

プロジェクタ・カメラシステムを用いた投影画像の 幾何補正に関する実験的検討

高橋 徹[†] 沼 徳仁[†] 青木 孝文[†] 近藤 敏志^{††}

[†] 東北大学 大学院情報科学研究科, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 松下電器産業株式会社, 〒571-8501 門真市大字門真 1006

E-mail: [†]toru@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本稿では、プロジェクタ・カメラシステムを用いた投影画像の幾何補正について実験的に検討する。実世界のさまざまな場所にプロジェクタで投影するとき、投影画像は、投影対象の形状やプロジェクタと投影対象との位置関係の影響により幾何学的に歪んでしまう。使用環境に応じて投影画像の幾何学的歪みを補正することでプロジェクタの機能性を高めることができる。本稿では、短基線長ステレオカメラによる3次元計測を用いた投影画像の幾何補正手法を提案する。提案手法では、短基線長ステレオカメラで得られた画像に対して位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) に基づく対応点探索を行うことで投影対象の形状を計測し、その形状に従って投影画像の幾何補正を行う。実験を通して、提案手法により投影画像の幾何学的歪みを効果的に補正できることを示す。

キーワード プロジェクタ・カメラシステム, 幾何補正, 3次元計測, 位相限定相関法

An Experimental Study of Geometric Correction for Projected Images Using Projector-Camera Systems

Toru TAKAHASHI[†], Norihito NUMA[†], Takafumi AOKI[†], and Satoshi KONDO^{††}

[†] Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, 6-6-05, Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, 980-8579 Japan

^{††} Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., 1006, Kadoma, Kadoma-shi, 571-8501 Japan

E-mail: [†]toru@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In this paper, we present an experimental study of geometric correction for projected images using projector-camera systems. When we use a projector in the various places in the real world, a projected image is distorted due to the shape of a display surface, the positional relationship between a projector and a display surface, etc. Addressing this problem, we propose a geometric correction method for projected images, which employs 3D measurement technique with the narrow-baseline stereo camera. In the proposed method, we use the correspondence search technique based on Phase-Only Correlation (POC) to obtain the 3D shape of the display surface. Experimental results show the proposed technique is effective for correcting distortion of projected images.

Key words projector-camera systems, geometric correction, 3D measurement, phase-only correlation

1. はじめに

プロジェクタは、小型で携帯性を有し、表示サイズを変更できる柔軟な表示デバイスである。一方、プロジェクタは、提示する画像（投影画像）が使用環境の影響を受けやすいという欠点を持つ。具体的には、投影対象の形状やプロジェクタと投影対象との位置関係によって投影画像が幾何学的に歪む場合や、投影対象の光の反射特性により投影画像の色調が損なわれる場合がある。そのため、使用環境に応じて投影画像を補正（幾何

補正、光学的補正）することによりプロジェクタの機能性を高める必要がある。

これまで、プロジェクタとカメラを組み合わせたプロジェクタ・カメラシステム (Projector-Camera systems: ProCams) を用いた投影画像の補正手法が提案されている [1]。プロジェクタ・カメラシステムでは、カメラで投影画像を撮影し、得られた画像に応じてプロジェクタに入力する画像を変換し、投影画像の補正を行う。したがって、投影対象の形状や色によらず、ユーザにとって望ましい画像に補正することができ、利便性の

向上が見込める。現在までに、投影対象が単一平面の場合についてのプロジェクタ・カメラシステムのキャリブレーション手法や投影画像の台形補正手法 [2]~[4]，投影対象が任意形状の場合の幾何補正手法 [5]~[8] が報告されている。また、テクスチャのある投影対象の場合は投影画像の色調が変化してしまうが、これを補正する光学的補正手法 [7], [9], [10] も報告されている。

プロジェクタ・カメラシステムを用いた投影画像の補正手法では、プロジェクタに入力する画像の座標系（プロジェクタ座標系）とカメラで撮影した画像の座標系（カメラ座標系）との対応関係を求める必要がある。通常、この対応関係を求めるために、プロジェクタで投影対象にパターン光を投影し、カメラで撮影する。代表的な手法として、井口らにより提案されたグレイコードパターン光投影法 [11] などがある。パターン光を用いる場合、基本的に、パターン光の投影・撮影を数回にわたり行う必要がある。したがって、プロジェクタ座標系とカメラ座標系の対応関係が変化すると、システムの利用を中断してパターン光の投影・撮影を再度数回にわたり行わなければならない。これは利便性の低下をもたらすと考えられ、特に環境が変化する機会が多い携帯利用を主とした小型のシステムにおいて問題となる。上述した手法を用いて環境変化に即応して補正を行う手法も提案されている [12] が、高速に動作可能な専用のプロジェクタやカメラを必要とし、汎用のプロジェクタやカメラを用いて補正を行うことは困難である。

これに対して、本稿では、短基線長のステレオカメラとプロジェクタを組み合わせたプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手法を検討する。本稿で検討するシステムおよび投影画像の幾何補正手法は、汎用のプロジェクタとカメラを用いて環境変化に即応することを考慮しており、1枚のパターン光の投影・撮影により投影対象の3次元形状を高精度かつ高密度に計測する。そして、得られた投影対象の3次元情報を用いて、投影画像の幾何学的歪みの補正を行う。さらに、本稿では、汎用のプロジェクタとカメラを用いて実験を行い、提案するシステムで投影対象を3次元計測した結果を示す。そして、短基線長のステレオカメラによって得られた3次元情報を用いて投影画像の幾何補正を行った結果を示す。実験を通して、検討したプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手法の有効性を示す。

2. プロジェクタ・カメラシステムの構成

本稿では、短基線長のステレオカメラとプロジェクタを組み合わせたプロジェクタ・カメラシステムを提案する。実験的に構築したプロジェクタ・カメラシステムを図1に示す。使用したカメラは PointGrey SCOR-14SOC であり、解像度は $1,280 \times 960$ ピクセルである。各カメラのレンズは μ TRON FV1022 である。使用したプロジェクタは MITSUBISHI LVP-PK20 であり、解像度は 800×600 ピクセルである。このプロジェクタ・カメラシステムの大きな特徴は、2つのカメラ間の距離を可能な限り短くしたステレオカメラを用いていることである。本稿で用いるステレオカメラでは、2つのカメラ間の距離を 51 mm

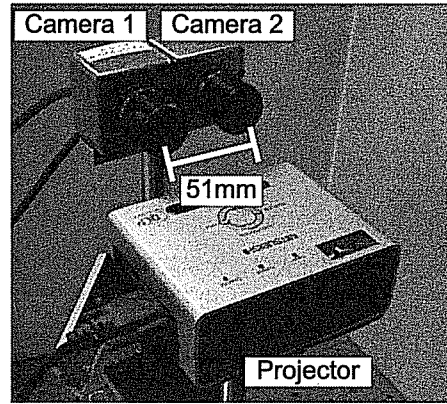


図1 プロジェクタ・カメラシステムの構成

に設定しているが、これは単に使用したカメラの本体のサイズに起因した制限である。短基線長のステレオカメラを用いることは、システム全体の小型化に貢献するため、カメラとプロジェクタを一体化した携帯利用を主とするシステムを想定した場合に有利であると考えられる。

投影対象の3次元計測およびその3次元計測結果を用いて投影画像の幾何補正を行うために、カメラおよびプロジェクタのキャリブレーションを行う必要がある。本稿では、チェッカーパターンの平板を用いて Zhang らが提案した手法 [13] によりキャリブレーションを行う。まず、各カメラおよびプロジェクタの内部パラメータを個々に推定する。本稿では、 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ のチェッカーパターンの平板を用いて、各カメラの内部パラメータを推定する。また、プロジェクタの内部パラメータは、チェッカーパターンにプロジェクタからパターン光を投影し、それをキャリブレーション済みのカメラで撮影することで行う。次に、カメラおよびプロジェクタを設置し、各カメラおよびプロジェクタの外部パラメータを推定する。外部パラメータの推定は、カメラおよびプロジェクタの正面にチェッカーパターンの平板を配置して行う。共通の世界座標系に対して、各カメラおよびプロジェクタの外部パラメータを推定し、透視投影行列をそれぞれ求める。

キャリブレーション後の各座標系間の関係を以下で述べる。3次元点を $M = (X, Y, Z)$ とし、これに対応するカメラ1、カメラ2およびプロジェクタの座標系の点をそれぞれ $m_{c1} = (x_{c1}, y_{c1})$ ， $m_{c2} = (x_{c2}, y_{c2})$ ， $m_p = (x_p, y_p)$ とすると、これらの関係は同次座標表現を用いて以下の式で表すことができる。

$$\tilde{m}_{c1} \cong P_{c1} \tilde{M} \quad (1)$$

$$\tilde{m}_{c2} \cong P_{c2} \tilde{M} \quad (2)$$

$$\tilde{m}_p \cong P_p \tilde{M} \quad (3)$$

ここで、 \cong は同値関係を表し、 P_{c1} 、 P_{c2} 、 P_p は、それぞれカメラ1、カメラ2およびプロジェクタの透視投影行列である。また、 $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ ， $\tilde{m}_{c1} = [x_{c1}, y_{c1}, 1]^T$ ， $\tilde{m}_{c2} = [x_{c2}, y_{c2}, 1]^T$ ， $\tilde{m}_p = [x_p, y_p, 1]^T$ である。キャリブレーションによって P_{c1} 、

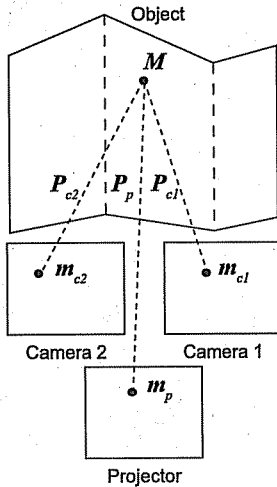


図2 3次元点と各カメラおよびプロジェクタ座標系の関係

P_{c2} , P_p を求めておくことで、カメラ1とカメラ2の対応点と式(1), (2)から投影対象の3次元座標を求めることが可能になる。また、得られた3次元点に対応するプロジェクタ座標系の点を、式(3)を用いて求めることが可能になる(図2)。

一般に、投影対象の3次元情報を用いて投影画像の幾何補正を行う場合、投影画像の補正結果は、補正処理に用いる3次元情報の精度に依存する。2つのカメラで物体の3次元計測をする場合、短い基線長のカメラ配置では、長い基線長のカメラ配置に比べて、計測で得られる3次元情報の精度が極めて低いという欠点がある。本稿では、この問題を解決するために、位相限定相関法(Phase-Only Correlation: POC)に基づく対応点探索を利用して、サブピクセル精度でステレオ画像間の対応付けを行う。次節に本システムを用いた投影画像の幾何補正手法を示す。

3. 短基線長ステレオカメラを用いた投影画像の幾何補正

本節では、ステレオカメラを用いたプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手法について述べる。本論文では、短基線長ステレオカメラにより投影対象を高精度に3次元計測するために、Takitaらが提案している位相限定相関法に基づく対応点探索[14]を利用する。位相限定相関法に基づく対応点探索により得られた対応点から、各カメラの透視投影行列を用いて、投影対象の3次元計測を行う。このとき得られた投影対象の3次元情報を用いてプロジェクタに入力する画像を変形させ、変形させた画像を投影することで幾何補正を行う。

以下では、まず、位相限定相関法の基本原理および対応点探索について概説し、次に本稿で提案したプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手順について述べる。

3.1 位相限定相関法の基本原理

画像サイズ $N_1 \times N_2$ ピクセルの2つの画像ブロックを $f(n_1, n_2)$, $g(n_1, n_2)$ とする。定式化の便宜上、離散空間のイ

ンデックスを $n_1 = -M_1, \dots, M_1$, $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ とし、画像サイズを $N_1 = 2M_1 + 1$ ピクセル、 $N_2 = 2M_2 + 1$ ピクセルとする。なお、ここでは説明を簡単にするために離散空間のインデックスを正負対称にとり、かつ2次元画像信号の大きさ N_1 , N_2 を奇数としているが、これは必須ではない。すなわち、通常よく用いられるように非負のインデックスを用い、 N_1 , N_2 を任意の正の整数に設定するように一般化することが可能である。

画像 $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ の2次元離散フーリエ変換(2D DFT)をそれぞれ $F(k_1, k_2)$, $G(k_1, k_2)$ として次式で与える。

$$F(k_1, k_2) = \sum_{n_1 n_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)} \quad (4)$$

$$G(k_1, k_2) = \sum_{n_1 n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \quad (5)$$

ここで、 $k_1 = -M_1, \dots, M_1$, $k_2 = -M_2, \dots, M_2$, $W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}$, $W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}}$ であり、 $\sum_{n_1 n_2}$ は、 $\sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2}$ である。 $A_F(k_1, k_2)$, $A_G(k_1, k_2)$ は振幅スペクトルであり、 $\theta_F(k_1, k_2)$, $\theta_G(k_1, k_2)$ は位相スペクトルである。このとき、 $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の正規化相互パワースペクトルを次式で与える。

$$R(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) G(k_1, k_2)|} = e^{j\theta(k_1, k_2)} \quad (6)$$

ここで、 $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役を示す。また、 $\theta(k_1, k_2) = \theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$ である。

POC関数 $r(n_1, n_2)$ は、 $R(k_1, k_2)$ の2次元逆離散フーリエ変換(2D IDFT)であり、次式で定義する。

$$r(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1 k_2} R(k_1, k_2) W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \quad (7)$$

ここで、 $\sum_{k_1 k_2}$ は $\sum_{k_1=-M_1}^{M_1} \sum_{k_2=-M_2}^{M_2}$ である。POC関数は、デルタ関数に近いきわめて鋭いピークを有する。この相関ピークの座標を求めることで、ピクセル精度の動きを検出することができる。この特長以外にも、POC関数は、画像間の位置ずれ(平行移動)や明るさの変化、加法的ノイズに対してロバストであることがItoらによって報告されている[15]。

次に、画像 $g(n_1, n_2)$ が $f(n_1, n_2)$ を (δ_1, δ_2) だけ微小に平行移動させた画像である場合を考える。ここで、 δ_1 および δ_2 は、それぞれ n_1 および n_2 方向のサブピクセルレベルの移動量を表している。このとき、 $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ のPOC関数は次式で与えられる。

$$r(n_1, n_2) \approx \frac{\alpha}{N_1 N_2} \frac{\sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\}} \frac{\sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}} \quad (8)$$

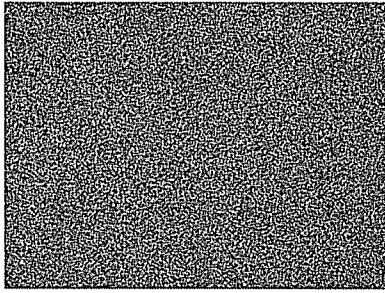


図3 プロジェクタが投影するパターン画像

ここで、 $\alpha = 1$ である。上式は、画像が (δ_1, δ_2) だけ微小に平行移動した場合の POC 関数の一般形を表している。 α は、相関ピークの高さを表すために導入されたパラメータである。画像に対して無相関なノイズが加わると α の値が減少するため、実際には $\alpha \leq 1$ となる。POC 関数を用いてサブピクセルの高精度な平行移動量を推定するためには、Takita らにより提案されている (i) 離散データで得られた POC 関数への相関ピークモデルのフィッティング、(ii) 画像端での信号の不連続性を解消するための窓関数の適用、(iii) エイリアシングやノイズの影響を抑制するためのスペクトル重み付けを用いる [14]。

3.2 位相限定相関法に基づく対応点探索

位相限定相関法に基づく対応点探索は、高精度に画像間の対応点を推定するために、(i) 位相限定相関法を用いた平行移動量推定手法による局所ブロック画像のブロックマッチングと (ii) 画像ピラミッドによる粗密探索を用いている。Takita らの精度評価実験によると、 32×32 ピクセルの画像ブロックに対して、0.05 ピクセルの精度で対応点間の移動量を求めることが可能である [14]。本手法の詳細については、文献 [14] を参考にされたい。

3.3 投影画像の幾何補正手順

本稿で提案するプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手順について述べる。投影画像の幾何補正手順は、(i) パターン光の投影・撮影、(ii) 投影対象の 3 次元計測、(iii) 原画像の変形の 3 つのステップからなる。以下では、各ステップについて概説する。

(i) パターン光の投影・撮影

ステレオカメラを用いているため、理想的には、プロジェクタからパターン光を投影せずに投影対象を 3 次元計測することが可能である。しかし、プロジェクタで情報を提示を行うことに適した投影対象は、基本的に表面が白色でテクスチャがない。このような投影対象の場合、ステレオカメラ画像間の対応付けを高精度かつ安定に行うことが困難である。そこで、投影対象の 3 次元計測を高精度かつ安定に行うために、プロジェクタから投影対象にパターン光を投影し、これをステレオカメラにより撮影する。本稿では、図 3 に示したランダムドット画像をプロジェクタに入力し、パターン光として用いる。このパターン光の投影・撮影を 1 回行うことにより、投影対象の 3 次元計測を行う。

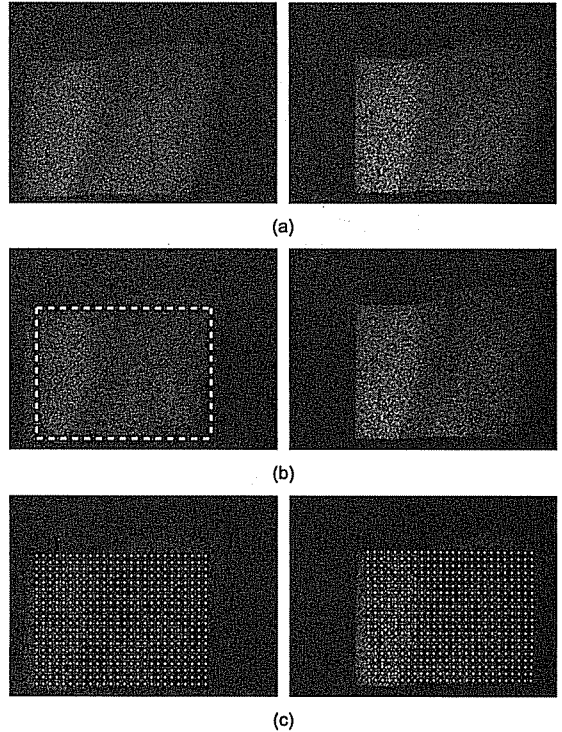


図4 投影対象の3次元計測：(a) 撮影画像（左：カメラ1，右：カメラ2）、(b) 補正結果を表示する領域の指定、(c) 対応点探索結果

(ii) 投影対象の 3 次元計測

(i) のパターン光の投影・撮影によって得られた画像を図 4 (a) に示す。図 4 (a) に示した 2 つの画像間の対応点を、位相限定相関法に基づく対応点探索により、サブピクセル精度で求める。本稿では、カメラ 1 の撮影画像において手で補正結果を表示する矩形領域を指定し (図 4 (b))、その内部において 8 ピクセルおきに基準点を設定する。この基準点に対して、カメラ 2 の撮影画像内で対応点を探索する。対応点探索時の画像ブロックサイズは 32×32 ピクセルとする。位相限定相関法に基づく対応点探索により、図 4 (c) に示すように対応点を取得することができる。

位相限定相関法に基づく対応点探索により得られた対応点 m_{e1}, m_{e2} と、事前のキャリブレーションによって求めたカメラの透視投影行列 P_{e1}, P_{e2} より、3 次元点 M に対して式 (1)、(2) の拘束が得られる。これを最小二乗法により解き、3 次元点を求める。

(iii) 原画像の変形

(ii) で得られた投影対象の 3 次元点群を、事前のキャリブレーションによって求めたプロジェクタの透視投影行列 P_p を用いて、式 (3) によりプロジェクタ座標系に変換する。プロジェクタ画像上に透視投影変換した点群からメッシュを形成し、メッシュベースで原画像を変形する。変形した原画像をプロジェクタで投影することで、投影画像の幾何補正を行う。

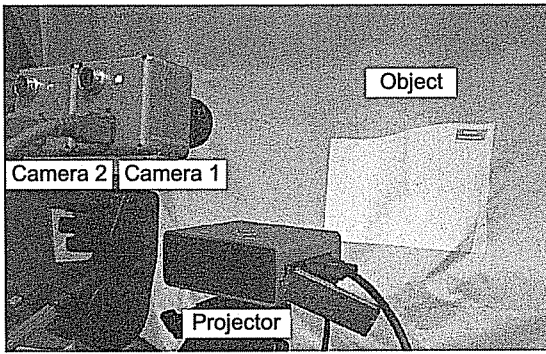


図5 投影画像の幾何補正実験

4. 実験・考察

本稿で提案したプロジェクタ・カメラシステムを用いた幾何補正手法を実験的に検討した結果について述べる。図5に示すようにカメラ、プロジェクタおよび投影対象を設置し、そのときカメラで観測される投影画像の幾何学的歪みの補正を行った。自由形状の投影対象として白色の遮光カーテンを用いた。カメラ1上で幾何補正後の投影画像を撮影し、視覚的に幾何補正の効果を確認した。

まず、短基線長のステレオカメラを用いて投影対象を3次元計測した結果を図6に示す。図6より、投影対象の高密度な3次元点群が得られていることを確認できる。次に、この3次元点群を用いて投影画像の幾何補正を行った結果を図7に示す。図7(a)に示す画像をプロジェクタに入力し幾何補正を行わずに投影した場合、投影画像は投影対象の形状の影響を受け、図7(b)に示すように幾何学的に歪んでいる。これに対して、提案手法を用いて幾何補正を行った場合、図7(c)に示すように投影画像の幾何学的歪みが補正されていることを確認できる。

実験により、短基線長ステレオカメラと位相限定相関法に基づく対応点探索アルゴリズムを用いることで、1枚のパターン光から投影対象の3次元形状を高密度に計測できることを確認した。また、このとき得られた3次元情報を用いて、投影画像の幾何補正を行うことができることを確認した。本稿で述べた投影画像の幾何補正手法は、キャリブレーションによってカメラおよびプロジェクタの位置関係を事前に求めておくことで、1枚のパターン光の投影・撮影により可能である。このため、投影対象の形状が変化した場合にも即座に対応することができると思われる。また、提案した幾何補正手法は、一般的なプロジェクタとカメラで実現できるため、汎用性が高いと言える。あらゆる場所に情報提示を行う携帯可能なプロジェクタ・カメラシステムを構築する場合に適していると考えられる。

5. まとめ

本稿では、短基線長ステレオカメラとプロジェクタを組み合わせたプロジェクタ・カメラシステムを構築し、短基線長ステレオカメラを用いた投影画像の幾何補正の検討を行った。構築

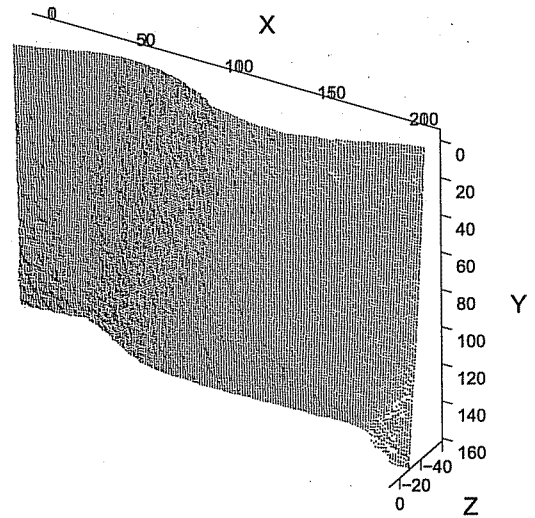
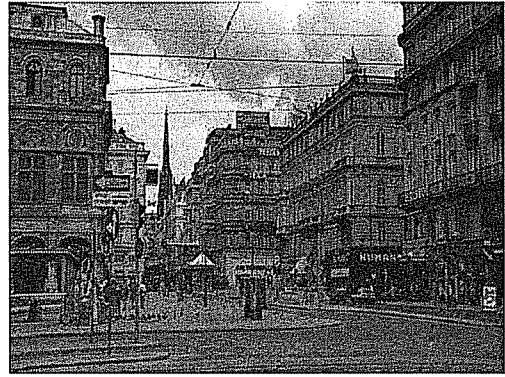
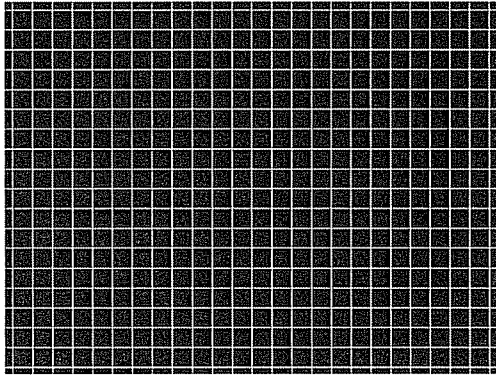


図6 投影対象の3次元計測結果

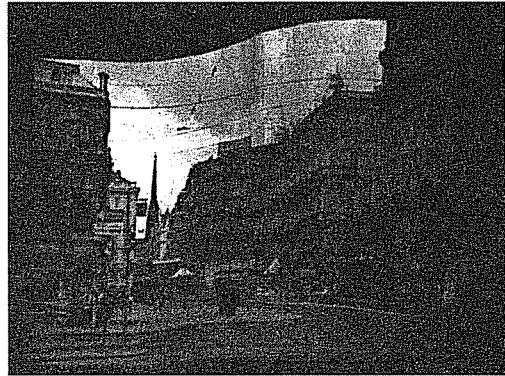
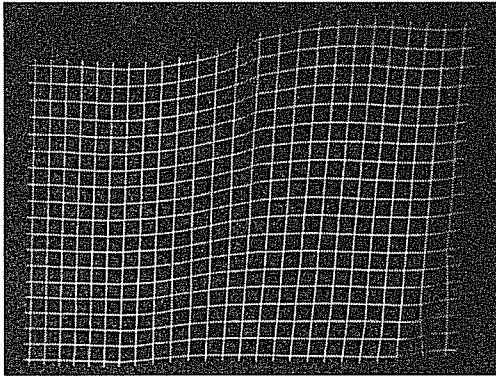
したプロジェクタ・カメラシステムでは、1回のパターン光の投影・撮影を行うことで投影対象の3次元形状を計測し、この計測結果を用いて投影画像の幾何補正を行う。実験を通して、短基線長ステレオカメラを用いて投影対象の形状を高精度に計測し、幾何学的に歪んだ投影画像を効果的に補正できることを示した。今後は、プロジェクタとカメラを用いて3次元計測した場合の結果と比較を行う予定である。また、処理時間についても検討する予定である。

文献

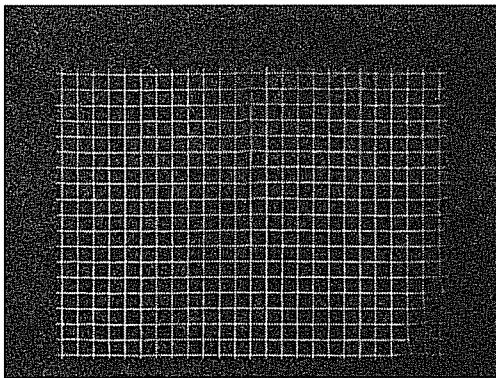
- [1] O. Bimber and R. Raskar: "Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds", A K Peters, Ltd. (2005).
- [2] T. Okatani and K. Deguchi: "Autocalibration of projector-camera system", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **27**, 12, pp. 1845-1855 (2005).
- [3] R. Sukthankar, R. Stockton and M. Mullin: "Smarter presentations: Exploiting homography in camera-projector systems", *Proc. Int. Conf. Computer Vision* (2001).
- [4] R. Raskar and P. Beardsley: "A self-correcting projector", *IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, **2**, pp. 504-508 (2001).
- [5] R. Raskar, M. Brown, R. Yang, W. Chen, G. Welch, H. Towles, B. Seales and H. Fuchs: "Multi-projector displays using camera-based registration", *IEEE Visualization*, pp. 161-168 (1999).
- [6] M. Brown, A. Majumder and R. Yang: "Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays", *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, **11**, 2, pp. 193-206 (2005).
- [7] O. Bimber, A. Emmerling and T. Klemmer: "Embedded entertainment with smart projectors", *IEEE Computer*, **38**, 1, pp. 48-55 (2005).
- [8] 高橋徹, 沼徳仁, 青木孝文, 近藤敏志: "投影画像の幾何補正に関する実験的検討", 計測自動制御学会東北支部第235回研究会, 235-5 (2007).
- [9] S. Nayar, H. Peri, M. Grossberg and P. Belhumeur: "A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections", *ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS)* (2003).
- [10] マークアシュダウン, 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一: "人間の



(a)



(b)



(c)

図7 投影画像の幾何補正結果：(a) プロジェクタに入力する原画像，(b) 幾何補正前，(c) 幾何補正後

視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正”，電子情報通信学会論文誌，**190**，8，pp. 2115–2125 (2007).

[11] 井口征士，佐藤宏介：“三次元画像計測”，昭晃堂 (1990).

[12] S. Zollmann and O. Bimber: “Imperceptible calibration for radiometric compensation”, Proc. Eurographics, pp. 61–64 (2007).

[13] Z. Zhang: “A flexible new technique for camera calibration”, Tech. Rep. MSR-TR-98-71, Microsoft Research (1998).

[14] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki and T. Higuchi: “A sub-

pixel correspondence search technique for computer vision applications”, IEICE Trans. on Fundamentals, **E87-A**，8，pp. 1913–1923 (2004).

[15] K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki and T. Higuchi: “A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation”, IEICE Trans. Fundamentals, **E87-A**，3，pp. 682–691 (2004).