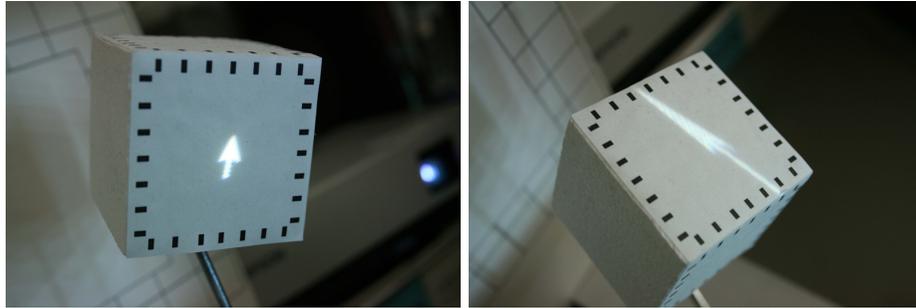
となる。ここで v はプロジェクト平面から投影レンズまでの距離である。焦点ボケの影響により、投影画素は以上で得られた R を半径とする円形に広がる。

投影対象面がプロジェクト光軸と垂直である場合は、投影された画素は上記のモデルに従って広がる。しかしながら、対象面がプロジェクト光軸に対して傾いている場合、対象面上での投影画素の拡がりには投影光の入射角に応じて拡大するため、空間分解能はより低下してしまう(図 1)。図 2 に示すように、投影画素の拡がりを光軸に沿って積み重ねていくと、合焦点を境に円錐形となる。ここで、対象面が光軸と垂直な平面から角度 θ 傾いている時、投影された画素はこの円錐を切断した楕円形となる。この楕円形の長半径を a 、短半径を b とすると、各々以下のように算出できる。まず、長半径 a は、

$$a = \frac{-R \tan \theta}{\cos \theta (c^2 - \tan^2 \theta)} \quad (3)$$

また、このとき楕円の短径 b は、

$$b = \frac{R \tan \theta}{|c^2 - \tan^2 \theta|} \sqrt{c^2 + \tan^2 \theta} \quad (4)$$



(a) 投影光が面にほぼ垂直に入射している場合 (b) 投影光が面にほぼ平行に入射している場合

図 1 投影光の入射角による物体表面上での点の拡がり

となる。ただし、

$$c = \begin{cases} \frac{r_p}{v} + \frac{r}{u_f} & (u > u_f) \\ \frac{r_p}{v} - \frac{r}{u_f} & (u \leq u_f) \end{cases} \quad (5)$$

である。これらより、投影対象面上での投影された画素の拡がりは、楕円の面積 S として算出される。

$$S = \pi ab \quad (6)$$

この楕円の面積 S が小さいほど、鮮明な映像を投影できる。今、対象上のある点において、プロジェクタ p から投影された画素の拡がりを $S(p)$ とすると、映像を投影するプロジェクタ p_{prj} は、以下のように $S(p)$ を最小とするプロジェクタとなる。

$$p_{prj} = \arg \min_p S(p) \quad (7)$$

この式により、対象上の各点について投影用プロジェクタを選択し、それらより映像を投影することで多重焦点制御を実現する。

3.2 投影像の影除去と多重焦点制御への統合

以上で述べた多重焦点制御手法は、遮蔽物による投影像の影の影響を考慮してこなかった。従来から、投影対象の幾何的情報より、複数台のプロジェクタを用いた投影像の影除去が実

現されている⁸⁾。陽に投影対象の幾何情報を扱ってこなかった従来の多重焦点制御と比べて、我々の提案する幾何モデルベースの手法では、この影除去手法を容易に統合することが可能である。

影除去においては、以下に示す 2 パスの影領域判定アルゴリズムを採用する。まず、投影対象物体をプロジェクタ視点からレンダリングした結果を一度バックバッファに描画し(オフスクリーンレンダリング)、最も手前の物体の奥行情報のみを Z バッファに保存する(1 パス目)。次に、プロジェクタからの対象面上の各点の奥行情報を取得し、Z バッファに保存されている奥行情報と比較し、一致していればその点が投影可能であると判断する(図 3)(2 パス目)。

多重焦点制御にここで述べた影判定を組込む。具体的には、対象面上の各点毎に影判定によって投影できるプロジェクタを選び出した後、式(7)に基づいて投影用プロジェクタを選択する。

3.3 ブレンド処理

以上までの処理により、対象面上の各点に対して投影すべき最適なプロジェクタが選択される。しかしながら、プロジェクタの投影パラメータの較正精度の低さやレンズ歪の問題より、対象面上で投影像が目標位置からずれる。これにより、複数のプロジェクタからの投影像が対象面上で接している場合、その境界領域にて大きな輝度の不連続(輝度ジャンプ)が生じてしまう(図 4 左参照)。例えば、接している複数の投影像がその境界から少し離れてい

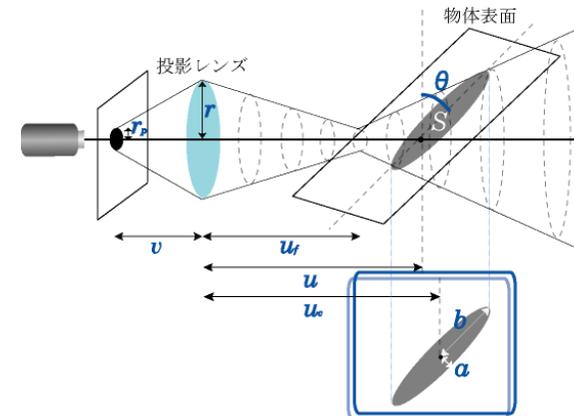


図 2 物体表面上での点の拡がり

る場合は黒い境界線が表れ、逆に境界にて重なっている場合は白い境界線が表れる。この問題に対して、プロジェクト同士の境界領域において各プロジェクトの輝度の和が 100 % になるよう、アルファブレンディングする手法が提案されている¹²⁾。このようにアルファブレンディングすることで大きな輝度ジャンプを防ぐことができる(図 4 右参照)。

4. 実験

提案する多重焦点制御の有効性を確認するため、図 5(a) に示すようなシステムを構築し、実機による実験を行った。同図 (b) に示すように、1 台のプロジェクトと 3 × 4 枚のミラーアレイを利用することで、実質的に 12 台のプロジェクトによる複数投影環境を実現した。各ミラーは、対象物体を投影光で照射できるように角度が定められており、投影対象のどの点についても、最低 1 台のプロジェクトからの投影像のピントが合うよう、各プロジェクトの合焦距離をずらした。また、カメラ(画素数: 1600 × 1200[*pixel*])はプロジェクト 12 台の内部パラメータ・外部パラメータの較正用に設置した。実験では、プロジェクトとして EPSON EMP-1710(画素数: 1024 × 768[*pixel*])を使用し、これを 1 台の PC(CPU: Intel Xeon 2[GHz], メモリ: 512[MB])により制御した。ミラーアレイにより分割された 12 台のプロジェクトの有効画素数は 200 × 230[*pixel*]であった。投影対象としては、一辺 50[mm]の立方体と、一辺 100[mm]の正方形平面を用いた。プロジェクトから見て前方に立方体を、後方に平面を配置した。立方体は、前後 1 軸の平行移動が可能でスライドステージ上に設置した。3.1 で用いた各種レンズパラメータについては、メーカーの発行する仕様書より算出した値を用いた。具体的には、 $r = 7.5[mm]$, $u_f = 900[mm]$, $r_p = 0.0007[mm]$, $v = 26[mm]$ という値を使い、実験を行った。

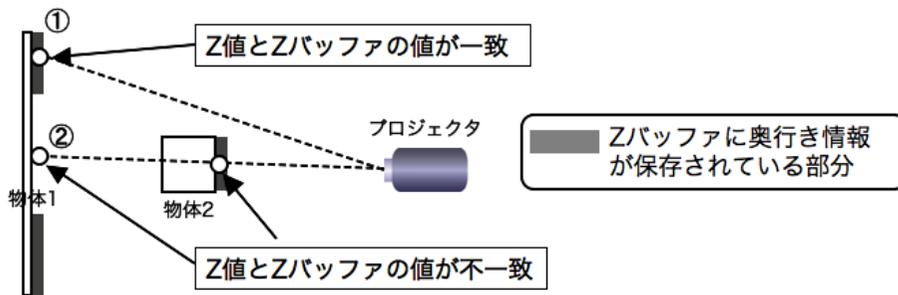


図 3 陰領域の判定

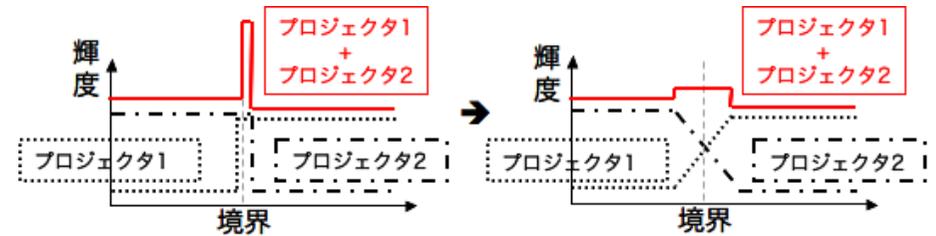
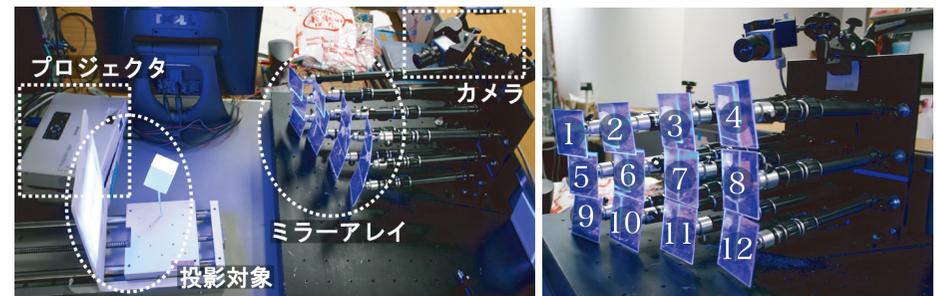


図 4 ブレンド処理前と処理後の境界領域での輝度変化



(a) 概観

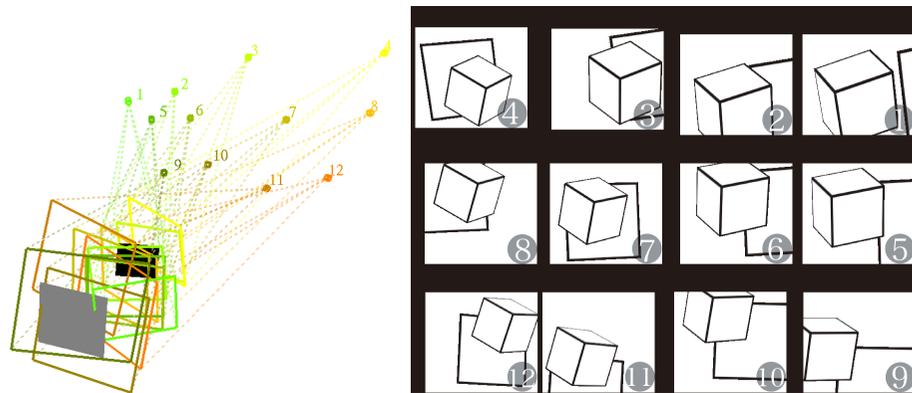
(b) ミラーアレイ

図 5 試作システム

4.1 較正

参考文献¹³⁾に示されているグレイコードパターン投影法に基づく手法を用いて、12 台のプロジェクトの較正を行った。投影対象である立方体を世界座標系を規定する基準物体として利用した。較正結果を図 6 に示す。図 6(a) は、較正された各プロジェクトと投影対象との位置姿勢関係を描画したものである。実線で描かれているのは、各々のプロジェクトの合焦距離における投影可能領域を示している。図 6(b) は各プロジェクト視点から投影シーンをレンダリングした結果である。本実験環境における較正の精度として、プロジェクト画素の再投影誤差を計算した所、平均で 2.9 ピクセルの誤差を確認した。

なお、後方の投影対象平面に関しては形状を手動で測定し、その位置姿勢に関しては、較正済みカメラの座標と平面の座標との対応点を 4 点以上取得することで求めた。投影立方体をスライドステージを用いて移動させ、前方と後方の 2 箇所において較正済みカメラで撮影することで、スライドステージの世界座標系における移動方向を求めた。



(a) 仮想プロジェクタと投影シーンとの位置関係
(b) 仮想プロジェクタから見た投影シーン
(黒：立方体，グレイ：平面)

図 6 プロジェクタキャリブレーション結果

4.2 影除去を統合した多重焦点制御実験

提案する影除去を統合した多重焦点制御の有効性を確認する実験を行った。12台のプロジェクタを用いて投影対象面上に画像を投影する場合と、1枚のミラーのみを使用した1台のプロジェクタより画像を投影する場合とで、投影された像の鮮明さと影の影響について比較を行った。実験では、前方の立方体、後方の平面共に同様の解像度である白黒の縞模様を投影した。

図7に、それぞれの場合の投影結果を撮影した図を示す。同図(a)は1台のプロジェクタから投影した場合の結果を示しており、同図(b)は12台のプロジェクタを用いて提案する多重焦点制御に基づき、画像を投影している。同図(a-2),(b-2)は立方体左側面の拡大図であるが、これらと比較すると、1台のプロジェクタからの投影では像の空間分解能が低下してしまっているのに対して、12台のプロジェクタを使用した場合には、提案する多重焦点制御により、鮮明な画像が投影されていることが確認できる。更に、後方の投影平面に着目すると、1台のプロジェクタからの投影では影が発生してしまっているのに対して、12台のプロジェクタを使用した場合は影が除去されていることが確認できる。また、各プロジェクタからの投影像の境界領域のエッジが視認できないことから、3.3で示したブレンド処理が有効であることが確認できる。

4.3 移動する対象への動的多重焦点制御実験

移動する対象に対する投影像の動的な多重焦点制御の有効性を確認する。プロジェクタやカメラを再度較正することなく、4.2の実験で使用した前方立方体をスライドステージを用いて35mm前方に移動させて、最適投影用プロジェクタの選択と投影像の生成を新たに行って画像を投影した。投影結果を図7(c)に示す。この図より、投影対象が移動する場合でも、再度較正する必要無しに、影のない鮮明な画像が投影できることが確認できる。

なお、4.2の実験で投影された12台のプロジェクタからの投影像と、スライドステージ移動後の投影像を図8に示す。これらより、対象上の各点における投影用プロジェクタと投影像が動的に変更されていることが確認できる。

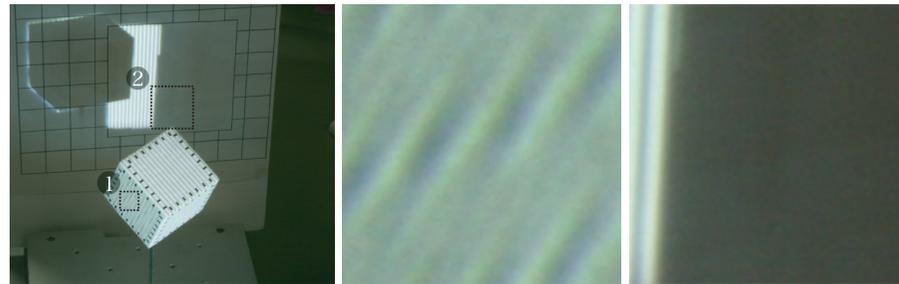
5. 考 察

4.2の実験結果より、提案手法に基づく多重焦点制御によって、奥行きのあるシーンに対しても鮮明な画像を投影することが可能であることが確認できた。影の除去に関しても、前方の投影対象によって後方の対象面に生じる影をほぼ除去できていることが確認できた。4.3の結果より、移動する投影対象に対しても再度較正する必要なく、最適な投影用プロジェクタ選択と投影像生成が可能であることが確認できた。

しかしながら、焦点ボケと投影面の傾斜の2種の要因は、本質的に空間分解能を低下させる原理が異なる。このため、今回我々が提案したように、これらの要因を完全に同じ尺度で評価を行うことが妥当であるかを検討する必要がある。また、傾斜している対象面上では、投影された画素の空間分解能は異方性を持つ。例えば、本報告で行った実験では、背景の平面に縦縞を投影している。この場合、縞と同じ方向には高い空間分解能は必要ないが、逆に縞を横切る方向には高い空間分解能が必要となる。このため、表示したい映像コンテンツに応じた最適プロジェクタ選択手法を今後考慮して行く必要がある。

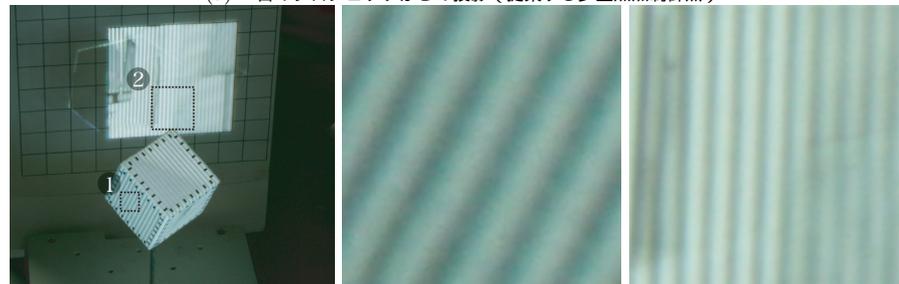
加えて、提案手法では高い較正精度が要求される。本報告中ではカメラ-世界座標系間及びプロジェクタ-世界座標系間の対応点を取得し、最小二乗法で内部・外部パラメータを推定したが、今後は非線形最適化を適用することで較正精度を向上させることを目指す。

今回考慮しなかった画質劣化の要因としては、投影像の対象面への入射角により、投影像の輝度が低下するという点が挙げられる。これにより、各プロジェクタから同じ点に同じ強度の光を投影しても、表示される輝度が異なってしまうという問題が生じる。この問題に対して、投影像の輝度が対象面への入射角のコサイン則に従うという拡散反射モデルを採用することで解決できる。



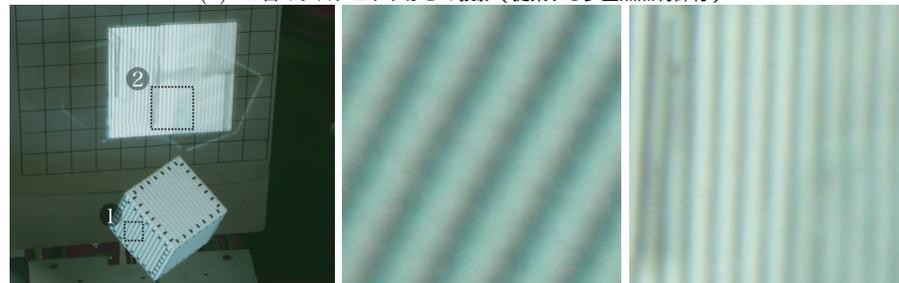
(a-1) 全体図 (a-2) 点線部 1 拡大図 (a-3) 点線部 2 拡大図

(a) 1 台のプロジェクタからの投影 (提案する多重焦点制御無)



(b-1) 全体図 (b-2) 点線部 1 拡大図 (b-3) 点線部 2 拡大図

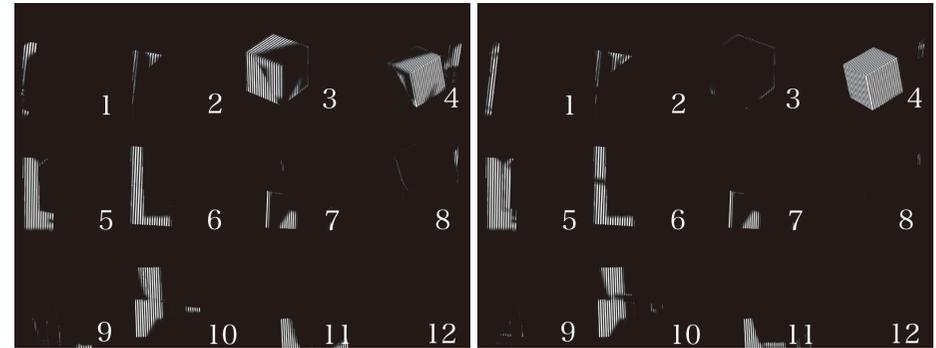
(b) 12 台のプロジェクタからの投影 (提案する多重焦点制御有)



(c-1) 全体図 (c-2) 点線部 1 拡大図 (c-3) 点線部 2 拡大図

(c) 投影対象位置移動後の再投影 (12 台のプロジェクタ使用)

図 7 実験結果



(a) 立方体移動前 (b) 立方体移動後

図 8 12 台のプロジェクタからの投影画像

また、今回は 1 台のプロジェクタからミラーアレイを用いて実質的に 12 台のプロジェクタを構築したが、実際に異なる複数台のプロジェクタを利用して多重焦点制御を行う場合、それぞれのプロジェクタの輝度差や色調差を考慮する必要がある。プロジェクタ間の輝度及び色調の違いに関しては、予め色の較正を行うことにより解決できる¹⁴⁾。

6. おわりに

本研究では複数投影環境において、プロジェクタ・投影対象の幾何学的情報に基づき、対象上で影のない鮮明な投影像表示を実現する多重焦点制御手法を提案した。特に、投影像の画質を劣化させる要因として、プロジェクタの焦点ボケと投影面の傾斜による投影像の空間分解能低下、そして遮蔽物による投影像の影という 2 種の問題に着目し、それらを統一的に解決する手法を提案した。複数投影システムをミラーアレイを用いて構築し、投影対象が移動する場合においても動的に多重焦点制御と影除去を行い、鮮明な投影像を表示し続けることができる点を実験により確認した。今後は、対象面上での投影画素の広がりを PSF として扱い、その空間周波数解析に基づいて最適な投影用プロジェクタを選択するようなアルゴリズムに関する検討を行う。

参考文献

- 1) 久田理, 山本景子, 金谷一朗, 佐藤宏介, "HYPERREAL 三次元形状デザイン支援システム (知的創造作業支援, <特集> インタラクションの理解とデザイン)", 情報処理学会

- 論文誌, 48(12), pp.3873-3881, 2007
- 2) S.Gupta, C.Jaynes, "The universal media book: Tracking and augmenting moving surfaces with projected information", International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2006 (ISMAR2006), pp.177-180, 2006
 - 3) D.Bandyopadhyay, R.Raskar, H.Fuchs, "Dynamic Shader Lamps:Painting on Real Objects ",The Second IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR), pp.207-216, 2001.
 - 4) O.Bimber, A.Emmerling, "Multifocal Projection: A Multiprojector Technique for Increasing Focal Depth", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.12, No.4, pp.658-667, 2006
 - 5) 小山田雄仁, 斎藤英雄, "投影面上に生じる焦点ボケ補正のための投影画像の事前補正法" MIRU2007 画像の認識・理解シンポジウム, pp.1295-1300, July 2007
 - 6) L.Zhang, S.Nayar, "Projection defocus analysis for scene capture and image display" In Proc. of ACM SIGGRAPH, pp.907-915, 2006
 - 7) Max Grosse, Oliver Bimber, "Coded Aperture Projection" In Proc. of EDT/IPT, article no.13, 2008
 - 8) R.Raskar, G.Welch, K.Low and D.Bandyopadhyay, " Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination ", Proc. Eurographics Rendering Workshop (ERGW2001), pp.89-102, 2001.
 - 9) R.Sukthankar, T.Cham, G.Sunthakar, "Dynamic shadow elimination for multiprojector displays", In Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), vol.II, pp.151-157, 2001
 - 10) C.Jaynes, S.Webb, R.M.Steele "Camera-Based Detection and Removal of Shadows from Interactive Multiprojector Displays", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.10, No.3, pp.290-301, May-June 2004.
 - 11) M.Levoy, B.Chen, V.Vaish, M.Horowitz, I.McDowall, M.Bolas, "Synthetic Aperture Confocal Imaging", Proc. ACM SIGGRAPH '04, pp.825-834, 2004
 - 12) R.Raskar, M.S.Brown, R.Yang, W.Chen, G.Welch, H.Towles, B.Seales, H.Fuchs, "Multiprojector Displays Using Camera-Based Registration" Proc.IEEE Visualization, pp.161-168, 1999
 - 13) 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 (Jun. 2002)
 - 14) 吉田壮伸, 堀井千夏, 佐藤宏介, 複合現実感のための反射色計測に基づくプロジェクタ投影テクスチャ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 97-104 (2004).