

研究速報

階層化位相シフト法による高精度な奥行計測

塚本 杜輔<sup>†</sup> (学生員)      呉 本亮<sup>†</sup> (正員)

古賀 和利<sup>††</sup> (正員)      三池 秀敏<sup>†</sup> (正員)

A High Accuracy Depth Measurement by a Hierarchical Phase Shifting Method

Sosuke TSUKAMOTO<sup>†</sup>, Student Member, Ben-yao WU<sup>†</sup>, Kazutoshi KOGA<sup>††</sup>, and Hidetoshi MIIKE<sup>†</sup>, Regular Members

<sup>†</sup> 山口大学工学部, 宇部市

Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ., 16-1 Tokiwadai 2-chome, Ube-shi, 755-8611 Japan

<sup>††</sup> 山口大学教育学部, 山口市

Faculty of Education, Yamaguchi Univ., 1677-1 Oaza Yoshida, Yamaguchi-shi, 753-8513 Japan

あらまし 1周期から複数周期の正弦波パターンを階層的に投影することで、位相接続問題を回避した位相シフトと三角測量に基づく高精度な奥行計測手法を提案する。液晶プロジェクタを用いることで生じる投影パターンのひずみを、直交する二つの正弦波パターンを用いることで軽減した。

キーワード レンジファインダ, 液晶プロジェクタ, 距離画像, 三角測量, 階層処理

1. まえがき

3次元形状計測法の一つとして、測定対象に何らかの意味をもたせた光を投影して画像を撮影するレンジファインダ [1], [2] がある。これまでも様々な手法と高精度化法が提案されている (例えば [3], [4]) が、レーザ装置などの専用ハードウェアが必要となっていた。またモアレ法などといった干渉縞を用いる方法は高精度な形状計測が可能な半面、位相接続が困難で距離が大きく変化するような対象では奥行分布が正確に求められない問題があった。

筆者らは、1周期の正弦波で構成したパターンを移動させながら対象に投影し、各画素で算出する初期位相からパターン面の位置を求め、三角測量によって対象の奥行を得る手法を提案してきた [5]。この方法は原理的には正弦波格子シフト法 [6] と等価であるが、投影パターンが1周期で構成されているため位相接続を必要とせず、高信頼な奥行情報が得られる。しかし、位相の精度が直接奥行の精度となることから、従来の提案では奥行の分解能が不十分であった。本論文では投影パターン光の空間周波数を段階的に切り換え、逐次位相計測精度を向上させる方法を導入した。更に、パターン光の投影には広く普及している液晶プロジェクタを用いるため、パターンのひずみを考慮した高精

度な奥行計測を目的として、縦方向と横方向に位相を変化させた二つの直交するパターン光を採用した。また、同一環境で従来のレンジファインダの手法と比較してより高精度な奥行分布が得られることを確認した。

2. 位相シフトによる奥行計測

2.1 計測原理

本手法で投影するパターンの例を図1に、また本システムの計測概念図を図2に示す。パターンは基本的に横方向 ( $x$  軸方向) に関して輝度変化させた1周期の正弦波で構成し、これを一定速度で左方向へ1周期だけ移動させつつ、画像を取得する。

このパターンは式 (1) で生成される。

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

ここで  $P$  はパターン面上の輝度値,  $t$  [frame] は時刻,  $T$  [frame] はパターンを1周期移動させるのにかける時間,  $L$  [pixel] はプロジェクタの  $x$  方向画素数 (パターンの1周期画素数),  $A_p$  及び  $B_p$  はそれぞれパ

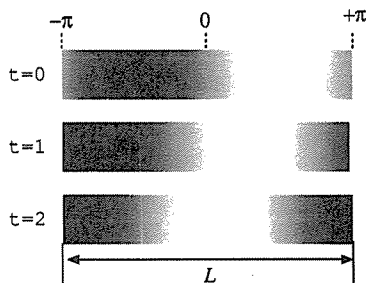


図1 正弦波パターン ( $\omega = \pi/4$ )  
Fig.1 Sinusoidal grating pattern ( $\omega = \pi/4$ ).

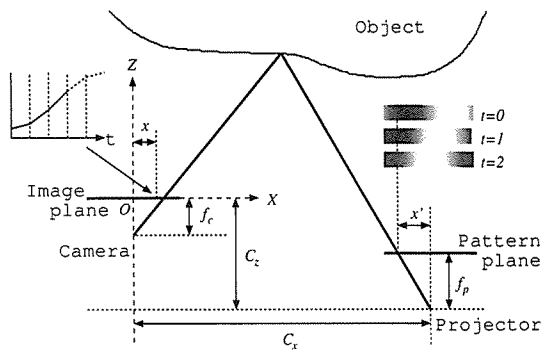


図2 提案手法の計測システム  
Fig.2 Measurement system for the proposed method.

ターンの強度及びバイアス成分,  $x'$  及び  $y'$  はパターン面上の座標 (パターン面中央を原点) である。

ここで投影系と撮像系とに線形性が仮定できれば, 投影するパターンが正弦波で構成され, また 1 周期だけ移動されることから, 撮影された画像上の任意の画素  $(x, y)$  で観測される輝度の時間的変化  $I(x, y, t)$  も次式のような 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,  $-\pi$  以上  $+\pi$  以下の値をとるものとする。この位相  $\phi(x, y)$  は式 (1) の投影パターンの移動によって引き起こされる。式 (1) を式 (2) と比較すると

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

となり, 式 (2) の観測波形から位相  $\phi(x, y)$  が求まれば

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

により, ある画素  $(x, y)$  に映っている対象を照らしているパターン面上の座標  $x'$  を求めることができる。これは, 画像上で観測される輝度の時間的変化の位相は,  $t = 0$  において投影されるパターンの空間的位相と同一となることを示している。

この  $\phi(x, y)$  は次式によって算出される。

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

パターン面にひずみがない場合, 投影パターンは縦方向に関して同一の位相となる。したがって対象の奥行  $Z(x, y)$  [mm] は, パターン面の  $x'(x, y)$  におけるこの同一位相直線とプロジェクタの光学中心とで構成される平面, そしてカメラの光学中心と注目画素  $(x, y)$  を結ぶ直線の交点として得られる。

$$Z(x, y) = \frac{C_x \cdot f_p - C_z \cdot x'/s_p}{x \cdot f_p/(s_c \cdot f_c) - x'/s_p} \quad (6)$$

ここで  $f_c$  [mm] 及び  $f_p$  [mm] はそれぞれカメラ及びプロジェクタの焦点距離,  $C_x$  [mm] 及び  $C_z$  [mm] は図 2 に示したようにカメラとプロジェクタの位置関係を表すパラメータ,  $s_c$  [mm/pixel] 及び  $s_p$  [mm/pixel] はそれぞれカメラ及びプロジェクタの画素の大きさである。

## 2.2 高精度化のための拡張

前節で述べた方法では空間波長が長いために位相分解能が低く, 得られる奥行の分解能も悪い。そこで投影するパターンの空間周波数を階層的に高いものへと切り換え, 位相情報を逐次修正する方法を導入する。本論文では図 3 に示すように, 階層を増すごとに投影パターンの波数を 2 倍 (1 周期画素数を 1/2 倍) にすることとする。階層を増すごとにパターンの 1 周期画素数が少なくなるが, 投影パターンは図 3 のようにパターン面全面にわたり複数周期投影するものとする。また, このときもパターンは  $T$  [frame] かけて 1 周期のみ動かすため, 実質的なパターンの移動速度は階層を増すごとに遅くなる。

これから位相算出/修正法の手順を述べるが, ここでは階層を  $m$  で表現し, 空間的に 1 周期のパターンを投影する  $m = 1$  から始めるものとする。まず全画素の位相の初期値を  $\phi_0(x, y) = 0$  とする。投影されるパターンの 1 周期画素数は  $L/m$  となる。位相は式 (7) のように各階層において修正する形で求められる。

$$\phi_m(x, y) = \phi_{m-1}(x, y) + \frac{1}{2^{m-1}} \cdot \tan^{-1} \frac{\sum_{t=0}^{T-1} I_m(x, y, t) \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + 2^{m-1}\phi_{m-1}(x, y)\right)}{\sum_{t=0}^{T-1} I_m(x, y, t) \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + 2^{m-1}\phi_{m-1}(x, y)\right)} \quad (7)$$

$m = 1$  のとき  $\phi_{m-1}(x, y) = 0$  より, 式 (7) は式 (5) と等価となる。この階層処理を, 液晶プロジェクタで正弦波が表現可能な範囲で  $m$  がある大きな値  $M_{\max}$  になるまで繰り返す。

以上が位相修正法であるが, この方法で位相の修正が可能なのは, 計測で得られた位相  $\phi_m$  とその真値  $\hat{\phi}_m$  が式 (8) の関係となるときである。

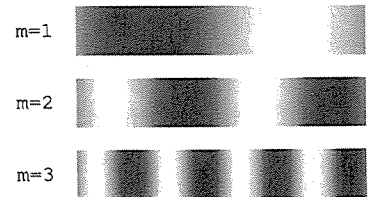


図 3 より高い周波数のパターン例  
Fig. 3 Example of higher frequency patterns.

$$|\phi_m - \hat{\phi}_m| < \pi \quad (8)$$

### 2.3 液晶プロジェクタを用いるための対応

液晶プロジェクタには2次元座標  $(x', y')$  に依存したひずみが存在し、前節で述べた位相直線が曲線となる。そのため、パターン面の位置を  $x'$  のみで定めると計測誤差が大きくなる。

そこで本論文では図1を90度回転させ、位相を縦方向に関して変化させたパターンも用いて、横方向の場合と同様に位相を求め、パターン面上の対応点  $(x', y')$  を得ることとした。この場合、得られる奥行分布  $Z(x, y)$  はプロジェクタの光学中心と対応点  $(x', y')$  を結ぶ直線、そしてカメラの光学中心と注目画素  $(x, y)$  とを結ぶ直線の、二つの直線の交点として得られることになるが、これら二つの直線は必ずしも交わらない。そこで本論文ではこれら二つの直線が最短距離となる中点を求める対象の奥行とする。

### 3. 実験

画像のサンプリング枚数については安定して位相を求めるため  $T = 10$  とし、最大空間周波数は  $M_{\max} = 8$  とした。システムのキャリブレーションには Tsai の手法 [7] を用い、液晶プロジェクタのキャリブレーションは長谷川ら [8] と同等の方法で行った。使用した液晶プロジェクタの画素数は横 800 画素、縦 600 画素で、実験にあたっては色ずれを考慮してパターンは緑色単色光で表現した。また、投影パターンはカメラとプロジェクタの総合的な輝度の非線形性を考慮し、パターンの強度及びバイアス成分はそれぞれ  $A_p = 90$ ,  $B_p = 130$  とした。

更に本手法の精度を検討するため、同じシステムを用いた場合の従来手法との比較として、空間コード化法 [3] による実験を行った。このときの最高スリット本数は液晶プロジェクタの限界である水平 800/垂直 600 本とし、安定してコード検出するためにグレイ符号を用い、相補パターン投影 [9] を行った。

#### 3.1 距離の異なる平面の計測

最初に、カメラの光軸にほぼ垂直に置かれた平面をカメラから遠ざかるよう 60[mm] ずつ移動させ、それぞれの距離について奥行計測実験を行った。本手法による結果を表1に、空間コード化法による結果を表2に示す。表は左から順に、奥行の真値、計測結果の画像全体での平均値、真値との平均2乗誤差、注目画素とその近傍8画素における距離の標準偏差を画像全体で平均化した値を示している。

この結果より、本手法では約2[m]の距離にある物体を誤差約1.6[mm]以内の精度で計測できることを確認した。また従来手法の代表としての空間コード化法と比較して、計測精度が大幅(3倍以上)に向上していることが確認できる。なお、推定した曲面に関しては10倍以上の滑らかさが得られた(表2の偏差を参照)。

**3.2 実物(石膏ヴィーナス像)を対象とした計測**  
 続いて、図4に示すような実際の物体(石膏ヴィーナス像)の形状計測を試みた。ここでは計測対象以外のものが画像に映らないよう、像の背後に暗幕をおいた。また、このような暗い場所や影の部分では位相が計測できないため、画像上で輝度の時間的変化がレベル40未満の画素については計測対象外とした。提案手法による実験結果を図5に示す。図5は奥行を濃淡で表現しており、白いほど近い位置にあることを示している。続いてヴィーナス像の首の部分における奥行分

表1 本手法による奥行計測結果  
 Table 1 Experimental results of the proposed method.

真値 [mm]	平均 [mm]	誤差	偏差
1727.3260	1726.2901	1.6259	0.2995
1787.3260	1786.7411	1.1470	0.3244
1847.3260	1846.5547	1.1330	0.3332
1907.3260	1906.8085	1.0067	0.3612

表2 空間コード化法による奥行計測結果  
 Table 2 Experimental results of the space encoding method.

真値 [mm]	平均 [mm]	誤差	偏差
1727.3260	1726.6078	4.6653	4.1040
1787.3260	1786.7455	4.8603	4.3907
1847.3260	1846.3130	5.1896	4.6721
1907.3260	1906.5315	5.4729	4.9708

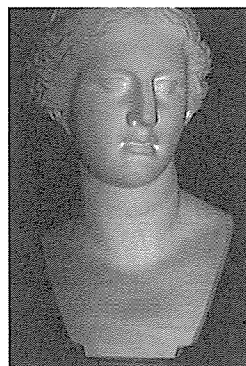


図4 計測対象  
 Fig. 4 Measurement target.

布をグラフにしたものを図6に示す。図中の実線が提案手法、破線が空間コード化法による結果である。更に、この対象についても形状の滑らかさを定量的に比較するため、奥行の局所標準偏差を求めた結果を表3に示す。これらより、本手法が対象の形状をより滑らかに復元していることが確認できた。

また、奥行計測にかかる時間については演算画素数によっても変わるが、ここで用いたヴィーナス像（縦470、横320画素）の場合は空間コード化法が約4秒であったのに対し、本手法が約36秒であった。



図5 提案手法による計測結果。奥行分布を濃淡レベルで表現している

Fig.5 Obtained depth map. The gray levels represent the depth information.

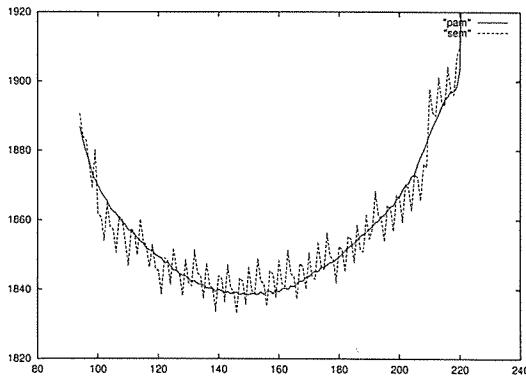


図6 ヴィーナス像の首の部分での奥行分布

Fig.6 Estimated depth distribution on the neck of the object.

表3 ヴィーナス像の計測結果の滑らかさ

Table 3 Smoothness of the experimental result.

手法	局所標準偏差
提案手法	1.2847
空間コード化法	5.1088

#### 4. むすび

本研究では、位相シフトと三角測量に基づく奥行計測手法を高精度化するための二つの提案を行った。まず、パターン空間周波数をより高いものへと切り換えて位相を逐次修正する階層化手法を導入した。この結果、同一システムの環境において従来手法（空間コード化法）よりはるかに高精度な計測結果が得られることを実証した。また液晶プロジェクタでパターンを投影することに起因するパターンのひずみの問題を回避するため、直交する二つの正弦波空間パターンを用いた計測を行い、良好な結果を得た。

ところで、最近本手法と同様の階層化に基づく位相シフト法が提案されている[10]。我々の研究とほぼ同時進行の研究であり、カラーR、G、Bの各々に異なる空間周波数を用いるなどの高速化の試みは評価できるが、現時点では位相修正の具体的な方法が述べられておらず、奥行計測実験もなされていない。

提案した計測手法は、現時点でリアルタイムの計測は困難であるが、パターン投影方法を工夫することにより高速化を図っていく予定である。

#### 文 献

- [1] 井口征士, “3次元形状計測の最近の動向,” 計測制御, vol.34, no.6, pp.429-434, June 1995.
- [2] 吉澤 徹(編), 光三次元計測, 新技術コミュニケーションズ, 1993.
- [3] 佐藤宏介, 井口征士, “空間コード化による距離画像入力,” 信学論(D), vol.J68-D, no.3, pp.369-375, March 1985.
- [4] 服部敦幸, 佐藤幸男, “レーザパターンシフトによる高分解能空間コード化法,” 信学論(D-II), vol.J80-D-II, no.6, pp.1423-1431, June 1997.
- [5] 塚本壮輔, 呉 本亮, 古賀和利, “運動パターン投影像の位相を用いた奥行き計測,” 動画像計測処理研究会論文要旨集, no.14, pp.3-6, Aug. 1998.
- [6] M. Halioua and H.C. Liu, “Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry,” Optics and Lasers in Engineering, vol.11, pp.185-215, 1989.
- [7] R.Y. Tsai, “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses,” J. Robotics and Automaton, vol.RA-3, no.4, pp.323-344, 1987.
- [8] 長谷川一英, 佐藤幸男, “内視鏡型形状計測システムの試作,” 信学技報, PRMU-98-3, May 1998.
- [9] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- [10] 傳田壮志, 大橋 健, 江島俊朗, “位相シフト法を用いた高速な3次元計測手法の提案,” 信学技報, PRMU-99-183, Dec. 1999.

(平成11年12月28日受付, 12年4月10日再受付)