

投影中心固定型パンチルトプロジェクタを用いた複数面投影

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 〒 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 プロジェクタの投影中心と回転台の回転中心が空間的に一致するように配置された投影中心固定型パンチルトプロジェクタ (Fixed-Center Pan-Tilt projector; FC-PT プロジェクタ) を提案する。この機構によりユーザは、プロジェクタを環境に設置し、事前にその 2 次元の形状を計測済みの平面についてその各頂点の方向を与えるという簡単な作業を行うだけで、実環境中の平面に歪みの無い画像情報を正確に描画することが可能となる。さらに、FC-PT プロジェクタでは、環境中の複数の平面間の連結関係を認識し、2 平面間の境界部に対しても、まるで紙のポスターがその 2 平面の折れ曲がりに沿って貼られているような描画を行うことも可能である。

キーワード 回転式プロジェクタ, キャリブレーション, ホモグラフィ, 歪み補正

Multi-Planar Projection by Fixed-Center Pan-Tilt Projectors

Ikuhisa MITSUGAMI[†], Norimichi UKITA^{†,††}, and Masatsugu KIDODE[†]

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

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

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

Abstract We describe a new steerable projector, whose projection center precisely corresponds with its rotation center, which we call a “Fixed-Center Pan-Tilt (FC-PT) projector.” This mechanism allows it be settled more easily to display graphics precisely on the planes in the environment than for other steerable projectors; wherever we would like to display graphics, all we have to do are locating the FC-PT projector in the environment, and directing it to the corners of the planes whose 2D sizes have been measured. Moreover, as the FC-PT projector can recognize automatically whether each plane is connected to others, it can display visual information that lies across the boundary line of two planes in a similar way to a paper poster folded along the planes.

Key words steerable projector, calibration methods, homography, undistortion

1. はじめに

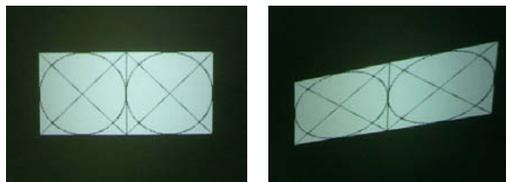
近年、ヒューマンインタフェース、ユビキタスコンピューティング、コンピュータビジョンなど多くの研究領域において、実環境中の任意の場所に視覚情報を提示する手法が注目され、多種多様なデバイスや手法の提案が行われている。そしてその多くは、環境据え置き型・埋め込み型のディスプレイやヘッドマウント型ディスプレイなどといったディスプレイデバイスを用いるものである。これらのデバイスは近年、より薄く、小さく、軽くなっており、日常生活の中で使用される機会が増加していくことが期待される。しかし、これらディスプレイデバイスにはいくつか欠点がある。据え置き型・埋め込み型のディスプレイの場合、その描画可能な領域はそのディスプレイ内に限定さ

れるため、環境中に広く描画を行いたい場合は多数のディスプレイを環境中に設置しなければならず、そのコストは一般に非常に大きい。また、ヘッドマウント型のディスプレイの場合、ユーザがデバイスを着用しておりユーザの視野内に常に描画を行うことができるため、使用場所を問わないという利点を持つが、実際に環境中に適切に視覚情報を提示するためには、その環境の 3 次元形状やヘッドマウントディスプレイ自体の位置・姿勢をリアルタイムかつ正確に計測しなければならない。そのような計測は困難で、そのため実現は非常に難しい。

一方、他の視覚情報提示法として、プロジェクタを用いる方法が挙げられる。プロジェクタを用いる手法は上述の手法と比較して次のような利点を持つ。

- 環境埋め込み型のディスプレイと比較して設置が簡単で、既に構築済みの環境に後から設置することも容易である。
- 視覚情報が実環境上に描画されるため、ユーザが観察し

^{††} 科学技術振興機構さきがけプログラム (PRESTO, JST)



(歪みの無い描画図形) (歪んだ描画図形)

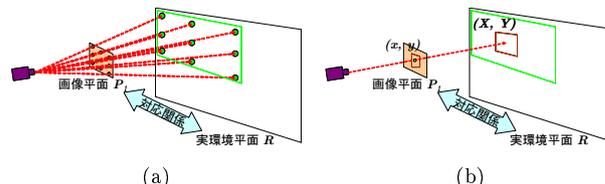
図 1 描画図形の歪み

やすい。ヘッドマウントディスプレイでは実環境中に視覚情報を仮想的に描画するが、その実体はユーザの眼のそばのディスプレイ上にあるため、違和感や疲労の原因となり長時間使用に向かない。

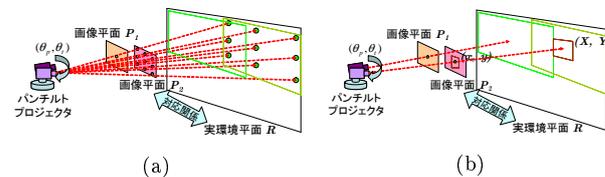
これらの利点に加えて、プロジェクタが回転しその向きを変化させることが可能となれば、1台のプロジェクタでより広い領域に対して描画が可能となる。さらにそのようなプロジェクタを環境中に複数台配置することによって、環境中の任意の場所への描画や、一台のプロジェクタでは描画不可能な大きな視覚情報の描画なども可能となる。

しかし、単にプロジェクタに回転機構を設けただけでは、描画される図形は、図 1 に示すようにプロジェクタと投影面の相対的な姿勢に応じて歪んでしまう。投影面上に歪みのない図形を描画するためには、プロジェクタに、その姿勢に応じて逆に歪ませておいた図形画像を入力して投影しなければならない。したがって、その姿勢が連続的に変化する回転式プロジェクタの場合、歪みの無い図形描画を実現するためには、その姿勢に応じた入力画像を実時間で生成する必要がある。本論で提案している回転式プロジェクタは、その投影中心が回転機構の回転中心と空間的に一致するように設計されている。このようなプロジェクタを投影中心固定型パンチルトプロジェクタ (FC-PT プロジェクタ^(注1)) と呼ぶこととする。この独特な機構により、プロジェクタの姿勢に応じた適切なプロジェクタ入力画像生成が、他の回転式プロジェクタと比較して容易となる。これについては 2. 章で述べる。続く 3. 章では、この FC-PT プロジェクタのキャリブレーション方法について述べる。各 FC-PT プロジェクタに対して、このキャリブレーションを事前に一度行っておくと、実利用時には FC-PT プロジェクタを環境に任意に設置し、2 次元的な形状が既知である実環境平面の各頂点の方向を与えておくだけで、以後平面上の任意の位置へ任意の形状の図形を歪み無く描画できる。この手法については 4. 章で述べる。この手法は環境中の複数の平面に対しても適用できる。4. 章で説明するプロセスを環境中のそれぞれの平面に対して行うことで描画が可能となる。さらに、本論ではこの手法を発展させ、それら環境中平面それぞれの頂点の方向情報から各平面間の連結関係を認識し各平面の 2 次元座標系間の変換式を算出している。このため、各平面上のみならず、2 平面の境界部に対しても、まるでそこに紙のポスターが折り曲げられて貼られているような視覚効果を持つ描画を行うことも可能である。この手法の詳細は 5. 章で述べる。

(注1): Fixed-Center Pan-Tilt Projector の略。



(a) (b)
図 2 固定式プロジェクタによる投影



(a) (b)
図 3 パンチルトプロジェクタによる投影

関連研究として以下のものが挙げられる。Raskar 等は [1] でカメラとプロジェクタからなるハンドヘルド型のプロジェクタを提案している。このプロジェクタは、ユーザが描画したい任意の場所へ歪み無い図形を描画することができるが、描画位置を変更するたびにプロジェクタから既知のパターンを投影しカメラによって観測するというプロセスが必要となる。Pinhanez 等は [2] で回転式のプロジェクタを提案している。しかし、このプロジェクタは投影中心が回転中心と一致していないために、やはり描画を行いたい各平面に対して、事前に既知パターンを投影しカメラで観測する、というプロセスを要する。Ashdown 等は [3] 環境中の複数平面への描画に関する研究を行っているが、ここで用いられているプロジェクタは固定式のため、描画可能な領域は非常に限定される。

2. FC-PT プロジェクタの利点

2.1 通常の固定式プロジェクタ

通常のプロジェクタの場合、プロジェクタへの入力画像と同じ図形を歪み無く実環境平面に描画するためには、プロジェクタが実環境平面に対して垂直に設置されていなければならない。この条件を満たさない場合、描画される画像は、プロジェクタと実環境平面の相対的な位置・姿勢に応じて、歪んでしまう。また、描画される画像の大きさはプロジェクタと実環境平面の距離によって変化する。そのため、投影面上に指定した位置に指定した大きさ・形状の画像を描画するためには、事前にプロジェクタの画像平面 P_1 と実環境平面 R の座標間の関係を取得し、 R 上で指定される画像の座標情報から P_1 上の座標情報を求め、それによって生成された画像をプロジェクタに入力するという処理を行わなければならない。そしてこの座標間の関係を求めるためには、格子点群などの既知のパターンを画像平面 P_1 に生成、すなわちプロジェクタに入力し、実環境平面 R に描画されたそれらの点群の位置を計測する (図 2(a))。これらの座標は自由度 8 の 3×3 のホモグラフィ行列で規定される [6] ため、4 点以上の点群を用いることによってこの関係を算出することができる。一度この関係が算出されれば、プロジェクタの投影可能な範囲内で実環境平面上に所望の画像を描画できる (図 2(b))。

2.2 パンチルトプロジェクタ

固定式のプロジェクタの場合、投影可能な領域が固定される

ため、環境中の非常に限られた場所にしか描画することができないが、プロジェクタを回転雲台に搭載し電動で制御することでより広範囲への描画を行うことが可能となる。このような電動回転機構を持つプロジェクタを「パンチルトプロジェクタ」と呼ぶ。ここでは、このパンチルトプロジェクタを用いて、環境中に歪みのない画像を描画する方法を考える。

2.2.1 平面座標間の関係を利用する方法

ある1つの姿勢については、2.1節の方法によって画像平面 P_1 と実環境平面 R との関係を出算することによって所望の描画が可能となる。次に、図3に示すように、プロジェクタが姿勢を変え画像平面が P_1 から P_2 に変化した場合を考える。ここでも先ほどの姿勢と同様に画像平面 P_2 と実環境平面 R の平面座標間関係を用いて描画を行うためには、 P_2 と R の関係を出算する必要がある(図3(a))。そのため、元の姿勢において行った作業をこの姿勢においても改めて行わなければならない。プロジェクタの姿勢をさらに複数変化させながらこの作業を反復して行えば、最終的に R 上の任意の位置に歪み無い図形を描画できる(図3(b))。

この方法では各姿勢におけるプロジェクタ画像平面座標と実環境平面の直接的な関係を用いているため、描画図形の位置・形状の精度は高い。しかし、その作業は非常に煩雑なものとなり、また、プロジェクタは既知パターン投影を行った姿勢以外の任意の姿勢をとることができないため、投影面上を連続的に移動するような図形を途切れなく描画することができないという欠点を持つ。

2.2.2 パンチルトプロジェクタのモデルを出算する方法

一方、プロジェクタの画像平面座標と実環境平面座標の関係を直接的に用いない方法も考えられる。各姿勢におけるプロジェクタの位置・姿勢を出算し、パンチルトプロジェクタの3次元構造の数理モデルを出算しておく方法である。なお、ここでのプロジェクタ位置とは、その投影中心の位置である。一般にパン・チルトの回転機構を持つプロジェクタはその投影中心と回転中心の位置が一致しないため、回転中心位置がプロジェクタの姿勢に無関係に静止するのに対して投影中心位置はプロジェクタの姿勢によって変化する。パンチルトプロジェクタのモデル化とは、プロジェクタの任意姿勢における投影中心位置を得るためにプロジェクタ姿勢と投影中心位置の関係を算出することであり、プロジェクタからの既知パターンを投影結果観測による投影中心位置推定を2姿勢以上で行うことによってモデル化が可能である。

この方法では、一度モデルを出算しておけば、以後任意の姿勢での投影が可能となり、連続的に移動する図形描画も可能である。さらに、このモデルは設置位置に無関係に不変なので、プロジェクタを任意の位置に設置し、ある姿勢で一度だけプロジェクタ位置の算出を行っておけば、モデルを元に任意の姿勢において所望の描画を行うことが可能である。しかし、このモデルの精度は、それぞれの姿勢における投影中心位置推定の精度に大きく依存する。そして、既知パターン投影などコンピュータビジョンによる手法での投影中心位置推定を行った場合、数 mm 程度の誤差は避けられず、結果として、モデル自体

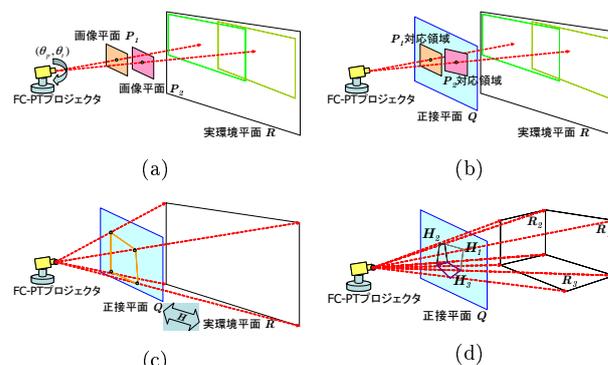


図4 FC-PT プロジェクタによる投影

も数 mm 程度の誤差を持ってしまい、描画の位置や形状の精度にも影響を及ぼしてしまうことが欠点である。

2.3 FC-PT プロジェクタ

パンチルトプロジェクタによる描画は任意の姿勢において行うことができることが望ましい。しかし、2.2節で述べたように、通常のパンチルトプロジェクタでは任意姿勢描画に対応するには投影中心と回転中心の相対位置情報を持つモデルを出算しておく必要があり、そしてこのモデルに数 mm 程度の誤差を含んでしまうことが問題であった。そこで本論では、コンピュータビジョンの方法で投影中心位置推定を行わずに済むよう、事前に投影中心が回転中心の位置を空間的に一致させてあるパンチルトプロジェクタ、FC-PT プロジェクタを提案している。この FC-PT 機構は、カメラの光学中心と回転中心を一致させた回転式カメラ FV-PTZ カメラ [4] と類似した機構である。FC-PT プロジェクタにおいて、投影中心と回転中心の位置あわせはコンピュータビジョン的な方法ではなく [5] に示す光学的な方法によって 1mm 以内の精度で行われている。そのため、通常パンチルトプロジェクタのモデル化の際に生じる誤差を回避できる。そのうえ、FC-PT プロジェクタは通常のパンチルトプロジェクタと比較してモデル自体が単純化されるため、描画のための演算も非常に簡単化される。本節では、この FC-PT プロジェクタを用いることによるこれら利点を概念的に示す。

FC-PT プロジェクタでは、その投影中心の空間的な位置が姿勢変化によって移動しない(図4(a))ため、任意姿勢における画像平面を統合する正接平面なる平面を導入することができる(図4(b))。任意姿勢における画像平面はすべてこの正接平面に投影され、その投影された領域(「投影可能領域」と呼ぶ)およびその領域と画像平面との関係を得ることができる。その結果、任意姿勢における画像平面を、正接平面上の投影可能領域として扱うことができる。この計算を FC-PT プロジェクタのキャリブレーションと呼び、その詳細については、3.章で述べる。

FC-PT プロジェクタのキャリブレーションを行った後、次に行わなければならないのは、正接平面と実環境平面との関係を取得することである。正接平面はプロジェクタの姿勢に関わらず不変であり、またこれは射影幾何における2平面間関係であるので、4点の対応関係によって算出が可能である。通常、

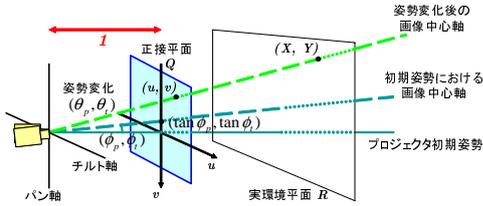


図5 正接平面の定義

この4点として平面の頂点を用い、対応関係を算出する(図4(c))。さらにこの計算は、壁面・床面・天井面などといった環境中の複数の平面に対しても行うことができる(図4(d))。

3. FC-PT プロジェクタのキャリブレーション

ここでは、FC-PT プロジェクタのキャリブレーションに用いる仮定の平面として、「正接平面」を導入する。正接平面は、図5に示すように、FC-PT プロジェクタの前方にあり、初期姿勢のパン軸・チルト軸によって定まる平面に平行な平面である。また、FC-PT プロジェクタの投影中心と正接平面の距離は便宜上1と定める。この定義より、正接平面はFC-PT プロジェクタの姿勢変化によらず不変であることが分かる。この章では、FC-PT プロジェクタの任意の姿勢における画像平面が、この正接平面上で容易に取り扱うことができることを述べる。

まず、FC-PT プロジェクタを初期姿勢 $\theta_p = \theta_t = 0$ をとるよう制御する。 θ_p および θ_t はそれぞれ雲台のパン・チルト方向の回転角である。この姿勢で、画像座標における座標値が既知である格子点群 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, 3, \dots$) をプロジェクタから投影し、実環境平面 R に描画された点群 (X_i, Y_i) を得る。ここで、これらの座標間には以下の関係が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = H_{PR} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 H_{PR} は 3×3 行列であり、一般にホモグラフィ行列として知られている[6]。この行列 H_{PR} は定数倍の不定性を持つためその自由度は8であり、対応する (x_i, y_i) と (X_i, Y_i) を4組以上用いて線形演算によって求めることができる。(注2)

次に、今度は画像平面の中央の点(「画像中央点」と呼ぶ)のみを R に投影を行う。このとき、この画像中央点を描画している投影光の方向を「画像中央軸」と呼ぶ。通常のプロジェクタの場合、図5に示すように画像中央軸はプロジェクタの物理的な姿勢とは異なった方向に向いていることが多く、画像中央軸と正接平面の交点 (u_c, v_c) は $(0, 0)$ とならず、画像中央軸とプロジェクタ姿勢のずれ角 (ϕ_p, ϕ_t) を用いて $(\tan \phi_p, \tan \phi_t)$ と表される。したがって、この後FC-PT プロジェクタを回転させ、異なる姿勢 (θ_p, θ_t) をとった際の、画像中央軸と正接平面の交点 (u, v) は次のようになる。

(注2): 実環境平面 R 上の座標 (X_i, Y_i) を計測するには、カメラを用いる。カメラによって観測される画像は Tsai の手法[7]によって歪み補正しておき、 R 上にはその座標が既知である点を4つ用意しておく。投影される各格子点座標を観測する際に、それらの点とこの既知の4点を同時に撮影することにより (X_i, Y_i) を算出することが可能である。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \lambda u \\ \lambda v \\ \lambda \end{pmatrix} = Rot_{(y, \theta_p)} Rot_{(x, \theta_t)} \begin{pmatrix} \tan \phi_p \\ \tan \phi_t \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$Rot_{(w, \theta)}$ は3次元座標の回転行列であり、 w 軸の周りに θ 回転させることを表す。また“ \sim ”は同次座標系における同値を表す。この後さらに別の複数のプロジェクタ姿勢に対して同様の作業を行い、プロジェクタ姿勢 $(\theta_{pi'}, \theta_{ti'})$ ($i' = 1, 2, 3, \dots$) とそれぞれ姿勢において画像中央点の R 上の投影結果 $(X_{i'}, Y_{i'})$ を計測する。(注3)そして、得られたプロジェクタ姿勢 $(\theta_{pi'}, \theta_{ti'})$ と式(2)より、それぞれの姿勢における画像中央軸と正接平面との交点 $(u_{i'}, v_{i'})$ を算出する。ここで、FC-PT プロジェクタの投影中心は不変なので、正接平面上の座標 $(u_{i'}, v_{i'})$ と実環境平面 R 上の座標 $(X_{i'}, Y_{i'})$ は透視投影の関係が成立し、式(1)と同様の次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(1)と同様に、対応する $(u_{i'}, v_{i'})$ と $(X_{i'}, Y_{i'})$ の組が4組以上得られれば、行列 H_{QR} を線形演算で求めることができる。

以上の作業の後、式(1),(3)により、次式が導かれる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR}^{-1} H_{PR} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = H_{PQ} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

P は初期姿勢における画像平面なので、画像平面の4頂点座標 $(\pm 1024/2, \pm 768/2)$ (XGA の場合) および画像中央点の座標 $(0, 0)$ を式(4)の (x, y) に代入することで、FC-PT プロジェクタの投影中心それらの点への方向 $(u_j^{(init)}, v_j^{(init)})$ ($j = 1, \dots, 4$), $(u_c^{(init)}, v_c^{(init)})$ を導出することができる。そして、この $(u_j^{(init)}, v_j^{(init)})$ は正接平面上における初期姿勢の投影可能領域を表し、 $(u_c^{(init)}, v_c^{(init)})$ は初期姿勢の画像中央軸の方向を表す。

FC-PT プロジェクタの姿勢変化は、3次元ベクトル $(u_j, v_j, 1)^T$ および $(u_c, v_c, 1)^T$ の回転として表現できるため、上述のプロセスで初期姿勢における投影可能領域 $(u_j^{(init)}, v_j^{(init)})$ および画像中央軸方向 $(u_c^{(init)}, v_c^{(init)})$ が得られれば、任意の姿勢における投影可能領域および画像中央点も容易に算出することが可能となる。

ここでは一例として、新たな画像中央軸方向が $(u_c^{(new)}, v_c^{(new)})$ となるようなプロジェクタ姿勢をとるときの、正接平面上の投影可能領域 $(u_j^{(new)}, v_j^{(new)})$ を導出する方法を以下に示す。

画像中央軸方向が $(u_c^{(new)}, v_c^{(new)})$ となると、FC-PT プロジェクタの姿勢 $(u_o^{(new)}, v_o^{(new)})$ は以下のように求められる。

$$\begin{pmatrix} u_o^{(new)} \\ v_o^{(new)} \\ 1 \end{pmatrix} \sim Rot_{(y, -\phi_p)} Rot_{(x, -\phi_t)} \begin{pmatrix} u_c^{(new)} \\ v_c^{(new)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

(注3): ここでも先と同様に、カメラによる観測によって (X_i, Y_i) を計測する。

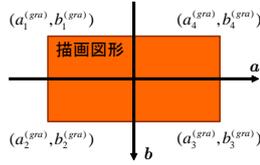


図 6 描画図形の座標

一方、この姿勢 $(u_o^{(new)}, v_o^{(new)})$ は、FC-PT プロジェクタのパン軸・チルト軸の周りの回転角 $(\theta_p^{(new)}, \theta_t^{(new)})$ を用いると以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} u_o^{(new)} \\ v_o^{(new)} \\ 1 \end{pmatrix} \sim Rot_{(y, \theta_p^{(new)})} Rot_{(x, \theta_t^{(new)})} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_p^{(new)} \cos \theta_t^{(new)} \\ -\sin \theta_t^{(new)} \\ \cos \theta_p^{(new)} \cos \theta_t^{(new)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

これより、FC-PT プロジェクタの回転角 $(\theta_p^{(new)}, \theta_t^{(new)})$ は以下のように求められる。

$$\theta_p^{(new)} = \tan^{-1} u_o^{(new)} \quad (7)$$

$$\theta_t^{(new)} = -\tan^{-1}(v_o^{(new)} \cos \theta_p^{(new)}) \quad (8)$$

$(\theta_p^{(new)}, \theta_t^{(new)})$ が得られれば、この姿勢における投影可能領域は次式のように容易に求めることができる。

$$\begin{pmatrix} u_j^{(new)} \\ v_j^{(new)} \\ 1 \end{pmatrix} \sim Rot_{(y, \theta_p^{(new)})} Rot_{(x, \theta_t^{(new)})} \begin{pmatrix} u_j^{(init)} \\ v_j^{(init)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

4. 1 平面への投影

FC-PT プロジェクタをキャリブレーションした後、実環境平面 R_1 に適切に描画を行うためには、 R_1 と正接平面 Q の関係を取得する必要がある。この関係はやはりホモグラフィ行列 H_{QR1} の形で記述されるため、式 (2)、(3) と 4 組の対応点から線形に算出することができる。そこで、画像平面の画像中央点が平面 R_1 の 4 頂点に投影されるように FC-PT プロジェクタを姿勢を手動で制御し、それぞれの頂点に対する姿勢情報を保持しておく。なお、このとき R_1 の 2 次元座標系における 4 頂点の座標は事前に得られているものとする^(注4)。この作業によって正接平面 Q と実環境平面 R_1 の対応関係を取得でき、この作業のことを「平面の登録」と呼ぶ。

ここでは、FC-PT プロジェクタによって実環境平面 R_1 の指定位置に指定形状を歪み無く描画するための処理を示す。ここでは例題として、実環境中における大きさ・形状を指定された矩形の図形を描画について説明する。なお、この図形は図 6 に示すようなメトリック座標系で記述されており、その 4 頂点は $(a_k^{(gra)}, b_k^{(gra)}) (k = 1, \dots, 4)$ で与えられるものとする。こ

のような図形を正確に描画するためには、図 7 に示すように、FC-PT プロジェクタが姿勢 (θ'_p, θ'_t) をとる際にその姿勢において投影するプロジェクタ画像中の 4 頂点 $(x_k^{(ans)}, y_k^{(ans)})$ を算出できなければならない。これは、 H_{QR1} が得られていれば、以下のプロセスによって実現される。

まず、FC-PT プロジェクタが (θ'_p, θ'_t) という姿勢をとるとき、式 (2) によって、その姿勢における画像中央軸と正接平面の交点 (u_c, v_c) を算出することができる。得られた (u_c, v_c) を実環境平面 R_1 に投影した点（すなわち R_1 上における画像中央点の描画位置） (X_c, Y_c) は次式で求められる。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR1} \begin{pmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

この (X_c, Y_c) が中心となるように図形を描画しようとするとき、 R_1 上における図形の 4 頂点の座標は次式で得られる。

$$\begin{aligned} X_k^{(gra)} &= a_k^{(gra)} + X_c \\ Y_k^{(gra)} &= b_k^{(gra)} + Y_c \end{aligned} \quad (11)$$

続いて、これらの点を正接平面上に逆投影する。

$$\begin{pmatrix} u_k^{(gra)} \\ v_k^{(gra)} \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR1}^{-1} \begin{pmatrix} X_k^{(gra)} \\ Y_k^{(gra)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

一方、3. 章で述べたように、姿勢情報 (θ'_p, θ'_t) が得られたとき、その姿勢における正接平面上の投影可能領域は、式 (9) を用いて容易に求めることができる。

$$\begin{pmatrix} u_j^{(pro)} \\ v_j^{(pro)} \\ 1 \end{pmatrix} \sim Rot_{(y, \theta'_p)} Rot_{(x, \theta'_t)} \begin{pmatrix} u_j^{(init)} \\ v_j^{(init)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

式 (12)、(13) より、FC-PT プロジェクタの姿勢 (θ'_p, θ'_t) における投影可能領域および図形形状を、正接平面上で記述することができた。この結果を用いて、次はこの姿勢における画像平面 P' 内に生成すべき図形形状（すなわちプロジェクタに入力すべき入力画像）を算出する。得られた投影可能領域の 4 頂点 $(u_j^{(pro)}, v_j^{(pro)})$ は画像平面 P' の 4 頂点 $(\pm 1024/2, \pm 768/2)$ (XGA の場合) に対応するので、このことから、画像平面 P' と正接平面 Q に関するホモグラフィ行列 $H_{QP'}$ が算出できる。そして、この $H_{QP'}$ を正接平面上の図形の 4 頂点 $(u_k^{(gra)}, v_k^{(gra)})$ にも適用することで、プロジェクタに入力すべき画像中の図形の 4 頂点 $(x_k^{(ans)}, y_k^{(ans)})$ を決定することができる。

$$\begin{pmatrix} x_k^{(ans)} \\ y_k^{(ans)} \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QP'} \begin{pmatrix} u_k^{(gra)} \\ v_k^{(gra)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

5. 複数平面への投影

実際の環境中には、通常複数の平面領域が存在し、これらすべてに対して視覚情報を描画できることが望ましい。4. 章で述べた FC-PT プロジェクタによる投影手法は、複数平面へ拡張

(注4): この平面の 2 次元形状情報は、建築物内部の壁や床であれば設計図から取得することが可能である。

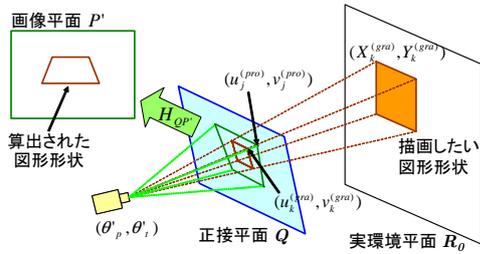


図7 実環境中の平面への投影プロセス

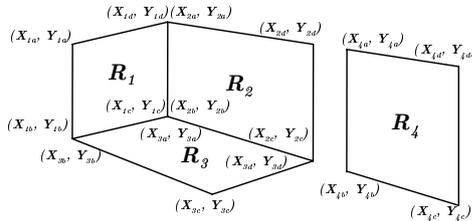


図8 実環境中の複数平面

表1 平面登録テーブル

Plane	(u, v)	(X, Y)
R ₁	(u _{1a} , v _{1a})	(X _{1a} , Y _{1a})
	(u _{1b} , v _{1b})	(X _{1b} , Y _{1b})
	(u _{1c} , v _{1c})	(X _{1c} , Y _{1c})
	(u _{1d} , v _{1d})	(X _{1d} , Y _{1d})
R ₂	(u _{2a} , v _{2a})	(X _{2a} , Y _{2a})
	(u _{2b} , v _{2b})	(X _{2b} , Y _{2b})
	(u _{2c} , v _{2c})	(X _{2c} , Y _{2c})
	(u _{2d} , v _{2d})	(X _{2d} , Y _{2d})
R ₃	(u _{3a} , v _{3a})	(X _{3a} , Y _{3a})
	(u _{3b} , v _{3b})	(X _{3b} , Y _{3b})

...

することも容易である。すなわち、この手法において平面の登録は、FC-PT プロジェクタから各平面の4頂点へ方向を与えることによって行われるため、平面が複数あった場合はこの作業をそれら全平面に対して行うだけでよい。しかし、各平面における2次元座標系は独立に設定されているため、このような手法では不十分である。なぜならば、FC-PT プロジェクタシステムは、これら複数平面間の連結関係、およびそれらの座標系間の関係を把握できないからである。その結果、FC-PT プロジェクタを2平面の境界部付近に向け2平面にまたがるような図形描画を行うことができない。この章では、このような問題を克服するための、複数平面に対応した手法を提案する。この提案手法によって、2平面の境界部付近に対しても、まるで紙のポスターが境界部の折れ曲がりによって貼られているような描画を行うことが可能となる。

5.1 複数面投影のための準備

例として、実環境中に図8に示すように、互いに連結した平面を含む4平面が存在する場合を考える。各平面はそれぞれ独立に任意のメトリックな2次元座標系を持ち、図8中の平面R₁上の座標系(X₁, Y₁)は他の平面上の座標系(X_l, Y_l) (l = 2, 3, 4)とは互いに独立である。各平面の登録は、FC-PT プロジェクタの画像中央軸を手動で各平面の4頂点に向けその姿勢情報(θ_p, θ_t)を保持することによってなされる。そして、

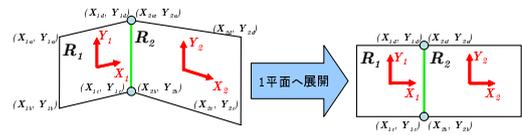


図9 連結2平面の展開

得られた(θ_p, θ_t)は、式(2)、(3)によって正接平面上に投影された点(u, v)に変換しておく。表1に、平面登録用の座標情報のリストを示す。この表を「平面登録テーブル」と呼ぶ。平面登録テーブルにおいて、ひとつの実環境平面に属する(u, v)は、正接平面上にある領域を形成する。この領域は各実環境平面全体を正接平面に逆投影したものであり、その境界線は各実環境平面の境界線に対応する。このような領域を、各実環境平面に対する「平面对応領域」と呼ぶ。

5.2 平面の連結関係の検出

5.1節で述べた平面登録を行った後、システムは平面登録テーブルから各2平面間の連結関係を検出し、その2次元座標系間の関係を算出する。

図8において、平面R₁上の点(X_{1d}, Y_{1d})と平面R₂上の点(X_{2a}, Y_{2a})は環境中では同一の点である。よって、FC-PT プロジェクタからこれらの点への方向は同一であり、その結果、(u_{1d}, v_{1d})と(u_{2a}, v_{2a})もまた同一となる。同様に、(u_{1c}, v_{1c})と(u_{2b}, v_{2b})も同一の値をとる。この2組の対応から、平面R₁とR₂において2頂点が環境中で同一であることが分かり、この2平面が連結していることを認識することが可能である。このことに基づき、システムは平面登録テーブル中から同一の(u, v)値を持つ行を探索し、各2平面間についてこのような座標が2組存在する場合に、その2平面が連結していると判断する。この処理をすべての2平面について行い、その結果として次のような行列を生成する。

$$M = (m_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & - \\ 3 & 0 & 4 & - \\ 5 & 6 & 0 & - \\ - & - & - & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

ただし、“-”は負値を表す。この行列の要素m_{ij}の値は、平面R_iと平面R_jの連結の有無を示す。m_{ij}が0の場合、R_iとR_jは同一であることを示す。m_{ij}が負値の場合はR_iとR_jは連結していない。それ以外の場合、すなわちm_{ij}が正値をとる場合は、R_iとR_jが連結していることを表す。この正値は各連結2平面に対して1, 2, 3, ...と順に与えられ、この値は平面对のIDとしても利用する。この行列を「連結判定行列」と呼ぶ。

次に、システムは連結している平面对ごとに、その座標系間の変換式を算出する。そのためには、図9に示すように、その2平面を1つの平面上に展開し、その2次元平面上で一方の座標系と他方の座標系の関係式を求める。例えば、平面R₁と平面R₂に注目した場合、R₂上の座標(X_{2n}, Y_{2n})は、R₁上の座標(X_{1n}, Y_{1n})を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} X_{2n} \\ Y_{2n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{1n} \\ Y_{1n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (16)$$

表 2 変換パラメータリスト

ID	parameters
1	$\alpha_1 \quad t_{X1} \quad t_{Y1}$
2	$\alpha_2 \quad t_{X2} \quad t_{Y2}$
3	$\alpha_3 \quad t_{X3} \quad t_{Y3}$
...	...

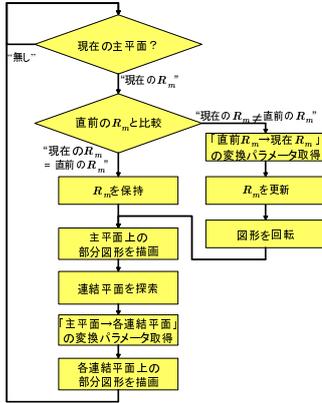


図 10 複数面投影のフローチャート

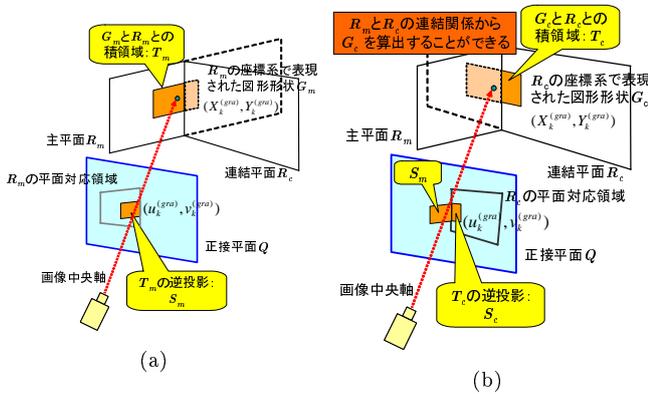


図 11 境界部への投影

各平面対は 2 組の同一点 (R_1 と R_2 の場合は, (X_{1d}, Y_{1d}) - (X_{2a}, Y_{2a}) と (X_{1c}, Y_{1c}) - (X_{2b}, Y_{2b})) を持つので, 両座標系間の変換パラメータ (α, t_X, t_Y) は, 次のように線形に計算することができる.

$$\begin{pmatrix} X_{2a} \\ X_{2b} \\ Y_{2a} \\ Y_{2b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{1d} & -Y_{1d} & 1 & 0 \\ X_{1c} & -Y_{1c} & 1 & 0 \\ Y_{1d} & X_{1d} & 0 & 1 \\ Y_{1c} & X_{1c} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ t_X \\ t_Y \end{pmatrix} \quad (17)$$

システムは, すべての連結平面対についてこの計算を行い, 得られた変換パラメータをその平面対の ID とともに保持する. 表 2 は, システムが保持するデータを示しており, この表を, 「変換パラメータリスト」と呼ぶ.

5.3 投影手法

以上の準備を行った上で, 複数平面への投影を行う. 複数平面投影のための処理のフローチャートを図 10 に示す.

まず, システムは現在の FC-PT プロジェクタの姿勢 (θ'_p, θ'_t) を受け取り, その姿勢における画像中央軸と正接平面の交点 (u_c, v_c) を算出する. システムは, 平面登録テーブルを参照し, この (u_c, v_c) がどの実環境平面の平面対応領域に属するかを調

べる. そして, (u_c, v_c) が含まれる領域に対応する実環境平面 R_m を現在の「主平面」と定義する. すなわち, 各瞬間において, FC-PT プロジェクタの画像中央点が投影されている平面が, その時点における主平面である.

次に, 図 11(a) に示すように, 4. 章の 1 平面に対する処理と同様に式 (12) によって主平面上の図形形状 $G_m : (X_k^{(gra),m}, Y_k^{(gra),m})$ を求める. しかしここでは, 4. 章の 1 平面の場合とは異なり, G_m をそのまま正接平面 Q に投影してはならない. これは, 複数平面を扱う場合, 各平面は有限の領域を持つことを考慮しなければならないためである. このような場合は, 正接平面上の図形形状 G_m と主平面 R_m の積領域 T_m を算出し, この T_m のみを正接平面 Q に投影するようにする (S_m).

続いて, システムは図 11(b) に示す連結平面に関する処理へ移る. システムは, 連結判定行列を参照し, 主平面 R_m に連結している連結平面 R_c を探索する. 連結判定行列はまた, 各連結平面对 R_m - R_c の ID を保持しており, その ID 情報をもとに変換パラメータリストを参照することにより, R_m - R_c の座標変換式を得ることができる. この変換式が得られれば, 主平面 R_m 上の座標を各連結平面 R_c 上の座標に変換することが可能となり, 現在 R_m 上で記述されている図形形状 $G_m : (X_k^{(gra),m}, Y_k^{(gra),m})$ も各連結平面 R_c 上の座標 $G_c : (X_k^{(gra),c}, Y_k^{(gra),c})$ に変換することができる. そして, 各 R_c について, R_m について行ったのと同様に, G_c と R_c との積領域 T_c を算出し, それを Q に投影する (S_c).

以上の処理によって, 正接平面 Q 上にはこれらの領域が組み合わされた形で図形領域 S_{all} が生成される. この姿勢 (θ'_p, θ'_t) は分かっているので, この S_{all} を画像平面 P' に投影することも可能である. 以上の処理によって, 所望の描画結果を得ることができる.

さらに上述の処理に加えて, FC-PT プロジェクタの連続的な姿勢変化によって主平面 R_m が途中で変化する場合への対応が必要となる. 実環境平面における図形形状は, その時点における主平面の座標系に基づいて算出されるため, 描画中に主平面が変化すると異なる座標系に基づく図形形状算出が行われるために, その 2 平面の座標系の向きの違いに応じて図形の向きも変化してしまうという問題が生じる. この問題に対応するため, 提案システムでは直前の主平面 R_m を常に記録しておき, 描画中に主平面が変化した場合は, それによる座標系変化を図形形状に反映させている. これによって, FC-PT プロジェクタを自由に回転させて, 図形を複数の平面にまたがって連続的に移動させても, まるで紙のポスターが滑らかにその表面に沿って移動しているかのような表示を行うことができる.

5.4 実環境での投影実験

本研究で開発した FC-PT プロジェクタを図 12 に示す. この FC-PT プロジェクタは, 小型軽量のプロジェクタ (プラスビジョン V3-131) と電動のパン・チルト回転雲台で構成されている. 実験用のため, 環境中に図 13 に示すような 2 平面を用意し, 事前にこの 2 平面それぞれの縦・横の長さを計測しておく. そして, FC-PT プロジェクタをこの 2 平面に向けて任

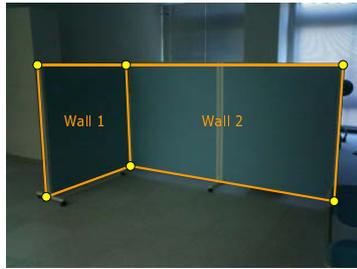


図 12 FC-PT プロジェクタ

図 13 実環境中の複数投影面



(a)



(b)

図 14 各平面への投影



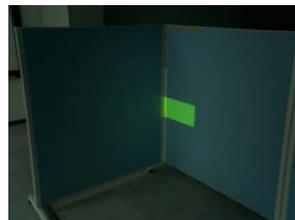
(i)



(ii)



(iii)



(iv)

図 15 2 平面の境界付近への投影

意位置に設置し、図 13 に示す 2 平面の全頂点に画像中央点が投影されるように手で動かす、そのときのプロジェクタ姿勢を記録しておく。図形描画のための準備は以上で完了する。

図 14, 15 に実験結果を示す。いずれの図でも、FC-PT プロジェクタは実環境中で 40cm × 20cm の長方形を描画するように制御している。図 14(a),(b) より、いずれの平面に対しても正しく長方形が描画されていることが確認できる。また、図 15 において、(i)-(iv) は時系列で並べられた図で、FC-PT プロジェクタが回転しながら、2 平面を横切るような図形描画を行った場合でも、紙のポスターが環境の形状に沿ってその表面を滑らかに動いているような表示が実現されていることが確認できる。

6. おわりに

本論では、プロジェクタの投影中心がその姿勢変化に応じて移動しないという特徴をもつ FC-PT プロジェクタを提案した。

そして、この FC-PT プロジェクタを用いて実環境投影を容易に行うためのキャリブレーション手法を提案し、さらに環境中の複数の平面に対して歪みの無い図形描画を行う手法についても提案した。提案手法を用いると、各 1 平面上だけでなく、連結している 2 平面の境界部付近であっても、まるで紙のポスターがその 2 平面の折れ曲がりに沿って滑らかにその表面上を移動するような表示を行うことが可能である。また、FC-PT プロジェクタを実際に開発し、実環境において描画実験を行い、その効果を確認した。

今後の課題として次のものが挙げられる。

- 環境形状取得の自動化

現在の手法では、各実環境平面の 2 次元形状は事前に取得しておく必要がある。この情報は部屋の図面などが存在する場合は容易に取得できるが、それ以外の場合は手作業によって計測しなければならない。この問題を解決するため、環境中に複数のカメラを設置し、環境中の各平面形状を自動的に計測するようにすることが望ましい。

- 複数台 FC-PT プロジェクタの使用

FC-PT プロジェクタはその姿勢を自由に動かすことができるため、環境中の広範囲に図形を描画することが可能である。しかし、1 台のプロジェクタでは描画できる図形の大きさには制限があり、それを超える大きな図形を描画することは不可能である。このような大きな図形を描画するためには、FC-PT プロジェクタを環境中に複数台配置して図形を分担して描画すればよいが、その場合それぞれの FC-PT プロジェクタ描画図形間のずれや図形の分割の仕方などが課題となる。

謝 辞

本研究は JST の PRESTO プログラム、および科学研究費補助金 (15700157) の支援を受けて行った。

文 献

- [1] R. Raskar, J. Baar, P. Beardsley, T. Willwacher, S. Rao, C. Forlines, "iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors," SIGGRAPH 2003, 22(3), pp.809-818, 2003.
- [2] C. Pinhanez, "The Everywhere Displays Projector: A Device to Create Ubiquitous Graphical Interfaces," UbiComp 2001, LLCS 2201, Springer-Verlag, Berlin, pp. 315-331, 2001.
- [3] M. Ashdown, M. Flagg, R. Sukthankar, J. M. Rehg, "A Flexible Projector-Camera System for Multi-Planar Displays," CVPR 2004, Vol.2, pp.165-172, 2004.
- [4] T. Matsuyama, "Cooperative Distributed Vision - Dynamic Integration of Visual Perception, Action and Communication -," DARPA Image Understanding Workshop 98, pp.365-384, 1998.
- [5] 満上育久, 浮田宗伯, 木戸出正継, "投影中心固定型バンチルトプロジェクタとそのキャリブレーション手法," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), Vol.1, pp.57-62, 2004.
- [6] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision," Chapter 12, Cambridge University Press, 2000.
- [7] R. Y. Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision", CVPR, pp.364-374, 1986.