

# カラー符号化を用いたレンジファインダ

佐藤辰雄

機械電子部

## Range Finder using Color Space Coding Patterns

Tatsuo Sato

Mechanical and Electronic Engineering 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、マルチスペクトルレンジファインダ<sup>[1]-[5]</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。この手法は解像度(空間分解能)が高いことに特徴があり、本検討により人の指紋の計測も可能となった。

### 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。ところが、その実現例としては人間の顔や体など比較的大きな物体を計測対象としており、ICパッケージや電子部品類などのような小さな物体を計測する装置を実現しようとする、レーザービームの絞りやビーム走査のジッタなど、いくつかの困難な問題が発生する。レーザーを用いたスポット光やスリット光走査法では解像度に比例してより多数の位置検出処理を必要とするため、実用的な装置のためには高速処理回路が必要となる。また、この点を改良した空間符号化法<sup>[9]</sup>があるが、バイナリコードやグレイコードなどを用いる場合、やはり距離分解能に比例して多数の画像取得が必要となり、高速性と分解能のトレードオフとなってくる。

そこで我々はこのような問題点を改良するため、機械的可動部を持たず、色の違いによって空間を符号化する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<sup>[2][3]</sup>、マルチスペクトルレンジファインダ(Multi-spectral Range Finder, MuRF)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。

この方法は機械的可動部を持たず、投影パターン

色(波長)とその時の画像との間に対応関係を簡単に決められるため、画像の全てのピクセルで距離が計算でき、しかも観測可能な波長帯域内では対象物の色の影響をキャンセルできるなどの好ましい特徴がある。

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有する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るなどして実現している。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も計測できない。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。等の欠点もある。

一方我々は、フィルムプロジェクタや液晶プロジェクタを使用してカラーパターンを投影し、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レンジファインダであり、上記の欠点を克服できている。液晶プロジェクタを使用する場合、投影するパターンを計算機により容易に制御することが可能なため、計測制度の改善のための様々な手法をソフトウェアで容易に実現できるという特徴もある。また、液晶プロジェクタは市販品として簡単に入手可能で、しかも技術向上により解像度や性能がどんどん向上しているため、より高性能なプロジェクタの登場によりレンジファインダの

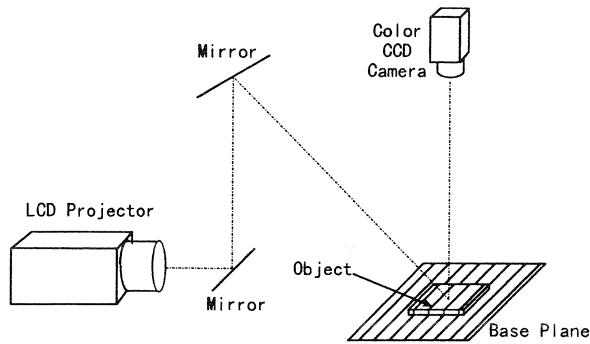


Fig 1 装置の概要

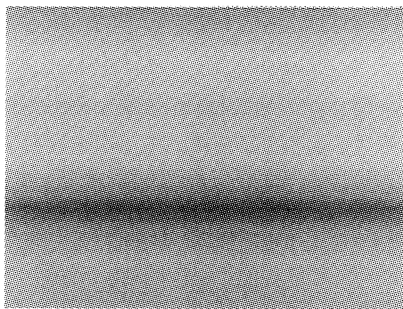


Fig 2 投影パターンの例

性能を向上させることもできる。

マルチスペクトルレンジファインダでは、これまで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性能改善を目指した。その新しく開発した計測方法について説明する。併せて実験結果も示す。

## 2. 装置の概要

装置は CCD カメラ, LCD プロジェクタ, 及びプロジェクタ, カメラインターフェースを備えた PC から構成される。

距離計測は色相が直線的に変化する縞模様からなるカラーパターンを斜め上方から投影し, CCD カメラで真上より観測する。

その概要を Fig1に示す。また、実際に使用する投影パターンの例を Fig2に示す。

### 2.1 色の表現

ここでは色の表現に色相を用いる。色相は一般的には角度表現を取るが、ここでは式変形した以下の定義を用いて  $(R, G, B)$  信号から計算する。

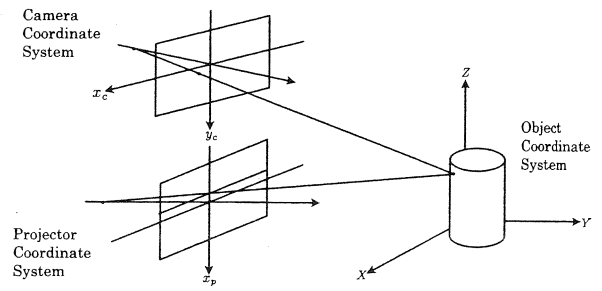


Fig 3 距離算出原理

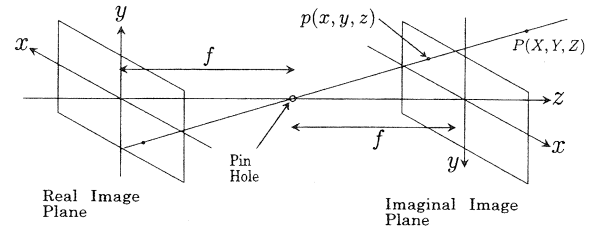


Fig 4 ピンホールカメラモデル

$$Min = \min(R, G, B)$$

$$R' = R - Min$$

$$G' = G - Min$$

$$B' = B - Min$$

$$H = \begin{cases} \frac{G'}{R'+G'}, & \text{if } Min = B \\ \frac{B'}{G'+B'} + 1, & \text{if } Min = R \\ \frac{R'}{B'+R'} + 2, & \text{if } Min = G \end{cases} \quad (1)$$

ここに  $H$  は  $0 \leq H < 3$  である。

## 3. 距離計測法

計測装置の幾何学的構成を Fig3に示す。

この手法は色相が直線的に変化するカラーコードで符号化した空間符号化法と考えられる。その距離計算及びキャリブレーションは以下のように行う。

### 3.1 カメラキャリブレーション

#### 3.1.1 ピンホールカメラモデル

カメラモデルとしては、もっとも単純なピンホールカメラモデル(Fig4)を用いる。このとき透視変換から、撮像面上の座標  $(x_c, y_c)$ 、物体座標  $(X, Y, Z)$  はカメラパラメータ  $C_{ij}$  を用いて、次のように表される。

$$\begin{pmatrix} H_c x_c \\ H_c y_c \\ H_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $H_c$  は媒介変数である。

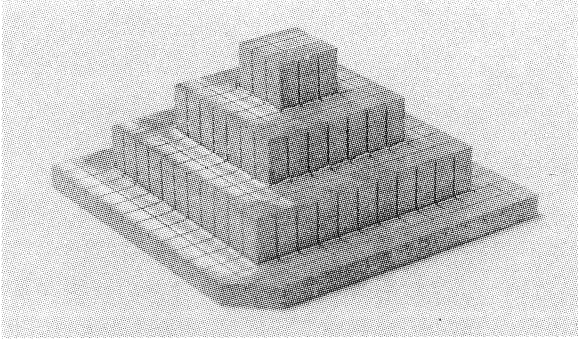


Fig 5 キャリブレーション用基準物体

### 3.1.2 キャリブレーション

式(2)から  $H_c$  を消去して整理すると、以下の関係式が得られる。

$$c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14} - c_{31}Xx_c - c_{32}Yx_c - c_{33}Zx_c - c_{34}x_c = 0 \quad (3)$$

$$c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24} - c_{31}Xy_c - c_{32}Yy_c - c_{33}Zy_c - c_{34}y_c = 0 \quad (4)$$

キャリブレーション用の基準物体を撮影し、ある基準点について物体座標系での位置  $(X, Y, Z)$  とそれに対応するカメラ座標  $(x_c, y_c)$  がわかっているとき、精度を高めるため、 $n (\geq 6)$  個の基準点からパラメータを同定するには、 $c_{34} = 1$  とおき、以下のように行う。

式(3),(4)から、

$$\begin{pmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ \dots \\ x_{cn} \\ y_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 & 1 & \mathbf{o} & -x_{c1}\mathbf{X}_1 \\ \mathbf{o} & \mathbf{X}_1 & 1 & -y_{c1}\mathbf{X}_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{X}_n & 1 & \mathbf{o} & -x_{cn}\mathbf{X}_n \\ \mathbf{o} & \mathbf{X}_n & 1 & -y_{cn}\mathbf{X}_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ \dots \\ c_{32} \\ c_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{X}_i = (X_i \ Y_i \ Z_i)$ ,  $\mathbf{o} = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$ .

がえ得られ、これを

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\mathbf{c}$$

と表せば最小 2 乗法により次のように求まる。

$$\begin{aligned} \mathbf{c} &= (\mathbf{A}'\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}'\mathbf{r} \\ &= \mathbf{A}^+\mathbf{r} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに  $\mathbf{A}^+$  は pseudo inverse である。

実際のキャリブレーションには Fig5 のような基準物体を使用した。基準点は物体に刻み込んだ直線の交点を使用し、カメラ座標の検出は今のところ自動化しておらず、画像を拡大してマウスで指示する。

## 3.2 プロジェクタキャリブレーション

### 3.2.1 プロジェクタモデル

プロジェクタモデルとしてもピンホールカメラの場合と同様にして、レンズ主点をピンホールと考えた場合のモデルを仮定する。

このときの透視変換から、液晶面上の等色相線(スリット)の座標  $x_p$ 、物体座標  $(X, Y, Z)$  はプロジェクタパラメータ  $p_{ij}$  を用いて、次のように表される。

$$\begin{pmatrix} H_p x_p \\ H_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $H_p$  は媒介変数である。

### 3.2.2 キャリブレーション

プロジェクタパラメータも、カメラキャリブレーションの場合と同様にして求められる。

式(7)から媒介変数  $H_p$  を消去し整理すると、

$$(p_{11} - p_{21}x_p)X + (p_{12} - p_{22}x_p)Y + (p_{13} - p_{23}x_p)Z = p_{24}x_p - p_{14} \quad (8)$$

が得られる。これは以下のようにも書き直せる。

$$p_{11}X + p_{12}Y + p_{13}Z + p_{14} - p_{21}Xx_p - p_{22}Yx_p - p_{23}Zx_p - p_{24}x_p = 0 \quad (9)$$

$m (\geq 8)$  個の基準点からのパラメータを同定するには、 $p_{24} = 1$  とおき以下のように行う。

$$\begin{pmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \\ \dots \\ x_{pm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 & 1 & -x_{p1}\mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 & 1 & -x_{p2}\mathbf{X}_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{X}_m & 1 & -x_{pm}\mathbf{X}_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ \dots \\ p_{23} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここに  $\mathbf{X}_i = (X_i \ Y_i \ Z_i)$  である。

これを

$$\mathbf{s} = \mathbf{B}\mathbf{p}$$

と表せば最小 2 乗法により

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= (\mathbf{B}'\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}'\mathbf{s} \\ &= \mathbf{B}^+\mathbf{s} \end{aligned} \quad (11)$$

ここに  $\mathbf{B}^+$  は pseudo inverse である。

ところで、プロジェクタパラメータのキャリブレーションの場合、プロジェクタ上での座標  $(x_p, y_p)$  に対応する点の物体座標系での座標  $(X, Y)$  を知ることはカメラキャリブレーションの場合ほど容易ではない。

ここではカメラは前節の手順でキャリブレーションできていることに着目し、物体座標系で高さ  $Z$  のわかっている位置に置いた  $X - Y$  平面に平行な平板にプロジェクタか

らキャリブレーション用格子パターンを投影し、カメラを用いてその投影像を撮影する。このとき投影した格子点については、プロジェクト上での座標  $x_p$  は投影パターンアドレスとして設計時に決まっている。

次に、取得した画像上での格子点のカメラ座標  $(x_c, y_c)$  から物体座標系での位置  $(X, Y)$  をカメラパラメータを用いて計算する。これによりその投影された格子点の物体座標系での座標  $(X, Y, Z)$  がわかる。

その計算は以下ようになる。式(3), (4)より、

$$\begin{pmatrix} c_{11} - c_{31}x_c & c_{12} - c_{32}x_c \\ c_{21} - c_{31}y_c & c_{22} - c_{32}y_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(c_{13} - c_{33}x_c)Z + (c_{34}x_c - c_{14}) \\ -(c_{23} - c_{33}y_c)Z + (c_{34}y_c - c_{14}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

これを

$$Du = w$$

と表すと、 $D^{-1}$ が存在すれば、

$$u = D^{-1}w \quad (13)$$

となり、 $(X, Y)$  が求まる。

以上の操作を様々な高さ  $Z = Z_i$  で繰り返すことにより、プロジェクト座標  $x_p$  と対応する物体座標の組をたくさん得て、プロジェクトパラメータを同定する。

### 3.2.3 三次元座標計算

三次元座標計算は画素のカメラ座標  $(x_c, y_c)$  と投影パターンのプロジェクト座標  $x_p$  とから、式(3), (4)を連立に解き、物体座標  $(X, Y, Z)$  を求めればよい。

式(3), (4), (9)から、

$$(c_{11} - c_{31}x_c)X + (c_{12} - c_{32}x_c)Y + (c_{13} - c_{33}x_c)Z = c_{34}x_c - C_{14}$$

$$(c_{21} - c_{31}y_c)X + (c_{22} - c_{32}y_c)Y + (c_{23} - c_{33}y_c)Z = c_{34}y_c - C_{24}$$

$$(p_{11} - p_{21}x_p)X + (p_{12} - p_{22}x_p)Y + (p_{13} - p_{23}x_p)Z = p_{24}x_p - p_{14}$$

が得られる。これを

$$f = \begin{pmatrix} c_{34}x_c - c_{14} \\ c_{34}y_c - c_{24} \\ p_{24}x_p - p_{14} \end{pmatrix},$$

$$Q = \begin{pmatrix} c_{11} - c_{31}x_c & c_{12} - c_{32}x_c & c_{13} - c_{33}x_c \\ c_{21} - c_{31}y_c & c_{22} - c_{32}y_c & c_{23} - c_{33}y_c \\ p_{11} - p_{21}x_p & p_{12} - p_{22}x_p & p_{13} - p_{23}x_p \end{pmatrix},$$

$$v = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix},$$

とおけば、上式はまとめて、

$$Qv = f \quad (14)$$

と書ける。そこで  $Q^{-1}$  が存在すれば

$$v = Q^{-1}f \quad (15)$$

から物体座標  $(X, Y, Z)$  が求まる。

実際の計測ではカメラ座標  $(x_c, y_c)$  とプロジェクト座標  $x_p$  の対応を調べる必要があり、以下の手順で行う。

- (1) Fig 7 の手順で合成した画像上の任意の画素  $(x_c, y_c)$  の色相を計算し、それを  $h(x_c, y_c)$  とする。
- (2) この  $h(x_c, y_c)$  から投影パターンの色相変化の傾きを用いて、プロジェクト座標  $x_p$  を求める。
- (3) 式(15)に、この  $(x_c, y_c)$  と  $x_p$  を適用して物体座標系での座標  $(X, Y, Z)$  を求める。
- (4) これを全ての画素について繰り返す。
- (5) 但し、色相が求められない(陰または黒い物体)場合には例外値を返す。

### 3.3 センサ特性キャリブレーション

カラーパターンを投影し、カメラでその画像を取り込むとき、プロジェクトやカメラの特性によって様々な変換を受ける。その変換特性をモデル化してそれを同定できれば、カメラ画像信号から投影されたはずのパターンを推定できる。

#### 3.3.1 クロストーク補正

実際のプロジェクトとカメラの各 RGB チャンネル間には相互に光の漏れ込み(クロストーク)が存在する。

また、CCD カメラの個々の RGB センサは、光が入ってこない(真っ暗)状態でもセンサ自体のいわゆる暗電流があるため出力はゼロではない。周囲光も完全にゼロとは限らない。

そこで、これらを考え併せて以下のような線形モデルを仮定し、観測画像に対して RGB チャンネル間のクロストークの補正を行う。

いまプロジェクトの投影パターンを  $(r, g, b)'$ 、観測したカラー画像信号を  $(R, G, B)'$  とすると、線形モデルは

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_r & b_r & c_r & r_0 \\ a_g & b_g & c_g & g_0 \\ a_b & b_b & c_b & b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \\ 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

と書ける。このパラメータを予め求めておくことにより、投影されたパターン  $(\tilde{r}, \tilde{g}, \tilde{b})'$  は観測された画像信号  $(R, G, B)'$  から

$$\begin{pmatrix} \tilde{r} \\ \tilde{g} \\ \tilde{b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_r & b_r & c_r \\ a_g & b_g & c_g \\ a_b & b_b & c_b \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} R - r_0 \\ G - g_0 \\ B - b_0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

のように推定できる。

ところが、実際の計算では上式の計数行列のうち対角要素以外の三角部分、特に $a_b, c_r$ は非常に小さな値となっており、逆行列計算時計算誤差が発生する。そこで、このモデルを次のように改め、それを同定することにより補正を行う。このとき $(r_0, g_0, b_0)'$ は予め別に求めておく。

$$\begin{pmatrix} \tilde{r} \\ \tilde{g} \\ \tilde{b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}_r & \hat{b}_r & \hat{c}_r \\ \hat{a}_g & \hat{b}_g & \hat{c}_g \\ \hat{a}_b & \hat{b}_b & \hat{c}_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R - r_0 \\ G - g_0 \\ B - b_0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

これによりプロジェクタとカメラを総合した感度(ゲイン)も自動的に一定に補償される。

このパラメータは線形重回帰分析により以下のように求められる。

$\mathbf{x} = (r, g, b, 1)'$ ,  $\mathbf{y} = (R, G, B)'$ と表すと、式(1)は次のように書ける。

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}'\mathbf{x} \quad (19)$$

いま $N$ 組の $\mathbf{x}$ と $\mathbf{y}$ が得られるとすると、平均2乗誤差を最小とする最適係数行列は、

$$\mathbf{B} = \mathbf{R}_{xx}^{-1}\mathbf{R}_{xy} \quad (20)$$

で与えられる。

ここに、

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i', \quad \mathbf{R}_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i'$$

は、それぞれ $\mathbf{x}_i$ の自己相関行列、 $\mathbf{x}_i$ と $\mathbf{y}_i$ の相互相関行列である。

### 3.3.2 直線性補償

プロジェクタやカメラの入出力応答はいわゆる $\gamma$ 特性となっており、両者を含めた総合的な直線性の補償を行う必要がある。

ここでは簡単な折れ線近似により、応答が直線に近づくよう補正を行っている。

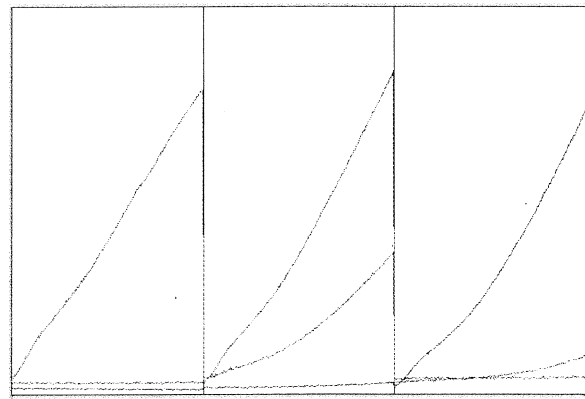
センサ特性の補正の様子を Fig6に示す。

### 3.3.3 物体色キャンセル

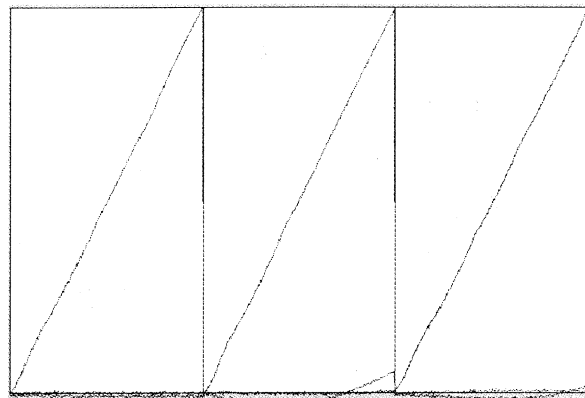
これまでのセンサ特性の補正に加え、Fig7の手順により物体表面の色の影響をキャンセルする。

## 4. 計測精度の評価と計測結果の例

まず計測精度の評価実験として、1, 2, 5, 10, 20(mm)のセラミックブロックゲージを測定し誤差を評価



(a)補正前



(b)補正後

Fig 6 センサ特性キャリブレーション

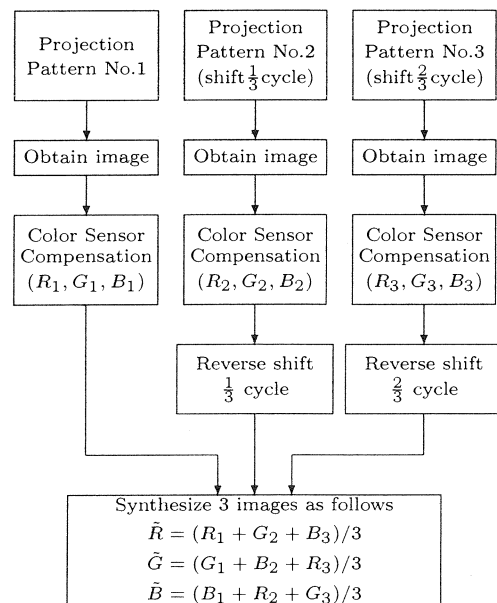


Fig 7 物体色キャンセルの手順

した。結果はゲージブロック公称寸法との誤差で評価した。

結果を Fig8に示す。この結果から現状での距離計測誤差は標準偏差で 0.09~0.19mm 程度であった。このときの計測範囲はおよそ(W)30×(D)40×(H)40mm である。また、計測データの例を Fig9に示す。

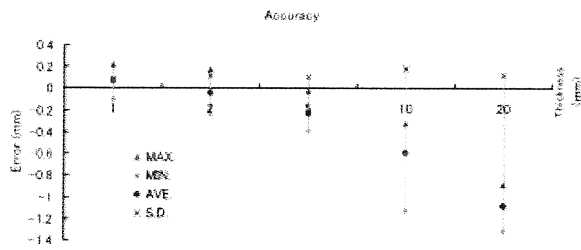
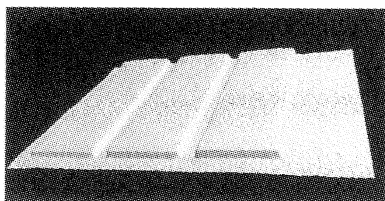
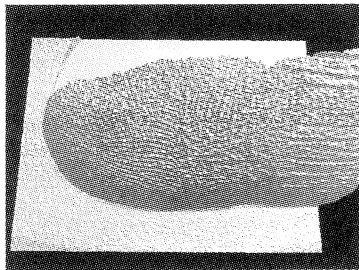


Fig 8 計測精度の評価



(a)ブロックゲージ(左から 1.005,1.10,1.20mm)



(b)指紋

Fig 9計測結果の例

## 5. まとめと考察

マルチスペクトル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、センサ信号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、アクティブステレオ法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。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、離散系ではあるものの本質

的には連続値を用いており、実際にはプロジェクタやカメラの入出力特性が線形でないため、そのまま実現することは困難を伴うが、多段階の補正により従来の計測法と比べて性能を向上することができた。

現時点ではプロジェクタやカメラの入出力特性の補正に計算の単純な線形計算を用いているが、今後は非線形計算法による補正などを検討し、さらなる改善を続ける予定である。

## 文献

- [1] 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)
- [2] Tatsuo Sato:“Multispectral Pattern Projection Range Finder”, Proc. of the SPIE Electronic Imaging '99, Vol.3640, pp.28-37 (1999-1)
- [3] 佐藤辰雄:“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”, 産科技センター研究報告, 平成10年度, pp.9-12(1999-8)
- [4] 佐藤, 前山田, 遠藤:“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”, 信学技報, PRMU99-164, pp.101-108(1999-11)
- [5] 佐藤, 築根:“カラー符号化を用いたレンジファインダ”, 電気学会システム・制御研究会資料, SC-00-5, pp.23-28(2000-3)
- [6] 田島讓二, 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)