

## マルチスペクトル光投影レンジファインダの性能向上に関する検討

佐藤辰雄  
機械電子部

## A Study on Improving the Multispectral Range Finder

Tatsuo Sato  
Mechanics & Electronics Division

## 要旨

カラーパターン投影法に基づく新しいレンジファインダを開発し、マルチスペクトル光投影レンジファインダ<sup>[11]・[15]</sup>と呼んでいる。この装置では原理的には平行光によるパターン投影を仮定しているが、このパターン投影を液晶プロジェクタで行うと、その投影光は実際には広がり角を持った投影が行われ、投影光の光路長をかなり長く取るにしてもその広がり角が誤差の要因となる。そこで本研究では、このような広がり角を持った投影装置の場合に関する距離計測について原理の再検討を行い、このレンジファインダの計測精度改善を目指した。

## 1. はじめに

物体の形状を計測する三次元計測装置(レンジファインダ)はいろいろな計測原理に基づく装置が提案され実現されてきている。我々はカラーパターン投影法に基づく新しいレンジファインダを開発し、マルチスペクトル光投影レンジファインダ<sup>[11]・[15]</sup>と呼んでいる。

カラーパターン投影法については、田島<sup>[6]・[8]</sup>が回折格子を用いたパターン投影と、所要帯域内で相補的な分光感度特性を持つ2つのセンサを用いることにより、Rainbow Range Finder(RRF)として実現している。しかし、可視光の全波長帯にわたる2種の異なる分光感度特性を実現するには特殊な光学フィルタを必要とするため、実現は容易ではなく、実際には例えばカラーCCDの緑と青のセンサを用いて実現している。そうすると、物体表面が例えば赤色の時にもCCDの出力信号は0となり、黒い物体の場合と同様に赤い部分は計測できない。また、回折格子ではその分光パターンが格子間隔や入射角度などから光学的に決まる一定角度に固定されてしまい、計測できる範囲が限定的なものとなる。といった欠点を有する。

そこで我々はフィルムプロジェクタや液晶プロジェクタを使用して比較的容易に制御可能なパターンを投影し、CCDカメラの持つ全波長帯域を使用することにより、計測対象の表面の色の影響を本質的に受けない計測方式を開発した。これがマルチスペクトル光投影レンジファインダであり、上記の欠点をすべて克服できている。

詳細は2節に説明するが、マルチスペクトル光投影レ

ンジファインダでは原理的には平行光によるパターン投影を仮定していた。ところが、このパターン投影をフィルムプロジェクタや液晶プロジェクタで行うと、その投影光は実際には広がり角を持った投影が行われ、投影光の光路長をかなり長く取るにしてもその広がり角が誤差の要因となる。

そこで本研究では、このような広がり角を持った投影装置の場合に関する距離計測についてその基本原理の再検討を行い、このレンジファインダの計測精度の改善を目指した。本報告ではリニューアルされた計測原理について説明する。

## 2. 従来のマルチスペクトル光投影レンジファインダ

ここではマルチスペクトル光投影レンジファインダの理解のため、まず従来の計測法について説明する。

## 2.1 計測原理

色合いが一定の変化率で連続的に変化している平行な縞模様の集合からなるカラーパターンを斜め上から投影し、真上のカメラで観測すると、投影されたカラーパターンは対象物の凹凸に応じて歪みが生じている。

このとき対象物表面の任意位置におけるパターンの歪み量は、ある高さを基準位置として、その基準面(高さの平面)に投影されたパターンの色合いと、対象物表面に投影されているパターンの色合いの差に比例する。したがって、その点における高さは投影角と色合いの差から計算できる。この操作を全画素について行うことにより

カメラの画素ごとに高さが求められる。この計測原理の概要を Fig.1 に示す。

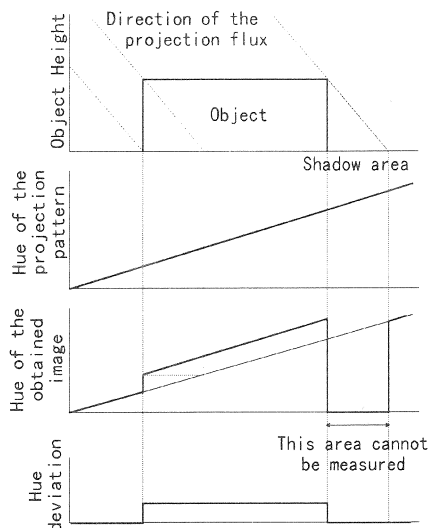


Fig. 1 計測原理概要

このときの距離計算は以下ようになる。

投影する平行縞模様カラーパターンは、色相が直線的に変化するよう設計する。このときの任意の点の色相変化の勾配を次のように決める。

$$dH/dX = A$$

$$A : const$$

このとき、対象物の凹凸に応じてゆがんだカラーパターン像から計測した色相差  $\Delta H$  は次式により  $X$  座標の変位  $\Delta X$  に変換される。

$$\Delta X = \Delta H / A$$

投影光が平行で投影角が  $\theta$  とすれば、その点における基準面からの距離 (高さ) は次式により求まる。

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \Delta X \tan \theta \\ &= \left( \frac{\Delta H}{A} \right) \tan \theta \\ &= c \Delta H \end{aligned} \quad (1)$$

ここで係数  $c = \tan \theta / A$  は一定値である。したがって、ある点における高さは本来基準面に投影されたであろうパターンの色相からの色相差に比例する。そこで基準面位置を  $Z = 0$  とし、この係数をキャリブレーションで求めておけば、投影角および投影パターンの色相変化の勾配はあらかじめ測定することなく高さが測れる。

## 2.2 物体表面の色の影響

カラーパターン投影法では計測対象の色による誤差の発生が知られている。

この誤差を軽減するために、それぞれの色相を循環的に  $1/3$  周期ずつずらした3通りの投影パターンを順次投影し、投影像を3回取り込む。

このときそれぞれの画像を  $(R_0, G_0, B_0)$ ,  $(R_1, G_1, B_1)$ ,

$(R_2, G_2, B_2)$  として、Fig.2 の手順で画像を合成する。

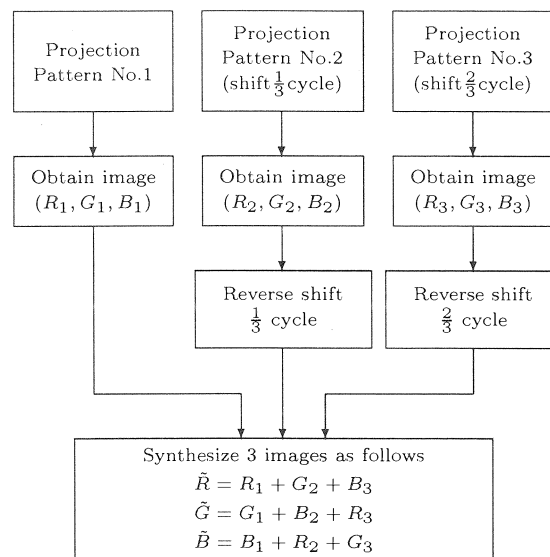


Fig. 2 表面の色をキャンセルする手順

この合成画像を用いて色相差を求め距離を算出すれば、計測対象の色に影響されない距離計測が可能である。なおこのとき使用した投影パターンは Fig.3 である。

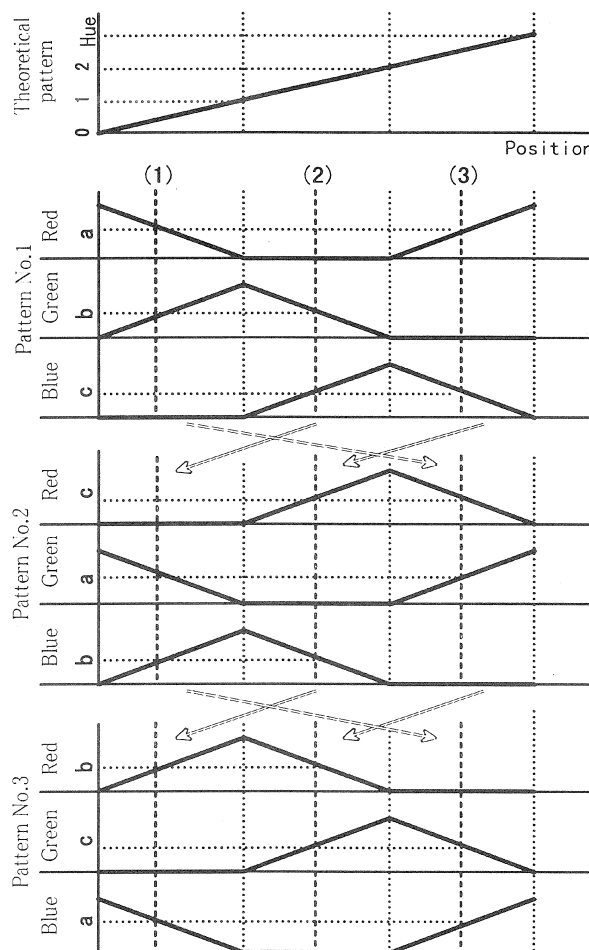


Fig. 3 投影パターンの設計例

### 3. 新しいジオメトリに基づく距離計測

前節にて説明した計測原理は光切断に基づいたマルチスリット法の拡張と考えられるが、前述のようにプロジェクタからの投影光は本来平行光ではないため、その投影光の広がり角により計測誤差が発生し、それを定数で補正することはできない。

また、この計測法では距離の計算に色相が直接使用されるため、プロジェクタと CCD カメラの両方を含めた系全体として色相の直線性が非常に重要となり、その誤差は直接計測誤差となって計算結果に累積される。ところが実際にはプロジェクタ、CCD カメラともに入出力の線形性は非常に悪く、たとえそれを CCD カメラでとらえた投影画像上での色相変化ができるだけ直線となるように投影パターンにフィードバックして補正するなどの手段によりダイナミックかつ非線形に補正しても、CCD カメラとプロジェクタの画素の組合せがいつも同じになるわけではなく、計測対象毎にそれが異なるため完全な補正は不可能であり、計測精度向上はあまり望めない。

そこでこの問題点に着目し、投影光の広がり角まで考慮して計測装置のジオメトリを図示すればこの問題を解決する計測手法は容易に設計できる。そのジオメトリを Fig.3 に示す。図では座標系はカメラ座標で表している。

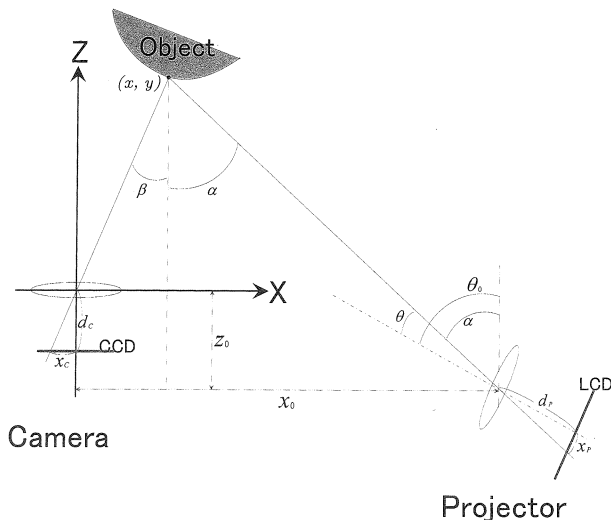


Fig. 4 広がり角を考慮した場合のジオメトリ

これはよく知られた三角測量の原理に基づくアクティブステレオ法のジオメトリと同じである。ここではカメラ画像と投影パターンの対応点の探索は、Fig.2 の手順による合成画像とプロジェクタにより投影する投影パターン上での色相から容易に行える。したがってこの手法は空間符号化法の拡張とも考えられる。

このときの物体までの距離  $z$  は以下のように求められ、 $y$  座標についてはカメラパラメータのキャリブレーションにより、CCD カメラの座標から正確に求まる。

Fig.4 で  $\beta$  および  $\alpha$  について

$$\frac{x}{z} = \tan \beta \quad (2)$$

$$\frac{x_0 - x}{z_0 + z} = \tan \alpha \quad (3)$$

の関係がある。これより  $z$  は次のように求まる。

$$z = \frac{x_0 - z_0 \tan \alpha}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (4)$$

また、カメラおよびプロジェクタのレンズに関して、

$$\tan \beta = \frac{x_c}{d_c} \quad (5)$$

$$\tan \theta = \frac{x_p}{d_p} \quad (6)$$

さらに  $\theta$  については、 $\theta = \theta_0 - \alpha$  であることから、

$$\tan \alpha = \frac{\tan \theta_0 - \tan \theta}{1 + \tan \theta_0 \tan \theta} \quad (7)$$

となる。この(5)(7)式を(4)式に代入すれば、

$$z = \frac{d_c \{ (x_0 x_p - z_0 d_p) \tan \theta_0 + (x_0 d_p + z_0 x_p) \}}{(d_c d_p + x_c x_p) \tan \theta_0 + (x_c d_p - d_c x_p)} \quad (8)$$

となり、距離が求まる。

ここで  $z_0, x_0, \theta_0, d_c, d_p$  はカメラとプロジェクタ、およびそれらの位置関係で決まる装置固有のシステム定数であり、キャリブレーションで求めておく。

$x_c, x_p$  は Fig.2 の手順で求めた合成画像上位置  $x_c$  の画素の色相値と同じ値を持つ投影パターンの画素位置  $x_p$  の関係から求まる座標値である。これをカメラ上のすべての画素について求めることにより、全画素の距離情報が求まる。

### 4. 実験と結果

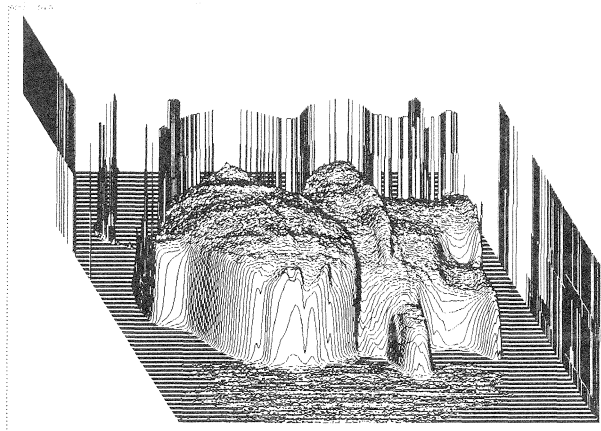
実験としては旧手法、新手法それぞれについておもちゃの形状を計測し、結果を比較した。計測した距離データの例を旧手法と新手法それぞれについて Fig.5 (a), (b) に示す。

新手法については、現時点ではキャリブレーションを実施していないため、カメラパラメータ、プロジェクタパラメータは補正されておらず、またシステム定数  $z_0, x_0, \theta_0, d_c, d_p$  もハードウェアから求めた数値をそのまま用いて実験した。したがって距離の絶対値には意味がないが、相対的に悪くない距離画像を得ることはできている。

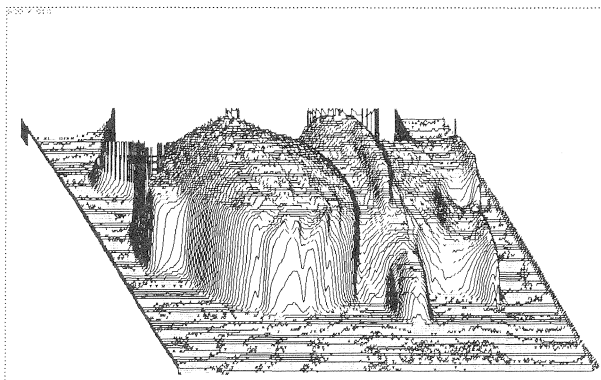
### 6. まとめと考察

マルチスペクトル光投影レンジファインダの性能改善に関する検討を行った。

従来の計測法は光切断に基づくマルチスリット法をカラー情報を用いて拡張したものと解釈できるが、距離の計算に色相が直接使用されるため、プロジェクタと CCD



(a) 旧手法による計測結果の例



(b) 新手法による計測結果の例

Fig. 5 計測結果の例

カメラの両方を含めた系全体としての色相の直線性が非常に重要となり、その誤差は計測誤差となって計算結果に直接重畳され、種々の手法を用いて直線性の補正を行うにしても性能向上の限界は低いと思われる。

そこで、プロジェクタと CCD カメラの広がり角を考慮したジオメトリに基づいて新しい計測手法の原理を確立した。これはよく知られた三角測量の原理に基づくアクティブステレオ法のジオメトリに一致し、カメラ画像と投影パターンの対応点の探索は合成画像と投影パターン上での色相により容易に行える。

本手法はカラー情報(色相)を用いて符号化した空間符号化法の拡張とも解釈できる。

この色相による符号化は、従来の2進符号化<sup>10)</sup>などとは異なり、離散系ではあるものの本質的には連続値を用いており、物体表面の色キャンセル手順により物体の色によらないため、その符号化精度はカラー情報の量子化精度まで上げることができると考えられ、キャリブレーションにより高い計測精度を実現できるものと期待される。

試作プログラムを用いて形状計測を行い、従来の手法で行った計測結果と比較した。

実験結果は、現時点では未キャリブレーションであるため定量的な精度比較はできないが、距離画像としては細かい部分まで形状が再現されており、理論的な検討結果をほぼ裏付けるものとなっている。

今後はカメラパラメータ、プロジェクタパラメータ、システムパラメータのキャリブレーションを行い、システムを完成するとともに、計測精度の定量的な比較も実施する予定である。

## 文 献

- [1] 佐藤辰雄, 北山公也: “カラーパターン投影法に基づく BGA 外観検査装置の試作”, 第8回「外観検査の自動化」ワークショップ, 精密工学会, pp.100-105(1996).
- [2] Tatsuo Sato, Kimiya Kitayama: “An Equipment Inspecting BGA-ball-pads Based on Color Pattern Projection Method”, Proc. of the 3rd Korea-Japan Joint Workshop on Computer Vision (Jan.20-22,1997).
- [3] 佐藤辰雄, 北山公也: “カラーパターン投影法レンジファインダによる BGA の計測”, 計測自動制御学会台 36 回学術講演会予稿集, Vol.II, 625-626(1997-7)
- [4] 佐藤辰雄, 北山公也: “マルチスペクトル光投影レンジファインダによる形状計測”, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.12, pp.177-184(1997-12)
- [5] Tatsuo Sato: “Multispectral Pattern Projection Range Finder”, Proc. of the SPIE Electronic Imaging '99, Vol.3640, pp.28-37(1999-1)
- [6] 田島譲二, 岩川正人: “Rainbow Range Finder による距離画像取得”, 信学論(D-II), J73-D-II, 3, pp. 374-382(1990)
- [7] Johji Tajima: “Rainbow range finder principle for range data acquisition”, Proc. of IEEE International Workshop on Industrial Application of Machine Intelligence, Seiken Symposium, pp.381-386(Feb.2-5, 1987)
- [8] Johji Tajima, Masato Iwakawa: “3-D data acquisition by rainbow range finder”, Proc. of the 10th International Conference on Pattern Recognition, pp.309-313(June 16-21, 1990)
- [9] 井口征士, 佐藤宏介: “三次元画像計測”, 昭晃堂 (1990)