

複数台の回転式プロジェクタによる投影画像間の微小な位置ずれ補正

満上 育久[†] 浮田 宗伯[†] 木戸出正継[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{ikuhi-mi,ukita,kidode}@is.naist.jp

あらまし 回転式のプロジェクタを実環境中に複数台配置しておけば、単に複数の画像を複数の位置に表示できるというだけでなく、複数の投影画像をタイル状に並べて大きな画像を表示したり、同じ位置に重ね合わせることでより鮮明な画像表示などに適用できる。ただし、複数の投影画像を表示する際には、単体による投影の際には問題にならない微小な誤差でも明確な位置ずれとして観測されるため、より高い位置合わせ精度が要求される。実際、単体の回転式プロジェクタのキャリブレーションに関する既存研究では5-10mm程度の投影位置誤差を持ち、複数台使用には不十分な精度である。本論では、パン・チルト・ズーム制御可能なカメラによってこの微小な位置ずれを事前に観測しておき、以後任意の位置でずれが軽減された違和感のない画像の重ね合わせを実現する手法について述べる。

キーワード 拡張現実感, 回転式プロジェクタ, 複数投影画像の位置合わせ, キャリブレーション

Rectifying Positional Errors in Projected Images from Multiple Steerable Projectors

Ikuhisa MITSUGAMI[†], Norimichi UKITA[†], and Masatsugu KIDODE[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Takayama 8916-5, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

E-mail: †{ikuhi-mi,ukita,kidode}@is.naist.jp

Abstract Placing multiple steerable projectors in an environment allows us to observe not only multiple images simultaneously, but also a large image made by tiling multiple projected images, and a brighter image generated by overlaying multiple projections onto a single position. However, when we apply multiple steerable projectors, positional error causes a misalignment of multiple projection which may be clearly perceived by users. Existing approaches have accomplished 5-10mm positional accuracy in steerable projector calibrations, which is adequate when steerable projector is used independently but is clearly perceived as a misalignment when using multiple projectors. To overcome this problem, we propose here a method that measures misalignment of projected images through a plane in the environment and hence displays images without misalignment.

Key words augmented reality, steerable projectors, alignment of multiple projected images, calibration methods

1. はじめに

実環境中に視覚情報を重ね合わせてユーザに提示することでユーザの思考や活動を支援する拡張現実感 (Augmented Reality: AR) システムや、ユーザがいつでもどこでも容易かつ直感的に情報を入力・参照できるユビキタスコンピューティング環境などにおいて、表示したい視覚情報を実環境中の適切な位置に正確に表示することは基本的かつ重要な機能である。

拡張現実感における視覚情報提示方法として、プロジェクタを環境に設置する方法が近年多く研究されている [1]~[3]。AR システムにおける視覚情報提示方法としては、ヘッドマウント

型ディスプレイ (Head-Mounted Display) を用いる方法も多く研究されているが、これと比較して、プロジェクタを用いる方法は、1) HMD のようにユーザがデバイスを身につける必要がない、2) 仮想的ではなく実環境中に直接視覚情報を表示できる、などの利点を持つ。また、ユーザが頭部に着用して自由に移動する HMD のに対して、環境中に設置されるプロジェクタの位置・姿勢推定は容易かつ正確に実現可能であり、その投影像の正確さを保障しやすい。

一方、プロジェクタの欠点として、視覚情報を表示できる領域はプロジェクタの投影光が照射される範囲に限定されることが挙げられる。しかし、プロジェクタにパン・チルトの回転機

構を設けることによって表示可能な領域は拡張できる。さらに、そのような回転式プロジェクタを環境の大きさや形状に応じて複数台設置することで、実環境中のより広範囲への視覚情報表示や、単体のプロジェクタでは表示できない大きな視覚情報表示、あるいは視覚情報の重ね合わせによってダイナミックレンジの大きな画像表示なども可能となる。

以上の議論より、本論では複数台の回転式プロジェクタを用いた実環境視覚情報提示を目的とする。なお、実環境中の多くの面は平面であることより、本論では投影面を平面に限定する。

実環境への視覚情報提示の基本的な要件として、実環境中で指定した位置に歪み無く視覚情報を提示することが挙げられる。プロジェクタは基本的に、平面のスクリーンに対して垂直に設置した時のみその投影像が歪みなく表示されるように設計されており、プロジェクタと投影面の垂直性が満たされていない場合はそれらの相対関係に応じて歪んだ画像として表示される。一方、プロジェクタをある姿勢に固定したまま実環境の広範囲に投影を行うことは不可能なので、視覚情報を表示したい位置に応じてプロジェクタの姿勢を制御する必要がある。したがって、実環境中で指定した正確な位置に視覚情報を歪み無く表示するためには、回転式プロジェクタを適切に姿勢制御した上で、さらに実環境中で歪み無く表示されるように姿勢に応じて適切に歪ませたプロジェクタ入力画像を生成するという手順をとらなければならない。文献 [4], [5] では単体の回転式プロジェクタの内部・外部キャリブレーションを行い、実環境中の位置・形状に関して正確な投影を実現している。これらの投影誤差は 5-10mm 程度で、単体で実環境に投影する多くのアプリケーションでは十分な精度であると考えられる。しかし、本論で扱う複数台プロジェクタ環境では、各プロジェクタによる投影画像を並べたり重ね合わせるため、単体で投影する際には問題とならないような上述のわずかな誤差でも各投影画像間のずれとしてユーザに明確に観測されてしまう。このような複数投影画像間の微小なずれを解消し、任意の位置でずれのない視覚情報表示を行うことが本論の目的である。

2. 複数プロジェクタによる実環境投影

関連研究として、文献 [6] では、複数台のプロジェクタの投影画像を適切に補正し重ね合わせることで、切れ目の無い一枚の画像表示を実現するシステムを提案している。このシステムは、複数台の回転機構付きプロジェクタと固定のカメラで構成されている。投影光の一部ずつが重り合うように手動でプロジェクタの姿勢を決め、その姿勢時の各投影画像の歪み・位置ずれをカメラで観測しておき、以後は前もって適切に変形された画像を各プロジェクタが投影することで、シームレスな画像表示を可能にしている。このシステムでは、投影面が 1 平面でかつ比較的狭いため、投影画像の絶対位置のみならず複数投影画像間の微小なずれも投影面全体を撮影する 1 台の固定カメラの画像から安定に観測できる。しかし、実環境中の複数の平面を投影面として利用したい場合、この手法では平面ごとあるいは平面の大きさに応じてカメラが必要となり、非現実的である。この固定カメラをパン・チルト・ズーム制御可能なカメラとし、こ

れを高精度にキャリブレーションしておけば、複数の投影面あるいは広い投影面をひとつのカメラ観測可能となり、投影面上でユーザが指定した絶対位置に対する画像表示することは理論上可能である。しかし、パン・チルト・ズーム機構を持つカメラにおいて、ズーミングによる焦点距離の変化を正確に推定しても、ピンホールカメラにおける投影中心や画像平面の空間的な位置がそれに伴って推定不可能な動きをするため、正確な幾何学的なモデルを正確には推定できないことが文献 [7] で報告されている。また、このシステムではプロジェクタの姿勢は手動でシステムはこの姿勢情報を取り扱っていないため、指定位置への画像表示のための姿勢制御などがそもそも不可能である。

本論では、カメラにこのような高精度なキャリブレーションを要求せず、絶対位置に関する正確性および複数投影画像間の位置ずれの軽減を同時に満たしながら広範囲への画像表示を実現する方法を提案する。具体的には、文献 [4] で示される高精度にキャリブレーション可能な投影中心固定型パンチルトプロジェクタを用いて、各プロジェクタが比較的正確な位置に実環境平面に投影された上で、そのとき各投影画像間に生じる微小な位置ずれのみをパン・チルト・ズーム可能なカメラで観測して補正する。文献 [5] などで示されるような他の回転式プロジェクタの場合は、外部キャリブレーション時に格子パターンを投影面に投影し、投影面上の各格子点の位置をカメラによって計測することによってなされるため、ここでもカメラの正確な外部キャリブレーションが要求されるが、投影中心固定型パンチルトプロジェクタの外部キャリブレーションでは、カメラによるそのような投影パターンの高精度な絶対位置計測を行わずに高精度なプロジェクタ外部キャリブレーションが可能である。

なお、本論の手法でもプロジェクタが現在投影している位置にカメラを向け、微小なずれを観測するために適切にズームアップする必要がある。しかし、カメラによって投影面上の絶対位置を観測しないので、高精度なカメラキャリブレーションは不要であるという点が重要である。

投影画像間の微小なずれは以下の 2 つの要因による。

- (1) 回転式プロジェクタの外部キャリブレーション誤差
- (2) 投影面の不完全な平面性

もしずれの要因が (1) のみであれば、事前に投影面上の複数の位置に投影を行って位置ごとの投影画像間ずれ量を観測・保持しておけば、この投影面を完全な平面と仮定をおき、任意位置におけるずれ量を最小自乗法などで算出することが可能である。しかし、実環境中に存在する平面は、全体としてわずかにカーブしていたり部分的に凹凸を持つことが多く (2) の影響を無視するべきではない。よって、投影面上の複数の位置で投影画像間ずれを観測してずれ量のマップを算出しておき、他の位置に投影する際にはその周辺の局所的な平面性のみを仮定した補間計算を行う方が適切であると考えられる。

3. 投影中心固定型パンチルトプロジェクタ

文献 [4] で提案されている投影中心固定型パンチルトプロジェクタ (以後、FC-PT プロジェクタ) とは、プロジェクタの投影光の投影中心とパン・チルト回転機構の回転中心とが空間的

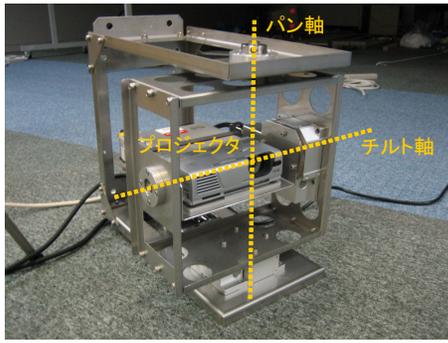


図 1 FC-PT プロジェクタ

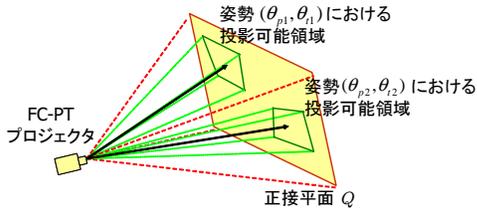


図 2 FC-PT プロジェクタモデル

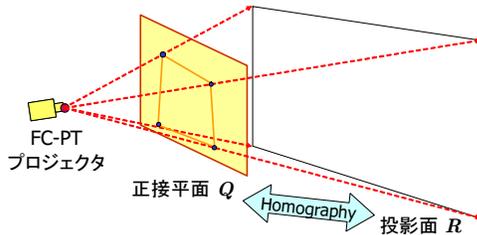


図 3 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーション

に一致するように設計された回転式プロジェクタである。我々が実装した FC-PT プロジェクタを図 1 に示す。回転雲台はパン軸とチルト軸が空間中で交差するように設計されており、その交点とプロジェクタの投影中心を一致させている。このような構造を持つことで、図 2 に示すように、任意のプロジェクタ姿勢における画像平面を、そのパン・チルト角を用いて唯一の仮想固定平面（正接平面と呼ばれる）上に線形に変換できる。よって、一般には投影中心と画像平面によってプロジェクタを定義し、姿勢変化をその外部パラメータの変化と捉えるのではなく、投影中心と正接平面で定義される仮想の固定プロジェクタのように捉えることができる。なお、このときプロジェクタ姿勢情報は、この仮想固定プロジェクタの内部の可変パラメータとして捉えられ、姿勢の変化による画像平面の変化は、正接平面上の投影可能領域の位置・形状変化として表される。

通常、プロジェクタの外部キャリブレーションを行う場合、プロジェクタから格子パターンを投影し、投影された各格子点をカメラを用いて位置計測することによって行われる。この方法では 2. 節で述べたように、観測用カメラのキャリブレーション精度や投影面の平面性に影響を受ける。これに対して、FC-PT の外部キャリブレーションは、投影面と正接平面の Homography [8] 算出によってなされる。このため、図 3 に示すように、プロジェクタから画像の中心の 1 点を投影し、それを投影面の 4 隅に向けるようプロジェクタを制御し、その角度を計測することに

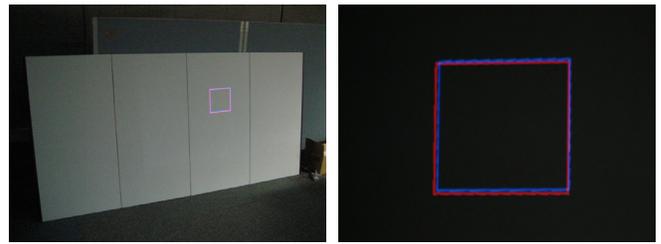


図 4 各 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションのみによる複数台投影

よって、外部キャリブレーションが完了する。また、このキャリブレーション法は、1) 作業が容易、2) 文献 [4] に示されるように実環境中の複数投影面にそのまま拡張できる、などの利点を持つ。

4. 複数投影画像の精密な重ね合わせ

本論で提案する複数台プロジェクタによる投影画像位置合わせ手法は、以下の 3 ステップで構成される。

- (1) 各 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーション
- (2) 投影面上の複数位置でのずれ量観測によるずれ量マップの生成
- (3) ずれ量マップを利用した投影面上任意位置でのずれ補正

以下に、2 台の FC-PT プロジェクタによる投影を例に、各ステップの詳細を述べる。

4.1 各 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーション

まず、3. 節で述べたように投影面の 4 隅の点にプロジェクタを向け、その時のプロジェクタの姿勢情報を取得することで、各 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションを行う。この方法を用いると、各プロジェクタは共通の投影面情報を元にキャリブレーションされたことになるので、比較的高い精度で投影画像の位置が一致することが期待される。

2 台の FC-PT プロジェクタについて、それぞれの外部キャリブレーションのみで複数台投影を行った様子の一例を図 4 に示す。2 台のプロジェクタからそれぞれ矩形を投影している。各投影画像は、投影面中における絶対位置としては 10mm 以内程度の誤差で表示されているが、重ね合わせると両者のずれが明確に観察されてしまう様子が分かる。

4.2 ずれの観測とずれ量マップの生成

4.1 節に示した複数の FC-PT プロジェクタによる投影画像間の位置ずれは、投影面上の位置に応じて変化するため、投影面全体にわたるずれの傾向をずれ量マップとして事前を取得しておくことで、以後の投影時にずれを補正した画像の重ね合わせが実現できる。本論で対象としている投影面は、基本的には実環境中の平面領域であるが、それが完全な平面性を満たさない不規則な形状である可能性があるため、理論上は、事前の位置ずれ観測は投影面上全体にわたって密に行われなければならない。しかし、そのような投影面でも局所的であれば平面性を満たすとみなすことができるので、ある位置における位置ずれはその周辺部における位置ずれと類似すると考えることができ

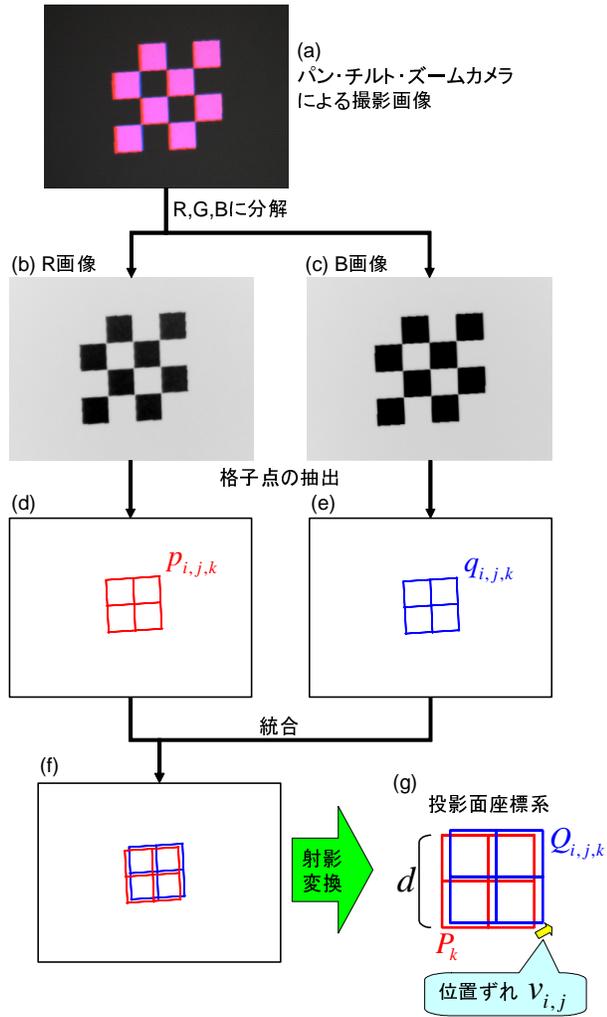


図5 サンプル座標における複数プロジェクトからの格子パターン投影とその観測

る．よって，投影面上において i, j 方向にそれぞれ一定の間隔 d でサンプル座標 $S_{i,j}$ を定め，全ての $S_{i,j}$ について事前に位置ずれ $v_{i,j}$ を計測，保持する．この $v_{i,j}$ をずれ量マップと定義する．以後任意の位置に投影を行う際には，位置ずれ補正量はその周辺の $S_{i,j}$ におけるずれを用いた補間計算を行って算出する．

$S_{i,j}$ には，外部キャリブレーション済みの各 FC-PT プロジェクトから格子パターンを投影する．本論では 3×3 の格子点を持つパターンを，その中心が $S_{i,j}$ を向くように投影し，またそのパターンの大きさはサンプル座標の間隔 d と等しくした．続いて，サンプル座標に投影された格子パターンをパン・チルト・ズームを電動で制御できるカメラによって観測する．このカメラパラメータを投影位置に応じて適切に制御し， $S_{i,j}$ に投影されている各格子パターンが詳細に観測できるところで静止させる．このカメラ制御のためには，事前にカメラを投影面に対して外部キャリブレーションしておく必要があるが，2. 節で論じたようにこの制御パラメータを用いた絶対座標の計測は行わないので，高精度のキャリブレーションを行う必要はない．図5(a) は，観測される格子パターン投影の一例である．プロジェクトが2台の場合は，図のように格子パターンの色を変えてお

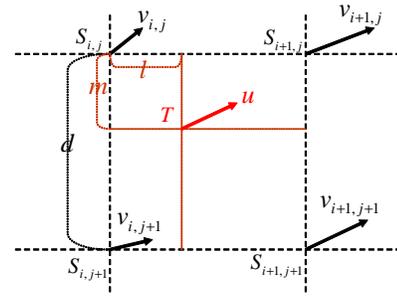


図6 線形補間による任意位置でのずれ補正

くことで複数の格子パターンを同時に検出し(図5(b)(c))，カメラ画像座標における各格子点位置 $p_{i,j,k}$ ， $q_{i,j,k}$ ($k = 1, \dots, 9$) を計測する(図5(d)(e))．さらに多くのプロジェクトを使用する場合は，カメラを静止させたまま各プロジェクトから格子パターンを順に投影し格子点座標を計測することを繰り返す．

次に，カメラ画像座標上で得られている $p_{i,j,k}$ と $q_{i,j,k}$ のずれを投影面上のメトリックな値に変換する． $p_{i,j,k}$ は，投影面上で間隔 d の格子点なので，以下の射影変換式が成り立つ．

$$\begin{pmatrix} P_k^x \\ P_k^y \\ 1 \end{pmatrix} = H_{i,j} \begin{pmatrix} p_{i,j,k}^x \\ p_{i,j,k}^y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし， $H_{i,j}$ は 3×3 行列であり，また P_k は投影面上のメトリックな格子点座標で，次のように表される．

$$\begin{aligned} P_1 &= (-d, -d) & P_2 &= (0, -d) & P_3 &= (d, -d) \\ P_4 &= (-d, 0) & P_5 &= (0, 0) & P_6 &= (d, 0) \\ P_7 &= (-d, d) & P_8 &= (0, d) & P_9 &= (d, d) \end{aligned} \quad (2)$$

$p_{i,j,k}$ はカメラ観測により取得されているので，(3),(2) 式より， $H_{i,j}$ が算出される． $p_{i,j,k}$ ， $q_{i,j,k}$ の同一の平面上にある格子点とみなせるので， $Q_{i,j,k}$ も次の式で求められる．

$$\begin{pmatrix} Q_{i,j,k}^x \\ Q_{i,j,k}^y \\ 1 \end{pmatrix} = H_{i,j} \begin{pmatrix} q_{i,j,k}^x \\ q_{i,j,k}^y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

本論では，位置ずれを平行移動に限定して考える．よって， $S_{i,j}$ におけるずれ $v_{i,j}$ は次の式で表される．

$$v_{i,j} = \frac{1}{9} \sum_k (Q_{i,j,k} - P_k) \quad (4)$$

なお，キャリブレーションされたパン・チルト・ズームカメラを使用することで，カメラを各サンプル座標周辺を撮影するように制御できるので，本節のプロセスはすべて自動化することができる．

4.3 ずれ量マップを用いたずれ補正

ずれ量マップ $v_{i,j}$ が得られれば，以後，投影面上の任意の位置 T におけるずれ補正量 u は，周辺サンプル座標におけるずれ $v_{i,j}$ の線形補間で算出することができる．

$$u = \frac{(d-l)(d-m)}{d^2} v_{i,j} + \frac{l(d-m)}{d^2} v_{i+1,j}$$

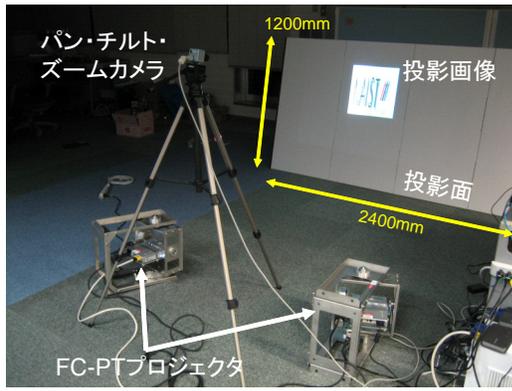


図 7 使用した環境

$$+ \frac{(d-l)m}{d^2} v_{i,j+1} + \frac{lm}{d^2} v_{i+1,j+1} \quad (5)$$

ただし、 i, j は以下を満たす最大の整数値である。

$$\begin{aligned} T^x &= S_{i,j}^x + l \quad (0 < l < d) \\ T^y &= S_{i,j}^y + m \quad (0 < m < d) \end{aligned} \quad (6)$$

ずれの補正方法としては、一方の投影画像を他方に合わせるように移動させる方法と、双方の投影画像を移動させる方法が考えられるが、これら 2 投影画像の位置ずれは非常に小さいため、どちらの方法を採っても構わないと考えられる。ここでは、一方を他方に合わせる方法を採用した。

5. 2 台の FC-PT プロジェクタによる投影実験

5.1 環境設定

図 7 に示すように、2 台の FC-PT プロジェクタ（仕様は表 1）とパン・チルト・ズームカメラ 1 台（仕様は表 2）を用いて、FC-PT プロジェクタから約 2m 前方に 1200mm×2400mm の投影面を置き、画像表示を行った。ただし、投影面は完全な平面ではなく、ゆるやかに歪曲していた。また、ずれ量マップ作成時のサンプル座標の間隔は 100mm とした。

5.2 投影結果と評価

まず、本論のずれ補正手法の有効性を確認するために、FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションのみを行い 2 台のプロジェクタから同じ画像を重ね合わせた場合と、そこにさらにずれ補正を適用した場合とを比較した。結果を図 8 に示す。2 台の FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションには 10mm 程度の投影画像の絶対位置誤差が生じ、単体の投影画像ではあまり問題にならないが、複数の画像を重ね合わせるにより (a) のように、観察者にとって非常に違和感の原因になることが確認できた。そして、提案手法を適用することで (b) のように位置ズレを解消した画像を得られることを確認した。また、図 9 に、他の位置での投影画像重ね合わせ結果を示す。この位置ずれの解消は、投影面上の任意の位置で有効であることが確認できた。

また、複数台利用を活かした投影例についても確認した。図 10 では、1 台のプロジェクタでは投影しきれない大きな画像を 2 台のプロジェクタで半分ずつ表示している例である。プロ

プロジェクタ (PLUS VISION 社 V3-131)	
投射方式	DLP
コントラスト比	2000:1
輝度	1000 lm
入力画像解像度	1024×768
電動雲台	
回転角精度 (パン, チルト)	0.002 deg
回転速度	10 deg/s

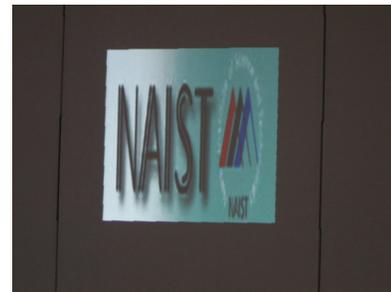
表 1 FC-PT プロジェクタ

カメラ (Pointgrey 社 Scorpion)	
画像解像度	1600×1200
撮像素子	1/1.8 プログレッシブ CCD
電動ズームレンズ (Computar 社)	
制御可能パラメータ	アイリス・フォーカス・ズーム
焦点距離	8~80 mm (10 倍ズーム)
電動雲台 (Directed Perception 社)	
回転角精度 (パン・チルト)	0.012857 deg
回転速度	60 deg/s

表 2 パン・チルト・ズームカメラ



(a) FC-PT プロジェクタ外部キャリブレーションのみ



(b) ずれ量マップを用いたずれ補正適用後

図 8 ずれ補正の効果

ジェクタの設置位置や視野角の制約上、単体のプロジェクタでは 1200mm 程度の幅の画像しか投影することができないが、2 台の投影画像を横に並べ、その連結部でずれや乖離がない自然な画像表示が実現できている。一方、図 11 では、2 台のプロジェクタの投影画像を重ね合わせることで画像の輝度を向上させた例である。2 投影画像の重ね合わせによって解像感が増し、画像がより鮮明になっているのが確認できる。

6. むすび

本論では、複数台の回転式プロジェクタを環境中に配置し、複数の投影画像をタイル状に並べて大きな画像を表示したり、

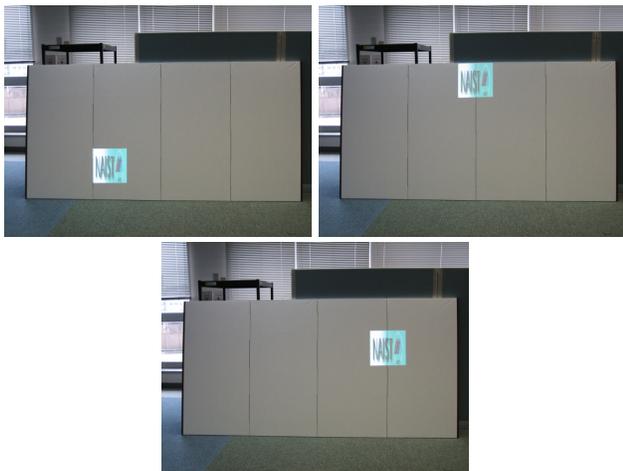


図 9 任意位置での 2 投影像の重ね合わせ

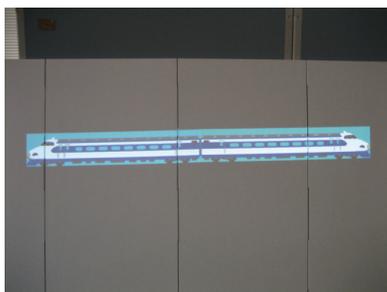
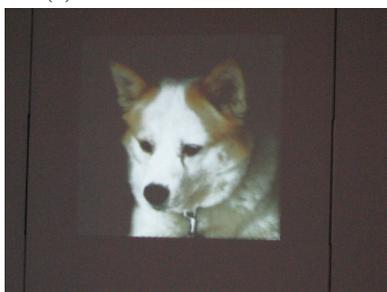


図 10 1 台のプロジェクトで表示できない大きな画像表示



(a) プロジェクタ 1 台による投影



(b) プロジェクタ 2 台による投影

図 11 投影画像の重ね合わせによる画像の鮮明化

同じ位置に重ね合わせることでより鮮明な画像表示を行うことが可能な広範囲視覚情報提示システムを提案した。複数の投影画像を表示する際には、単体による投影では問題にならない微小な誤差でも明確な位置ずれとして観測されるため、より高い位置合わせ精度が要求される。本論では、各プロジェクトを単体の使用については十分な程度に正確にキャリブレーションしておき、その上で生じる各投影画像間の位置ずれをパン・チルト・ズームカメラによって詳細に観測することで、投影面上での絶対位置精度と投影画像間の位置合わせ精度を同時に満たした画像表示を実現した。この手法は、観測に用いるカメラに高精度なキャリブレーションを要求しないため、実際の環境で安定に動作する。

今後の課題として、連続的に移動する画像の表示が挙げられる。現在のシステムでは、投影面上の任意の位置に静止した画像表示において複数投影画像間の位置ずれを補正することは可能だが、投影面上で画像を移動させている間はこの位置合わせが正しく維持されない。これは、このシステムでは、ある時点でのプロジェクト姿勢情報を取得してからその姿勢に応じた適切な入力画像を算出し表示するまでの遅延を考慮していないこと、また各プロジェクト制御用 PC 間で処理の同期を行っていないことなどが原因として挙げられる。複数台の首振りプロジェクト環境において発生するこれらの問題を考察し、最適な処理分担、高速化、通信方法などについて検討し、システム全体の提案・実装・評価することが今後の課題である。複数画像を並べたり重ね合わせた際に生じる、画像内の色や明るさの不均一さの解消も重要な課題のひとつと考えられる。

文 献

- [1] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Steven, "The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays," ACM SIGGRAPH98, 1998.
- [2] C. Pinhanez, "The Everywhere Displays Projector: A Device to Create Ubiquitous Graphical Interfaces," Proc. UbiComp 2001: Ubiquitous Computing, LLCS 2201, pp.315-331, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [3] M. Ashdown, M. Flagg, R. Sukthankar, J. M. Rehg, "A flexible projector-camera system for multi-planar displays," Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.165-172, 2004.
- [4] I. Mitsugami, N. Ukita, M. Kidode, "Multi-Planar Projection by Fixed-Center Pan-Tilt Projectors", Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, no.108, 2005.
- [5] M. Ashdown, Y. Sato, "Steerable Projector Calibration," Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, no.98, 2005.
- [6] R. Yang and D. Gotz and J. Hensley and H. Towles and M. Brown, "PixelFlex: A Reconfigurable Multi-Projector Display System," Proceedings of IEEE Visualization 2001, 2001.
- [7] L. de Agapito and R. Hartley and E. Hayman, "Linear self-calibration of a rotating and zooming camera," Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.1, pp.5-21, 1999.
- [8] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision," Chapter 12, Cambridge University Press, 2000.