

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

満上 育久^{†a)} 浮田 宗伯[†] 木戸出正継[†]

Fixed-Center Pan-Tilt Projector and Its Calibration Method

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

あらまし 本論文では、実環境中の広い範囲に位置やサイズについて正確な視覚情報表示を行うことを目的として、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、及びその実現方法について提案する。この特殊な構造により、プロジェクタの正確で安定したキャリブレーションが実現され、従来の回転式プロジェクタと比較して高精度な画像表示を行うことができることを示す。更に、実環境での画像表示実験を行い、提案プロジェクタが有効であることを示す。

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

1. ま え が き

実環境に光を投影し直接視覚情報を表示できるデバイスとして近年プロジェクタが注目され、多くのアプリケーションで利用されている。実環境中の物体の表面上に直接描画できるにもかかわらずその表面を汚すことなくまた描画内容を動的に変更できることから、例えば文献 [1] では遠隔地の作業者にオブジェクトを置く位置や向きを指定するためのガイド表示として、文献 [2] ~ [4] ではテクスチャのない模型にテクスチャを投影して模型のリアリティを向上させるなどの用途でプロジェクタが利用されている。これらのシステムでは、固定のプロジェクタが利用されており、事前にキャリブレーションによって内部パラメータ・外部パラメータを算出しておくことによって、物体上の正確な位置への描画を可能としている。なお、文献 [5] ~ [7] のように、投影を行う対象を 1 平面に限ることで、内部・外部パラメータを陽に求めることはせずプロジェクタ入力画像と投影面との間の Homography [8] の算出で済ませているものなどもある。

このような固定プロジェクタを利用したシステムの問題として、描画可能な範囲がその投影範囲内に限定

される点が挙げられる。この改善策として、投影範囲の拡大のため電動の首振り機構をもつプロジェクタが提案され実装されている [9], [10]。しかしこれらのプロジェクタは、ある姿勢でキャリブレーションを行っても、そこで得られた外部パラメータは姿勢変化によって変化してしまう。任意の姿勢で正確な描画を実現するためには、この外部パラメータが姿勢変化に応じてどのように変化するかを記述する構造モデルが必要となる。このモデル、及びそこに含まれるパラメータをどのように決定するかが重要となる。文献 [9] では、固定プロジェクタと可動式のミラーによって構成された回転式プロジェクタについて、その構造に忠実なモデルを設定しそこに含まれるパラメータを順次求めてモデルパラメータを推定している。パラメータ推定には姿勢やズームパラメータを多数変化させたときのプロジェクタの投影中心位置を利用しているが、個々の投影中心位置推定は一般に不安定なため正確なパラメータ推定を行うのは困難である。一方、文献 [10] では、実際の回転式プロジェクタの構造に忠実ではない簡易なモデルを設定している。そのためパラメータ数が少なく推定は安定するが、そもそも正確なモデルではないため、投影結果は正確ではない。

そこで本論文では、モデルが簡単になるようにその物理的な構造自体を設計した回転式プロジェクタを実装することで、正確なモデル化と安定したパラメータ推定を行い、正確な投影結果を得ることを目指す。具体的には、その投影中心が回転機構の回転中心

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 生駒市
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, 8916-5 Takayama, Ikoma-shi, 630-
0192 Japan

a) E-mail: ikuhi-mi@is.naist.jp

と空間的に一致するような構造をもつ回転式プロジェクタを提案・実装する．本論文では，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 (Fixed-Center Pan-Tilt projector; FC-PT プロジェクタ) と呼ぶ．そして，実環境での投影実験を行いその有効性を確認する．

なお，本論文では誤解を避けるために，以後，回転機構を含んだプロジェクタシステム全体をプロジェクタと呼び，回転機構に搭載されているプロジェクタ装置を投光部と呼んで区別する．

2. 従来の回転型プロジェクタのモデルパラメータ推定

2.1 Non-FC-PT プロジェクタ

従来の回転型プロジェクタの実装法として，文献 [10] のようにプロジェクタを回転雲台の上に設置し直接投影光の方向をコントロールする方法と，文献 [9], [11] のようにプロジェクタ投光部の前方に設置したミラーを回転させることで投影光の方向をコントロールする方法がある．これらの実装では，投影中心位置 (後者の例の場合，ミラーごしの仮想の投影中心位置) は一般にプロジェクタの姿勢変化によって変化する．本論文ではこのような回転型プロジェクタを投影中心非固定パンチルトプロジェクタ (Non Fixed-Center Pan-Tilt Projector; Non-FC-PT プロジェクタ) と呼ぶ．

2.2 Non-FC-PT プロジェクタモデル

実環境中の平面・曲面に対して意図した画像表示を行うためのプロジェクタ入力画像算出には，投影中心位置及び投光部姿勢が必要となる．固定型プロジェクタの場合，一度設置すればその位置・姿勢は不変なので，それらの情報は設置時に一度計測しておけばよい．それに対して，回転型プロジェクタの場合は設置後自由にその姿勢を変化させることができ，特に Non-FC-PT プロジェクタであればその姿勢変化に応じて投影中心位置も変化する．そのような任意の姿勢に対して，その位置・姿勢を計測しておくのは非現実的なので，通常，一つないし複数の姿勢における投影中心位置・投光部姿勢のみを計測しておき，その計測情報と自らの構造情報を利用して任意に姿勢を変化させた際の位置・姿勢を算出する．この構造情報のことをモデルと呼ぶ．

本論文では，Non-FC-PT プロジェクタモデルの一般例として，図 1 に示すモデルを考える．3. の FC-PT プロジェクタのキャリブレーションとの対比のため，

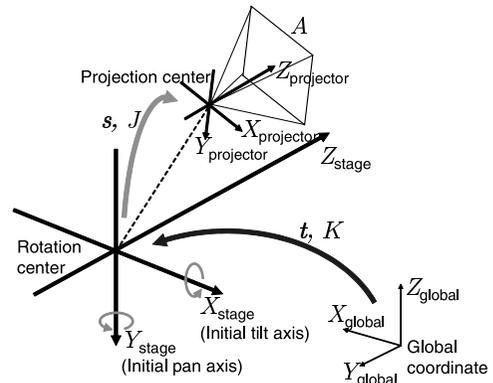


図 1 Non-FC-PT プロジェクタの構造モデル
Fig. 1 Model of a Non-FC-PT projector.

パン・チルト 2 軸が互いに直交するようなジンバル機構とした．また，プロジェクタの初期姿勢を定め，その状態における回転機構のパン軸・チルト軸，及びそれらの垂線によって定義される座標系をプロジェクタ座標系と呼び，グローバル座標系におけるプロジェクタ座標系の位置・姿勢をプロジェクタの位置・姿勢と呼ぶ．この定義より，プロジェクタ座標系の原点は，回転機構の中心点 (回転中心) となる．図 1 より，このモデルには以下のような合計 17 個のパラメータ^(注1)が関係することが分かる．

- 投光部の内部パラメータ行列 A (5 パラメータ)
- プロジェクタ座標系における投影中心位置 s ，投光部姿勢 J (合計 6 パラメータ)
- プロジェクタ位置 (回転中心) t ，姿勢 K (合計 6 パラメータ)

s, t は三次元ベクトル， J, K は 3×3 の回転行列である．また，プロジェクタは一般にカメラと比較してレンズひずみがよく解消されているため，本論文ではレンズひずみに関するパラメータは内部パラメータに含まないこととした．

上記のパラメータのうち， t, K は設置のたびに変わるため再計測 (外部キャリブレーション) が必要となるが，それ以外のパラメータは設置場所に依存しない，回転式プロジェクタごとの固有のパラメータである．よって，これらのパラメータ A, s, J を本論文で

(注1): なお，文献 [9] でも Non-FC-PT プロジェクタのモデル化を行っているが，そのパラメータ数が異なっている．レンズひずみを考慮していることなどにより内部パラメータが三つ多く，またパン軸・チルト軸が交わっていないためその距離に関するパラメータが一つ，更にミラーの設置に関するパラメータ二つをもつため，合計で本論文より 6 パラメータ多い，23 パラメータを含むモデルとなっている．

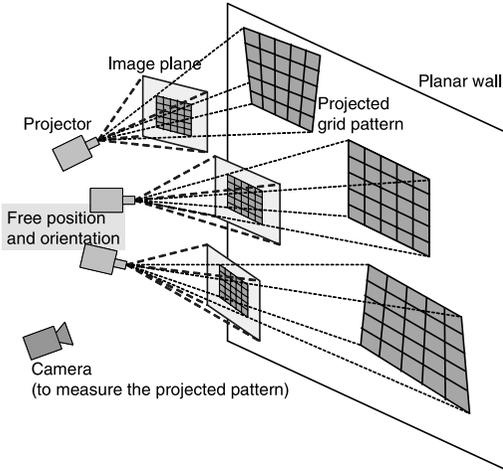


図2 Zhangの方法を利用した投光部のキャリブレーション
Fig. 2 Projector calibration by the Zhang's method.

はモデルパラメータと定義する。

2.3 Non-FC-PT プロジェクタのモデルパラメータ推定法

プロジェクタの投影中心位置はその外見から明らかではなく、また個体差もあるため、2.2で示したパラメータは、装置を直接測って正確に得るのは困難である。そのため通常、プロジェクタを姿勢変化させたときの投影中心位置・投光部姿勢を計測し、そこからモデルパラメータを推定する。ここではその詳細を述べる。なお、文献[9]のプロジェクタは本論文のものとモデルが異なるため計算プロセスは同一ではないが、本質的には同様である。

まず、Zhangのカメラキャリブレーション法[12]を用いて、投光部の内部キャリブレーション及び外部キャリブレーションを行う。具体的には、図2のようにプロジェクタに一定の格子パターンを入力し、複数のプロジェクタ姿勢 (α_i, β_i) について、実環境の1平面に投影された格子パターンの位置を計測する(注2)。この処理によって、投光部の内部パラメータ A 及びそれぞれのプロジェクタ姿勢 (α_i, β_i) における投影中心位置 p_i (三次元ベクトル)と投光部姿勢 V_i (3×3 の回転行列)が推定できる。ここで得られた内部パラメータ A については、そのままNon-FC-PTプロジェクタのモデルパラメータとして採用する。

残るモデルパラメータ s, J は、外部パラメータ t, K と併せて以下の手順での推定を行う。Zhangの手法によって得られた p_i や V_i には誤差が含まれやすいのと

比較して、 (α_i, β_i) は回転雲台から取得する角度情報の誤差は無視できる程度に小さいので、これら残りのモデルパラメータを推定する際には、 (α_i, β_i) は誤差をもたない定数とし、 p_i と V_i の誤差を最小化させる最適化問題として解く。具体的には、モデルパラメータと各姿勢 (α_i, β_i) によって定まる投影中心位置と p_i との誤差の総和を表す次式の評価値 e_{pos} を用いる。

$$e_{\text{pos}} = \sum_i |(KD_{(\alpha_i, \beta_i)}s + t) - p_i|^2 \quad (1)$$

ただし、 $D_{(\alpha, \beta)}$ は、パン方向に α 、チルト方向に β 回転させる 3×3 の回転行列である。上式中には J が現れないため、加えて姿勢情報に関する評価値 e_{dir} を別途次のように導出する。姿勢 (α_i, β_i) における投光部姿勢は、

$$KD_{(\alpha_i, \beta_i)}J \quad (2)$$

となり、複数の姿勢においてこれが V_i に近づくような最適化を行えばよい。姿勢の推定値とモデルが完全に一致していれば次の行列 V' は単位行列 E となる。

$$V'_i = V_i^{-1}(KD_{(\alpha_i, \beta_i)}J) \quad (3)$$

したがって、 V' の要素 v'_{ij} について、以下の e_{dir} を評価値とすればよい。

$$e_{\text{dir}} = \sum_i |(v'_{11} - 1)(v'_{22} - 1)(v'_{33} - 1)| \quad (4)$$

式(1)、(4)の二つの評価値 $e_{\text{pos}}, e_{\text{dir}}$ を用いてLevenberg-Marquardt法[13]によって非線形最適化を行うことによって s, J, t, K を決定することができる。

以上のプロセスで得られた A, s, J をNon-FC-PTプロジェクタのモデルパラメータ推定値とする。

2.4 計算機シミュレーション実験と評価

2.3のモデルパラメータ推定法では、Zhangの手法による投光部の内部パラメータ推定値をそのまま採用し、またモデルパラメータ s, J の推定についても投光部の外部キャリブレーションに強く依存した処理になっていることが分かる。しかし、投光部のキャリブレーションは一般に誤差を含みやすいことは経験的に知られている。そこで、ここでは、2.3のモデルパラ

(注2): この計測には固定カメラを用いる。事前に平面上に描いた格子パターンをカメラで撮影することで、カメラのひずみ補正及び平面-カメラ画像間のHomographyを算出しておく。これによって、以後カメラ撮影画像から、プロジェクタによって投影された各格子点の平面上でのメトリックな座標を算出することができる。

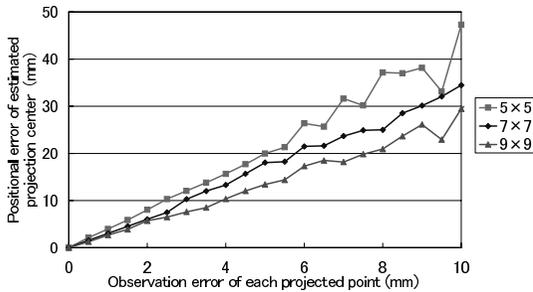


図3 投影中心位置推定のシミュレーション結果

Fig. 3 Simulation result of extrinsic calibration of a projection center.

メータ推定を行った場合に、投光部キャリブレーションの誤差がどのようにモデルパラメータ推定結果に影響を及ぼすかについて、シミュレーションによって定量的な検証を行う。

まず、文献[12]のZhangの手法に基づく投影中心位置及び投光部姿勢の推定誤差に関して検証する。この手法において、誤差の主要因は投影された格子点の観測誤差である。そこで、その観測誤差と推定されたキャリブレーション結果の誤差の関係をシミュレーションによって調べる。シミュレーション環境を以下に示す。

- プロジェクタの焦点距離：23 mm（実際に利用しているプロジェクタの焦点距離）
 - 平面とプロジェクタ間の距離：1600 mm
 - 投影される格子点の個数：5×5, 7×7, 9×9
- 上述の条件における投影中心位置推定誤差の結果のグラフを図3に示す。グラフの横軸は投影された各格子点に加えるガウス雑音の標準偏差、縦軸は推定された投影中心位置の誤差である。このグラフより、投影中心位置推定誤差は投影点観測誤差の3~4倍程の値となった。

次に、プロジェクタの姿勢を複数変化させた際の投光部の位置 p_i と姿勢 V_i の推定値から、モデルパラメータ s, J を推定する際の誤差について、以下の環境でシミュレーションを行い検証する。

- プロジェクタ姿勢：パン・チルトそれぞれに $-30^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で 5° 刻み
- 構造モデルにおける投影中心と回転中心との距離：0~200 mm

ここでは一例として、全モデルパラメータのうち、投影中心と回転中心の距離（中心間距離） $|s|$ を取り上げ、投影中心位置誤差とこの中心間距離推定値の誤差

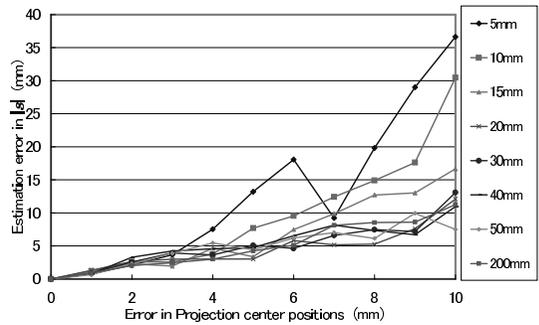


図4 モデルパラメータ $|s|$ 推定のシミュレーション結果
Fig. 4 Simulation result of a model parameter $|s|$.

との関係を表すグラフを図4に示す。グラフの横軸は各投影中心位置に加えるガウス雑音の標準偏差とし、縦軸は推定された $|s|$ の誤差の標準偏差とした。正解のモデルとして中心間距離を5 mmから200 mmまで変化させたものを用い、これらを各系列として示した。このグラフより、中心間距離が小さいほど、各投影中心位置の誤差の影響を大きく受けるため、 $|s|$ の推定精度が悪化する傾向が確認できた。また、逆に中心間距離が大きいほど誤差が小さくなるが、この誤差は投影中心位置の誤差程度以上には改善されないことも確認した。

以上二つのシミュレーション実験より、中心間距離が十分大きく、なおかつ格子パターン観測誤差以外の誤差要因が一切ない状況下でも、 $|s|$ の推定値には格子パターン観測誤差の3~4倍の推定誤差が生じるといえる。この傾向は他のモデルパラメータについても同様である。また、実際の環境下では、図2に示すような広い平面について完全な平面性が保証されないため、モデルパラメータ推定精度は更に悪化すると考えられる。つまり、このように実環境の平面について広範囲にわたる完全な平面性や更にその平面全体にわたって高い精度で格子パターン位置を取得することを要求するこのようなアプローチでは、十分な推定精度は保証されない。

3. FC-PT プロジェクタの提案とそのモデルパラメータ推定

3.1 FC-PT プロジェクタ

2.4で述べたように、一般の回転式プロジェクタすなわちNon-FC-PTプロジェクタのモデルパラメータ推定は理論上可能だが、実際にはその処理過程で要求される格子パターンの観測精度や環境平面の平面性が

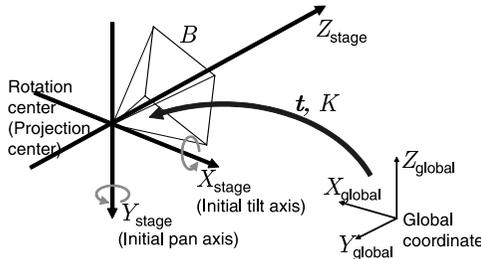


図 5 FC-PT プロジェクタの構造モデル
Fig. 5 Model of a FC-PT projector.

不十分なために、その推定は一般に不安定になる。本論文ではこれを解決するために、プロジェクタの投影中心位置が姿勢変化に応じて移動しないよう、投影中心と回転中心の位置を正確に一致させ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。

3.2 FC-PT プロジェクタモデル

FC-PT プロジェクタの構造を図 5 に示す。このモデルには以下のようなパラメータが関係する。

- 投光部の内部パラメータ行列 B
- プロジェクタ位置 (回転中心) t , 姿勢 K

Non-FC-PT プロジェクタモデルと比較すると、FC-PT プロジェクタでは投影中心と回転中心を一致させているため $s = 0$ となりパラメータが三つ削減されている。投光部姿勢 J については、投光部の内部パラメータ A に掛け合わせて全体として一つの内部パラメータ行列 B として表現している。また、Non-FC-PT プロジェクタと同様に t, K は外部パラメータである。したがってモデルパラメータは B のみとなる。

3.3 FC-PT プロジェクタのモデルパラメータ推定

3.2 より、Non-FC-PT プロジェクタと比較して FC-PT プロジェクタの方がモデルパラメータ数が少なくなっていることが分かる。推定すべきパラメータ数が少ない分、FC-PT プロジェクタのモデルパラメータ推定の方が安定に求められることが期待できる。これに加えて、投影中心位置が不変であるという FC-PT プロジェクタの特徴に注目することで、 B に関する最適化を行うことができ、推定精度の向上が図れる。その詳細について以下に述べる。

プロジェクタ姿勢 (α, β) のとき、プロジェクタ座標系において $(X, Y, Z)^T$ で表される空間中の 1 点に対応する画像上の座標 (x, y) は以下の式で得られる。

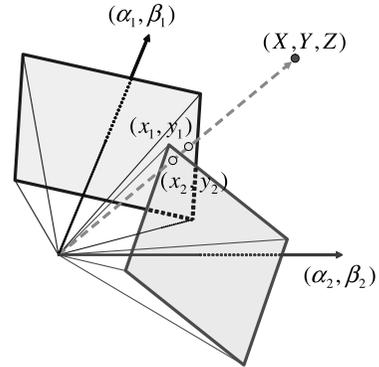


図 6 異なる姿勢からの同一点投影
Fig. 6 The same point projection from different orientations.

$$\sigma \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = B(D_{(\alpha, \beta)} | 0) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = BD_{(\alpha, \beta)} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ただし、 σ は定数である。異なる二つの姿勢 $(\alpha, \beta) = (\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2)$ における画像平面座標をそれぞれ $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ とし、これらを式 (5) に代入すると、

$$\sigma \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} = BD_{(\alpha_2, \beta_2)} D_{(\alpha_1, \beta_1)}^{-1} B^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

を得る。この式は、図 6 に示すように、空間中の任意の 1 点 (X, Y, Z) について、その点が姿勢 (α_1, β_1) のプロジェクタの画像上の点 (x_1, y_1) によって照らされるとき、異なる姿勢 (α_2, β_2) で同じ点を照らすための画像上の点 (x_2, y_2) が定まるということを示している。これは文献 [14] の視点固定型パンチルトズームカメラにおいても成り立つ、投影中心固定型特有の性質である。この性質を利用し、 B に関する最適化処理を以下のように行う。

まず、初期姿勢 $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ において画像平面上の既知点群 $(x, y) = (x'_i, y'_i) (i = 1, 2, 3, \dots)$ を実環境中に投影しておく。この点群は一つの平面上になければならないという制約が必要ないことが重要である。次に、それらの投影点を画像平面の中央の点 $(x, y) = (0, 0)$ で照らすことのできる姿勢を制御し、そのときの姿勢 (α'_i, β'_i) を観測する。このとき、 (x'_i, y'_i) と (α'_i, β'_i) は FC-PT プロジェクタが正確にキャリブレーションされていれば式 (6) より、以下の関係を満たす。

$$\sigma \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = BD(\alpha'_i, \beta'_i)B^{-1} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

姿勢情報 (α'_i, β'_i) は回転雲台から正確に取得できるため、この式が成り立たなくなる主要因は投影部の内部パラメータ B にあると考えられる。以上の考察より、次式の評価値 e_{fc} を用いて行列 B の非線形最適化を行い、内部パラメータを決定する。

$$e_{fc} = \sum_i (m_i^2 + n_i^2) \quad (8)$$

ただし、 (m, n) は以下で与えられる。

$$\sigma \begin{pmatrix} m_i \\ n_i \\ 1 \end{pmatrix} = BD(\alpha'_i, \beta'_i)B^{-1} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

なお、本論文の実装では、投光部をパン・チルト2軸の垂線方向とほぼ一致するように向けておく(すなわち $J \approx E$)、文献[12]の内部キャリブレーションによって推定された A を、 B の初期値として用いている。

3.4 投影中心固定法

3.3 で述べた FC-PT プロジェクタのモデルパラメータ推定手法は、 $s = 0$ 、すなわち投影中心と回転中心が完全に一致する場合にのみ成り立つ。よって、この方法でモデルパラメータ推定を行う際には、FC-PT プロジェクタがこの構造を正確に満たすように実装することが重要である。以下にその方法の詳細を述べる。

まず、パン・チルト方向に回転可能な電動回転雲台を用意する。この雲台は、パン軸とチルト軸が交差するように正確に設計する。この交点が雲台の回転中心となる。

FC-PT プロジェクタを製作する際には、投影中心が雲台の回転中心と空間的に一致するようにプロジェクタを配置しなければならない。しかし、プロジェクタの投影中心の空間的な位置を正確に得るのは困難なので、投影中心と回転中心を正確に一致させることはできない。そこで本論文では、1) 投影光軌跡観測によるおおよその投影中心位置の計測を行った後、2) 投影中心固定状態で満たすべき投影結果が得られるように雲台上で投光部の位置を微調節する、という2ステップの作業によって投影中心と回転中心の一致を確認する手法を採用する。

1) の投影中心のおおよその位置の計測では、図7に示すように、平面物体を用意し、投光部のレンズ前方に垂直に立ててプロジェクタから投影を行い投影光の

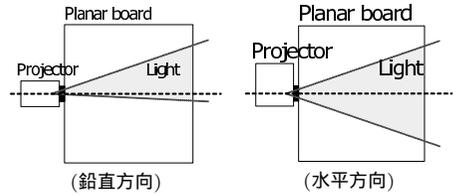


図7 投影光の軌跡による投影中心位置計測
Fig. 7 Projection center estimation by measuring.

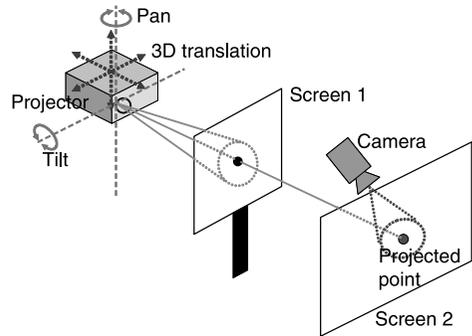


図8 正確な投影中心位置固定法
Fig. 8 Precise fixing of the projection center.

軌跡を平面物体上に記録する。水平方向にも同様の作業を行う。投影光がある1点から投影されるとすると、これらの軌跡を延長すると1点で交わる。したがって、この交点の位置をおおよその投影中心位置とみなす。

次に、図8に示すように、投光部を回転雲台の上に設置する。この際、上で求めたおおよその投影中心が回転雲台の回転中心に一致するように設置する。また、投光部には回転雲台上で x, y, z 方向にスライド可能な機構を設けておく。プロジェクタの前方には二つのスクリーンを設け、近い側のスクリーン(スクリーン1)には小さな穴を一つ空けておく。プロジェクタから光を投影すると、この小さな穴を通過した光のみが遠い側のスクリーン(スクリーン2)に到達し、点として投影される。このとき、もし投影中心が回転中心と正確に一致していれば、プロジェクタがどのように姿勢変化しても、このスクリーン2上の投影点の位置は不変となる。逆に、投影中心と回転中心がずれている場合、スクリーン2上の投影点の位置はプロジェクタの回転に応じて変動する。したがって、回転雲台上の投光部の位置を少しずつ変化させながら、投影光が穴を通過できるようプロジェクタをその画角内の範囲で回転させて投影点の動きを観測する。具体的には、観測

にはその投影点付近のみを高解像度にとらえられるように設置された固定カメラを使用し、その撮影画像上で投影点軌跡の凸包多角形の面積を計測する。そして、この面積が最小になる状態（すなわち投影点が動かなくなる状態）を発見し、それを投影中心と回転中心が一致している状態とみなす。

この方法によって投影中心固定が実現可能であることを確認するために回転中心と投影中心の位置ズレと投影点の軌跡面積の関係について、計算機シミュレーションを行った。回転中心を原点とする座標系において (s_x, s_y, s_z) の位置にある投影中心を、パン・チルトそれぞれ $-15^\circ \sim 15^\circ$ の範囲で回転させた際の投影点の軌跡面積 U を求める。結果を図 9 に示す。(a), (b) より、 U は投影中心の Z 方向のずれには敏感なのに対し、 X, Y 方向については変化が微小である。これは、 $s_z = 0$ 平面上の点は、図 10 に示すように、画角の範囲内という小さな角度回転運動をさせてもその投

影中心の動きは Z 軸とほぼ平行になり、スクリーン上の投影点の動きに反映されにくいためである。一方、(c) の $s_z = 0$ の断面を見ると、 $s_z = 0$ でも特に X 軸方向について U 最小の位置を見つけるのが困難だと考えられる。しかし、(d) に示すように、 s_z を前後にずらすと U 最小の位置は明確になり、またこの傾向は $s_z = 0$ に関してほぼ対称となる。これを利用することで、 U が最小となる投影中心位置の探索が可能となる。

なお、この手法では XYZ 空間中での U の大域的な変化を観測しなければならないが、候補領域全体にわたって密に U を観測していくのは大変な作業である。そのため、実際の作業では、まずおおよその投影中心位置を中心に X, Y, Z 方向それぞれに $-10 \sim 10$ mm の範囲を 5 mm 間隔で投光部を動かして U 最小となる位置を探索し、次にその周辺で 1 mm 間隔で密に U を観測して真の U 最小位置を探索するという 2 段階の探索を行った。

3.5 FC-PT プロジェクトの利点と欠点

本論文で提案する FC-PT プロジェクトの実装法及びモデルパラメータ推定について既存の Non-FC-PT プロジェクトと比較し、その利点と欠点を考察する。

まず、重要な利点として、3.3 に示したように、FC-PT プロジェクトのモデルパラメータ推定法では投影中心位置や投光部姿勢などの推定値を一切必要としない点が挙げられる。Non-FC-PT プロジェクトの場合、2.3 に示したように、そのモデルパラメータ推定精度は Zhang の手法による投影中心位置・投光部姿勢の推定精度に強く依存する。そして、Zhang の手法では、広い投影平面の完全な平面性を仮定しているために、実際の環境ではそれほど高い推定精度が期待できない。これに対して、FC-PT プロジェクトの場合は、投光部の内部パラメータ推定の初期値として Zhang の手法による推定値を用いるが、最適化段階では、この不安定な手法を一切利用せず、用いる投影面も平面である必要はなく任意の形状でかまわない。

また、カメラによる計測する範囲の違いによって次のような利点も生じる。Non-FC-PT プロジェクトの場合は、投影される格子パターンの投影面上での絶対座標を計測する必要がある。しかし、カメラを用いて広い投影平面全域にわたって高い計測精度を実現するためには正確なカメラキャリブレーションが必要となり、一般に高い精度を実現するのは難しい。これに対して、FC-PT プロジェクトの場合、カメラによる計測が必要となるのは 3.4 で示した投影点の軌跡計測

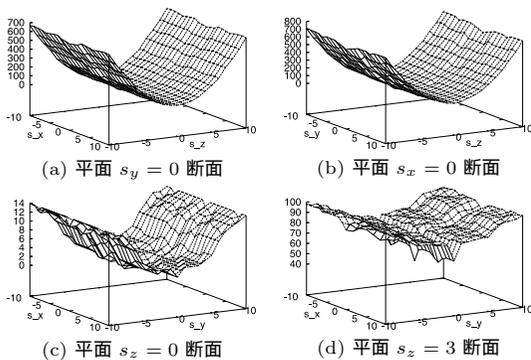


図 9 投影中心位置と投影点軌跡の関係

Fig. 9 Position of a projection center and movement of the projection.

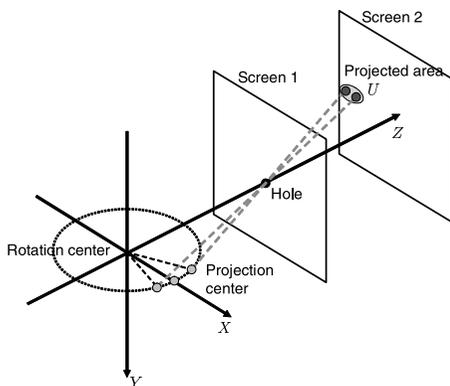


図 10 投影点がほとんど動かない状況

Fig. 10 A case that the projection almost stops.

であるが、これは軌跡の範囲のみを高解像度で撮影したカメラ画像を用いてその軌跡面積のみを計測すればよい。そのため正確なキャリブレーションの必要がなく、またとらえる範囲を狭く限定できるため空間分解能が高いという利点ももつ^(注3)。

一方、3.4 で述べた FC-PT プロジェクタの実装法が面倒なのが欠点である。投影中心固定位置を見つけるために、その周辺で x, y, z スライドステージを微小に変化させながら投影点の軌跡を観測していかなければならない。ただし、この作業は FC-PT プロジェクタ実装時にただ一度だけ行う作業であること、また製品化時には製作者側の光学設計の段階での工夫によって簡単化できる可能性もあることから、本論文では高精度にモデルパラメータが推定可能で正確な投影が実現できるという利用者時の利点を重視し、このようなアプローチをとっている。

4. FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションと投影画像算出法

FC-PT プロジェクタにおいても、投影面が平面でも任意の曲面であっても、従来の固定プロジェクタと同様に投影面の三次元形状が分かれば投影可能である。したがって、FC-PT プロジェクタの導入によって、既存のシステム [1] ~ [7] など容易に回転式プロジェクタに拡張できる。

一方、実環境中の壁面や床面などの平面領域のみを投影面とする場合には、既存手法の拡張ではなく、FC-PT プロジェクタの特徴である正接平面を利用した新たな外部キャリブレーション方法をとることができる。本章では、その方法について述べる。

4.1 FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーション

内部パラメータ B が正確に得られれば、式 (6) の関係が成立するので、任意姿勢における画像平面座標を初期姿勢での画像平面に変換できる。本論文では、初期姿勢におけるパン・チルト軸によってできる平面と平行で、回転中心からの距離が 1 となる仮定の平面（正接平面と呼ぶ）を定義し、任意の姿勢における画像平面座標をこの正接平面上に変換することとする。正接平面の定義と式 (5) より、姿勢 (α, β) における画像平面座標 (x, y) は以下の式で正接平面上の点 (u, v) に変換される。

$$\begin{pmatrix} \lambda u \\ \lambda v \\ \lambda \end{pmatrix} = D_{(\alpha, \beta)}^{-1} B^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

正接平面を導入すると、実環境中の平面に対して外部キャリブレーションを行う際には、その平面と正接平面とのホモグラフィ行列を利用できる。ホモグラフィ行列はこの二つの平面について 4 点以上の対応があれば算出可能で、通常、実環境平面の 4 隅を用いるのが都合が良い。これは以下の二つの理由からである。

- 外部キャリブレーションの安定性

その平面の隅から隅の角度情報を用いた投光部位置・姿勢推定なので、基線の長い三角測量に相当し、キャリブレーションの安定が期待される。

- 作業の容易さ

多くの壁面や床面のように形状が長方形である場合、4 隅の点の二次元的な位置関係を得るのが容易で、また特徴的な点なので投影した点を位置合せしやすい。

4.2 1 平面への投影

例として、図 11 のように、実環境中の 1 平面 R_1 と正接平面 Q とのホモグラフィ行列 H_{QR_1} を取得（これを平面 R_1 の登録と呼ぶこととする）した際に、4 頂点が R_1 上のメトリックな二次元座標系で $(X_k^{(gra)}, Y_k^{(gra)})$ ($k = 1, \dots, 4$) と与えられる矩形を投影するための姿勢及び入力画像の算出方法を述べる。

まず、 R_1 上に定義されている図形 $(X_k^{(gra)}, Y_k^{(gra)})$ を H_{QR_1} を用いて正接平面 Q 上に投影する。

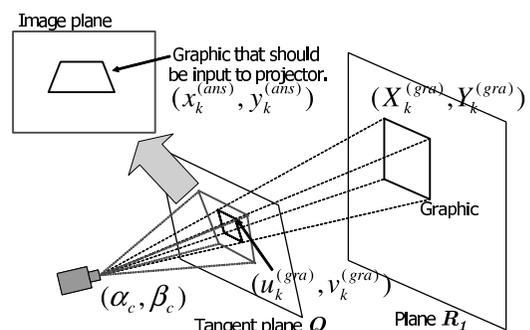


図 11 実環境中の平面への投影
Fig. 11 Projection onto a plane in the real environment.

(注3): 例えば、2 m 幅の平面領域上で VGA カメラを用いて格子点位置観測をする場合、1 ピクセル当り 3.13 mm だが、投影点付近のみをとらえられるよう 10 cm 幅のみを同カメラで撮影する場合 1 ピクセルあたり 0.16 mm となる、観測誤差もこれに比例して異なると考えられる。

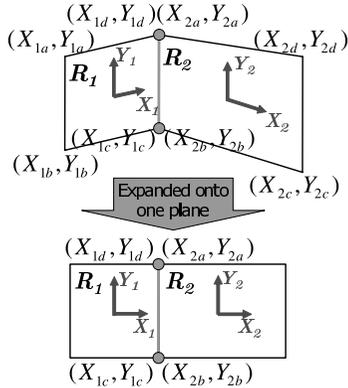


図 12 連結 2 平面の展開
Fig. 12 Expanded two planes.

$$\begin{pmatrix} u_k^{(gra)} \\ v_k^{(gra)} \\ 1 \end{pmatrix} = H_{QR1}^{-1} \begin{pmatrix} X_k^{(gra)} \\ Y_k^{(gra)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

次に正接平面上で図形の重心 $(u_c^{(gra)}, v_c^{(gra)})$ を求め、式 (10) によって、この図形を画像の中央でとらえられるプロジェクト姿勢 (α_c, β_c) を得る。最後に再び式 (10) を用い、姿勢 (α_c, β_c) 及び正接平面上での図形情報 $(u_k^{(gra)}, v_k^{(gra)})$ を代入して、この姿勢における図形の画像平面座標 $(x_k^{(ans)}, y_k^{(ans)})$ を得る。

4.3 複数平面への拡張

4.2 で述べた FC-PT プロジェクタによる投影手法は、実環境中に平面が複数ある場合には、同様の手続きを各平面に対して行えばよい。しかし、各平面における二次元座標系が独立に設定されていると、これら複数平面間の連結関係、及びそれらの座標系間の関係を把握できない。その結果、ある平面上に描画されている図形を隣接する他の平面に移動させる際に、その境界部で描画が破綻してしまう。

この問題を解決するためには、実環境中の複数平面の連結関係、及びそれらのメトリックな二次元座標系間の関係が得られればよい。各平面について 4.2 の方法で外部キャリブレーションしていれば、プロジェクトから各平面の 4 隅への方向が既知なので、平面間に共通する辺の有無が判断でき、連結関係を認識できる。また、座標系間の関係については、図 12 に示すように、各連結 2 平面を展開図的に 1 平面上に広げ、その状態でその 2 平面の二次元座標系間の変換式を算出しておけばよい。

以上の準備を行った上で、複数の平面にまたがる図形を描画するための処理方法を以下に述べる。まず、

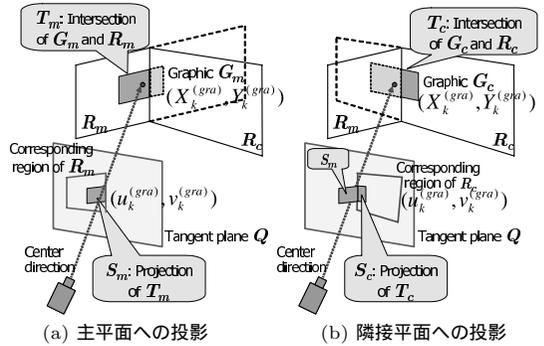


図 13 境界部への投影
Fig. 13 Projection onto a boundary of two planes.

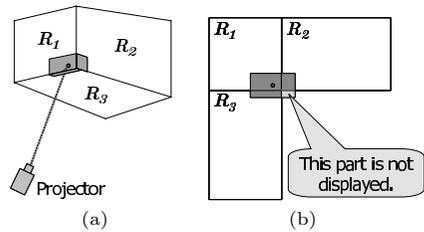


図 14 3 平面の角部への投影
Fig. 14 Projection onto a corner of three planes.

図形の重心が含まれる実環境平面 R_m を現在の主平面と定義する。そして、図 13 (a) に示すように、図形形状 G_m は主平面 R_m の領域からはみ出るので、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 に投影し、部分像 S_m を得る。続いて、現在の主平面 R_m に連結している連結平面 R_c を探索し、 R_m-R_c の二次元座標系間の変換式を用いて、現在 R_m 上で記述されている図形形状 G_m を各連結平面 R_c 上の座標 G_c に変換する。そして、図 13 (b) に示すように、 G_c と R_c との積領域 T_c を算出し、それを Q に投影し、部分像 S_c を得る。以上の処理の後、正接平面 Q でこれらの部分像を組み合わせて図形領域 S_{all} を生成する。 S_{all} が得られれば、あとは 4.2 と同様に姿勢とそのときの入力画像を算出できる。

なお、図 14 (a) で示すような 3 平面の角部への描画を考えた場合、図形のひずみも欠落もなく表示することは、投影の手法によらず不可能である^(注4)。本論文の手法では、図 14 (b) のように主平面 (この図では R_1) を中心に連結平面を展開図的に広げ、その展開図上に図形を配置するため、描画図形の一部がどの平面

(注4): 紙を、たわみも切断もなく、3 平面の角部にそのまま貼り付けることができないのと同様である。

領域からもはみ出してしまい、結果として欠落のある図形描画となる。逆に、図形をひずませて欠落のない図形描画する方法も考えられる。どのような描画が適切かはアプリケーションに依存しており、用途に応じた適切な描画方法を検討し選択する必要がある。

5. 実環境での性能評価実験

開発した FC-PT プロジェクタを図 15 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。主なスペックを表 1 に示す。雲台には、姿勢の位置精度・再現精度の高いステッピングモータを用いた。この FC-PT プロジェクタを用いて、以下 3 種類の実験を行った。なお、いずれの実験も、投影面がプロジェクタの画角に比べて大きく、プロジェクタの姿勢変化を必要とする環境設定とした。

5.1 FC-PT プロジェクタの有効性に関する実験

本論文は、3.5 で、FC-PT プロジェクタの導入によって Non-FC-PT プロジェクタで起こるモデルパラメータ推定誤差を軽減できると主張している。しかし、もし投影中心と回転中心がずれているプロジェクタに対して FC-PT プロジェクタモデルを仮定したモデルパラメータ推定を行えば、精度が逆転する可能性もあ

る。そこで、ここでは、実機を用いて Non-FC-PT プロジェクタ・FC-PT プロジェクタの実装とモデルパラメータ推定を行い、実現される精度を比較し、FC-PT プロジェクタの有効性を確認する。

最終的な投影の精度は外部キャリブレーションの精度にも依存する。そのため本論文では外部キャリブレーションに関する条件をそろえるために、FC-PT プロジェクタと Non-FC-PT プロジェクタの双方について、以下の処理を行った。まず、図 16 (a) に示すように初期姿勢 $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ において平面に格子パターンを投影し Zhang の手法によって外部キャリブレーションを行った。そして、図 16 (b) のようにその各格子点位置にプロジェクタ姿勢を変化させて投影を行った際の位置精度を調べた。なお、プロジェクタと平面の距離は 2m とした。

5.1.1 FC-PT プロジェクタでの実現精度

FC-PT プロジェクタについては、3.3, 3.4 で示した方法により実装しモデルパラメータ推定を行ったものを使用した。FC-PT プロジェクタの場合、式 (6) を利用することで、外部キャリブレーションの結果を用いずに自身の姿勢情報のみから各格子点位置への投影が可能であり、実際の投影において、その投影位置

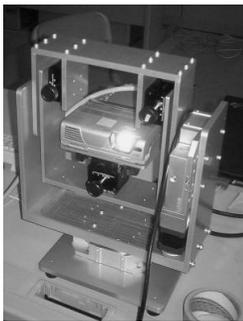


図 15 FC-PT プロジェクタ
Fig.15 FC-PT projector.

表 1 FC-PT プロジェクタスペック
Table 1 Spec. 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
焦点距離	23 mm
電動雲台	
回転角精度 (パン, チルト)	0.002 deg
最大回転速度	10 deg/s

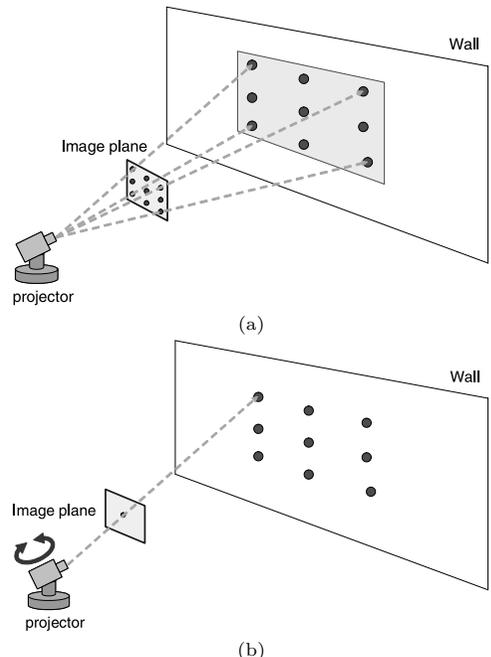


図 16 モデルパラメータ推定精度比較のための環境設定
Fig.16 Configuration for comparing accuracy of model parameter estimation.

誤差は最大 2 mm であった。

一方、正確に投影中心固定が実現されていることを前提とした式 (6) を用いて行った投影位置誤差がこのように小さいことより、投影中心固定及びモデルパラメータ推定がかなり正確に行われていたと考察できる。

5.1.2 Non-FC-PT プロジェクタでの実現精度

本論文でこれまで述べたきたように、適当に実装された Non-FC-PT プロジェクタについて、そのモデルパラメータの正確な値を得ることは不可能である。そこで、5.1.1 で実装したかなり正確に投影中心が固定できたと考えられる FC-PT プロジェクタを用いて、その投光部のみを前方に 50 mm スライドさせたものを Non-FC-PT プロジェクタとして利用した。これにより、この Non-FC-PT プロジェクタの中心間距離 $|s|$ はおよそ 50 mm と見込まれる。

この Non-FC-PT プロジェクタについて、2.3 の方法でモデルパラメータ推定を行った結果、推定された中心間距離は 106 mm と推定された。これは実際の値と大きく異なり、モデルパラメータ推定が破たんしている。また、このモデルパラメータ推定値を用いて実際に投影を行うと、投影位置誤差の最大値は 36 mm となった。

5.1.1 に示した FC-PT プロジェクタの場合との比較より、実機において、本論文で提案する FC-PT プロジェクタの実装法及びモデルパラメータ推定法が投影精度の点で有利であることが確認された。

5.2 位置精度に関する実験

次に、4.1 で述べた FC-PT プロジェクタの外部キャリブレーションも行った上での投影画像の位置精度を確認する実験を行った。図 17 (a) に示す三つの投影面について、それぞれの 4 隅を用いてホモグラフィ行列を算出した。各平面上には 20 cm 間隔の格子点を設定し、各格子点に図 17 (b) に示すような十字マークを位置を指定して投影し、その位置精度を計測した。その結果、すべての指定位置で誤差は 5 mm 以内であった。5.1.1 に示したようにモデルパラメータ推定に起因する誤差は 2 mm 程度なので、残る 3 mm は外部キャリブレーションに起因する誤差であると考えられる。ただし、5.1.2 の Non-FC-PT プロジェクタによる投影との比較より、FC-PT プロジェクタの方が位置精度が高い。

5.3 姿勢変化による投影範囲拡大の効果

プロジェクタに回転機構をもたせる主目的は、投影可能な範囲の拡大である。プロジェクタの表示解像度

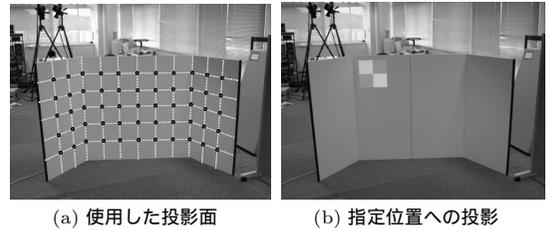


図 17 投影画像の位置精度に関する実験

Fig. 17 Experiments about positional accuracy of projections.



図 18 実験環境と投影例

Fig. 18 Environment and a projection example.

や明るさ、焦点深度の制約のもとで、実際にどの程度投影範囲を拡大できるかを調べる。

実験環境の壁面上に図 18 に示したような $8\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ の方形領域を用意し、その壁面から約 2 m の位置に FC-PT プロジェクタを設置した。方形領域の 4 隅にはマーカーを貼っておき、外部キャリブレーションはその 4 隅を用いて行った。図中の 4 点はそのマーカー位置を表している。想定する館内案内や遠隔操作指示などのアプリケーションを踏まえ、表示すべき最小の文字サイズを $12.5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ とし、それに合わせて投影画像として 1 辺 50 cm の正方形内に 40 文字 \times 20 行の英文字を並べたものを使用した。画像のピントが合っているかどうかは目視によるその英文字の読取りの可否で判断することとした。

プロジェクタの正面方向に画像がぼけなく投影される状態でピントを固定し、プロジェクタの正面位置及びそこから横に 1 m, 2 m, 3 m の位置に投影した画像の一部を拡大したものを、図 19 (a) ~ (d) に示す。一方、比較用に、同じ位置だがその位置ごとにピントを合わせ直したものを (a') ~ (d') に示す。また、それぞれの位置におけるプロジェクタへの入力画像を (a'') ~ (d'') に示す。

まず、(a'') ~ (d'') に示すように、投影位置が遠くなるに従ってプロジェクタ入力画像中での投影画像の大

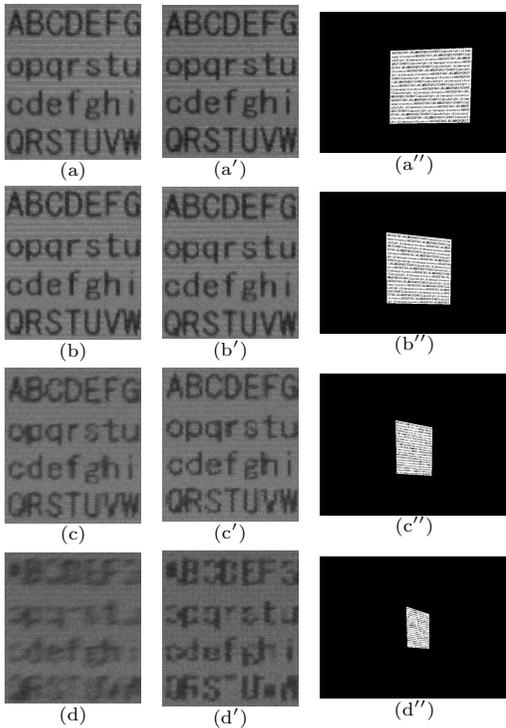


図 19 FC-PT プロジェクタによる広範囲投影
Fig. 19 Projection to a wide area by a FC-PT projector.

きさが小さくなり、投影画像の解像度が低下することが確認できる。そして、(d) に示すように、3 m の位置で文字の読取りが不可能になっているが、ぼけを解消した (d') でも読取り不可能なことから分かるように、読取り不可能の主要因は画像の解像度の低下である。逆に、(a) ~ (d) に示すように、読取り可能な解像度となる 2 m までの範囲では、ぼけの影響はほとんどなかった。よって、首振り機構によって現実的に投影可能な領域は、壁面上でプロジェクタの正面方向の点を中心とした半径 2 m の円周内となり、プロジェクタ固定時と面積を比較すると 10.6 倍となった。

このようにぼけの影響が小さいのは、使用したプロジェクタの投影方式が焦点深度の比較的大きい DLP を用いているからだと考えられる。

5.4 複数平面への投影

最後に、複数平面を対象とした投影実験を行った。環境中に図 20 に示すような 3 平面を用意し、FC-PT プロジェクタをこの 3 平面の前方約 1.5 m の任意位置に設置した。矢印の画像が人に追従しながら館内案内を行うアプリケーションを想定し、矢印の画像をこ

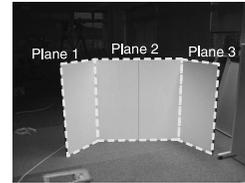


図 20 実環境中の 3 平面
Fig. 20 Three planes in experimental environment.

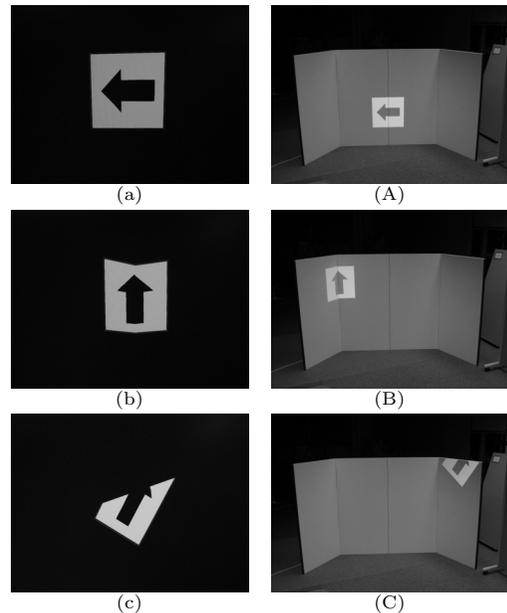


図 21 投影結果
Fig. 21 Experimental results.

の 3 平面上で自由に動かした。その投影実験の一部を図 21 に示す。(A) のように各平面上の任意位置で正確に画像描画できるだけでなく、(B) のような複数平面をまたがる場合でも、まるで紙のポスターが 2 平面の境界部の折れ曲がりに沿って貼られたまま移動していくような描画を確認できた。また (C) では、視覚情報の一部が事前に登録した 3 平面外にはみ出す場合に、 unnecessary 部分を投影しないようにする処理も適切に行われているのが確認できた。

また、描画された視覚情報の位置精度については、誤差 5 mm 以下となった。これは、実環境中の物体に対するアノテーションや位置指定など、多くの AR システムにおける視覚情報提示用途において、十分な精度だと考えられる。

6. む す び

本論文では、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 プロジェクタとそのキャリブレーション, 及び投影法を提案した. 本論文の方法は, FC-PT プロジェクタの実装時に, 投影中心と回転中心の位置合せ作業が面倒という欠点をもつが, 安定なキャリブレーション結果を得ることができ, 既存の方法と比較して投影結果の精度向上を実現できることを確認した. ただし, 現状の実装はモバイルプロジェクタを用いた小型プロトタイプシステムであり, 美術館等の館内案内や遠隔操作指示など実際のアプリケーションでは投影距離が大きくなり, 光量の点で不十分であると考えられる. 実利用に十分な仕様のシステムを実装し, その光量・フォーカス・解像度等を調査し, 利用範囲を明らかにする必要があると考えられる.

また, 今後の展開として, 複数台 FC-PT プロジェクタの使用が挙げられる. 複数プロジェクタにより, 投影可能範囲の更なる広域化や, 投影像の重畳により投影サイズ, ダイナミックレンジの拡大も可能になる. しかし, 複数台用いる場合は 1 台による画像表示では問題にならない程度の微小な位置のずれでも, 観測者にとって違和感のあるずれとなってしまう. この微小なずれをカメラシステムで観測するなどして軽減する方法などが必要となると考えられる. また, 連続的に移動する画像を表示するためには, プロジェクタと電動雲台という非同期なシステムをうまく制御する必要が生じる. 更に複数台のプロジェクタによってそのような移動画像を投影するためには, ネットワーク接続された複数台間の情報伝達手段も必要となる. このような複数非同期モジュールを含むシステムの制御手法も今後の課題となる.

謝辞 本研究は JST の PRESTO プログラム, 及び科学研究費補助金 (15700157) の支援を受けて行った.

文 献

- [1] 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, vol.7, no.2, pp.169–176, 2002.
- [2] 向川康博, 西山正志, 尺長 健, “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-D-II, no.7, pp.1448–1455, July 2001.
- [3] R. Raskar, G. Welch, K.-L. Low, and D. Bandyopadhyay, “Shader lamps: Animating real objects with image based illumination,” Proc. 12th Eurographics Workshop on Rendering Workshop, pp.89–102, 2001.
- [4] M.D. Grossberg, H. Peri, S.K. Nayar, and P.N. Belhumeur, “Making one object look like another: Controlling appearance using a projector-camera system,” Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2004), vol.1, pp.452–459, 2004.
- [5] J.M. Rehg, M. Flagg, T.-J. Cham, R. Sukthankar, and G. Sukthankar, “Projected light displays using visual feedback,” Proc. International Conference on Control, Automation, Robotics, and Vision, vol.II, pp.926–932, 2002.
- [6] R. Sukthankar, T.-J. Cham, and G. Sukthankar, “Dynamic shadow elimination for multi-projector displays,” Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.II, pp.151–157, 2001.
- [7] P. Beardsley, C. Forlines, R. Raskar, and J. VanBaar, “Handheld projectors for mixing physical and digital textures,” International Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams2005), p.112, 2005.
- [8] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, chapter 12, Cambridge University Press, 2000.
- [9] M. Ashdown and Y. Sato, “Steerable projector calibration,” International Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams2005), p.98, 2005.
- [10] S. Borkowski, O. Riff, and J.L. Crowley, “Projecting rectified images in an augmented environment,” International Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams2003), 2003.
- [11] C.S. Pinhanez, “The everywhere displays projector: A device to create ubiquitous graphical interfaces,” Proc. 3rd international conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '01), pp.315–331, 2001.
- [12] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.22, no.11, pp.1330–1334, 2000.
- [13] D.W. Marquardt, “An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters,” SIAM J. Appl. Math., vol.11, no.2, pp.431–441, 1963.
- [14] 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司, “視点固定型パンチルトズームカメラとその応用,” 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.6, pp.1182–1193, June 1998.

(平成 18 年 11 月 6 日受付, 19 年 4 月 10 日再受付)



満上 育久 (学生員)

2001 京大・工・電気電子卒. 2003 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程了. 現在, 同大学博士後期課程在学中. コンピュータビジョン, 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.



浮田 宗伯 (正員)

2001 京都大学大学院博士後期課程了。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 同准教授。2002 より 2006 まで科学技術振興機構さきがけ研究員兼任。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。

1999 本会論文賞受賞。



木戸出正継 (正員:フェロー)

昭 45 京都大学大学院工学研究科修士課程了。同年東京芝浦電気(現, 東芝)総合研究所入社。同社総合企画部, 関西研究所, 東芝アメリカ社を経て, 平 12 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。京都大学工学博士。パターン認識, ロボット

ビジョン, ヒューマンインタフェース, ウェアラブルコンピュータに関する研究に従事。情報処理学会フェロー, IEEE フェロー, IAPR(国際パターン認識協会)フェロー, 本会業績賞, 高柳記念奨励賞, などを受賞。情報処理学会関西支部長, 本会理事, MVA 国際ワークショップ組織委員長, IEEE ウェアラブルコンピュータ国際シンポジウム実行委員長などを歴任。現在, 本会情報システムソサイエティ会長。