

投影中心固定型パンチルトプロジェクタと そのキャリブレーション手法

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 プロジェクタを用いた実環境視覚情報提示は、壁や床などといった任意の平面に任意の視覚情報を投影し描画することが可能で、また描画された視覚情報がユーザにとって観察が容易であるという利点を持つ。しかし一方、一台のプロジェクタで描画可能な領域が限られており、ユビキタスコンピューティング環境における情報提示デバイスとしては不向きである。そこで本論文では、プロジェクタにパン・チルトの回転機構を持たせることでこの欠点を補う。さらにこれらを環境の大きさや形状に応じて適切な台数を用いれば、十分な描画領域を確保することも可能である。パン・チルト可能なプロジェクタは、その投影中心と回転中心が一致するように設計することによって、プロジェクタの射影幾何学的な扱いを容易にすることができる。本論文では、この投影中心固定型パンチルトプロジェクタを実現するためのキャリブレーション手法について述べる。

キーワード 複合現実感, プロジェクタ, キャリブレーション, ホモグラフィ

Fixed Projection Center Pan-Tilt Projector and Its Calibration Methods

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

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

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

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

Abstract Drawing visual information in the real world by projectors has advantages that they can project and show arbitrary images on arbitrary planes, walls and floors for example. They are good also because we can easily look at projected images on the planes. However, they are unsuitable for output devices in ubiquitous computing environments because their projectable areas are not enough. In our research, in order to overcome the problem, we propose new projectors that can pan and tilt and will utilize adequate amount of the projectors according to size or shape of environments. The pan-tilt projectors are designed in order that the projection centers of them correspond with the rotation centers and it helps us to control them. In this paper, we describe how to accomplish such projectors and their calibration methods.

Key words augmented reality, projectors, calibration methods, homography

1. はじめに

館内案内や遠隔作業指示などの場面においてユーザに直感的な指示を与える方法として、コンピュータシステムがテキストや画像情報を実環境に付加してユーザに提示する複合現実感 (Augmented Reality: AR, Mixed Reality: MR) の研究が盛んである。そのような実環境情報付加の実現方法のひとつとして HMD (Head Mounted Display) などのユーザ着用型の

デバイスを用いる方法が近年数多く研究されている。しかし、HMD を用いるアプローチは、常時着用という負担をユーザに強いる上に、描画情報と実環境との幾何学的整合性を満たすためにユーザ頭部の 3 次元的な位置・姿勢を高速かつ高精度に得る必要がある。そのために装置に位置センサを取り付ける方法 [1] や環境側にマークを取り付ける方法 [2] などが提案されているが、いずれも着用装置や環境設備が非常に煩雑になる上、リアルタイムで実環境との正確な幾何学的整合性を満たすのに十分な精度や処理速度を得られるものではない。

一方、環境側に情報を付加してユーザに提示する方法とし

^{††} 科学技術振興機構さきがけプログラム (PRESTO, JST)

て、プロジェクタなどを用いて実環境に情報を直接描画する方法 [3], [4] が考えられる。実環境で過ごすユーザは、何も着用する必要がない上、通常見ている実環境の表面上に情報を見ることができるので観察における負担が少なく、複数ユーザが情報共有することも容易である。また、着用型ではなく環境中に据え置きされるプロジェクタシステムの場合、事前に実環境との位置合わせを一度行っておけば、以後のオンライン位置・姿勢計測なしで実環境との幾何学的整合性を満たすことが可能である。このような理由から、本論文ではプロジェクタを用いた情報提示法を採用する。

しかし、このアプローチにも欠点がある。ユーザの視野を完全に覆うことができる HMD ではユーザがどの方向を向いてもその視野中に描画することが可能なのに対して、プロジェクタによる手法は描画エリアは限定される。本論文では、プロジェクタにパン・チルト回転機構を設ける（以後このような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）ことによりこの欠点を補うことを考える。さらに、将来的には環境中に複数台のパンチルトプロジェクタを適切に配置することで、より広く複雑な環境においても十分な描画領域・描画能力を実現できると考えられる。

描画情報と実環境との幾何学的整合性を満たすためには、各パンチルトプロジェクタについて、実環境投影面の座標とプロジェクタ姿勢およびプロジェクタ投影画像の座標との対応関係を求めなければならない。しかし、一般に回転機構を持つプロジェクタの場合、その姿勢変化に伴い投影中心位置も変化するため、姿勢ごとに実環境投影面とプロジェクタ投影画像の対応関係を求めなければならない。作業が非常に煩雑になる上に回転運動しながらの連続的な投影に対応できない。そこで、本論文では回転運動によって投影中心位置が変化しない投影中心固定型パンチルトプロジェクタを提案し、この問題を解決する。また、投影したい平面に対して事前に簡単な観測作業を行うことで上記対応関係が求める手法を提案する。その結果、実環境投影面の座標系で表現される情報の描画が可能となり、さらにプロジェクタ姿勢の連続的に変化させながらの投影も実現できる。

関連研究としては、Borkowski らの [5] や中村らの [6] などが挙げられる。[5] では姿勢変化による投影形状の歪み補正が可能だが、投影中心が固定されていないため実環境投影面上で位置や大きさを正確に制御できない。これに対して、本論文の手法では描画情報を実環境投影面座標系で記述できるため、位置・大きさの正確な制御が可能である。一方 [6] は、実環境座標系を扱うことができるが、前処理として環境の 3 次元モデルを取得しておく必要がある。本論文の手法では、この 3 次元環境モデル作成は行う必要がなく、前処理量が大きく軽減される。

2. 投影中心固定型パンチルトプロジェクタの設計方針

2.1 カメラモデルを模倣したプロジェクタモデル

実環境に対する情報の入出力の点で、カメラとプロジェクタは相反するデバイスである。しかし一方で両者の光学的構造は非常に類似している。カメラはコンピュータビジョンの分野で

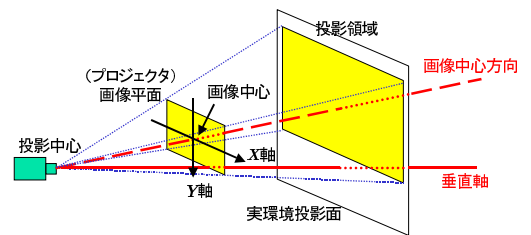


図1 プロジェクタの幾何モデル

古くから取り扱われており、多くの場合にピンホールカメラモデルと呼ばれるモデル化がなされ、数学的に体系づけられている。上述のカメラとプロジェクタの類似性を考えれば、プロジェクタについてもカメラと同様のモデル化が可能である。

図1に、ここで取り扱うプロジェクタの幾何モデルを示す。プロジェクタからの投影光はある一点から発せられていると仮定し、その一点を投影中心と呼ぶ。投影中心の前方にはプロジェクタへの入力画像を描画するプロジェクタ画像平面が存在するものとし、投影中心からの投影光はこのプロジェクタ画像平面を通過して実環境に投影されているものとする。このプロジェクタ画像平面はカメラモデルにおける画像平面に相当し、以下では単に画像平面と呼ぶ。画像平面上では、その中央の点（画像が例えば XGA の場合、その左上端から右に 1024/2 ピクセル、下に 768/2 ピクセルの点）を画像中心^(注1)と呼び、画像平面における画像座標系は画像中心を原点として画像の横方向、縦方向をそれぞれ X 軸、Y 軸として決定される。また、投影中心と画像平面との距離を焦点距離と呼び、投影中心を通り画像平面に対して垂直な直線を垂直軸^(注2)とする。さらに、投影中心を通り画像平面と平行な平面を考え、その平面と垂直軸によって定義される座標系をプロジェクタ座標系と呼ぶ。また、プロジェクタから投影される実環境中の平面を実環境投影面と呼ぶ。

2.2 投影中心固定型パンチルトプロジェクタ

1. 章でも述べたように、1 台の固定されたプロジェクタで投影可能な領域は非常に小さい。本稿では、この投影可能な領域を広げるために、プロジェクタにパン・チルト回転機構を加える。この回転機構は自由に投影位置をコントロールできる点で非常に便利であるが、その一方、姿勢変化によってプロジェクタの投影中心の位置が変化してしまうという問題がある。投影中心が姿勢変化に応じて移動すると、姿勢変化ごとに実環境投影面と画像座標の位置合わせが必要となりその作業が非常に煩雑になる上、プロジェクタ姿勢を連続的に変化させながらの投影が不可能となる。そこで本稿では、[7] のパン・チルト回転機構を持つカメラと同様のアプローチとして、プロジェクタの投影中心とパン・チルト回転台の回転中心が一致するようにこれらを配置することで、姿勢変化してもプロジェクタの投影中心の位置が変化しない投影中心固定型パンチルトプロジェクタを提案する。

(注1)：ピンホールカメラモデルにおいて投影中心から画像平面に下ろした垂線の足と定義される画像中心とは異なる。

(注2)：ピンホールカメラモデルにおける光軸に相当するが、一般には上述の画像中心を通らない。特にプロジェクタの場合は、その設置の都合上光を正面前方ではなくやや上向きに投影するため、画像中心方向と垂直軸は大きく異なる。

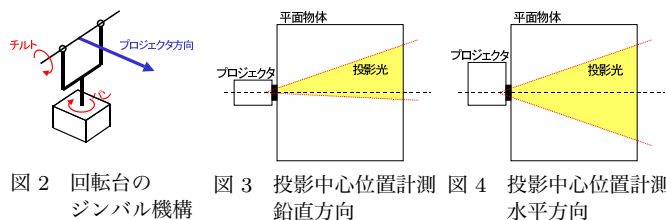


図 2 回転台のジンバル機構

図 3 投影中心位置計測鉛直方向

図 4 投影中心位置計測水平方向

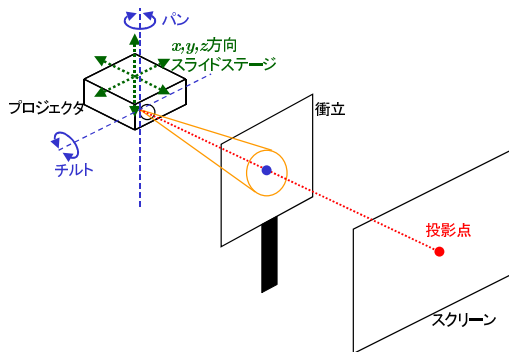


図 5 精密な位置合わせ

3. 投影中心固定法

2.2 節で述べたパンチルトプロジェクタを実現するためには、パン・チルト 2 軸の回転機構を持つ台が必要となる。まず、図 2 のようなジンバル機構を設ける。この機構ではパン回転台の上にチルト回転台が組まれているため、パン軸回転によってチルト軸は移動する。この機構をパン軸とチルト軸が 1 点で交差するように設計し、回転運動によって位置が変わらない回転中心を設ける。次に、この回転中心とプロジェクタの投影中心を一致させる。しかしプロジェクタの投影中心そのものを正確に得ることは困難であり、またたとえ正確な位置が得られたとしても、それを回転中心に一致させるように設置することは難しい。そこで本稿では、3.1 節に示す方法でまずプロジェクタの投影中心のおおよその位置を初期位置として事前に求める。回転中心の空間的な位置は既知なので、この投影中心初期位置と回転中心がおおよそ一致するようにプロジェクタを回転台上に設置する。続いて 3.2 節に示す方法で、投影中心と回転中心が完全に一致する位置を探索する。以上のような 2 段階の位置合わせ手法を用いて、投影中心固定型パンチルトプロジェクタを実現する。

3.1 投影中心の初期位置計測

プロジェクタを水平面上に設置した上で、図 3 に示すようにプロジェクタのレンズ部の正面に平面物体を鉛直に立てる。この状態でプロジェクタから投影を行うと、平面上に光の軌跡を観測することができるので、この軌跡の上下の境界線を記録する。続いて、図 4 のように水平方向についても同様の作業を行う。これらの作業により得られる境界線を延長して得られる交点を投影中心の初期位置とする。この作業において、環境設定や境界線記録を誤差無く行うことは不可能なので、ここで得られた投影中心初期位置は誤差を含む。

3.2 精密な位置合わせ

プロジェクタには回転台の上で x, y, z 軸方向にスライド可能な機構を持たせる。そしてまず、3.1 節の方法で得られたプ

ロジェクタ投影中心のおおよその位置がパン・チルトの回転中心とほぼ一致するように設置する。また、図 5 に示すように、プロジェクタの前方にスクリーンを設置し、さらにスクリーンとプロジェクタの間に衝立を設置する。衝立には 1 箇所穴があけられており、この穴を通過したプロジェクタ光のみがスクリーンに届くようになっている。スクリーンの側にはカメラが固定されており、スクリーンを観測させる。以上の環境設定のもとで、プロジェクタをある決まった範囲のパン角・チルト角によって姿勢変化させながら、全面単色の光を投影し衝立の穴を通過してスクリーンに投影される点の位置の変化をカメラで観測する。プロジェクタ投影中心が回転台の回転中心と完全に一致していれば、姿勢を変化させてもスクリーン上の投影点は静止するが、ずれていればそのずれの大きさに応じて投影点はスクリーン上を動く。よって、プロジェクタを雲台の上で x, y, z それぞれの方向について微小に変化させつつ、それぞれの位置でこの投影点の軌跡を計測する。そしてその軌跡領域が最小になるような x, y, z 位置を探索しその位置で投影中心と回転中心が一致していると判断する。

4. パンチルトプロジェクタのキャリブレーション

4.1 キャリブレーションの定義

実環境投影面座標表現による描画を実現するためには、投影面座標系で表現されている座標値からプロジェクタがとるべき姿勢と投影すべき画像情報を求めなければならない。

2.1 節で述べたプロジェクタモデルにおける焦点距離、垂直軸に対する投影光の方向、画像平面の大きさなどといったプロジェクタごとに固有の値をとるパラメータ（内部パラメータ）や、プロジェクタの位置・姿勢（外部パラメータ）が得られ、なおかつ実環境投影面やプロジェクタを仮想 3 次元空間中で完全に表現することができれば、空間幾何学的に計算することでプロジェクタ姿勢や入力画像を求めることが可能である。しかしこのような方法では、プロジェクタの内部・外部パラメータをすべて求める作業が非常に煩雑となる上に、それらに含まれる不可避な誤差が計算中で蓄積されるため、良好な結果は期待できない。また環境の 3 次元形状計測を高精度に行うことも非常に困難である。このような理由から、プロジェクタの内部・外部パラメータを陽に求めるアプローチは作業効率の面でも精度の面でも賢明でない。

カメラシステムにおいても同様の問題が以前から議論されており、多くの実環境使用のカメラシステムではこのように全パラメータを陽に求めるというアプローチはとらず、画像平面座標と実環境座標との直接的な関係を求めたり、ステレオカメラの場合であれば画像平面座標間の関係を求めたりといった、内部・外部パラメータを陽に利用しないアプローチをとっている。そこで、本論文でも多くのカメラシステムと同様に、ユーザが指定する実環境投影面座標と、システムが決定すべきプロジェクタ姿勢や入力画像の直接的な関係を求め利用する方法をとることとする。ここで、以後の導出方法の都合により、プロジェクタ姿勢と入力画像座標を分離し、以下の 3 者相互の関係を求める。

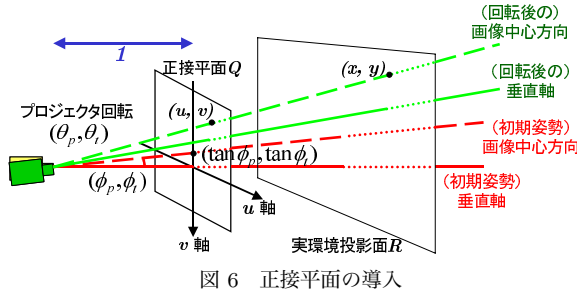


図6 正接平面の導入

Param.1 実環境投影面 R 上の座標 (x, y)

Param.2 画像平面 P 上の座標 (X, Y)

Param.3 プロジェクタ姿勢（パン角，チルト角） (θ_p, θ_t)

これら3者の関係が得られれば、4.4節で述べる方法によってParam.1からParam.2, Param.3を求めることが可能となる。すなわち実環境投影面座標から、プロジェクタ姿勢と入力画像を決定することができる。本論文では、これら3者の関係を求めることをキャリブレーションと呼ぶ。

4.2 キャリブレーション方法

4.1節のParam.1～3のうち、まずParam.1とParam.2の関係を求める。このとき、残るParam.3はある姿勢に固定し、それをプロジェクタの初期姿勢 $\theta_p = \theta_t = 0$ とする。この初期姿勢で投影を行った際、プロジェクタ画像平面 P 上の1点 (X, Y) とその点に対応する投影平面 R 上の点 (x, y) に関して、同次座標系で以下の関係が成り立つことが知られている[9], [10]。

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

H_{PR} は自由度8の 3×3 行列であり、 (X, Y) と (x, y) の対応が4組以上あれば線形計算によって求めることが可能である。プロジェクタから4点以上の適当な個数の点群をプロジェクタ画像平面で格子上に配置し、それを投影面に投影して投影面上での点群の位置を計測することで、この対応を取得でき、 H_{PR} を決定できる。なお、投影面上の点群観測は環境に配置されたカメラを用いる。カメラ画像はTsaiのカメラキャリブレーション[8]によって歪み補正されており、投影面上の座標が既知の参照点4点と点群を画像中に含むように撮影することによって点群の座標を求めることが可能である。

続いて、4.1節の3者のうちParam.1とParam.3の関係を求める。そのためここで、図6に示すように、プロジェクタ初期姿勢におけるパン・チルトの回転軸によって定まる平面に平行で、プロジェクタの投影中心（すなわち回転中心）からの距離が1であるような仮想平面を導入する。以後これを正接平面と呼ぶ。なお、パンチルトプロジェクタは3.章で述べたようなジンバル機構をとり、回転運動によってパン軸は不変、チルト軸は変化するが、この正接平面は初期姿勢における2軸に平行な平面として定義されているので、回転運動に関して不変な平面である。ここではParam.1とParam.3の関係を求めるため、Param.2を固定して考える。すなわち、プロジェクタ画像平面上に1固定点を定め、その点を複数のプロジェクタ姿勢で投影面に投影し観測することにより関係を得る。固定点は、画像平面上で、かつ垂直軸からの角度 (ϕ_p, ϕ_t) が取得可能な点であ

ばよい。ここでは画像中心を採用する^(注3)。

初期姿勢での画像中心への3次元方向ベクトルは $(\tan \phi_p, \tan \phi_t, 1)^T$ で与えられる。3.章で述べたジンバル機構回転台を用いてプロジェクタがパン方向に θ_p 、さらにそこからチルト方向に θ_t 回転した^(注4)後の方向ベクトル $(u', v', w')^T$ は、

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

となる。ただし、これ以降 $Rot_{(a, \alpha)}$ という行列表記は、 a 軸の回りに α 回転させる回転行列を表すこととする。ここで、この方向ベクトルを、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u'/w' \\ v'/w' \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} \quad (3)$$

と z 座標が1になるようにベクトルを実数倍すると、 (u, v) はこのベクトルの Q 上の投影点座標となる。以後、 $(u', v', w')^T$ と $(u, v, 1)^T$ のようなベクトルの実数倍関係を同値と呼び、式(3)中のように表すこととする。この (u, v) と、実環境投影面に投影された点の座標 (x, y) にも式(1)と同様に、

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

なる関係が成り立つ。プロジェクタの姿勢を変化させ、4つ以上の姿勢について (u, v) を算出し (x, y) を計測することによって、 H_{QR} を決定することができる。ここでも (x, y) の計測はカメラによって行う。

4.3 キャリブレーション後のプロジェクタモデルの記述

H_{QR} の逆行列を H_{QR}^{-1} とすると、式(1)と式(4)より以下の式が得られる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR}^{-1} H_{PR} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = H_{PQ} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

この式より、初期姿勢画像平面 P 上の座標 (X, Y) を正接平面 Q 上の座標 (u, v) に変換することが可能となるので、 (X, Y) に画像平面の4隅の座標 (X_i, Y_i) ($i = 1, \dots, 4$) (XGAの場合 $(\pm 1024/2, \pm 768/2)$)を代入して、対応する $(u_i^{(init)}, v_i^{(init)})$ を取得する。垂直軸に対する画像中心の方向および画像の4隅の方向間の相対位置は不変なので、回転時にはすべてに同じ回転行列を施すことで回転後の各方向が得られる。そしてこれらの方向ベクトルはすべて z 軸方向の正規化を施すことで正接平面上の座標として表現することができる。したがって、

- 画像中心の方向ベクトル $(\tan \phi_p, \tan \phi_t, 1)$
- 画像領域4隅の方向ベクトル $(u_i^{(init)}, v_i^{(init)}, 1)$
- 正接平面と実環境投影面の関係 H_{QR}

を保持しておけば、与えられる実環境投影面座標への投影のためのプロジェクタ姿勢およびプロジェクタへの入力画像が算出できる。

(注3)：多くの場合、垂直軸との画像中心方向との角度はプロジェクタの仕様書に記される設計値から容易に得ることができる。ただし、設計値には通常誤差が含まれるので、これをより正確に求める手法も検討しなければならない。

(注4)：パンは右向き回転角を正、チルトは下向き回転角を正とする。

4.4 投影プロセス

この節では、前節までの準備によって実際に投影制御可能であることを示す。ここでは一例として、投影面座標系で表される4点 (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, 4$) を頂点とする矩形の描画を考える。プロジェクタの姿勢 $(\theta_p^{(ans)}, \theta_t^{(ans)})$ およびプロジェクタの投影画像（ここでは4 端点 $(X_i^{(ans)}, Y_i^{(ans)})$) を求めることができればよい（図7）。

まず、プロジェクタの姿勢を決定する。4.1 節でも述べたように、アプリケーションなどに応じて姿勢制御ポリシーは適当に決めることができるが、ここでは単純に矩形の重心に画像中心方向を合わせるような制御を行うこととする。

投影面の4 端点 (x_i, y_i) の重心 (x_g, y_g) を求め、正接平面に逆投影する。

$$\begin{pmatrix} u_g^{(img)} \\ v_g^{(img)} \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR}^{-1} \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

画像中心の方向ベクトルを $(u_g^{(img)}, v_g^{(img)}, 1)^T$ に一致させたときの垂直軸の方向ベクトルは次のようになる。

$$\begin{pmatrix} u^{(pro)} \\ v^{(pro)} \\ 1 \end{pmatrix} \sim Rot_{(y, -\phi_p)} Rot_{(x, \phi_t)} \begin{pmatrix} u_g^{(img)} \\ v_g^{(img)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

一方、初期姿勢からパン方向に θ_p 、そこからチルト方向に θ_t 回転させたときの垂直軸の方向ベクトルは以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} u^{(pro)} \\ v^{(pro)} \\ 1 \end{pmatrix} \sim Rot_{(y, \theta_p)} Rot_{(x, -\theta_t)} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_p \cos \theta_t \\ \sin \theta_t \\ \cos \theta_p \cos \theta_t \end{pmatrix} \quad (8)$$

これを (θ_p, θ_t) について解くことによって、垂直軸の方向すなわちプロジェクタ姿勢 $(\theta_p^{(ans)}, \theta_t^{(ans)})$ が得られる。

$$\theta_p^{(ans)} = \tan^{-1} u_g^{(pro)} \quad (9)$$

$$\theta_t^{(ans)} = \tan^{-1}(v_g^{(pro)} \cos \theta_p^{(ans)}) \quad (10)$$

$(\theta_p^{(ans)}, \theta_t^{(ans)})$ が得られれば、この姿勢におけるプロジェクタ画像平面の4 隅の方向は容易に求まる。

$$\begin{pmatrix} u_i^{(img)} \\ v_i^{(img)} \\ 1 \end{pmatrix} \sim Rot_{(y, \theta_p^{(ans)})} Rot_{(x, -\theta_t^{(ans)})} \begin{pmatrix} u_i^{(init)} \\ v_i^{(init)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$(u_i^{(img)}, v_i^{(img)})$ は画像平面の4 隅を正接平面に投影した点となる。投影オブジェクトの4 端点 (x_i, y_i) についても式(6)と同様に正接平面上に投影する。正接平面上に投影された4 端点 $(u_i^{(obj)}, v_i^{(obj)})$ は以下で得られる。

$$\begin{pmatrix} u_i^{(obj)} \\ v_i^{(obj)} \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR}^{-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

以上で、式(11)(12)より正接平面上での投影領域形状および投影オブジェクト形状が得られた。

次に、プロジェクタ姿勢 $(\theta_p^{(ans)}, \theta_t^{(ans)})$ における画像平面 P' を考える。式(11)で得られた4 点 $(u_i^{(img)}, v_i^{(img)})$ が画像平面 P' の4 隅 $(\pm 1024/2, \pm 768/2)$ (XGA の場合) に対応することにより、正接平面 Q から画像平面 P' への変換行列 $H_{QP'}$ が求められる。この $H_{QP'}$ を式(12)で得られた $(u_i^{(obj)}, v_i^{(obj)})$ に対し

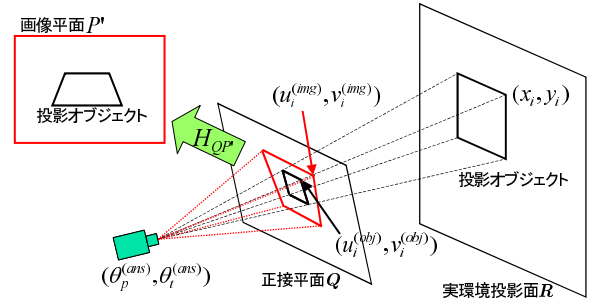


図7 姿勢および投影画像の算出プロセス

回転範囲 (パン)	$-60^\circ \sim 60^\circ$
回転範囲 (チルト)	$-30^\circ \sim 30^\circ$
回転角精度 (パン, チルト)	0.002°
回転速度	毎秒 10°
スライド範囲 (x, y, z それぞれ)	$-15\text{mm} \sim 15\text{mm}$
スライド精度 (x, y, z それぞれ)	0.1mm

表1 スライド機構付き電動回転台



図8 パンチルトプロジェクタの外観

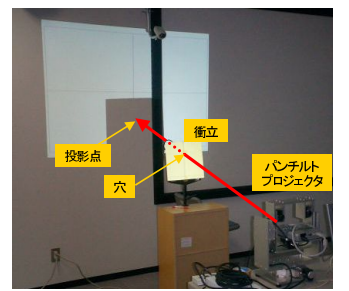


図9 精密な位置合わせ作業

ても次式のように適用することにより、画像平面 P' 上に生成すべき投影オブジェクトの4 端点 $(X_i^{(ans)}, Y_i^{(ans)})$ が決定する。

$$\begin{pmatrix} X_i^{(ans)} \\ Y_i^{(ans)} \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QP'} \begin{pmatrix} u_i^{(obj)} \\ v_i^{(obj)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

この4 端点による矩形をプロジェクタ姿勢 $(\theta_p^{(ans)}, \theta_t^{(ans)})$ で投影面に投影すると、要求どおり (x_i, y_i) を端点に持つ矩形を観測することができる。

5. 実 験

5.1 使用装置

以上の議論を実環境で確認するために実験を行う。輝度1000lm、コントラスト比2000:1であるPLUS VISION社の小型軽量プロジェクタV3-131を、パン・チルト機構およびその上に x, y, z 3 軸方向へのスライド機構を持つ電動回転台に設置した（図8）。電動回転台の主な仕様を表1に示す。

5.2 投影中心の固定

3.章で述べた2 段階の位置合わせを行った。まず、プロジェクタを雲台に設置する前に3.1 節の方法により投影中心探索のための初期位置を計測した。結果は、プロジェクタのレンズ側下端点から x, y, z 方向にそれぞれ40mm, 25mm, 40mm となった。次に、この位置が雲台の回転中心と一致するようにプロジェクタを雲台に設置し、3.2 節の方法で、パン・チルト雲台上で x, y, z 方向に位置を変化させながら、精密な位置合わせを行った（図9）。その結果得られた最適位置はプロジェクタのレンズ側下端点から x, y, z 方向にそれぞれ40mm, 25mm,

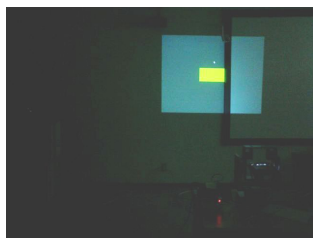


図 10 初期姿勢での投影結果

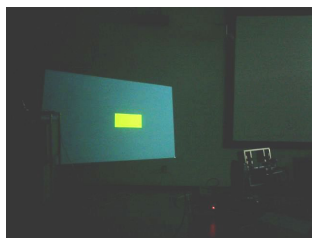


図 11 回転後の投影結果

32mm となった。以後、プロジェクタはこの最適位置に固定され、投影中心固定型のパンチルトプロジェクタとして取り扱うこととした。

5.3 キャリブレーション

続いて 4.2 節の方法で投影中心固定型パンチルトプロジェクタと実環境とのキャリブレーションを行った。画像平面と実環境投影面の関係については、プロジェクタ初期姿勢で画像平面上に格子状に座標値が既知に 9 点を配置し、実環境に投影した結果を計測した。プロジェクタ姿勢と実環境投影面の関係については、プロジェクタをパン・チルト方向に既知の角度変化させた 9 姿勢について画像中心の投影結果を計測した。これらの計測結果を用いて、4.3 節に示した正接平面 Q と実環境投影面 R との変換行列 H_{QR} 、画像中心方向ベクトル $(u_i^{(init)}, v_i^{(init)}, 1)^T$ および画像平面 4 隅の方向ベクトル $(\tan \phi_p, \tan \phi_t, 1)^T$ を算出した。

5.4 投影テスト

以上の準備を行った上で、投影テストを行った。まず、プロジェクタ初期姿勢において、実環境投影面上に指定された形状・大きさの矩形を描画するテストを行った。矩形の大きさは実環境投影面の座標系で指定することができ、ここでは縦 20cm、横 40cm とした。投影結果を図 10 に示す。プロジェクタはピクセルサイズより精細な描画ができないため、投影された矩形の各辺は滑らかな直線にはならないが、指定した辺の長さを実際に描画された矩形の辺の長さ誤差（描画誤差）は 1cm 以下であった。なおこの誤差は、キャリブレーションの際の投影結果計測誤差が主な原因であると考えられる。

続いて、プロジェクタ姿勢を変化させ、先ほどと同様縦 20cm、横 40cm という大きさの矩形を指定し、描画させた。投影結果を図 11 に示す。姿勢が変化しても初期姿勢と同じ形状・大きさの矩形を描画できることが確認された。ここでも描画誤差は 1cm 以内であった。

6. ま と め

本論文では、実環境における視覚情報提示法について検討し、プロジェクタによって実環境中の広範囲に投影を行うためにプロジェクタにパン・チルト方向の回転機構を設けることとした。その際、回転中心とプロジェクタの投影中心を完全に一致させることで姿勢制御に伴う投影中心の位置変化が起らない投影中心固定型パンチルトプロジェクタを提案し、その実現方法について論じた。さらに、プロジェクタ姿勢パラメータを取り扱うための仮想平面である正接平面を導入し、これと画像平面、実環境投影面という 3 平面の射影幾何学的関係を求める方法に

ついて述べた。これによって、環境の 3 次元モデルを利用することなく、実環境投影面の座標系で表現される視覚情報入力から、プロジェクタ姿勢および入力画像情報を決定することを可能とした。投影実験を行い、本論文で述べた手法によって所望の投影結果を得ることができることを確認した。

今後の課題を以下に挙げる。

- 複数台への拡張

本論文ではプロジェクタに回転機構を加えることで投影可能な領域を拡大させたが、1 台のパンチルトプロジェクタだけでは、環境の形状やプロジェクタの設置位置あるいは環境中のオブジェクトの配置によって、投影可能な領域は制限される。プロジェクタを複数台用意し、環境中に適切に配置することで、より広域への投影が可能となると考えられる。さらに、複数台が協調することで、移動物体への投影や、オクルージョン回避などより知的な投影が実現できると考えられる。

- 複数面への投影

本論文では実環境投影面を 1 つに限定しキャリブレーションを行った。しかし、実環境には通常、床面や壁面さらには机の上や棚の正面など複数の平面が存在しており、柔軟で高性能な視覚情報提示システムを実現するためには、これら複数面への投影が必要となると考えられる。

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] 小田島, 神原, 横矢, “拡張現実感技術を用いた屋外型ウェアラブル注視提示システム”, 画像電子学会誌, Vol. 32, No.6, pp. 832–840, Nov.2003.
- [2] M.Maeda, T.Ogawa, T.Machida, K.Kiyokawa and H.Takemura, “Indoor Localization and Navigation using IR Markers for Augmented Reality”, Adjunct Proc. of 10th International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 283–284, Jun.2003.
- [3] 日浦, 東城, 稗田, 森谷, 井口, “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”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2002) 論文集 I, pp29–38, Jul.2002.
- [4] 向川, 西山, 尺長, “スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現”, 信学論 D-II, Vol.J84, No.7, pp.1448–1455, Jul.2001.
- [5] S.Borkowski, O.Riff, J.L.Crowley, “Projecting Rectified Images in an Augmented Environment”, ProCams Workshop. IEEE Computer Society Press, Oct.2003.
- [6] 中村, 平池, “アクティブプロジェクタ: 凹凸面上を移動する映像の歪み補正”, FIT (情報科学技術フォーラム) 2002 講演論文集, pp.423–424, Sep.2002.
- [7] 和田, 浮田, 松山, “視点固定型パンチルトズームカメラとその応用” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-DII, No.6, pp.1182–1193, 1998.
- [8] R.Y.Tsai, “A efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision”, CVPR, pp.364–374, 1986.
- [9] R.Hartley and A.Zisserman, “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Chapter.12, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2000.
- [10] R. Sukthankar, T.-J. Cham, G. Sukthankar, “Dynamic Shadow Elimination for Multi-Projector Displays”, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR’01), Vol.2, pp.151–157, 2001.