

福岡工業大学 学術機関リポジトリ

A 3D Measurement Using Modulated Pattern Projection

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-02-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Lu, Cunwei メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/11478/00001634

変調パターン光投影に基づく 3次元計測

盧 存 偉 (工学部電子工学科)

A 3D Measurement Using Modulated Pattern Projection

Cunwei Lu (Dept.of Electronic, Fac. of Eng.)

Abstract

By the 3-D image measurement methods, such as space pattern projection technique and moiré topography, to discern the exact striped order is taken as the foundations of measurement. Because the depth range of an object is computed by correspondence relation between the fringe order of a reflective pattern, and the depth of an object. Multiple images needs by the conventional method. Moreover, by methods, such as the moire method and the interfering method, this is known as the problem of phase unwrapping of moiré patterns or interfering patterns. Because of this problem, it is difficult to calculate the absolute phase or to discern the relation between the fringes, especially in the cases in which the fringes are discontinuous or the objects are isolated, and so forth.

The technique of using modulated projection with 3-D information is presented. A new fringe pattern whose fringe intensity or color changes with its order can produced. The fringe order can be extracted easily from the fringe intensity or color, and the absolute phase or absolute depth range can be obtained solely by its intensity or color.

Key words: 3-D measurement, moiré fringe order, absolute depth range, and modulated projection

1. ま え が き

能動的な3次元計測方法として、パターン光投影法、カラーパターン光投影法など方法が良く使われている。投影法の特徴から見ると、これらの方法は二値化パターン法、濃淡パターン法、カラーパターン法に大別できる。^[1, 2, 3]

これらの方法の共通点は、反射パターンの縞の次数と奥行き距離の間の対応関係により、奥行き距離値を算出することである。即ち、これらの方法に対して、

反射パターンの縞の次数を正しく算出するのは一番重要なことである。

二値化パターン光投影法は二値化投影パターン及び二値化画像を使うので、反射パターンの各縞の次数を算出するために、複数回の投影が必要とする。

濃淡パターン光投影法及びカラーパターン光投影法は、一回の投影で二値化パターン光投影により多い情報が得られるが、反射パターンは特体の表面模様などに影響されるので、複数回の投影が必要とする。

モアレトポグラフィに基づく3次元計測方法も投影パターンを利用するものである。

モアレによる3次元計測は、1枚の等高線画像即ちモアレパターンによって直観的に物体の全体の形状が

理解できる等の利点があるため、生体計測、自動車の外形計測、ガラスの平坦度計測あるいはICパッケージの熱変形の計測等分野で幅広く実用化されている。^[4, 5, 6]

しかし、今までのモアレ方法では、相隣二本の縞間の奥行き距離差が分かたが、各縞の絶対次数が分からない。位相図でみると、正弦波状分布するモアレ縞の各点の絶対位相値が求められないので、これにより、各点の絶対距離値を算出できない。

近年来、縞の絶対次数、絶対位相、絶対距離などに関する研究は活発になってきた。

位相解析特に位相シフト技術は、縞解析分野で良く使われている。この方法は反射パターンのポイントがすべて使用されたので、相隣の縞間の奥行き関係を解明できるだけでなく、計測の感度も改善できる。

投影型モアレでは、位相のシフトは、工学もしくはデジタルの手法で、投影格子の位相あるいは観察格子の位相を移動させるにより、容易に実現できる^[7]。実体格子型モアレでは、位相のシフトは、格子平面とカメラの間の距離、あるいはカメラ光源間の距離の変更により、および計測物体を移動させるか、格子を回転させることにより実現できる。^[8, 9]

通常、位相シフト方法は、格子移動の正確なコントロールを必要とする。また、それがいくつかのイメージを必要とするので、動いている物体を測定することは困難である。

新井らは、同時に位相が異なる3つのイメージを得るために3台のカメラを使用する技術を示し^[10]、Duanらは、subtraction-baseに基づいた位相シフト方法を示した^[11]。これらの方法は、格子の光学あるいはデジタル移動を要求しない。したがって、高度に敏感な測定を得ることができ、動物体の測定も実行することができる。

加藤らは実時間列画像を利用し、計測装置が固定したまま複数枚の位相が異なる画像を得られ、動物体の計測もできる^[12]。

位相解析方法の大きな欠点は位相測定の曖昧性である。すなわち、計算された位相値は、 2π の周期を持って、 $-\pi \sim \pi$ の範囲中に包まれる。この範囲を超えると、正しい位相値を求めることは不可能である。これは、モアレパターンや干渉パターンの解析のunwrappingと呼ばれる問題として知られている。この問題のために、絶対的な位相を計算するか、周辺の縞の奥行き対応関係を判別することは困難である。特に縞が不

連続や、計測対象物体が分離される時等場合での計測は不可能である。

もし反射パターンを1つの周期の測定深さ範囲を制限すれば、もしくは縞の次数が数えるという制限があれば、位相の曖昧問題を回避し、絶対的な位相を得ることができる。この制限は頻繁に使用される。

しかしこれは、位相の曖昧問題は解決していない。計測深さ範囲が制限範囲を超える場合では、計測を実現することができない。

位相及び縞次数の曖昧性問題は、モアレ技術の実用化を妨げている。これらの問題に関するの研究はモアレや干渉法による計測のトピックである。その問題は次の名前によって引用される：絶対奥行き距離計測 (absolute range measurement), 絶対位相計測 (absolute phase measurement), 波長スキャンニング (wavelength scanning), 分階層解析 (hierarchical unwrapping) 及び分時間解析 (temporal unwrapping) など。

このような問題を解決するために、いくつかの技術が近年示された。例えば、分時間位相解析技術が提案された^{[15][14]}。これは、一定の時間間隔を持つ位相が異なる複数枚の画像を使用して、時間軸に沿って解析する方法である。Bremand氏は、位相スィールドのほとんどの矛盾を回避するアルゴリズムを示した^[15]。X. 彭らは、複合マスク調和技術を提案した^[16]。

unwrapping問題を解決するために、カラー変調技術の使用も提案された^[17]。カラー画像は白黒画像より多くの情報を持っているので、カラーマスクの使用によって、1枚のカラー画像で複数の位相が異なる位相パターンが得られる。しかし、カラー計測では、対象物体が白いか単純な色を持っていることを要求し、よい計測環境など測定条件を要求する。位相の曖昧性問題及び奥行き距離の曖昧性問題が実用的なレベルで徹底的に解決されていない。

上記の曖昧性問題の基本的な原因は縞の次数を識別することができないということである。この問題を解決するために、本文は、変調投影法に基づいて3次元計測手法を提案する。研究の目的は、曖昧性問題を解決し、画像強度と縞次数及び位相さらに物体の奥行き距離の間に唯一的な対応関係を求め、快速且つロバスト性を持つ3次元計測を実現することである。

本文では、モアレ計測及び空間パターン光投影法を例として展開する。

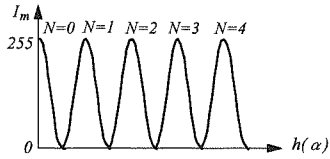


Fig. 1 従来のモアレパターンの強度分布

2. モアレ縞次数の自動確定

2. 1 従来法モアレの縞次数確定の曖昧性

従来法のモアレパターンは(1)式のような強度分布を持っている。

$$I_m = A_m \cos(\omega h + \omega_0) \tag{1}$$

但し、

I_m : モアレ縞の強度値、

A_m : モアレ縞の振幅、

h : 測計点から格子面までの奥行き距離、

ω : 注目点の位相値、

ω_0 : モアレパターンの位相の初期値。

モアレ縞の次数 N を定義すると、

$$\omega h_N + \omega_0 = 2\pi N \tag{2}$$

N 番の縞と対応する奥行き h_N は(3)式より計算できる。

$$h_N = \frac{2\pi N - \omega_0}{\omega} \tag{3}$$

しかし、Fig. 1 に示したように、この段階では N が未知数であるので、 h_N が算出できない。

2. 2 強度変調モアレ

本研究では、モアレ縞の振幅の大きさを変調し、Fig. 2 のような分布を持たせ、縞の強度により、その次数を決定する。

モアレ縞の振幅の大きさを変調するために、本研究では、Fig. 3 に示したように強度が指数関数で変調さ

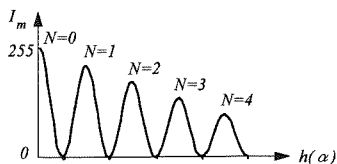


Fig. 2 強度変調モアレパターンの強度分布

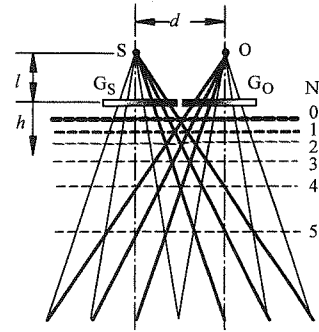


Fig. 3 強度変調モアレの計測イメージ図

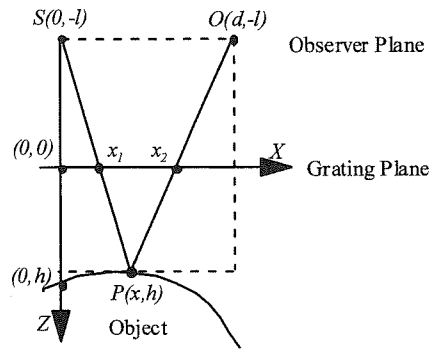


Fig. 4 計測システムの座標関係

れた投影法を使って物体に照射する。また得られた反射パターンを指数関数で復調する。

まず、投影格子の透過率 T_s を指数関数で変調する。

$$T_s = \frac{a^{k_1 + x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) \tag{4}$$

但し、

a, k_1 : 定数、

x_1 : 投影格子での注目点の座標、

s : 投影格子と観測格子のピッチ。

計測システムの座標関係は Fig. 4 に示す。

物体上の点 $P(x, y)$ に当てる投影光の強度 I_s は

$$I_s = \frac{a^{k_1 + x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) I_0 \tag{5}$$

となる。

反射パターンを復調するために、観測格子の透過率 T_0 を下記のように指数関数で変調する。

$$T_0 = \frac{a^{k_2 - x_2}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \epsilon}{s} \right) \tag{6}$$

但し、

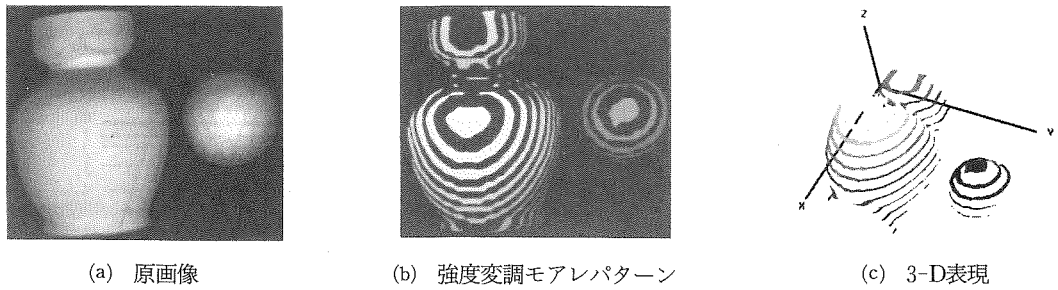


Fig. 5 強度変調モアレによる計測結果

k_2 : 定数,
 x_2 : 観測格子での注目点の座標,
 ϵ/s : 投影格子と観測格子の間の位相差, 電子走査モアレ方式には, 簡単に $\epsilon=0$ と設定できる。

そうすると, 強度が(7)式のように分布くる新しいモアレパターンが得られる。

$$I_m = \frac{1}{8} a^{k_1+k_2} a^{-dh/(h+l)} \cos \left[\frac{2\pi}{s} \frac{dh - \epsilon(h+l)}{h+l} \right] I_0 \quad (7)$$

ただし, d, c, l は計測システムのパラメータである。

$\epsilon=0, I_0=1$, とすると, (7)式がさらに(8)式に整理できる。

$$I_m = ka^{-SN} \cos(2\pi N) \quad (8)$$

モアレ縞の振幅の大きさ A_m は

$$A_m = ka^{-SN} \quad (9)$$

となる。 N 番目縞の振幅の大きさ A_m はその次数 N のみに依存する。このような強度変調モアレの各次数縞の振幅の大きさによって直接その次数を求めることができる。

実計測するとき, 物体の表面色やテクスチャなどはモアレ縞の強度に影響を及ぼす。文献 [18] には, これらの影響を削除する手法を提案した。

Fig. 5 は花瓶と石膏球の計測結果である。(a)は原画像, (b)は強度変調モアレ画像である。カメラからの距離が遠くなるにしたがって, 縞が次第に黒くなる。また, 二つ物体の奥行き値が同じ所は同じ強度の縞が持っていることが分かる。(c)は(b)の画像強度より復元した三次元表示である。

上記の計測結果より, モアレパターンから物体の奥行きを一意的に決定することができ, 物体の表面形状の凹凸判別や縞の不規則変化部分あるいは離れた多物体の間の奥行き関係の決定も実現できる。

3 絶対位相の自動確定

3.1 従来法位相解析の曖昧性

(1)式から奥行き h と縞の強度 I_m および縞の位相 α の間の関係が得られる。

$$h = \frac{1}{\omega} \arccos \left(\frac{I_m}{A_m} \right) - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{1}{\omega} \alpha - \frac{\omega_0}{\omega} \quad (10)$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{I_m}{A_m} \right) \quad (11)$$

しかし, \arccos 関数は単値関数ではなく, Fig. 1 に示すように, 一つの画像強度値に対して, 複数個の位相値がある。

これにより, 画像強度 I_m から位相 α を一意的に求められず, h を決定できない。

3.2 強度変調モアレを用いた位相解析

強度変調モアレを用いることにより, 上記の問題を解決することができる。Fig. 6 に示したように, まず, 強度変調されたモアレ縞の強度によって, モアレパターンをいくつかの奥行き領域に分割する。但し, 各領域内の位相 α と奥行き h の変化幅が次式の範囲に収まるように領域を分割する。

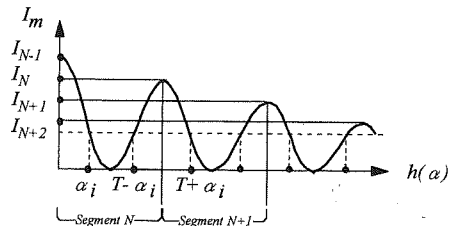


Fig. 6 強度変調モアレパターンの強度-位相対応関係

$$\alpha_N \leq \alpha \leq \alpha_N + 2\pi \quad (12)$$

$$h_N \leq h \leq h_N + \Delta h \quad (13)$$

但し、 α_N はその領域の位相の初期値、 h_N はその領域の奥行き距離の初期値である。

さらに位相が増加するときの縞の強度変化方向特性によって各領域を2分割すると、(10)式と(11)式は単値関数として使えるようになる。

領域分割のためには、各次数の縞の正確なスケルトンの位置と強度を抽出する必要がある。一般に、スケルトンの抽出は、二値化や微分に基づく方法があるが、強度変調モアレに対して、安定性が高くないので、本研究では縞の強度変化方向特性を用いる強度・位相解析方法を使う^[19, 20]。

Fig. 7には強度変調モアレパターンの強度・位相解析のシミュレーション結果を示し、対象物体は二つの円錐体である。Fig. 7(a)は強度変調モアレパターンで、(b)は同(a)のモアレパターンの奥行き領域分割の結果で、同じ輝度値を持っている部分は同じ領域に属している。

各領域で(14)式により、注目点の位相値 α を求め、(15)式により、奥行き距離値 h を算出できる。

$$\alpha_N(i, j) = \begin{cases} \arccos I_m(i, j) & B(i, j) = 1 \\ 2\pi - \arccos I_m(i, j) & B(i, j) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$h(i, j) = h_N + k\alpha(i, j) \quad (15)$$

但し、 $B(i, j)$ は縞の強度変化方向を表す。走査方向に沿って、縞の強度が増加する時 $B(i, j) = 1$ 、減少するとき $B(i, j) = 0$ である。

これにより、モアレパターンの強度から一意的に位

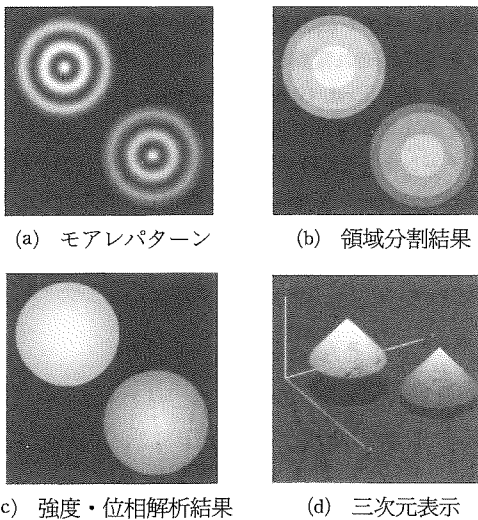


Fig. 7 強度・位相における強度と位相との対応関係

相値と奥行きを決定できる。位相の曖昧性問題は解決された。

4 強度変調空間パターン光投影法

三角測量に基づく3次元計測方法には、空間パターン光投影法はよく使っている。特に、グレイコードを用いた空間コード化パターン光投影法はコード化パターンの誤認識を避けることができ、物体の表面反射特性などに対して安定性の高い、高速な3次元計測が実現できる。

グレイコード化空間パターン光投影法などは二値画像の計測方法で、一回の計測には複数回の投影をしなければならない。例えば、伝統的なグレイコード化投影法では、 2^N 本のスリット縞の次数を決定するためには、少なくとも N 回投影し、 N 枚の画像を撮る必要がある。グレイコード化空間パターン光投影法は伝統的なスリットパターン光投影法より、投影回数を削減し、計測コスパを上げたが、それでも計測時間はかかった。

伝統的な二値画像式の空間パターン光投影法には、複数回の投影のかわりに、強度変調投影光を使うと、

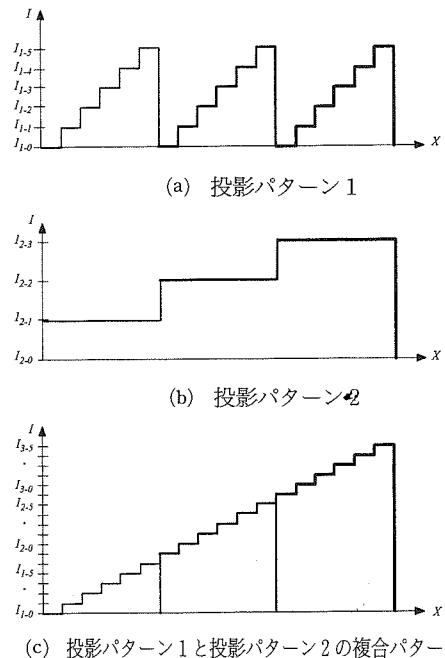


Fig. 8 強度変調空間パターン光投影法の計測原理

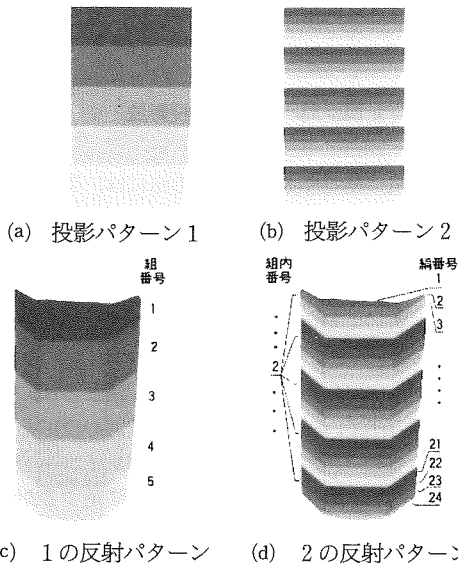


Fig. 9 強度変調空間パターン光投影法の計測例

多値化画像が得られ、これにより計測精度あるいは速度を向上することができる。このような考え方に基

いて、私は強度変調空間パターン光投影法を提案する。強度変調した投影光を用いると、一枚の画像により M 階調の強度値を区別できれば、 N 枚の画像から、 M^N 本のスリット縞の次数を決定できる。表面特性が複雑な物体に対して、一枚の補正用の画像を加えて、 N 枚の画像から、 M^{N-1} 本のスリット縞の次数を決定できる。従来の空間パターン光投影法では、 N 回の投影で 2^N 本のスリットが得られたことと比べて、提案手法は同じ投影回数で計測精度を大幅に上げていることが分かる。

言い換えると、 N 本のスリットを得るためには、従来の空間パターン光投影法は $\log_2 N$ 回の投影を必要とし、強度変調空間パターン光投影法は $\log_M N (M >$

$2)$ 回の投影しか必要としない。同じ計測精度ならば、計測時間を減少できることが分かる。

これは強度変調空間パターン光投影法の基本思想である。Fig. 8 は本手法の計測原理を示す。

簡単な応用例として、Fig. 9 は強度変調空間パターン光投影法の計測結果を表す。物体は石膏の六角柱である。簡単にスリット光の強度変調の階調数 M を 5 とすると、(a) と (b) のようなパターンで二回投影し、(c) と (d) のような画像が得られ、2 回の投影で 25 本のスリットパターンを決定できる。

5 カラー変調投影法による計測

能動的な 3 次元計測方法として、変調投影光手法は、普通の投影光方法よりもっと多くの情報を物体に照射するので、撮った画像も普通の方法よりもっと多くの情報量いわゆる付加情報量を持っている。これらの付加情報を考慮することにより、強度変調投影光だけでなく、様々な新しい手法を提案することができる。本章ではカラー変調モアレによる 3 次元計測手法を提案する。

現在投影光の波長を簡単にコントロールできる液晶プロジェクトと CCD カラーカメラは商品化された。これらの技術を用いて、強度変調の代わりに、カラー変調も実現できると思われる。

カラー画像を利用すると、Red, Green, Blue 3 チャンネルを別々に投影することで、撮った画像の Red, Green, Blue 3 チャンネルを別々に解析することが可能となる。

例えば、モアレ縞の Red, Green, Blue 3 チャンネルの成分をそれぞれ変調し、Fig. 10 のような分布を持たせると、縞の Red, Green, Blue 各成分の強度値により、その次数を決定することができる。

3 チャンネル CCD カメラのもう一つの有効な利用は、一つのチャンネルの信号を利用し、他の 2 チャン

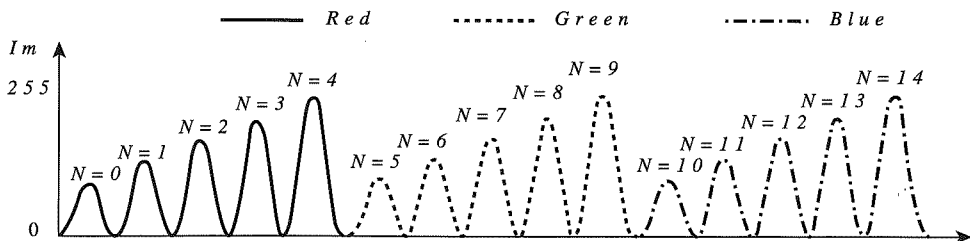


Fig. 10 カラー変調モアレの縞強度分布

ネルの信号を補正するということである。Fig. 3 における計測システムでは、投影格子 G_s と観測格子 G_o の Red, Blue 成分の透過率 T_{RS}, T_{BS} と T_{RO}, T_{BO} をそれぞれ指数関数で変調する。なお、Green 成分の透過率 T_{GS} と T_{GO} は補正用のため変調しない。

$$T_{RS} = \frac{a^{h_1+x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) \quad (16)$$

$$T_{GS} = 1 \quad (17)$$

$$T_{BS} = \frac{a^{h_1-x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) \quad (18)$$

$$T_{RO} = \frac{a^{h_2-x_2}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s} \right) \quad (19)$$

$$T_{GO} = 1 \quad (20)$$

$$T_{BO} = \frac{a^{h_2+x_2}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s} \right) \quad (21)$$

これにより、下記のようなモアレパターンが得られる。

$$I_{MR} = \frac{1}{8} a^{h_1+h_2} a^{-dh/(h+l)} \cos \left[\frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} \right] \quad (22)$$

$$I_{MB} = \frac{1}{8} a^{h_1+h_2} a^{dh/(h+l)} \cos \left[\frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} \right] \quad (23)$$

モアレ縞の次数 N を下式より算出できる。

$$N = \frac{\log_a(I_{MB}) - \log_a(I_{MR}) + K}{2s} \quad (24)$$

Fig. 11 はシミュレーション結果である。モノクロ印刷のため、チャンネル別に表示する。

6 終わりに

本論文では強度変調投影光とカラー変調投影光即ち変調投影光による三次元計測手法を提案し、モアレトポグラフィと空間パターン光投影法に置いての応用例を述べた。

強度変調投影光に基づいて、強度変調モアレと強度変調空間パターン光投影法を提案した。

従来のモアレ法には、縞の絶対次数判定と絶対位相測定絶対奥行き距離の計算等の問題が残っている。本研究では強度変調モアレを提案した。強度変調投影光の利用により、画像に含まれる情報量を増加させた。これにより上記の問題を解決し、人間を介在せず、モアレパターンの解析から物体の3次元形状を復元することができた。

強度変調パターン光投影法の使用により、従来の空間パターン光投影法の計測精度を向上させ、計測時間を減少させることができる。

強度変調光投影法と同じ発想により、本研究ではカ

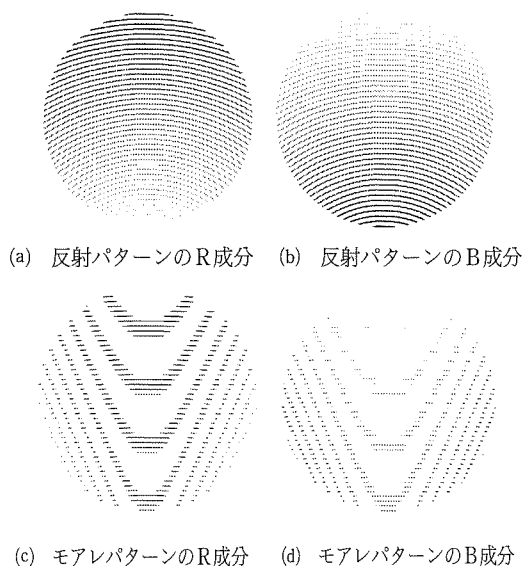


Fig. 11 カラー変調モアレのチャンネル別強度分布

ラー変調モアレを例してカラー変調パターン光投影法を提案した。RGB 3チャンネルの信号を別々に変調するカラー変調光の利用により、カラー変調モアレパターンを生成し、強度変調モアレと同じ役割を果たせた。

3次元投影パターン光の使用は本研究の特徴とする。提案手法はモアレトポグラフィや空間パターン光投影法にだけでなく、他のアクティブステレオ法や干渉法による計測にも応用することができる。

文 献

1. 吉澤徹：光三次元計測，新技術コミュニケーションズ，1993
2. 井口征士，佐藤宏介：三次元画像計測，昭晃堂，1990
3. 松山隆司，久野義徳，井宮淳：コンピュータビジョン，新技術コミュニケーションズ，1998
4. Meadows, W. O. Johnson, and B. Allen: Appl. Opt., 9(4), (1970), pp. 942-947
5. H. Takasaki: Moiré Topography, Appl. Opt., 9(6), (1970), pp. 1467-1472
6. D. Post, B. Han and P. Ifju: High Sensitivity

- Moiré, Springer-Verlag, New York, 1994
7. M. Halioua, R. S. Krishnamurthy, H. Liu, and F. P. Chang: *Appl. Opt.* 22(3), (1983), pp. 850-855
 8. G. Mauvoision, F. Bremand, and A. Lagarde: *Appl. Opt.*, 33(11), (1994), pp. 2163-2169
 9. Xinjun Xie, John T. Atkinson, Michael J. Lalor, and David R. Burton: *Appl. Opt.*, 35(35), (1996), pp. 6690-6695
 10. Y. Arai, S. Yokozeki and T. Yamada: *Appl. Opt.*, 34(22), (1995), pp. 4877-4882
 11. X. F. Duan, M. Gao, and L. M. Peng: *Appl. Phys.*, 72(7), (1998), pp. 771-773
 12. 加藤純一, 石塚豊, 山口一郎, 中橋末三: レーザ科学研究, 13(1991), pp. 160-162
 13. J.M. Huntley, H. Saldner: *Appl. Opt.*, 32(17), (1993), pp. 3047-3052
 14. J. M. Huntley, Henrik O. Saldner: *Proc. The International Society for Optical Engineering*, (Bellingham, WA USA. V. 3100, (1997), pp. 185-192
 15. Fabrice Bremand: *Optics and Lasers in Engineering*, 21 (1-2), (1994), pp. 49-60
 16. X. Peng, SR. Zhu, SH. Ye, Hans J. Tiziani: *Proc. The International Society for Optical Engineering*, (Bellingham, WA USA, 1996), V. 2899, pp. 96-104
 17. Erhard Schubert: *Proc. The 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, (ICASSP. Part 4 of 5, 1997), Munich, Ger. V. 4, pp. 3057-3060
 18. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 計測自動制御論文集, 34(7), (1998), pp. 692-697
 19. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 電子情報通信学会論文集, J81-A(9), (1998), pp. 1257-1264
 20. C. Lu, S. Inokuchi: *Appl. Opt.*, 39(19), (1999), pp. 4019-4029