

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19680009  
 研究課題名 (和文) 超高精細画像の投影を手軽に実現するマルチプロジェクタディスプレイの研究  
 研究課題名 (英文) Study of Multi-projector Displays Realizing Easy Projection of Super-high-resolution images  
 研究代表者  
 岡谷 貴之 (OKATANI TAKAYUKI)  
 東北大学・大学院情報科学研究科・准教授  
 研究者番号：00312637

## 研究成果の概要：

複数の異なるプロジェクタを組み合わせて超高解像度画像の表示を可能とするシステムを初め、プロジェクタを使ったいくつかの応用システムの研究を行った。従来は手間と時間を要していたキャリブレーション作業を画像一枚の撮影だけで済むようにしたこと、投影像を重ねて画像を高解像化する重畳投影の原理と表示映像の特性を明らかにしたこと、および映像投影によって仮想的な反射特性を立体形状の上で再現するシステムを実現したこと、などを主な成果とする。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
年度			
年度			
年度			
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

## 研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：コンピュータビジョン

## 1. 研究開始当初の背景

近年、複数のプロジェクタを使って一枚の高品質 (= 大画面・高精細等) な画像を投影するシステム (以下 MPD (Multi-Projector Display) とする) が研究開発され、実用化に至っている。しかしながら、製品化されたものも含めこれまでの MPD は、基本的に固定された環境で使われる特殊用途向けの「専用品」として位置付けられてきた。

MPD において高品質な画像を合成する鍵となるのは、プロジェクタ間の投影映像間の「つじつま」を合わせるためのキャリブレーションである。キャリブレーションには通常

カメラが使われ、これによって投影像を撮影し、そこから必要な情報を取得することが行われる。

MPD の実用化に貢献してきた研究として、CMU の Sukthankar らのグループや三菱電機研究所 (MERL) の Raskar らの研究があるが、これらの研究は、射影幾何学において良く知られた一般的な事実を応用しているだけで、同じ条件で何が出来て何が出来ないのか、その限界を理論的に論じることをしていなかった。MPD のキャリブレーションは、

- 投影像の位置合わせ
- 最終投影像の正規化 (画像を正しいアス

ペクト比の矩形とする)の2つに分解できるが、従来研究では、(a)のみをカメラにて行い、(b)についてはスクリーン上のマーカーを使うなど、手作業を介在させていた。

このようなことが理由となり、MPDのセットアップは、(大抵のシステムがキャリブレーションの簡単さをうたっているにもかかわらず)熟練者が時間をかけて行わなければならない。

## 2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、博覧会やPCプレゼンテーションなど、身近な用途を対象とする「いつでもどこでも、ステーションナリ感覚で使えるMPD」を実現することである。

この「身近なMPD」を実現するという目的へ向けて、以下の4つの研究項目を設けた。

- (1) MPDのためのEasy-Calibration法の実現
- (2) よりスケラブルなMPDを実現する重畳投影法の研究。
- (3) 携帯プロジェクタの映像投影のキャリブレーション法の研究
- (4) プロジェクタカメラシステムによる仮想反射特性の実現

である。以下具体的な内容を述べる。

(1)のEasy-calibration法とは、平面スクリーンを対象としたMPDの校正を、手で持ったカメラによるたった1枚の画像の撮影で行うものである。この方法の着想の背景には、報告者の以前の研究(若手研究(B)(H17~18)「自己校正理論に基づくプロジェクタカメラシステムの研究」等)があった。そこでは、カメラで撮影した画像のみから、上述のMPDのキャリブレーション要素(b)を(a)と同時に解決できてしまうことが分かりつつあった。同時に、この方法を実用に供するためには、まず、臨界条件(プロジェクタやカメラの配置やレンズの設定如何で解が縮退して求まらないケース)への対策が欠かせないことも分かり、これらの解決が主要な課題となった。

(2)の重畳投影とは、従来のようにプロジェクタの投影像を並べるのではなく、これを重ねることで高解像画像を実現しようとする方法である。これによって、プロジェクタの配置の自由度を現在よりも高めることの可能となり、MPDをさらに便利に使えるようになる。重ねて実現される映像において高解像度表示を実現するには、各プロジェクタへの投影画像をどのように計算すべきかを検討する。また、重畳投影では従来システムよりもキャリブレーション精度の要求が高くなる。高い精度で投影像の重なり合いを求める方法を実現することも目的となる。

(3)は、上述の(1)のキャリブレーション法

を、「携帯プロジェクタ」の映像投影に応用するものである。近年携帯型の小型プロジェクタが次々に市場に投入されているが、これらは、プロジェクタの持つ映像表示装置としての性質(表示映像が本体サイズとは関係ないこと、専用スクリーンに限らない任意の物体表面に像を投影できること)をいかんなく発揮するもので、今後の利用の広がりが見込まれる。ここでは、この携帯プロジェクタをターゲットに、カメラと組み合わせてプロジェクタカメラシステムを作って、映像投影をキャリブレーションする方法を考えた。プロジェクタは、投影スクリーン面に正対させない限り、投影像は幾何学的に歪む。そしてプロジェクタを手で持って映像を表示させると、手のぶれのせいで表示映像はたえず変動することとなる。ここでは、手で動かしながら映像を投影しているうち、投影される映像が自動的に正規化される(表示映像が、正しい画像アスペクト比を持つ長方形になる)方法の実現を目指した。

(4)は、プロジェクタから立体的な物体表面上に映像を投影することで、その反射特性を仮想的に変化させる方法である。例えば石膏像上に像を投影することで金属光沢を再現する。その用途には、工業製品のデザインやエンターテインメントVRなどがある。特に、見た目に違和感を極限まで小さくする(つまり仮想反射特性が本物に見える)には、何かを必要かを考え、そのための方法を実現することを目的とする。

以上4つの研究項目を考えたが、それぞれで解決すべき問題には、射影幾何学を初めとし、行列・テンソルの分解などの代数の問題や、画像間の対応点検出や超解像度画像生成など、広くコンピュータビジョン(以下CV)の分野における普遍的な問題が含まれている。本研究ではこれらの問題に取り組むことにより、上述の「身近なMPD」の実現を具体的な目標としつつ、CVのフロンティアの拡大を目指した。

## 3. 研究の方法

平成19年度においては次のように研究を行った。

目的の(1)について、キャリブレーションの臨界条件を理論的に研究した。特に「プロジェクタがスクリーンに正対して配置される」場合の取り扱いが鍵になると予想し、問題の定式化(具体的にはプロジェクタの内外部パラメータの取り方)を吟味した。さらにその対策が可能なのではないかと予想し、理論的検討を行った。

目的の(2)について、異なるプロジェクタからの投影像を重ねたとき、結果的に一枚の望みの画像が生成されるためには、各プロジェクタにどのような画像を投影させればよ

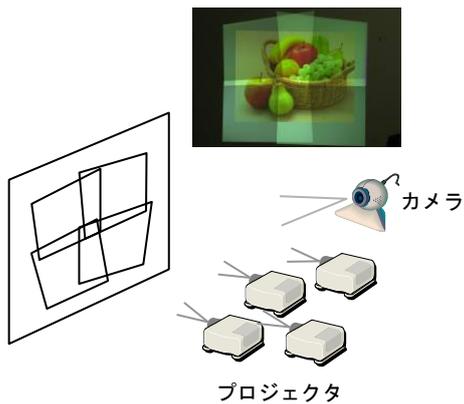


図 1. マルチプロジェクタディスプレイ

いか、すなわち、望みの画像の色と濃淡値を、各プロジェクタの画素単位の位置合わせ情報を元に分解する問題について、解法を理論的に研究した。また、重畳投影にて求められる高精度な投影像の位置合わせのためのキャリブレーション法を研究した。

目的の(4)について、(1)および(2)の理論的成果に基づいて、理論面において方法の研究を行った。

平成20年度においては次のように研究を進めた。

目的の(1)について、前年度の結果を踏まえてアルゴリズムを実装し、ユーザインタフェースまで含めたトータルなシステムを構築した。その後、構築したシステムを使って実機による実験を行った。目的は、実際の使用状況を想定したキャリブレーションの精度と安定性を検証することである。様々なプロジェクタの台数・配置を対象に、実験を行った。

目的の(2)について、8台のMPDを使った実験システムを構築し、検証実験を行った。実験システムの様子を図2に示す。さらに、重畳投影により実現される表示映像の特性を理論的に解析した。具体的には、重畳投影は複数プロジェクタの投影像を重ねて一枚の画像を実現するが、その性質上、濃淡を加算できても減算はできない非対称性があり、それが表示映像に及ぼす影響を調べた。またそれを上述の実験システムを使って検証し



図 2. 重畳投影の実験システム

た。

目的の(3)について、(1)の成果に基づいて理論構築を行った。さらにシステムの実装と実験の準備を行った。

目的の(4)について、前年度の成果を用いてシステムを実装した後、被験者を使った視覚心理実験を行い、性能の評価および方法の改良を行った。

#### 4. 研究成果

以上のように研究を進めた結果、「研究の目的」に述べた4つの項目について、それぞれ次のような成果を得た。

##### (1) Easy-calibration法の完成

当初目的を達成し、手で持ったカメラで1枚の画像を撮影するだけで、完全なキャリブレーションが可能となる方法を完成した(図3)。キャリブレーションに関わる臨界条件についてもほぼ明らかにすることができた。

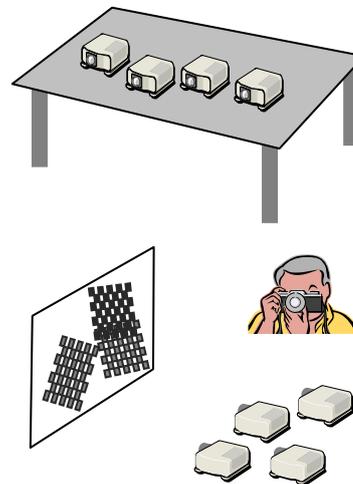


図3. Easy-calibration法のイメージ。まず上のようにプロジェクタを並べ、次に下のように手持ちカメラで画像を一枚とるだけで、キャリブレーションが終了する。

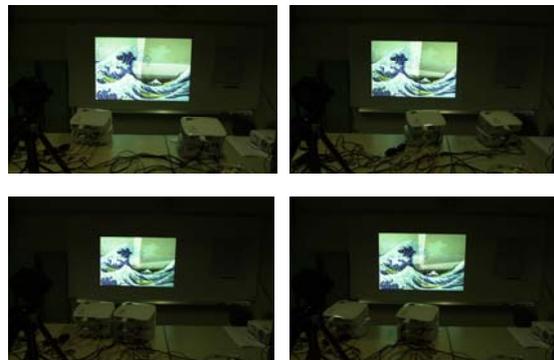


図4. Easy-calibration法によるキャリブレーション結果の例。プロジェクタ4台。任意のプロジェクタの配置に対し、正確に校正できている。

手法を使ったキャリブレーションの様子を図4に示す。成果は International Journal of Computer Vision 誌上に発表した（「5. 雑誌論文」の①）。

### (2) 重畳投影の原理と特性の解明

重畳投影の基本原理（図5，6）とその実行可能性を明らかにした。実験システムにより，その有効性を確認できた。実現画像の例を図7に示す。

さらに，重畳投影による表示映像の基本的性質を明らかにした。その具体的には，一枚の画像を実現するのに濃淡を加算はできても減算できない非対称性があることにより，濃淡の凹構造（例えば白地に黒文字）は理論上いくらでも細かいものを表現できる一方で，凸構造（黒地に白文字）はそれほどうまく表現できないことを突き止めた。以上の成果を IEEE Trans. Image Processing 等（「5. 雑誌論文」の②および③）に発表した。

### (3) 携帯プロジェクタの映像キャリブレーション

携帯プロジェクタを手で持って自由に動

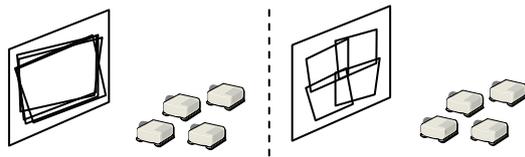


図5. 重畳投影（左）と従来の並列投影（右）

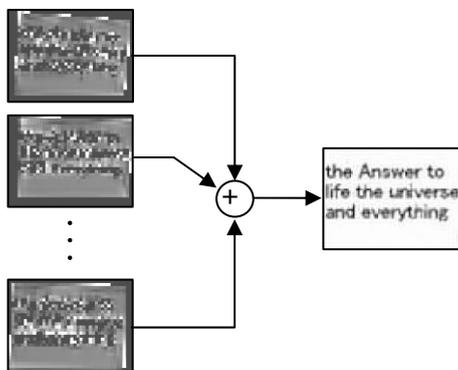


図6. 重畳投影の仕組み：各プロジェクタの投影像（左）と最終画像（右）



図7. 重畳投影の実現例. 左：1台，右：8台の重畳投影による。



図8. 仮想反射特性の再現実験. 左上：実験システム，右上：映像の投影対象となる物体，左下および右下：仮想反射特性再現例。

かしながら画像を投影している最中に，キャリブレーションが完了するという自動キャリブレーションの方法を実現した。なお，理論面では明らかにすることができたが，実装および実験は現在も継続中である。そのうちの理論的な成果は，国際会議ほか数件を投稿中で，研究発表を予定している。

### (4) 映像投影による仮想反射特性の再現

そして，表面反射特性を変化させる方法の研究では，プロジェクタとカメラのキャリブレーションおよび形状計測を同時に行える方法を提案し，その際，構造化パターン投影に基づくステレオ3次元復元に加えて，照度差ステレオを組み合わせることで，表面の向きをきわめて高精度に取得する方法を実現した（形状復元の方法について，Applied Optics 誌に発表）。これによって，仮想的な表面反射特性を視覚的に高い精度で再現することに成功している。再現例を図8に示す。この成果は国際会議（PSIVT, 5. 「学会発表」の①）に発表し，現在ジャーナルに論文を投稿中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計4件）

- ① Takayuki Okatani and Kocichiro Deguchi, Easy Calibration of a Multi-Projector Display System, International Journal of Computer Vision, 印刷中—オンライン版公開済（2009年4月28日付け）：<http://www.springerlink.com/content/w441404n7kj83556/>, 査読有。
- ② Takayuki Okatani, Mikio Wada, and Koichiro Deguchi, Study of Image Quality of Superimposed Projection Using Multiple Projectors, IEEE Transaction on Image Processing, , Vol. 18, 424-429, 2009, 査読有。
- ③ 岡谷貴之, プロジェクタ投影像の超解像化：複数プロジェクタ投影像の重ね合わせによる高解像度画像表示, 画像ラボ（日

- 本工業出版), 19 卷, 11 号, 2008, 査読無.
- ④ Rui Ishiyama, Shizuo Sakamoto, Johji Tajima, Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi, Absolute Phase Measurements using Geometric Constraints between Multiple Cameras and Projectors, Applied Optics, Vol. 46, Issue 17, pp. 3528-3538, 2007, 査読有.  
[学会発表] (計 15 件)
- ① Tomoya Okazaki, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi: Shape Reconstruction by Combination of Structured-Light Projection and Photometric Stereo Using a Projector-Camera System. PSIVT 2009 (410-422), January 16, 2009, Tokyo.
- ② Tomoya Okazaki, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi, Autocalibration-based 3D Object Measurement using the Combination of Structured Light Projection and Photometric Stereo - Improving Visual Quality of Projector-based Virtual Reflectance Reproduction, MIRU International Workshop on Computer Vision, July 28, 2008, Nagano.
- ③ 石澤昂, 岡谷貴之, 出口光一郎, 被写界深度ボケの提示により奥行き感を強化する注視反応型ディスプレイ, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), 7 月 20 日, 2008, 長野
- ④ 和田幹生, 岡谷貴之, 出口光一郎, 複数プロジェクタの投影像の重ね合わせによる超解像画像投影について, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), 7 月 20 日, 2008, 長野
- ⑤ 岡崎智也, 岡谷貴之, 出口光一郎, 構造化光投影と照度差ステレオを組み合わせた自動校正による 3 次元物体計測手法: プロジェクタによる仮想反射特性再現の質感向上, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), 7 月 20 日, 2008, 長野
- ⑥ 和田幹生, 岡谷貴之, 出口光一郎, プロジェクタの投影像の重ね合わせによる高解像度画像実現について, 第 14 回画像センシングシンポジウム 6 月 10 日, 2008, 横浜
- ⑦ 武田悟郎, 岡谷貴之, 出口光一郎, 多眼カメラを用いたアピランスに基づく物体の姿勢推定, 第 14 回画像センシングシンポジウム, 6 月 10 日, 2008, 横浜
- ⑧ 武田悟郎, 岡谷貴之, 出口光一郎, 多眼カメラを使った事前学習を要しないアピランスベース姿勢推定 (優秀発表賞受賞), 情報処理学会CVIM研究会, 5 月 8 日, 2008, 京都
- ⑨ 和田幹生, 岡谷貴之, 出口光一郎, 複数プロジェクタの重ね合わせ投影による高精細画像実現, 情報処理学会CVIM研究会, 3 月 11 日, 2008, 金沢
- ⑩ 岡谷貴之, マルチプロジェクタのキャリブレーション技術, 日本光学会年次学術講演会 OPJ2007, 11/26~11/28, 大阪大学, 2007
- ⑪ Thi Mai Dung, Koichiro Deguchi, and Takayuki Okatani, 3D spatial information extraction from ALOS PRISM triple image, The 28th Asian Conference on Remote Sensing - ACRS2007, November 12, 2007, Kuala Lumpur, Malaysia,
- ⑫ R. Ishiyama, T. Okatani and K. Deguchi, Precise 3-D Measurements Using Un-Calibrated Pattern Projection, Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2007), September 16, 2007
- ⑬ 岡谷貴之, 出口光一郎, 被写界深度ボケを伴う画像一枚からのシーンのスケールの推定: ミニチュアシーンの錯覚に関する一考察, 画像の認識理解シンポジウム, 7 月 30 日, 2007, 広島.
- ⑭ 岡崎智也, 岡谷貴之, 出口光一郎, アクティブライティングによる画像からの対象物の抽出, 画像の認識理解シンポジウム, 7 月 30 日, 2007, 広島.
- ⑮ Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi, Variational Bayes Approach to Robust Subspace Learning, Proceedings of IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, July 20, 2007, Minneapolis.
- ⑯ Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi, Estimating Scale of a Scene from a Single Image Based on Defocus Blur and Scene Geometry, Proceedings of IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, July 20, 2007, Minneapolis.
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.fractal.is.tohoku.ac.jp/okatani/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡谷 貴之 (Takyuki Okatani)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 00312637

### (2) 研究分担者

( )

### (3) 連携研究者

( )