

複数台首振りプロジェクタによる連続移動画像投影

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

複数台の電動プロジェクタを滑らかに首振りさせながら連続投影する際、それら複数の投影像を常にズレなく正確に並べたり重ね合わせることを目的とする。本論ではまず、各プロジェクタの外部キャリブレーションを行った上でも生じてしまう複数投影画像間の微小な位置ズレの補正を行う。また、ネットワーク接続された複数台のプロジェクタ投影画像を同期して移動しているように表示する手法についても述べる。

Displaying a Moving Image By Multiple Steerable Projectors

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

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

This paper proposes a method for precise overlapping of projected images from multiple steerable projectors, even while they are rotating so as that the images are moving on a plane in the environment. The method eliminates slight misalignments that still exist after an extrinsic calibration of each projector. In addition, the method contains synchronization of multiple projectors connected to a network.

1 はじめに

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, 2, 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 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、その投影像の位置・形状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、そのような首振り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。以上より、本論では複数台の首振りプロジェクタを用いた実環境視覚情報提示システムについて論じる。これが実現されると、建物内の廊下環境など首振りプロジェクタを複数配置しておき、床や壁に画像を表示しユーザの移動に追従して目的地を案内するナビゲーションシステムや、黒板やスライドの位置やサイズを自由にコントロールできる講義システムなどに応用できる。

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。そのためには、首振りプロジェクタの内部・外部キャリブレーションを行い、その上で、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の首振りプロジェクタの適切な姿勢制御、およびその姿勢に応じて適切に歪ませたプロジェクタ入力画像生成を行わなければならない。文献 [4, 5] では単体の首振りプロジェクタの内部・外部キャリブレーションを

行い、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。首振りプロジェクタを環境中に複数台設置した場合でも、環境中に共通の座標系を設定して外部キャリブレーションを行っておけば、複数の投影画像の重ね合わせや連結などは容易に実現できる。しかし、このように複数の投影画像を同時に表示する際には、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ズレとしてユーザに明確に観測されてしまう。このような個々のプロジェクタのキャリブレーションレベルでは解消しきれない複数投影画像間の微細なズレを解消し、任意の位置でズレのない視覚情報表示を行うことが本論の目的のひとつである。

また、本論では複数台の同期についても論じる。投影する画像が投影面上を連続的に移動する画像や動画などの場合、単に各投影画像が正確な位置・形状に表示されるだけでなく、それらが時間的に同期して表示されていなければ、位置の不一致や画像内容の不一致が起こる。本論では、各首振りプロジェクタが独立のPCによって制御され、それらのPC間をネットワーク接続されるような構成を考え、そのような環境において、投影画像の同期を実現する手法について述べる。

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・位置ズレを事前にカメラで観測しておき、その情報をもとに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細なズレ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、一般に実環境中には多数の平面領域があり、それらをすべて投影面として利用したい場合はこの手法では

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、ズーム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。すなわち、このようなカメラを用いた絶対位置計測に基づくキャリブレーションは、その精度を保証するのが困難である。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ズレ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細な位置ズレのみをパン・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首振り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、微細なズレ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大きなメリットである。

投影画像間の微小なズレは以下の2つの要因による。

1. 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

もしズレの要因が(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ズレ量を観測・保持しておけば、この投影面を完全な平面と仮定をおき、任意位置におけるズレ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ズレを観測してズレ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。このすれ量マップは事前のキャリブレーションの一部として行われるため、実利用時のズレの観測は不要なため、動作の高速性の点でも優れているといえる。

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中心とパン・チルト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。我々が実装したFC-PTプロジェクタを図1に示す。このような特殊な構造を持つ首振りプロジェクタとすることで、その構造モデルのパラメータ数が減少し、安定したモデルパラメータ推定が可能となる。また、特に投影対象が実環境中の平面である場合には容易で正確な外部キャリブレーションを行うことができるという利点も持つ。

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、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よって行われる。この手法では平面上の微小な凹凸に影響を受けず、また投影面領域の端から端までの情報を利用しており基線の長い三角測量を行うことに相当するため、安定な外部キャリブレーションを実現できる。また、このキャリブレーション法は、1) 作業が容易、2) 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。

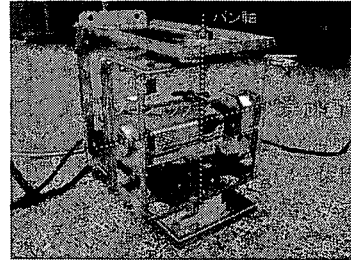


図 1: FC-PT プロジェクタ

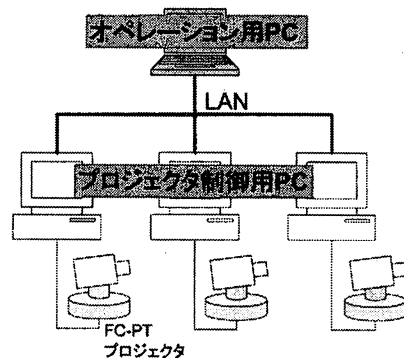


図 2: システム構成

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、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よって行われる。この手法では平面上の微小な凹凸に影響を受けず、また投影面領域の端から端までの情報を利用しており基線の長い三角測量を行うことに相当するため、安定な外部キャリブレーションを実現できる。また、このキャリブレーション法は、1) 作業が容易、2) 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 システム構成

本論で想定するアプリケーションでは、プロジェクタの台数は環境の広さや形状に応じた任意数で、また各プロジェクタ間は数m～数十mの距離があるため、文献[6]のシステムのように複数台のプロジェクタを1台のPCに接続するような構成は現実的でない。よって、図2に示すように、各FC-PT

プロジェクタは個別の PC によって制御され（プロジェクタ制御用 PC）、それらがネットワーク接続される構成となる。ネットワークには、画像の情報を管理するオペレーション用 PC も接続されており、画像の位置や形状などの情報を各プロジェクタ制御用 PC に送信する。システムの規模が大きくなると、この構成を階層化させるなどの対策が必要となるが、ここでは、このような単純なクライアント・サーバ型のネットワーク構造をとることとする。

5 複数静止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ズレ量観測によるズレ量マップの生成
3. ズレ量マップを利用した投影面上任意位置でのズレ補正

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。

5.1 各 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーション

まず、3 節で述べた方法で各 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションを行う。各プロジェクタに関して、共通の投影面座標系を用いていれば、各プロジェクタからの投影画像は理論上一致する。しかし実際には、図 3 のように、微小な位置ズレが発生する。

5.2 ズレの観測とズレ量マップの生成

5.1 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ズレは、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ズレの傾向をズレ量マップとして事前に取得しておくことで、以後の投影時にズレ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、事前の位置ズレ観測は投影面上全体にわたって密に行われなけれ

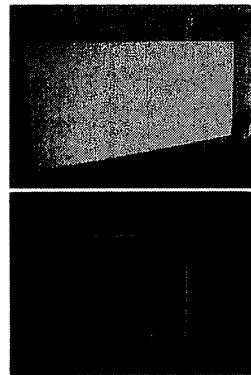


図 3: 各 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションのみによる複数台投影

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ズレはその周辺部における位置ズレと類似すると考えることができる。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ズレ $v_{i,j}$ を計測、保持する。この $v_{i,j}$ をズレ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、位置ズレ補正量はその周辺の $S_{i,j}$ におけるズレ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 プロジェクタから格子パターンを投影する。本論では 3×3 個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 4(a) は、観測される格子パターン投影の一例である。プロジェクタが 2 台の場合は、図のように格子パターンの色を変えておくことで複数の格子パター

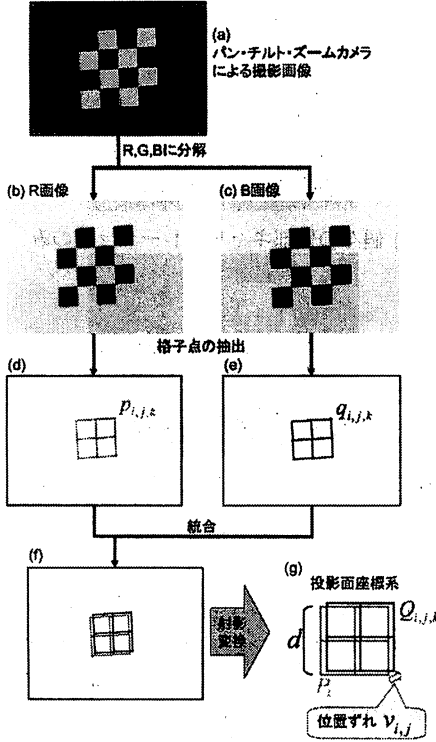


図 4: サンプル座標における複数プロジェクタからの格子パターン投影とその観測

ンを同時に検出し (図 4(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 4(d)(e)). さらに多くのプロジェクタを使用する場合は, カメラを静止させたまま各プロジェクタ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 $q_{i,j,k}$ のズレ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

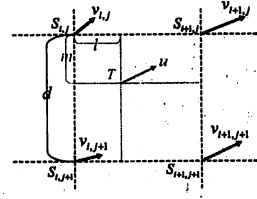


図 5: 線形補間による任意位置でのズレ補正

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, 位置ズレを平行移動に限定して考える. よって, $S_{i,j}$ におけるズレ $v_{i,j}$ 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.

5.3 ズレ量マップを用いたズレ補正

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

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

ただし, i, j は以下を満たす最大の整数値である.

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

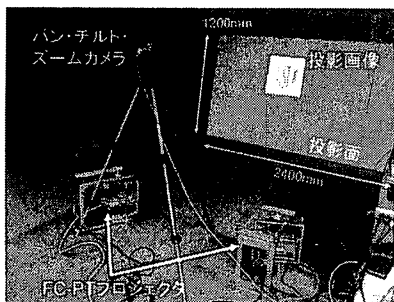


図 6: 使用した環境

プロジェクタ (PLUS VISION 社 V3-131)	
投影方式	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
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

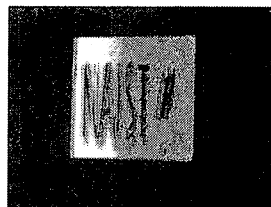
表 2: パン・チルト・ズームカメラ

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。

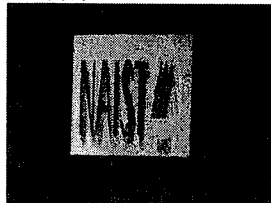
5.4 投影結果と評価

図6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、ズレ量マップ作成時のサンプル座標の間隔は100mm とした。

本論のズレ補正手法の有効性を確認するために、



(a) 個々の外部キャリブレーションのみ



(b) ズレ量マップを用いたズレ補正適用後

図 7: ズレ補正の効果

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、そこにさらにズレ補正を適用した場合とを比較した。結果を図7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ことで(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8に、各プロジェクタの姿勢を変化させ、投影面上の他の位置での投影画像重ね合わせ結果を示す。これより、プロジェクタが特定の姿勢をとるときだけではなく、任意の姿勢であっても位置ズレを補正できてい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9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、その連結部でズレや乖離がない自然な画像表示が実現できている。一方、図10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

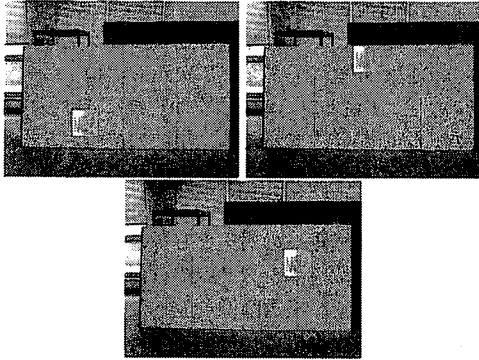


図 8: 任意位置での 2 投影像の重ね合わせ

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 複数台プロジェクタの同期投影

6.1 ネットワークを介した複数台プロジェクタの同期手法

投影面上で静止した画像を表示する場合、5 章で述べた手法によって、任意の位置でズレのない画像表示が実現できる。しかし、表示したい画像が投影面上を連続的に移動する画像や動画画像の場合、単に各投影画像が正確な位置・形状にズレ無く表示されるだけでなく、それらが時間的に同期して表示されていなければ、位置の不一致や画像内容の不一致が起こる。4 章のようなシステム構成では、オペレーション用 PC が発生させた位置・形状パラメータの連続系列をサンプリングし離散的に送信した位置・形状を情報をプロジェクタ制御用 PC が受け取り、適切な姿勢および入力画像を算出し投影するので、この過程で次のような遅延が発生する。

1. ネットワーク伝送遅延
2. 入力画像生成による遅延

前者はネットワークの帯域や伝送距離などによって変化し、後者は PC の処理速度や画像サイズに影響を受けるため、この遅延は、各プロジェクタ制御用 PC 間で一定とならず、その結果、時間同期の取れていない画像表示となる。

そこで本論では、オペレーション用 PC が送る情報の中にタイムスタンプを埋め込み送信する。各

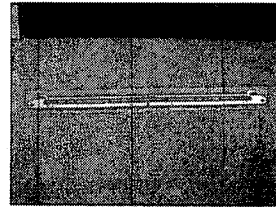
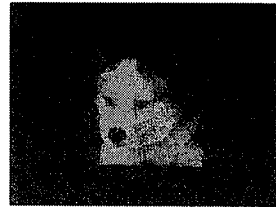


図 9: 1 台のプロジェクタで表示できない大きな画像表示



(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 10: 投影画像の重ね合わせによる画像の鮮明化

プロジェクタ制御用 PC 側は、その情報を受け取り、元の位置・形状パラメータの連続系列を復元する。ここでネットワーク上の全 PC について NTP によって時刻同期をとっておくと、各プロジェクタ制御用 PC はオペレーション用 PC が発生させた連続系列と同期の取れた連続系列を持つことになる。ここで、直前フレームにおいて画像生成に要した時間やプロジェクタの姿勢変化情報などを考慮し、新しいフレームが表示されるだろう時刻に対応する入力画像を算出する。これによって、画像の位置・形状および時刻が正確な複数画像投影が実現できる。

6.2 投影結果

5.4 節と同じ実験環境を使用し、複数台の同期を確認する実験を行った。図 11 に動作結果を示す。2 台の FC-PT プロジェクタを用いて車の画像を円運動させている例である。この手法では、各プロ

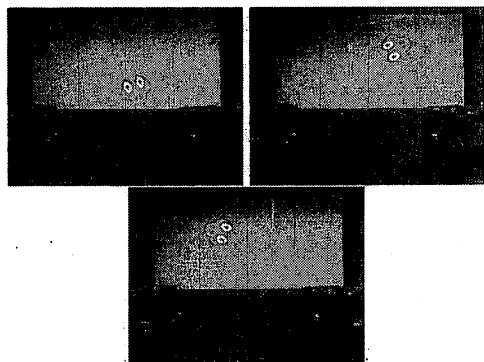


図 11: 2 台の FC-PT プロジェクタを用いた連続移動画像投影

ジェクタのフレーム更新タイミングが同期しているわけではないが、各プロジェクタが同期のとれた位置・形状のパラメータ連続系列に対して正確に高フレームレートで画像表示を行っているため、非常になめらか（フレームレート約 60 fps）でズレのない連続移動画像表示を実現している。

7 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。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ズレ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、各プロジェクタ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ズレをパン・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。またネットワーク接続された複数台のプロジェクタで時間的に同期のとれた画像表示を実現するための同期手法についても述べた。これによって、連続的に移動する画像も複数台でズレ無く表示す

ることが可能となった。

今後の課題として、連続移動する 3 次元形状物体への投影が挙げられる。3 次元形状物体への投影の場合、1 台のプロジェクタからだけでは投影できない箇所が発生するため、複数の位置から投影することが必須となり、より複数台のプロジェクタを用いることのメリットを活かせる状況である。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の検討も課題のひとつである。また、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など、光学的な問題についても検討する必要がある。

参考文献

- [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.