論 文

複数台首振りプロジェクタによる連続移動画像投影

Displaying a Moving Image using Multiple Steerable Projectors

満上育久[†], 浮田宗伯[††], 木戸出正継[††]

Ikuhisa Mitsugami[†], Norimichi Ukita[††] and Masatsugu Kidode[††]

Abstract We propose a method for precise overlapping of projected images using multiple steerable projectors. When steerable projectors are controlled simultaneously, two problems occur: (1) because the flatness of the projected planes is not suited to the real environment, each projected image from each multiple projector that is calibrated with just a part of the plane cannot always be located to the same position as that of an image from another projector, even when the images are intended to be located at the same position; and (2) because the projectors run asynchronously it is impossible to display a moving image by precisely tiling or overlaying the multiple projected images. To overcome this (1), we propose a method that preliminarily measures the misalignments through every plane in the environment, and hence displays the image without misalignment. For (2), we describe a method for the synchronization of moving and scaling between multiple projections.

キーワード：首振りプロジェクタ，キャリブレーション，歪み補正，同期画像投影

1. ま え が き

プロジェクタを用いた実環境中への視覚情報表示技術は，館内案内システム[1)]，遠隔操作指示[2)]，デザインシミュレーション[3)]など多くのアプリケーションへの利用が提案されている．ユーザがデバイスを身につける必要がなく，また実環境の表面上に実際に画像を描くため見やすいというのが，これらの大きな利点である．これらのシステムでは，プロジェクタが固定設置されており，事前にその環境でキャリブレーションを行うことができるため，投影面に対して正しい位置に画像を表示することができるが，投影できる範囲は限られており，1) では特定の壁面や卓上，2) や 3) では静止した 3 次元物体上という，非常に限定された場所にしか画像表示を行うことができないという問題があった．この画像表示範囲の制約を克服する方法として，首振り機構を持つプロジェクタを用いる方法や，曲面の鏡などを利用してプロジェクタの画角を広げる方法が考えられるが，前者はプロジェクタの構造が複雑になりキャリブレーションが不安定になるため表示位置の正確さを欠き，後者は空間解像度が低下してしまうため上述のアプリケーションで用いる局所的な画像表示には向かない．あるいは，固定のプロジェクタをアレイ状に並べる方法が考えられるが，これはすべてのプロジェクタで同時に表示を行う場合以外には無駄の多い構成であり，やはり上述のアプリケーションには向かない．

そこで本論では，6) で提案されている安定なキャリブレーションが可能な首振りプロジェクタを利用し，さらにそれらを環境の広さや形状に応じて複数台設置することによって，充分な解像度の画像を広範囲に表示可能なシステムを構築する．なお，各首振りプロジェクタの設置間隔をできる限り大きくとると，効率的に広域化が可能であるし，また設置間隔を比較的小さくすると，複数台のプロジェクタからの画像を重ね合わせて明るく表示したり，複数台からの画像を並べることで 1 台のプロジェクタでは表示できない大きな画像を表示することも可能である．

このシステムにおいて，個々の首振りプロジェクタは 6) で示されたキャリブレーションによって環境中の平面上の指定位置への画像表示が可能である．しかし，扱う投影平面が広くなると，投影面全域に渡って完全な平面性を満たしているという前提は成り立たなくなる．その結果，各首振りプロジェクタは，その投影光が届く範囲の局所的な平面性に基づいたキャリブレーションを行うことになり，複数台のプロジェクタから同じ位置に投影したはずの画像は正確には重なり合わず，わずかなズレが生じる．このズレ

IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems で発表
2007 年 5 月 21 日受付，2008 年 2 月 4 日最終受付，2003 年 2 月 28 日採録

† 京都大学 学術情報メディアセンター
（〒 606–8501 京都市左京区吉田二本松町，TEL:075-753-9048）
†† 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,TEL:0743-72-5265）
† Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University
(Yoshida-Nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606–8501, Japan)
†† Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology
(8916–5, Takayama, Ikoma, Nara 630–0192, Japan)

は，投影面のわずかな起伏によって生じ* ，それらの起伏は不規則に存在する．そこで，本論では，投影面上に適当な間隔で参照点を定め，それらの参照点においてズレ量を事前に観測することでズレ量に関するマップを用意し，オンライン実行時に補正する手法を用いた．

また，連続的に移動・伸縮する画像を複数台のプロジェクタによって表示する場合，表示位置だけでなくその表示時刻も合わせなければならないが，非同期に動作する複数台プロジェクタを個別に制御するだけでは表示時刻が一致せず，結果的にズレた表示になってしまう．そこで本論では，複数台の非同期システムの統合手法として提案されているダイナミックメモリーアーキテクチャ[5] をベースに，プロジェクタ入力画像算出時間も考慮に入れた，複数投影画像の表示位置変化・サイズ変化同期手法について提案し，その有効性を確認する．

2. システム構成

2.1 投影中心固定型パンチルトプロジェクタ

本論では，首振りプロジェクタとして投影中心固定型パンチルトプロジェクタ（以下，FC-PT(Fixed-Center Pan-Tilt) プロジェクタ）[6] を用いる．FC-PT プロジェクタは，その投影中心と回転機構の回転中心とが空間的に一致するように設計された首振りプロジェクタである．首振りプロジェクタは，画角や焦点距離などといったプロジェクタの投影光に関するパラメータだけでなく，首振り雲台の構造に関するパラメータを含む．これらのパラメータすべてを正確に推定するのは一般に困難であり，正確で安定なキャリブレーションを実現しにくい．これに対して，FC-PT プロジェクタは，姿勢が変化しても投影中心位置が変化しない特殊な構造をとることで，事前に推定すべき幾何学的なパラメータ数が削減されているために，正確・安定なキャリブレーションを実現している．また，FC-PT プロジェクタを設置した際には，画像を表示したい複数の平面領域について，プロジェクタ投影光の中心をその面の 4 隅に向けた際の角度を取得するのみで，プロジェクタと投影面の相対的な位置・姿勢が得られる．そのため，投影面上のメトリックな 2 次元座標系で画像の位置や大きさを与えれば，向くべきプロジェクタのパン・チルト角，およびその姿勢で投影面上に歪みなく画像が表示されるようにするために逆変換された入力画像を算出できる．

2.2 複数台プロジェクタ制御用の構成

複数台の制御を考慮したシステム構成として，複数台のプロジェクタをすべて 1 台の PC によって制御するものが考えられる．この構成では，1 台の PC がすべての情報の入出力や制御を行うため，複数台の制御が容易である．Yang らの PixelFlex[8] もこの構成を採用している．しかし，この構成はプロジェクタの台数に比例して PC の処理負担が増し，スケーラビリティの面で問題がある．

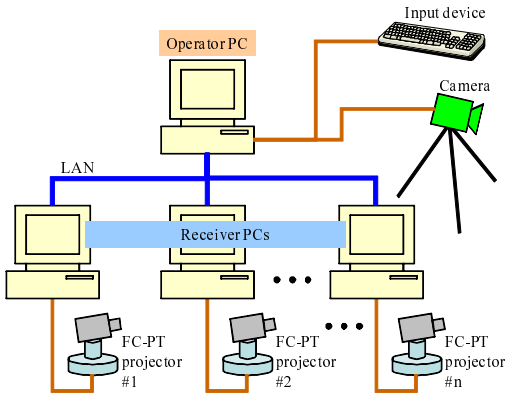


図 1 複数台プロジェクタ制御のための構成
Configuration for controlling multiple projectors.

そこで本論では，**図 1** に示すように，プロジェクタ 1 台につき PC（Receiver PC と呼ぶ）1 台を用意し，それらの PC 間をネットワークで接続する構成を採用する．各 Receiver PC は対応するプロジェクタの制御を受け持つ．さらにネットワーク内には，これらの Receiver PC に投影画像の位置や寸法などを指示する PC（Operator PC と呼ぶ）を用意する．館内案内に利用する際の来訪者位置情報や，表示画像を移動・伸縮させるキーボードやマウスなどの入力情報は，この Operator PC が受け付ける．そして Operator PC は，それらの情報に応じた画像位置・寸法・角度情報（本論では，画像メトリックパラメータと呼ぶ）をネットワークにブロードキャストし，各 Receiver PC に伝達する．本論では，投影する画像は静止画のみとし，使用する画像は事前に各 Receiver PC に保存しておく．これによって，各プロジェクタは，6) のキャリブレーション手法を用いて，投影面上に設定したメトリックな 2 次元座標系に対してキャリブレーションしておけば，Operator PC から受け取る画像メトリックパラメータとプロジェクタの姿勢制御や入力画像の生成が可能である．Operator PC は，単純にこの画像メトリックパラメータのみを各 Receiver PC にブロードキャストすればよい．この構成では，1 台の PC に処理が集中することがないため，スケーラビリティの点で優れており，建物の形状や広さに応じてプロジェクタの台数・配置を決めなければならない館内案内などのアプリケーションに適している．

3. 複数静止投影画像の精密な重ね合わせ

3.1 ズレの発生要因とその対処策

プロジェクタを用いて平面に画像を投影する研究では，プロジェクタの画像平面と実環境投影平面の間の Homography を利用することが多い[7)8)]．2.1 節の FC-PT プロジェクタも同様に平面上の 4 点から算出した Homography によってキャリブレーションを行っている．この手法は，投影

* 厳密には，首振りプロジェクタ設置時のキャリブレーション誤差も，このズレの要因である．しかし，そのキャリブレーション誤差自体にも投影面の非平面性が影響しており，この 2 種類の誤差要因を厳密に分離することはできない．そこで，本論では，これらの要因をまとめて扱っている．

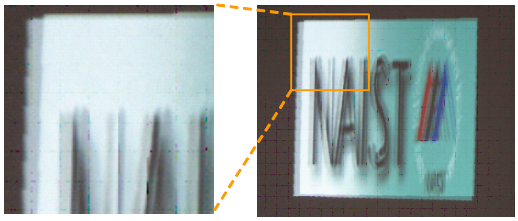


図 2　2 つの投影画像間の位置ズレ
Misalignment of two projected images.

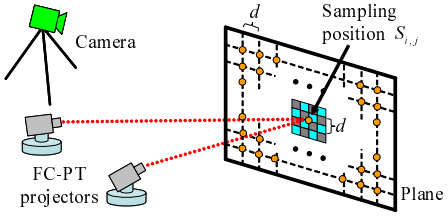


図 3　サンプリング位置への格子パターン投影
Grid pattern projection at a sampling position.

面の平面性に基づいているため，投影する領域が小さくその領域内で平面性が充分に満たされる場合には，正確な位置への投影が可能である．しかし，本論で扱う広い投影面の場合，投影面全域に渡って完全な平面性が満たされないため，異なるプロジェクタから同じ位置に投影しようとした画像間でわずかなズレが生じる．実世界の広い平面が完全な平面性を満たすことはないため，**図 2** に示すように複数の投影画像を重ね合わせようとしてもズレが生じ，ユーザにとって見づらい表示となる．このズレは，投影面上に不規則に存在するわずかな起伏によって生じるため，事前の位置ズレ観測は領域全体にわたって行わざるを得ない．そこで本論では，複数台のプロジェクタによって表示可能な領域について，事前に投影画像間に生じるズレを観測しマップを作成しておき，実利用時にそのマップをもとに画像位置を補正することで，ズレのない画像を表示する方法を採用する．事前に行うズレ量の観測は，領域中に複数の観測点に対して行うため作業時間を要するという欠点を持つが，この作業はプロジェクタ設置時にただ一度行えばよく，またカメラシステムと連携した自動化も可能なので，大きな問題とはならない．

3.2　ズレの観測とズレ量マップの生成

投影面上に起伏は不規則に存在するため，事前の位置ズレ観測は領域全体にわたって密に行われなければならないが，明らかな起伏を含む面ではなく局所的に見れば充分な平面性を満たす投影面を対象とするため，ある位置における位置ズレはその周辺部における位置ズレと類似すると考えても支障がない．よって，**図 3** に示すように，投影面上において i, j 方向にそれぞれ一定の間隔 d でサンプリング位置 $\boldsymbol{S}_{i,j}$ を定め，各 $\boldsymbol{S}_{i,j}$ に対して，各プロジェクタからその位置に投影を行うよう制御し，その結果表示された各投影画像間の位置ズレ $\boldsymbol{v}_{i,j}$ を計測する．この $\{\boldsymbol{v}_{i,j}\}$ をズレ量マップと定義する．

図 4 に，2 台のプロジェクタを用いた場合における，各サンプリング位置におけるズレ量計測処理の概要を示す．各 $\boldsymbol{S}_{i,j}$ に対して，各 FC-PT プロジェクタをその位置に格子パターンを投影するように制御する．本論では，間隔 $d' = d/2$ の 4×4 格子パターンを，その中心の投影面上での座標が $\boldsymbol{S}_{i,j}$ となるように制御する．それぞれのプロジェクタから投影された格子パターンは，投影面の非平面性のために真の $\boldsymbol{S}_{i,j}$ からわずかにずれるため，二つの格子パターンの間には相対的なズレが生じる．一方のプロジェクタから赤色のパターン，他方のプロジェクタから青色のパターンを用いることにより，カメラで撮影した画像（図中 (a)）を色で分離してこれらの格子パターンを別々に抽出することができ（図中 (b)(c)），これらから，カメラ画像座標における各格子点位置 $\boldsymbol{p}_{i,j,k}$，$\boldsymbol{q}_{i,j,k}(k = 1, \cdots, 9)$ を計測する*（図 4(d)(e)）．次に，カメラ画像座標上で得られている $\boldsymbol{p}_{i,j,k}$ と $\boldsymbol{q}_{i,j,k}$ のズレを投影面上のメトリックな値に変換する．格子パターンの間隔も，その投影位置と同様に投影面の非平面性のためにわずかな誤差を持ちうるが，その誤差は非常に小さいため，近似的に間隔は d' であるとみなすことができる．これにより，$\boldsymbol{p}_{i,j,k}$ と間隔 d' の格子点座標集合との間に，以下の平面射影変換式が成り立つ．

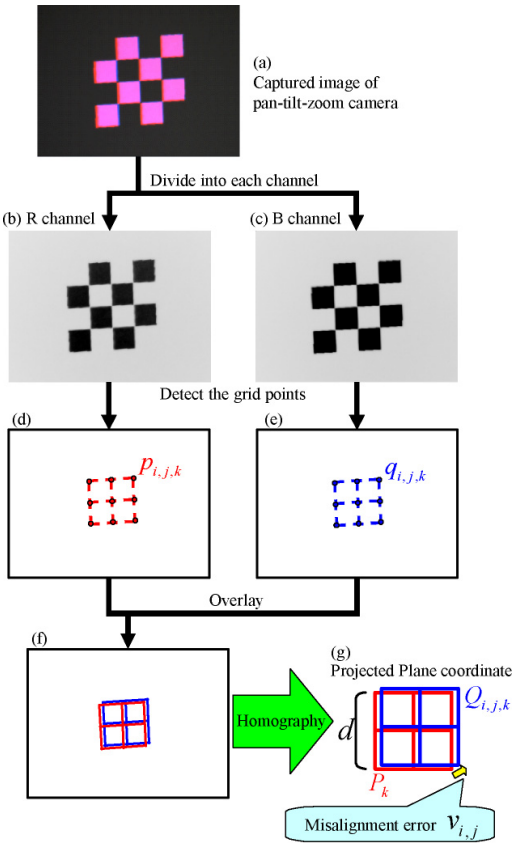


図 4　二つの投影パターン間のズレ量計測
Measuring a misalignment between two projected patterns.

* 電動首振りカメラを使うことでこの作業は自動化することも可能である．首振りカメラによって，投影面上の絶対位置を観測しなければならない場合は，高精度なキャリブレーションが必要となるが，本論の手法では，複数投影パターン間の相対的な位置ズレの観測のみ観測できればよいので，投影パターンがカメラの画角内におさまる程度の姿勢制御を行うだけでよく，容易に実現できる．

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

ただし，$H_{i,j}$ は 3×3 行列であり，また $\boldsymbol{P}_k$ は投影面上の格子点座標で，次のように表される．

$$\begin{array}{lll} \boldsymbol{P}_1 = (-d', -d') & \boldsymbol{P}_2 = (0, -d') & \boldsymbol{P}_3 = (d', -d') \\ \boldsymbol{P}_4 = (-d', 0) & \boldsymbol{P}_5 = (0, 0) & \boldsymbol{P}_6 = (d', 0) \\ \boldsymbol{P}_7 = (-d', d') & \boldsymbol{P}_8 = (0, d') & \boldsymbol{P}_9 = (d', d') \end{array} \quad (2)$$

$\boldsymbol{p}_{i,j,k}$ はカメラ観測により取得されているので，(1),(2) 式より，$H_{i,j}$ が算出される．$\boldsymbol{p}_{i,j,k}$，$\boldsymbol{q}_{i,j,k}$ は同一の平面上にある格子点とみなせるので，$\boldsymbol{Q}_{i,j,k}$ も次の式で求められる．

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

ズレ量補正によって投影画像間のズレが悪化しないためには，格子パターン間のズレ量計測誤差が，投影面の非平面性によるズレ量よりも充分に小さくなければならない．そこで本論では，対応する一組の格子点から算出するのではなく，次式のように九組すべての格子点のズレ量の平均をとることで，格子パターン間のズレ量 $\boldsymbol{v}_{i,j}$ を安定して計測できるようにしている．

$$\boldsymbol{v}_{i,j} = \frac{1}{9} \sum_k (\boldsymbol{Q}_{i,j,k} - \boldsymbol{P}_k) \quad (4)$$

3.3 ズレ量マップを用いたズレ補正

ズレ量マップ $\{\boldsymbol{v}_{i,j}\}$ が得られれば，以後，投影面上の任意の位置 T におけるズレ補正量 u は，周辺サンプリング位置におけるズレ $\boldsymbol{v}_{i,j}$ の線形補間で算出することができる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u} = & \frac{(d-l)(d-m)}{d^2} \boldsymbol{v}_{i,j} + \frac{l(d-m)}{d^2} \boldsymbol{v}_{i+1,j} \\ & + \frac{(d-l)m}{d^2} \boldsymbol{v}_{i,j+1} + \frac{lm}{d^2} \boldsymbol{v}_{i+1,j+1} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし，i, j は以下を満たす最大の整数値である．

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

ズレ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 投影画像の位置ズレは非常に小さいため，どちらの方法を採っても構わない．ここでは，一方の画像の処理を行っている Receiver PC 上の画像メトリックパラメータの位置情報を u だけずらすことで，他方に合わせる．

このような位置合わせによって，一方あるいは両方の Receiver PC 上の画像位置情報を補正しているが，この補正量は投影面の非平面性によって生じる位置誤差範囲内なので，そもそもの各プロジェクタのキャリブレーション結果を放棄するものではない．また，任意位置での u はマップの線形補間によって算出するため，投影面上で滑らかに変化する．そのため，後述する連続移動する画像表示の際にも，この補正によって画像移動が不自然になることがないのも利点である．

3.4 サンプリング間隔の決定方法

本論のシステムによって表示する画像の縦横の長さがサンプリング間隔 d の倍であるとき，あるサンプリング位置 $\boldsymbol{S}_{i,j}$ が中心となるように画像を重ね合わせた場合，その画像の端が $\boldsymbol{S}_{i,j}$ の隣接サンプリング位置となる．そのため，画像を $\boldsymbol{S}_{i,j}$ におけるズレ量 $\boldsymbol{v}_{i,j}$ を用いて補正しても，その画像の端では，$\boldsymbol{S}_{i,j}$ とそ $\boldsymbol{S}_{i\pm1,j\pm1}$ におけるズレの量の差 $\Delta\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_{i\pm1,j\pm1} - \boldsymbol{v}_{i,j}$ にほぼ等しい* ズレが発生することになる．また，本論で扱うようなほぼ平面とみなすことのできる投影面の場合は，サンプリング間隔 d が小さいほど $\Delta\boldsymbol{v}$ も小さくなると考えられる．

以上の関係より，サンプリング間隔 d は，表示したい画像サイズの半分以下を目安とする．これによって，画像を重ね合わせた際に実際に発生するであろうズレ量の最大値を，観測した隣接サンプリング位置間におけるズレ量の差の最大値 $\Delta\boldsymbol{v}_{\max}$ によって推定することが可能となる．また，$\Delta\boldsymbol{v}_{\max}$ が 5mm 以上の大きな値をとる場合には，サンプリング間隔 d をもっと小さくし，それに応じて表示する画像のサイズも小さくしなければならない，という判断を行うこともできる．

また，本論の処理を行う上で．プロジェクタから図 4(a) の格子パターンを投影し，カメラで観測できなければならない．したがって，d には，投影面上の任意の位置において $2d \times 2d$ の矩形がプロジェクタおよびカメラの画角内におさまらなければならないという制約も存在する．

なお，本論のアプローチではサンプリング間隔 d 内での細かい起伏に対応することは原理的に不可能であるが，本論では，3.2 節でも述べたように，画像が表示される局所領域では充分な平面性が成り立つような投影面を前提としており，そのような細かい起伏に対する処理は行わない．

3.5 投影結果と評価

本論のズレ補正手法の有効性を確認するための実験を行った．具体的には，**図 5** に示すように，FC-PT プロジェクタ（仕様は表 1）2 台と，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 の投影面を置いた．プロジェクタを静止すると投影面上のおよそ 900mm×1200mm の領域にしか投影できないため，投影面全域に画像を表示するためには首振りが必要な環境である．投影面は 1200mm×600mm の平面四つを繋げた衝立を肉眼で観察して平面になるように広げたものを用いた．ズレ量マップ作成時のサンプリング位置の間隔は 200mm とした．

* 厳密には，プロジェクタ設置時のキャリブレーション誤差の影響を受けるため，正確には一致しない．

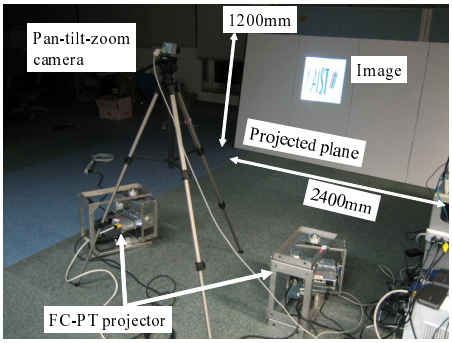


図 5　使用した環境
Experimental environment.

表 1　FC-PT プロジェクタの仕様
Specification of a FC-PT projector

プロジェクタ (PLUS VISION 社 V3-131)	
投映方式	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
回転範囲（パン）	-60 ～ 60 deg
回転範囲（チルト）	-30 ～ 45 deg

表 2　パン・チルト・ズームカメラ
Specification of a Pan-Tilt-Zoom camera

カメラ (Pointgrey 社 Scorpion)	
画像解像度	800×600
焦点距離	8∼80 mm
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

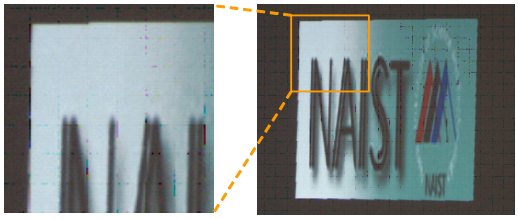


図 6　ズレ量マップを用いた位置ズレ補正結果
Image well-aligned by the misalignment map.

なお，補正後のズレ量マップ作成時のズレ量計測および補正後の評価のためのズレ量計測は，3.2 節の図 4 に示す方法で行った．3.2 節で述べたように，格子パターン中の九つすべての格子点の平均でズレ量を計測しており，この環境下での計測精度は約 1mm であった．投影画像間の補正前のズレ量は最大 10mm であり，計測精度はそれと比較して充分に小さい．

実験の結果，投影面全域で，補正後のズレ量は 1mm 以下となった．これによって，図 2 に示した位置ズレが，**図 6** のように補正された．このとき，筆者の肉眼による通常の観測では，ズレは知覚できなかった．

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 7** 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，その連結部でズレのない自然な画像表示が実現できている．一方，**図 8** 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明るく，解像感が増した画像が得られることが確認できる．

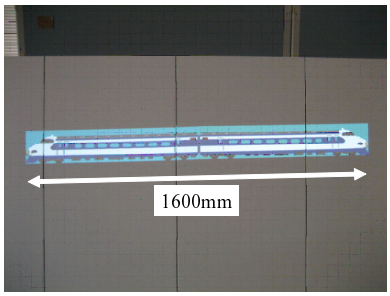
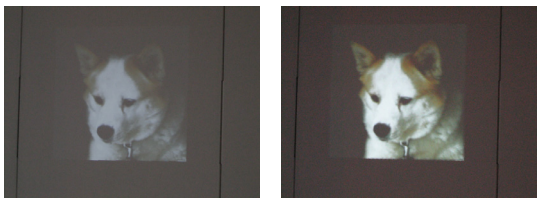


図 7　1 台のプロジェクタで表示できない大きな画像表示
Larger image projection by tiling multiple projections.



(a) 1 台による投影　　(b) 2 台による投影

図 8　投影画像の重ね合わせによる画像の高輝度化
Bright image obtained by overlaying multiple projections.

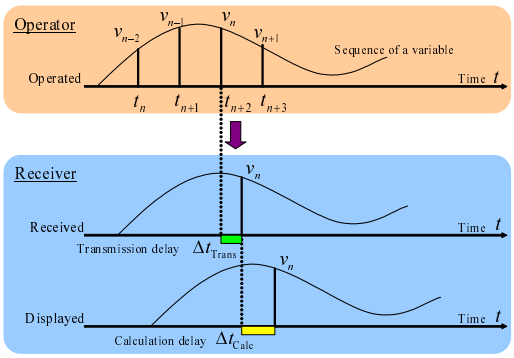


図 9　連続移動画像表示における問題
Problems in using multiple projectors.

4.　複数台プロジェクタによる画像の移動・伸縮同期

4.1　複数台首振りプロジェクタの統合における問題

表示する画像の位置・寸法が固定であれば，3 章の手法によって複数の投影画像の位置合わせを行うことができる．しかし，この重ね合わせた画像を人の動きに応じて連続的に移動・伸縮するようなアプリケーションに利用する場合には，新たな問題が生じる．システムは，図 1 に示した構成のもとで，Operator PC から表示したい画像の位置や寸法の時系列変化情報を標本化して送信するが，図 9 *に示

* グラフの横軸は時間，縦軸は画像メトリックパラメータの一つを表す．

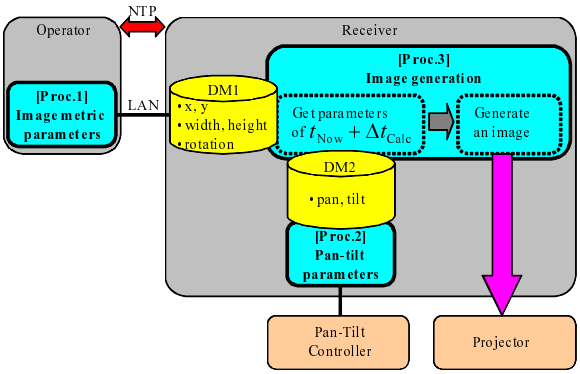


図 10　ダイナミックメモリーを用いた Receiver PC の処理構造
Process of a Receiver PC using dynamic memory.

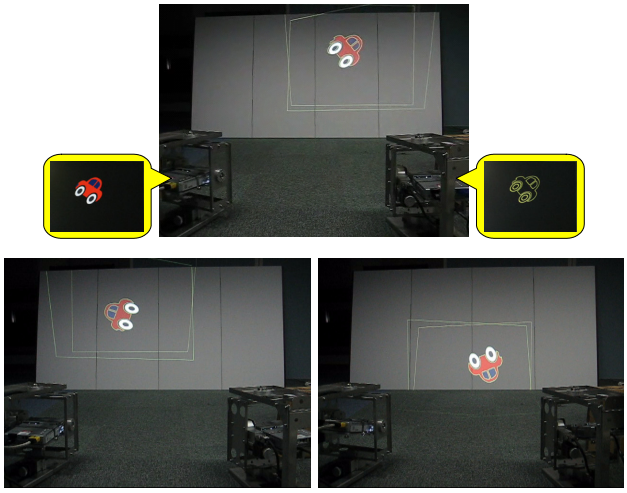


図 11　2 台の FC-PT プロジェクタを用いた連続移動画像投影
Moving image projection using two FC-PT projectors.

すように，Receiver PC がその情報を受け取るまでに伝送遅延 ($\Delta t_{\mathrm{Trans}}$) を生じ，さらに Receiver PC がその情報を元にプロジェクタの入力画像を生成し実際に表示されるまでに演算遅延 (Δt_{Calc}) を生じる．そして，これら二つの遅延はネットワーク伝送路の長さや各Receiver PC の処理スペックによって異なるため，結果として各プロジェクタから表示されるタイミングが揃わず，投影画像間のズレとして観測されるのである．

4.2　複数画像の移動・伸縮の同期手法

松山らが提案したダイナミックメモリーアーキテクチャ[5]は，システム内で非同期に動作する複数のプロセス間の情報共有方式である．各プロセスがそれぞれ独立に最新のデータを書込み参照する黒板型の情報共有ではなく，書込みデータにタイムスタンプを付けた履歴情報を保存しておく．データ参照時には，参照したい時刻を与えると，データを履歴情報の中からその時刻周辺のデータを選択し，それらの補間計算によってその時刻のデータを算出する．この処理によって，各プロセスは同期をとることなく，任意のタイミングで変数の読み書きを行うことができ，複数の非同期プロセスを統合したリアルタイム処理が実現される．

図 10 に，本論で提案した Receiver PC での処理構造を示す．Operator PC では，画像メトリックパラメータを送信するプロセス（Proc.1）が実行される．一方，Receiver PC では，首振り雲台からパン・チルト角情報を読取るプロセス（Proc.2）とプロジェクタの入力画像生成を行うプロセス（Proc.3）が実行される．以上のプロセスはすべて非同期で動作する．そこで，Proc.1 と Proc.3 の間の情報共有，および Proc.2 と Proc.3 の間を統合したリアルタイム処理を実現するために，それぞれダイナミックメモリー DM1，DM2 を Receiver PC 上に設ける．ただし，DM1 については，異なる PC 内のプロセス間の情報共有であるため，書込まれたデータのタイムスタンプの時刻と，データ参照の際に指定する時刻が異なる PC の時間軸によって表現されるために，適切なプロセス統合がなされない．この問題は，それらの PC 間で NTP によって時刻同期をとっておくことによって解決される．時刻同期を取ることによって，ネットワーク伝送遅延はダイナミックメモリー内の補間（予測）機能によって吸収され，同一 PC 内プロセス間のダイナミックメモリーと同様に動作する．

上記二つのダイナミックメモリーの導入により Receiver PC は任意の時刻の画像メトリックパラメータおよびパン・チルト角を取得できる．そして，システムは現在時刻 t_{Now} において，この時刻のパラメータではなく，ダイナミックメモリーの読込み時間*およびその後のプロジェクタ入力画像の生成処理に必要な時間 Δt_{Calc} を加味した時刻 $t_{\mathrm{Disp}} = t_{\mathrm{Now}} + \Delta t_{\mathrm{Calc}}$ のパラメータを取得し，入力画像を算出して投影する．なお，正確には，Δt_{Calc} は未知だが，入力画像は急激に変化することがないことから，その生成処理にかかる時間も急激に変化しないものとし，直前フレームの生成処理に要した時間を用いる．

以上の処理によって，Operator PC と Receiver PC との間の伝送遅延，および Receiver PC での演算遅延が解消され，Operator PC が与えた移動・伸縮オペレーションに同期して各プロジェクタから画像が投影される．

4.3　評価実験

本論では，2 台の FC-PT プロジェクタを使用し，投影実験を行った．実験環境は 3 章と同一とし，2 投影画像間の位置合わせについても同様に行った．プロジェクタの首振り制御については，コントローラ性能の制約から，滑らかな PID 制御ではなく，シンプルなストップアンドゴーの制御を行った．

図 11 は，2 台の FC-PT プロジェクタからそれぞれ車の画像およびその輪郭線画像を同じ位置に投影し重ね合わせたまま，平面上を円軌道で移動させたときの動作の様子である．なお，図中の二つの四角形は，各 FC-PT プロジェク

* 本論の実装ではダイナミックメモリーでは，最新から 3 時刻分の履歴情報から線形予測で指定時刻のパラメータ算出をしている．そのため，実際にはこれにかかるオーバヘッドは，プロジェクタ入力画像の生成処理に比べて極めて小さい．

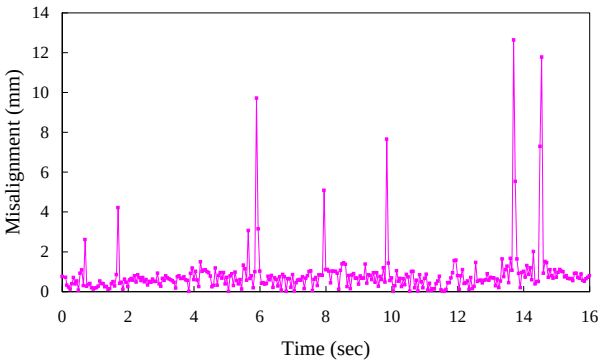
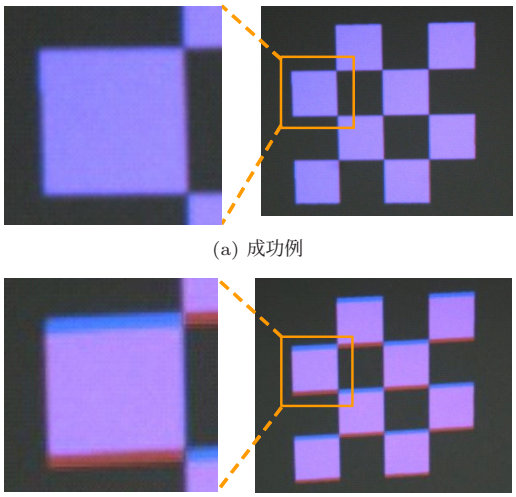


図 12 移動画像重ね合わせにおける位置ズレ観測結果
Misalignments when the image moves along a circle.



(a) 成功例

(b) 失敗例

図 13 移動画像の重ね合わせの成功例と失敗例
Examples of good/bad alignment results.

タの投影可能な領域を示している．実行した結果，2 画像が重ね合わせによる画像であることが観察者には知覚できない程度にズレは小さかった．また，Receiver PC におけるプロジェクタ入力画像生成処理は充分に速く（CPU Intel Xeon 3.2GHz，メモリー 2GB の PC で約 90fps），各プロジェクタのフレームレートはその仕様の最大値である 60fps で動作しており，画像が滑らかに移動しているように観測できた．また，Receiver PC の処理に待ち時間を挟むことで，フレームレートを変更しながら観察したところ，筆者は 20fps 以下では画像の移動の滑らかさが低下したと感じた．滑らかな画像移動・伸縮を実現するには，30fps 以上のフレームレートが望ましい．

同じ条件で，投影画像間のズレに関する定量評価実験を行った．ズレ計測は，3 章と同様に，格子パターンを投影し，それをカメラ観測することによって行った．ただし，プロジェクタのフレームレートが 60fps なのに対して，このカメラのレートは 20fps のためすべての投影フレームが観測できたわけではない．また，画像の移動速度は秒速 100mm，150mm，200mm とした．秒速 150mm における計測結果を**図 12** に示す．グラフの横軸は時間，縦軸は位置ズレの大きさである．全時間のうち 97 %は位置ズレ量は約 1mm 以下という，静止した画像でのズレ補正を行った 3.5 節と同様の精度を示しており，やはり通常の観測で知覚不可能であった（**図 13**(a)）．この結果は他の移動速度でも同様である．

ただし，この実験の際に，図 13(b) のようにズレが大きくなる瞬間があった．これは図 12 のグラフでところどころに見られるズレ量のピークに相当する．これは，首振り制御はストップアンドゴーの単純な制御であり，画像の円運動をプロジェクタの首振り運動によって追従する際に，パン・チルト回転が停止し，その後逆回転を始めるという動きをする*ため，ダイナミックメモリーにおけるパン・チルト角の補間（予測）に瞬時的に失敗しているからである．この瞬時的なズレは，画像の移動速度（正確には，それに応じて変化するプロジェクタの首振り速度）が大きいほど大きくなるが，いずれも重ね合わせが破綻して正しい画像として見えない点は同じである．なお，この瞬時的なズレの問題は，PID 制御によって滑らかな姿勢制御を実現することで，軽減できると考えられる．

5. む す び

本論では，複数台の首振りプロジェクタを環境中に配置し，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はなく，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．首振りプロジェクタは，固定式のプロジェクタと比較して，投影面上の広い範囲への画像投影が可能となる点で優れている．しかし，実環境中の平面は広範囲に渡って完全な平面性を満たしていることは限らないため，画像投影を行う範囲が広がるほど，その平面性が信用できなくなる．すなわち，固定のプロジェクタであれば，その投影範囲が小さいために，その投影範囲が完全な平面だと仮定して画像投影を行っても問題ないのに対して，首振りプロジェクタの場合は，広い投影面全体を平面と仮定して画像投影を行うと，その平面性に関する誤差が無視できなくなり，投影される画像にズレが生じてしまう．本論では，この位置ズレの問題を，事前にズレ量を観測したマップを用意しておくことで補正する手法を実装した．また，ダイナミックメモリーアーキテクチャを利用した複数台プロジェクタ間の投影画像の移動・伸縮の同期手法についても提案した．2 台の首振りプロジェクタを使って，重ね合わせた投影画像を連続的に移動させる実験を行い，提案手法の有効性を確認した．

今後の課題として，実環境中の平面以外の面への投影が

* 例えば，画像が時計の 12 時の位置から 6 時の位置まで円運動する際に，パン運動はまず右に向かい，2 時付近で停止し，4 時付近で左に回転を再開する，という動きになる．

考えられる．実環境中の床や壁などを投影面として利用することを考えると，本論で扱った平面だけではなく，円筒状の柱など 1 方向のみに曲率を持つ曲面や，その他球面などの任意形状曲面も存在する．本論のアプローチは，ズレ量マップを利用することで完全な平面ではない面へのズレのない投影を実現しているが，これは肉眼による観察で平面だと判断される程度の面のみを想定しており，ズレ補正の方法も画像の並進移動のみである．したがって，肉眼による観察でも明らかな上述の曲面の場合には，本論のアプローチは適用できず，グレイコードパターン投影法 [9] などを用いて，その曲面の形状を計測しなければならない．ただし，円筒状の柱などについては，1 方向のみが曲率を持ち，他方が直線であることを利用し，より容易な作業で投影できる手法を検討したいと考えている．

別の課題として，複数台プロジェクタによる動画像の重ね合わせが挙げられる．動画像を重ね合わせる場合，表示する動画像も同期しなければならないが，単に動画像情報を同期して各 Receiver PC に入力する，あるいは各 Receiver PC で開始時刻を合わせて動画像ファイルを読込むという処理だけでは，その後のプロジェクタ入力画像の生成処理時間が Receiver PC 間で異なると実際に投影される動画像は同期しない．この問題は，動画像のフレーム番号も Operator PC-Receiver PC 間のダイナミックメモリーで取り扱うことによって解決できると考えられる．ただし，その場合でも，各プロジェクタは非同期でフレーム更新を行うため，画像の更新タイミングは 1/60 秒（60fps のプロジェクタの場合）の範囲でずれてしまう．この時間的なズレが観察者に違和感を与えるものかは今後調査する必要があると考えられる．逆に，Receiver PC 側のフレームレートが極端に低い場合には，表示される動画像にコマ落ちが発生し，また長時間投影画像がロックされるために時間的にずれたフレームが重なり合うことになるので，重ね合わせた画像に違和感が生じると思われる．しかし，それほどまで遅いレートでは，そもそも画像の移動・伸縮自体がなめらかでなくなってしまう．4.3 節で述べたように，動画像を扱う場合でも，Receiver PC は 30fps 程度のフレームレートを維持できるよう実装すべきである．

また，連続移動する 3 次元形状物体への投影システムの構築にも取り組みたいと考えている．このシステムでは，プロジェクタの投影中心位置が不変なため，物体の位置・姿勢を与えれば各プロジェクタの姿勢とは無関係に投影しうる物体表面領域が一意に定まるという，FC-PT プロジェクタの特徴を有効に活かすことができる．すなわち，入力画像算出にその時刻の姿勢情報を取得する必要がないため，高フレームレートで遅延の少ない表示が期待できる．このようなシステムにおける，物体の位置・姿勢の高精度リアルタイム計測，物体表面に投影不可能な領域が生じないようなプロジェクタ配置，物体表面の明度差の抑制や相互反射の考慮などといった光学的問題が，今後の課題であると考えられる．さらに，システム大規模化への対策として，ネットワークの階層化や分散協調システムなども検討課題として考えられる．

〔文　献〕

1) Claudio Pinhanez, Rick Kjeldsen, Anthony Levas, Gopal Pingali, Mark Podlaseck, and Noi Sukaviriya: “Applications of steerable projector-camera systems”, In *Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams2003)*, IEEE Computer Society Press (2003)
2) 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集, 7, pp.169–176 (2002)
3) Ramesh Raskar, Greg Welch, Kok-Lim Low, and Deepak Bandyopadhyay: “Shader lamps: Animating real objects with image based illumination”, In *Proc. 12th Eurographics Workshop on Rendering Workshop*, pp.89–102 (2001)
4) Mark Ashdown, Yoichi Sato: “Steerable projector calibration”, In *Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams2005)*. IEEE Computer Society Press (2005)
5) Takashi Matsuyama, Shinsaku Hiura, Toshikazu Wada, Kentaro Murase, Akio Yoshioka: “Dynamic Memory: Architecture for Real Time Integration of Visual Perception, Camera Action, and Network Communication”, In *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2000)*, **02**, pp.728–735, IEEE Computer Society (2000)
6) 満上育久, 浮田宗伯, 木戸出正継: “投影中心固定型パンチルトプロジェクタとキャリブレーション”, 信学論 D, **J90-D**, 11, pp.3065–3078 (2007)
7) Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi: “Autocalibration of an ad hoc construction of multi-projector displays”, In *Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams2006)*, IEEE Computer Society Press (2006)
8) Ruigang Yang, David Gotz, Justin Hensley, Herman Towles, Michael S. Brown: “Pixelflex: a reconfigurable multi-projector display system”, In *Proc. the conference on Visualization ’01*, pp.167–174, IEEE Computer Society (2001)
9) 井口征士, 佐藤宏介: “三次元画像計測”, 昭晃堂, pp.80–91 (1990)

満上　育久（みつがみ　いくひさ）2001 年，京都大学工学部電気電子工学科卒業．2007 年，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了．同年，京都大学学術情報メディアセンター研究員（科学技術振興）．コンピュータビジョン，対象抽出・追跡，プロジェクタによる実環境視覚情報提示に関する研究に従事．博士（工学）．

浮田　宗伯（うきた　のりみち）2001 年，京都大学大学院博士後期課程修了．同年，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手．2007 年同准教授．2002 年〜2006 年まで，科学技術振興機構さきがけ研究員兼任．現在，カーネギーメロン大学客員研究員兼任．博士（情報学）．コンピュータビジョン，分散協調視覚，対象追跡に関する研究に従事．

木戸出正継（きどでまさつぐ）1970 年，京都大学大学院修了．同年，東京芝浦電気（現，東芝）総合研究所入社．東芝アメリカ社を経て，2001 年，奈良先端科学技術大学院大学教授．京都大学工学博士．パターン認識，コンピュータビジョンに関する研究に従事．