

プロジェクタ・カメラシステムのレスポンス関数を用いた位相シフト法によるアクティブ・ステレオの精度向上

戸塚 聡[†] 古川 亮^{††} 川崎 洋[†]

[†] 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{††} 広島市立大学 情報科学部 〒731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: [†]{totsuka,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 本論文では、アクティブステレオシステム方式の一つである、ビデオカメラとプロジェクタを用いた 3 次元計測システムの精度向上を実現する手法を提案する。通常、アクティブステレオ方式による 3 次元計測では事前に計測機器の精密な校正が必要とされる。しかし、プロジェクタはカメラとは入出力が逆な光学機器なため、校正には投影されたパターンをカメラで撮影し、これをデコードすることにより対応点を得て、これを入力とする必要がある。しかし、空間コード化法による 3 次元計測では、サブピクセル精度の対応点が得られず、校正や計測結果の精度に悪影響を及ぼすという問題があった。空間コード化法と位相シフト法を併用することで、サブピクセル精度の対応点を獲得する手法が提案されている。これを校正に用いれば、プロジェクタの内部パラメータの精度向上、及びカメラとプロジェクタ間の外部パラメータを高精度に推定することができ、3 次元計測の精度向上が実現できる。しかし、位相シフト法の精度は輝度値に依存するため光学特性を考慮する必要がある。そこで、本論文ではプロジェクタの光学特性を考慮することで、より高精度な校正及び 3 次元復元を実現する方法を提案する。

キーワード

Precision improvement method for phase shifting based projector-camera stereo system using response function

Satoshi TOTSUKA[†], Ryo FURUKAWA^{††}, and Hiroshi KAWASAKI[†]

[†] Faculty of Engineering, Saitama University Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama, Japan

^{††} Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University Ozuka-higasi, Asaminami-ku, Hiroshima, Japan

E-mail: [†]{totsuka,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp

Abstract In this paper, we describe a high accuracy active stereo vision system using a projector and a camera using a phase shifting method. Generally, a 3D measurement system based on coded structured light consists of a camera and a projector, and both intrinsic and extrinsic parameters of these devices should be precalibrated. A projector has a reversed optical property compared to a camera. One method for calibrating a projector is using correspondences between screen coordinates between a camera and a projector, which can be obtained by capturing a scene while a set of binary patterns are projected to the scene (coded structured light with binary patterns). However, coded structured light with binary patterns is not capable of capturing correspondences with sub-pixel accuracy. One solution for obtaining correspondences with sub-pixel accuracy is using a phase-shift method and binary patterns. If a phase-shift method is used for calibration, accuracy of 3D measurements and calibration of the extrinsic and intrinsic parameters can be improved. One problem for the approach is that accuracy of phase-shift method is affected by non-linearity of response properties of the camera and the projector. In this paper, a method for reducing this effect and improve the accuracy is proposed.

Key words

1. はじめに

近年、さまざまな 3 次元計測システムが提案・実用化

されている。その一つであるプロジェクタ・カメラを用いたパターン投影によるアクティブ方式の計測システム

は、効率よく3次元計測を行えるため、利便性が高く広く利用されている。

一般にアクティブステレオ方式による3次元計測では、事前に計測装置の厳密な校正が必要である。光パターン投影法によるプロジェクタ・カメラシステムにおいては、プロジェクタとカメラの内部パラメータおよび、計測装置間の外部パラメータが必要となる。特にプロジェクタはその性質上、映像をデータとして取得できないため内部校正には3次元計測で得られた対応点を使用する。

プロジェクタ・カメラの両画像間の対応関係を求める手法として空間コード化法がある。空間コード化法はプロジェクタ・カメラ間の画素の対応付けを高速かつ密に求めることが出来るレンジファインダに多く用いられてきた。しかし、空間コード化法はプロジェクタの被写界深度や投影する角度の影響により投影するパターンにぼけや歪が生じてしまい、対応点に誤差が含まれる問題があった。

そこで、空間コード化法により粗い対応関係を求めた後、位相シフト法を用いることでサブピクセル精度の対応点を得るといことが行われている [1]。位相シフト法は正弦波パターンを時系列で位相を変化させながら投影し、観測される輝度値変化から位相値を求めることによりプロジェクタ・カメラの対応関係を得るものである。しかし、位相シフト法の精度は観測される輝度値に依存するため、カメラにおける入射輝度と出力値の関係(反応曲線)やプロジェクタにおける画素値と出力される輝度値の関係に非線形性があると、それによる誤差が生じるという問題がある。本論文では空間コード化法と位相シフト法を併用し、プロジェクタ・カメラの光学特性を考慮することで位相シフト法の精度向上を行い、これをプロジェクタの校正に用いることで校正精度の向上を行った。更に、この手法を用いることで3次元計測精度の向上および、正確な形状復元が実現できることを示す。

2. 位相シフト法による3次元計測

2.1 計測原理

位相シフト法による3次元計測は、カメラと正弦波パターンを投影するプロジェクタから構成される。本手法の計測システムの概略図を図1に示す。正弦波パターンは、図1のような濃度パターンを持つ。このパターンを一定速度で左方向に1周期だけ移動させながら投影し、その様子をカメラで撮影する。図2に石膏像に正弦波パターンを投影した画像を示す。投影する正弦波パターンは式(1)により作成する。

$$P(x', y', t) = A_p \sin(2\pi(t/T + x'/L)) + B_p \quad (1)$$

P はパターン上の輝度値、 t は時刻、 T は1周期移動させるのに掛ける時間、 L はプロジェクタの x 方向の画素数、 A_p および B_p はそれぞれパターンの強度およびバイアス成分、 x' および y' はパターン上の座標を表す。

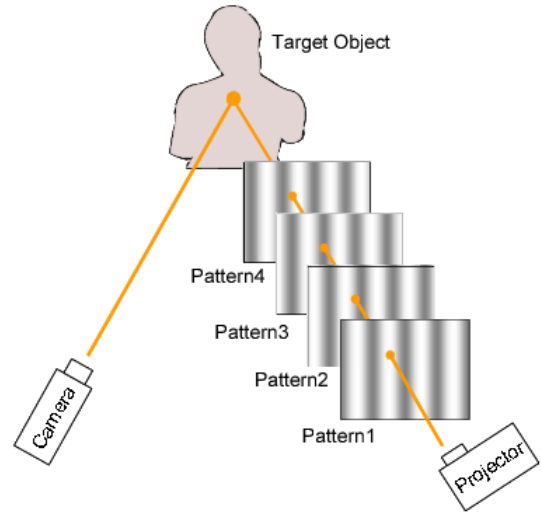


図1 計測システム

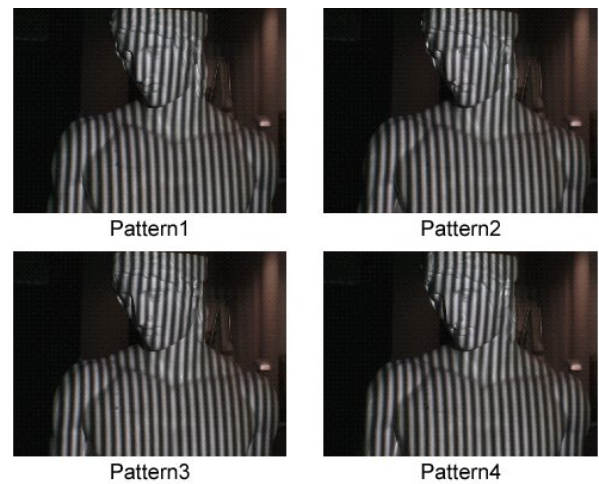


図2 正弦波パターンを投影した画像

ここで、カメラとプロジェクタの反応曲線の線形性を仮定できれば、撮影された任意の画素 (x, y) における輝度値の時間的変化 $I(x, y, t)$ は式(2)のように、投影したパターンの1周期の正弦波となる。

$$I(x, y, t) = A_i \sin(2\pi t/T + \phi(x, y)) + B_i \quad (2)$$

ここで、 $\phi(x, y)$ [rad] は輝度の時間的変化の位相で、 $-\pi$ から π の値をとる。式(1)と式(2)を比較すると

$$\phi(x, y) = 2\pi x'/L \quad (3)$$

となり、撮影したある画素の輝度値変化から位相 ϕ が求まれば、

$$x'(x, y) = \frac{\phi(x, y)L}{2\pi} \quad (4)$$

式(4)により、ある画素に対応する投影したパターン上の x' を求めることができる。そこで、画像上の画素の輝度値変化のみから最初に投影したパターンの位相復元を行う。

この ϕ は次式により算出される。

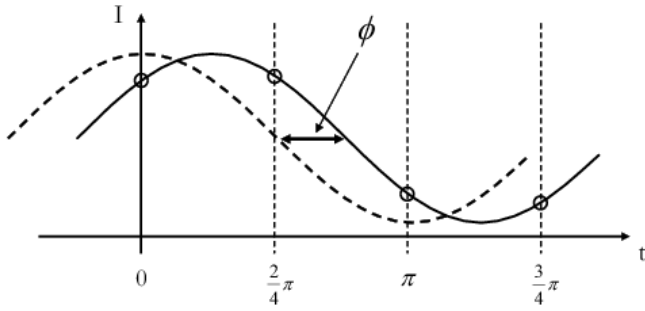


図3 ある画素における位相計算の概念図，実線は観測された輝度値による正弦波当てはめ，破線は初期投影パターンの正弦波

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{t=0}^{T-1} I(x, y, t) \cos(2\pi t/T)}{\sum_{t=0}^{T-1} I(x, y, t) \sin(2\pi t/T)} \quad (5)$$

この位相計算は測定値に対して正弦波の最小二乗当てはめを行っていることに相当し，パターンの駆動時間 T を増やすことにより統計的誤差を小さくすることが期待される [2], [3]. ある画素で観測された輝度値とその正弦波当てはめから計算される位相の関係を図 3 に示す。

2.2 位相連結処理

位相シフト法で得られる位相は $-\pi$ から π までの 1 周期のみである．このため投影する正弦波の周波数に相当する 2π の整数倍の不定性が存在する．つまり，画像の左端を基準にして復元した位相が $-\pi \sim \pi \sim 3\pi \sim 5\pi \dots$ と表されるような絶対位相値を求めなくてはならない．そのため，図 4 のように n 本目の縞の復元位相値に対して $n \times 2\pi$ を加算する処理が必要である．

この問題に対してはさまざまな手法が提案されているが [2], [4]，グレーコードなどの空間コード化法で得た荒い対応関係から絶対位相を求める手法が精度良く簡単に求められる [1]. 図 5 に石膏像を計測したときの復元した位相画像とその位相連結後の画像を示す。

3. 反応曲線の推定による位相シフト法の精度向上

3.1 反応曲線の推定

位相シフト法ではカメラ・プロジェクタ双方の反応曲線が線形であることが前提である．しかし，実際には反応曲線が非線形となる場合が多く，このような場合復元される位相に歪みが生じることになる．この問題に対する簡単な回避方法として，カメラとプロジェクタの総合的な輝度値の非線形性を考慮し，線形性が保たれる強度で投影パターンを作成することが考えられる [3] (図 6). しかし，この方法では投影する正弦波パターンの振幅が減少し，特に入力画像枚数が少ないときに復元される位

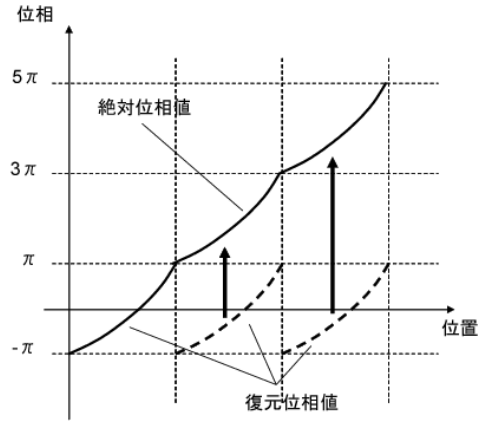
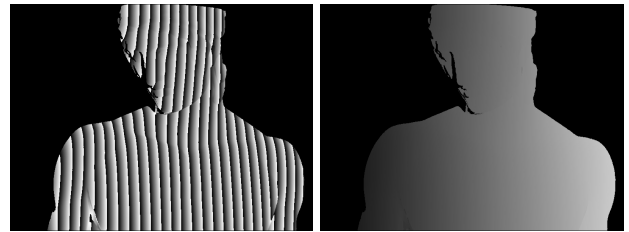


図4 位相連結処理



(a) 復元位相画像 (b) 位相連結画像

図5 計測対象の位相復元画像 (a) と位相連結処理後の画像 (b)

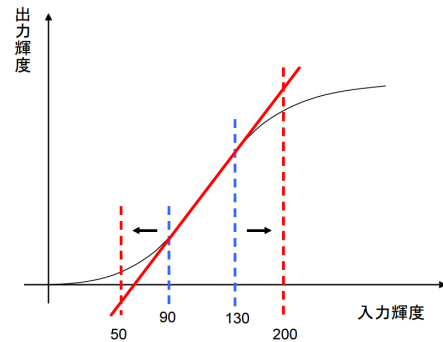


図6 非線形反応曲線における線形性が保たれる強度

相の精度が低くなる．結果，得られる奥行き分解能も悪くなる問題がある．そこで，カメラ・プロジェクタの反応曲線を推定し観測される輝度値を補正することで位相復元精度の向上を行う．

カメラの反応曲線を求める手法には，さまざまな研究がなされている．その代表的なものに，カメラを固定して同一シーンをシャッタースピードを変えながら複数枚撮影し，それらの画像から，非線形最適化により，各画素における実際の光量と，カメラの反応曲線を同時推定する手法がある [5]. 後に述べる実験では，この手法によって反応曲線を求めた．

プロジェクタの反応曲線は，以下の手法で求める．まず，白色板に $0 \sim 255$ のグレースケールのパターンを投影し，その様子をカメラで撮影する．撮影された各画像での投影パターンの (カメラの反応曲線で補正された) 輝

度値をプロットし、2次曲線で近似したものをプロジェクタの反応曲線とする。

上記の手法で求められたプロジェクタの反応曲線は、白色板に照射した場合の値である。実際のシーンには、物体色による反射率変化の影響がある。このため、実際のシーンを計測する際、あらかじめ正弦波パターンの強度 A_p とバイアス成分 B_p を足した輝度値のみのパターンを投影し、得られた各画素での輝度値によって計測画像を補整することで、白色板を計測した場合に相当する輝度値を求め、これに反応曲線を適用することで、反応曲線の影響を除いた輝度値を算出する。

3.2 校正パラメータ推定

3.2.1 カメラの校正

内部パラメータとは、焦点距離や画像中心、レンズ歪と言った機器が固有に持つパラメータである。カメラの内部パラメータの推定方法は、さまざま提案されているが次に挙げる理由から、任意のチェスパターンを用いて校正する Zhang の手法 [6] を用いる。

- 一般的に内部パラメータの自己校正はノイズの影響に弱く不安定である。
- Zhang の手法は安定かつ精度が良くソースコードが公開されているため扱いやすい。

3.2.2 プロジェクタの校正

プロジェクタは、光を放出するという点でカメラとの違いがあるものの、幾何学的にはカメラと同様なモデルで表現することが出来る。プロジェクタを、アクティブステレオの光源として利用するためには、プロジェクタの内部パラメータを含めた校正が必要である。プロジェクタは、それ自身では映像をデータとして取得できないため、カメラで計測した画像から、間接的に校正を行なう必要がある。

プロジェクタ・カメラ系の校正としては、プロジェクタの画像とカメラの画像の間の2次元 Homography のみを問題とする研究がある [7]。しかし、本論文では、プロジェクタ・カメラ系をアクティブステレオに利用するために、両装置の3次元的関係を得る必要がある。このような校正を扱った研究としては、複数個の平面を利用する方法 [8] や、任意形状による自己校正を行なう方法 [9] がある。

上記の手法において、プロジェクタ・カメラ間の対応点情報の取得は、安定性や容易さから、二進コードやグレーコードによるパターンが利用されてきた。しかし、そうした方法では、対応点の精度はサブピクセル精度にはならず、校正精度を低下させると考えられる。そこで、位相シフト法により得られたサブピクセル精度の対応点を用いて校正を行うことで、従来法よりも高精度に内部パラメータの推定を行う。

3.2.3 外部パラメータ推定

本論文においての外部パラメータとは、カメラ・プロジェクタ間の剛体変換パラメータを表す。推定パラメータは、並進パラメータ t_x, t_y, t_z [m] および各軸の回転パラメータ α, β, γ [deg] の6パラメータである。外部パラメータもプロジェクタの校正と同様にパターンをデコードして得られた対応点を用いて行われる。校正方法としては校正儀を用いる強校正及び、校正儀を用いない自己校正のいずれでも良い [1], [9]。特に自己校正の場合は計測装置の移動のたびに校正を必要とせず、計測システムとしての利便性が向上する。

4. 実 験

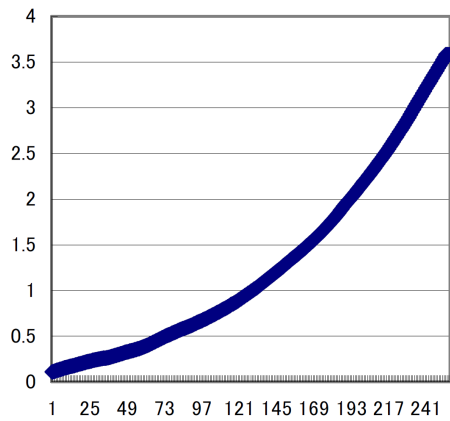
4.1 形状計測に関する精度評価

提案手法の有効性を検証するために、従来手法による位相シフト法と提案手法による位相シフト法の評価を行った。ここで従来手法の位相シフト法とは、カメラ・プロジェクタの反応曲線は考慮せずに、観測された輝度値をそのまま使い位相を計算するものを指す。

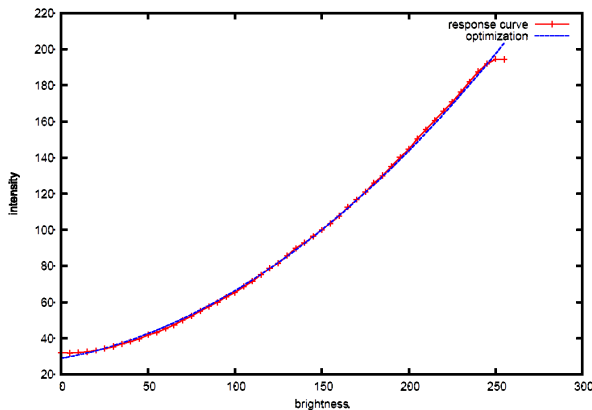
まず、形状計測に関する精度評価に関する実験を行った。プロジェクタ・カメラ系による3次元計測システムについて、あらかじめ内部パラメータ及び外部パラメータを校正した。そして、グレーコードによる空間コード化法、従来法による位相シフト法、提案手法による位相シフト法の3種類の対応点決定法を利用して、同一の平面を測定した。ここで正弦波パターンの周期はプロジェクタ画像上で縦方向24画素、横方向32画素とし、パターンの駆動時間は $T = 4$ とした。また、パターンの強度及びバイアス成分は $A_p = 90, B_p = 140$ とした。グレーコードによる空間コード化法では、観測誤差がなければプロジェクタの画素が全て区別可能なように、最小で2画素幅のストライプまで投影した(実際には、プロジェクタの焦点深度、光の漏れ、カメラの解像度などの影響で、画素に近いサイズのストライプについては、観測の信頼性が低い)。評価方法は、平面状の対象物を計測し、その復元結果に対して平面を当てはめ、当てはめ残差の平均2乗誤差を求めた。

提案手法において必要となる反応曲線の計測結果を図7に、空間コード化法を利用した場合と、提案手法による位相シフト法を利用した場合の計測結果の形状を図8に示す。また、平面の当てはめ残差を計算した結果を表1に示す。

図8の結果から、空間コード化法では、平面の表面に細かい凹凸が生じていることが分かる。この凹凸は、プロジェクタの画素の位置情報に関する量子化誤差であると考えられ、その周期はプロジェクタとカメラの位置によって異なる。これに対し、位相シフト法では、このような量子化誤差は生じないが、正弦波パターンの周期で波打つ誤差がみられた。また、表1から、計測結果の誤差は、空間コード化法よりも従来法の位相シフト法の方



(a) カメラの反応曲線



(右) プロジェクタの反応曲線

図 7 反応曲線

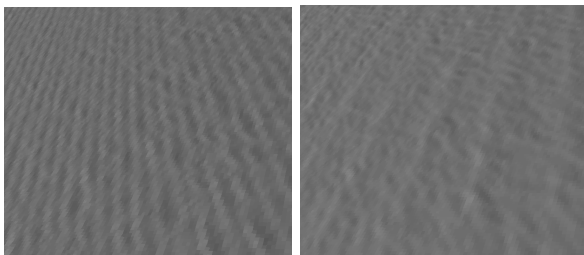


図 8 計測された平面の拡大図：(左) グレーコードによる空間コード化法, (右) 提案手法による位相シフト法

表 1 平面当てはめの残差

手法	偏差
空間コード化法	1.45×10^{-3}
位相シフト法 (従来法)	1.29×10^{-3}
位相シフト法 (提案法)	1.14×10^{-3}

が、また提案手法よりも従来法の位相シフトの方が小さかったことが分かる。これは、位相シフト法によるサブピクセル精度の対応点の効果と、反応曲線の利用による位相シフト法の精度向上の効果が現れたと考えられる。

4.2 プロジェクタの内部パラメータの校正に関する精度評価

次に、プロジェクタの内部パラメータの校正に関して、

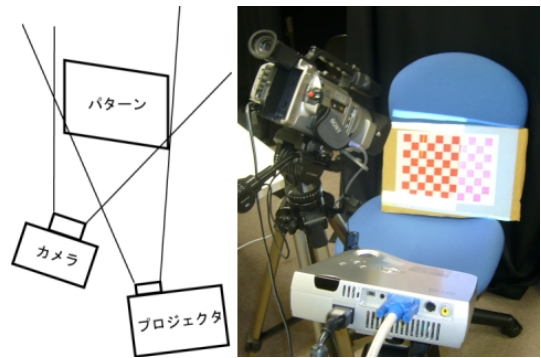


図 9 チェッカーパターンの計測方法

位相シフト法を利用することによる精度の変化を調べるための実験を行った。プロジェクタの内部パラメータの校正には、カメラ校正の手法としての Zhang の手法を、プロジェクタ・カメラ系に拡張して使用した。

具体的な方法としては、 8×11 のチェスパターンの模様を持つ校正儀を、プロジェクタ・カメラシステムによって複数回計測する。それぞれの計測では、カメラからの画像の取得と、空間コード化法や位相シフト法などによるカメラ・プロジェクタ間のスクリーン座標間の対応点の取得を同時に行う (図 9)。カメラからの画像を利用してカメラの校正を行うことで、校正儀の各特徴点とカメラのスクリーン座標間での対応関係が決定する。この情報に加えて、カメラ・プロジェクタ間のスクリーン座標間の対応が分かることから、校正儀の各特徴点とプロジェクタのスクリーン座標間での対応関係が決定する。これに Zhang の手法を適用することで、プロジェクタの内部及び外部パラメータの校正を行うことが出来る。

上記の手法を、校正儀を計測する回数を変えながら、適用し、スクリーン座標間の対応の取得方法として空間コード化法と位相シフト法を利用した場合についての比較を行った。評価には、カメラ及びプロジェクタの校正の後、立方体の形状の 2 面を位置を変えながら 5 回計測し、それぞれの 2 面を平面近似してからそれらの間の角度の平均を求めた。この角度は、本来直角になるので、直角からのずれによって校正の精度を比較できる。また、精度の比較結果を図 10 に示す。横軸が校正に使用するデータの入力個数、縦軸が角度を表す。いずれの入力個数でも、空間コード化法よりも位相シフトの方が、校正結果での角度の誤差が小さいことを確認できる。

4.3 復元形状の結果比較

図 11(a) に示すような実物体 (石膏像) の形状を空間コード化法と提案手法による位相シフト法で計測を行った。その復元結果が図 11(b)-(g) である。空間コード化法の結果で見られる階段状のノイズが位相シフト法ではなく、非常に滑らかな形状が得られていることが分かる。

5. まとめ

本論文では、位相シフト法を用いてのプロジェクタ・

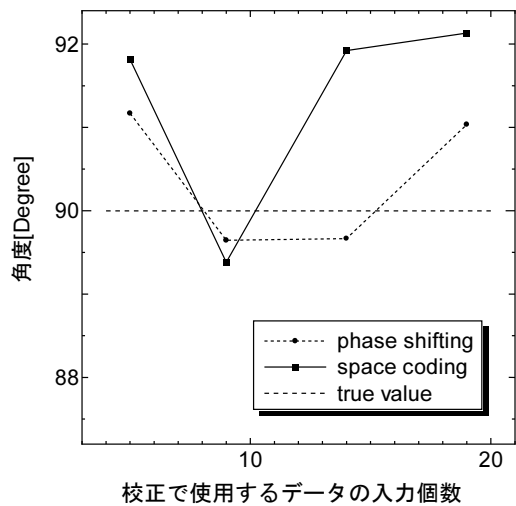


図 10 校正儀の 2 平面間の角度推定

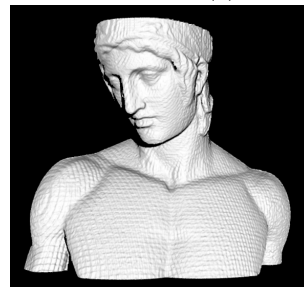
カメラシステムによる形状計測について、高精度化の手法を提案した。具体的には、位相シフト法における問題点であった反応曲線の非線形性を解決する手法として、カメラとプロジェクタの反応曲線を求め、これを考慮することで、非線形な反応曲線にも対応が可能となる。実験により、位相シフト法の精度向上を確認した。また、空間コード化法の代わりに位相シフト法を使うことによる、形状計測に関する精度向上が見られるかどうかについての実験も行った。結果として、位相シフト法ではサブピクセル精度の対応点が得られるため、空間コード化法を用いたときの復元形状に見られる階段状のノイズがなく非常に滑らかな形状復元が行えることを確認した。

文 献

- [1] 岡崎, 岡谷, 出口: “構造化光投影と照度差ステレオを組み合わせた自動校正による仮想反射特性再現の質感向上”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), pp. 1100-1107 (2008).
- [2] 傳田, 大橋, 江島: “位相シフト法を用いた高速な 3 次元計測手法の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, **99**, 515, pp. 43-50 (1999).
- [3] 塚本, 呉, 古賀, 三池: “階層化位相シフト法による高精度な奥行計測”, 電子情報通信学会論文誌, **J83-D-II**, 9, pp. 1962-1965 (2000).
- [4] 三高, 濱田: “位相シフト法による高速高精度 3 次元計測技術 (特集 生産技術)”, 松下電工技報, pp. 10-15 (2002).
- [5] P. E. Debevec and J. Malik: “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs”, SIGGRAPH '08, New York, NY, USA, ACM, pp. 1-10 (2008).
- [6] Z. Zhang: “A flexible new technique for camera calibration”, Technical Report MSR-TR-98-71 (1998).
- [7] 見市, 和田, 松山: “プロジェクタ・カメラシステムのキャリブレーションに関する研究”, コンピュータビジョンとイメージメディア, 133-1 (2002).
- [8] 木村, 持丸, 金出: “任意の平面を用いたプロジェクタのキャリブレーション”, 第 12 回画像センシングシンポジウム予稿集, pp. 444-448 (2006).
- [9] 川崎, 大沢, 古川, 中村: “空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な 3 次元形状復元”, 情報処理学会論文誌 CVIM, **47**, 10, pp. 59-71 (2006).



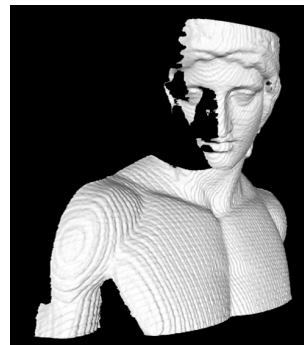
(a) 計測対象: 石膏像



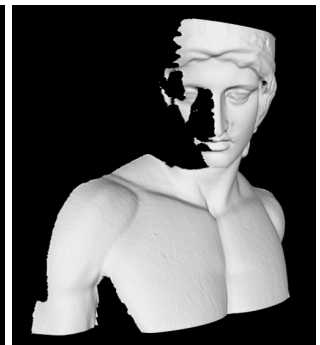
(b) 空間コード化法



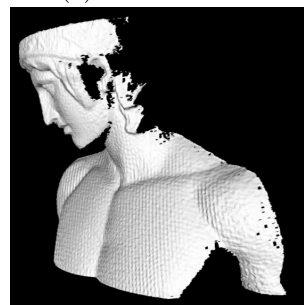
(c) 位相シフト法



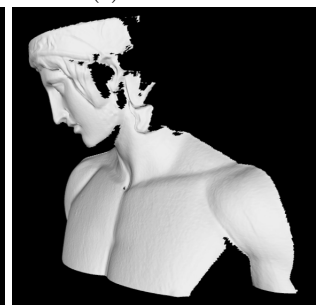
(d) 空間コード化法



(e) 位相シフト法



(f) 空間コード化法



(g) 位相シフト法

図 11 復元結果比較