

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

佐藤辰雄*, 北山公也**

*機械電子部, **新鶴海興産(株)

Measuring Shape with Multi-Spectral Pattern Projection Range Finder

Tatsuo Sato*, Kimiya Kitayama**

*Mechanics & Electronics Division, **Shin Tsurukai Kousan Co.Ltd.

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た。色相の変化率が一定となるように設計した縞模様のカラーパターンを白色光で投影し、対象物体の凹凸に応じて生じる縞模様の歪み量を基準面からの色相差で検出する方法を採用している。計測対象物表面の色の違いにより発生する誤差もキャンセルできた。この計測手法は、(1)少なくとも3 frame timeを要するのでビデオレートとはいかないが、全視野を一括計測できるので原理的に高速、(2) Rainbow Range Finder と比べて回折格子などの特殊な光学系を必要としない、(3)市販の液晶プロジェクタと CCD カメラで実現できるので低コスト化可能、(4)投影パターンが自由に制御可能なためパターンの繰り返し等により距離計測範囲は狭まるが精度向上がはかれる、等の特徴を有している。

1. まえがき

物体の形状を計測する3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。計測方式は大きく能動的手法と受動的手法に分けられる。

能動的手法とは、3次元形状を計測するために巧みに制御され、その形状パターンや濃淡スペクトルなどに対して何らかの意味を持ったエネルギー(光、電波、音波など)を対象に照射する手法をさす。逆に受動的手法とは、対象に一般的な照明などを行うにしても、計測に関して特別な意味のあるエネルギーを利用しない手法をいう。産業分野において検査装置などで実用的に使用する場合、高速、高精度、安価などの要求があるが、比較的高速安価な計算機が手にはいるようになった今でも、一般に受動的な手法はこれらの点で実用的でなく、能動的な手法が多く使われている。

能動的な手法では照射するエネルギーとして、自動車やロボットにおける障害物検知のように対象物表面までの平均的な距離を計測すればいい場合には超音波や電波も使用されるが、3次元計測の場合には空間分解能の観点から光を使用するのが一般的である。能動的な手法はまた光の伝播時間の測定に基づく方法と三角測量の原理を利用する方法とに分けられ、多くの手法が知られている。

一方、計測された形状データを利用する立場からは、計測に使用するカメラの各画素ごとに距離が求まることが望ましい。例えばスポット光走査法、スリット光走査法などにおいては、距離の精度や信頼度は高いものの、画素ごとの空間分解能を得るには処理速度が遅くなるなどの欠点がある。

全視野を一括計測し、画素ごとの形状データが得られる手法としてカラーパターン投影法があり、田島らが Rainbow Range Finder (RRF)と呼ぶシステムを提案している。これは回折格子によって分光した虹状の連続スペクトルパターンを対象物に照射し、それぞれ分光感度の異なる2種のセンサでスペクトル分布を求めて三角測量により距離を得るものである。一般にカラーパターン投影法では計測対象とする物体表面の色の違いによる計測誤差の発生が知られている。このシステムは本質的に計測対象の色の影響を受けず、一度に視野内の全面を計測できる等の特徴を持っているが、回折格子や特殊な分光感度特性を持ったセンサ等を必要とするため安価にはできにくいこと、投影するパターンは回折格子によって決定され任意には制御できないため精度向上が容易でないこと等の欠点もある。

そこで検査装置への適用を目指して、カメラの各画素ごとに距離が求まる特徴を生かしながら、これらの問題点を解決した、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た。このマルチスペクトル光投影レンジファインダについて以下に詳説する。

2. 計測原理の概要

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 $Z = 0$ 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三角測量の原理によって計算できる。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。

計測原理の概要を Fig.1 に示す。

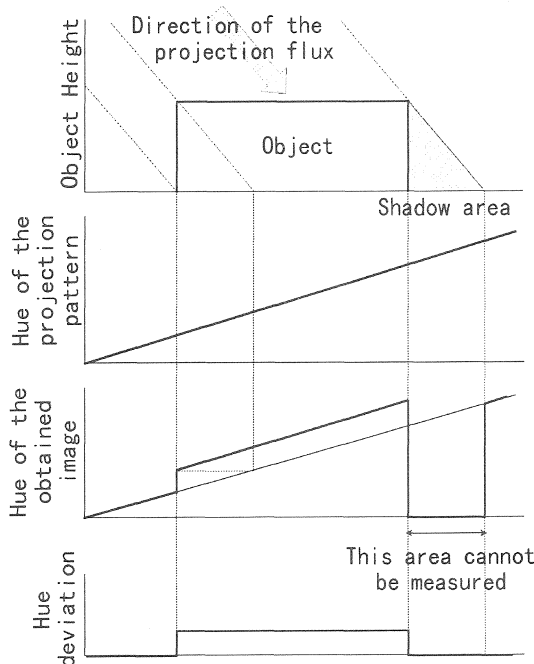


Fig.1 計測原理

2.1 色相

この手法では色合いを定量的に表現する必要がある。色合いの表現には色相(Hue)を用いる。色相は CCD カメラの RGB 信号から次式により計算で求める。

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

ここで H は色相で、 $0 \leq H < 3$ で循環する。

3. 高さ(距離)の算出

投影パターンは色相 H の変化率 A が一定となるように設計する。その勾配を A とすれば次のように表される。

$$\frac{dH}{dX} = A$$

この関係から、対象物に投影されたカラーパターン像における任意画素と基準面におけるその画素との色相差 ΔH は次式により座標の変位に変換される。

$$\Delta X = \frac{\Delta H}{A}$$

投影光が平行で投影角が θ のとき、その点の基準面からの高さは三角測量の原理から次のように求まる。

$$\begin{aligned}
 \Delta Z &= \Delta X \tan \theta = \left(\frac{\Delta H}{A} \right) \tan \theta \\
 &= \left(\frac{\tan \theta}{A} \right) \Delta H \\
 &= c \Delta H \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで係数 $c = \tan \theta / A$ は一定値である。したがって、ある点の高さはその点の色と本来基準面に投影されたであろうパターンの色と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高さが測れ、 θ および A はあらかじめ知っておく必要がない。

3.1 計測対象の色の影響

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_1, G_1, B_1) , (R_2, G_2, B_2) , (R_3, G_3, B_3) とし、Fig.2の手順にしたがって画像を合成する。

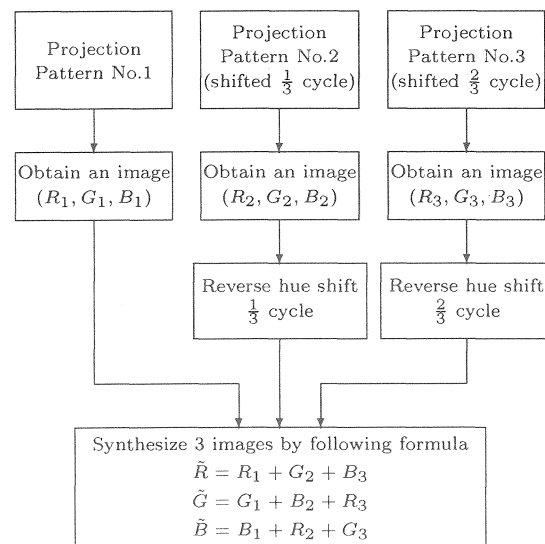


Fig.2 画像の合成

ここで、Fig.2中の色相を逆方向に $1/3$ および $2/3$ 周期シフトする操作は、実際には計算を必要とせず、RGBの入れ替えて良いため簡単であり、画像の合成は単純な加算で行える。この合成画像 $(\tilde{R}, \tilde{G}, \tilde{B})$ を用いて色相差 ΔH を求めて、(2)式により距離を算出すれば、計測対象の色に影響されない距離計測が可能である。

3.2 計測対象の色のキャンセルの理論的証明

Fig.2の手順で計測対象の色の影響がキャンセルされることを理論的に解析する。そのためにいくつかの前提条件を仮定する。

3.2.1 液晶投影装置の線形性

液晶投影装置は、赤(R)、緑(G)、青(B)の三原色フィルタの透過量を制御することにより三原色光の放射量を制御し、投影光の色と明るさを決定する。このとき各三原色の放射光量は設定された出力値に対して線形応答するものとする。すなわち、各三原色に対して設定値*s*を出力したとき、各三原色の放射光強度は変換感度定数を α, β, γ として次式で表せる。

$$L_R(s) = \alpha s, \quad L_G(s) = \beta s, \quad L_B(s) = \gamma s$$

3.2.2 センサ(カラーCCDカメラ)の線形性

受光センサとして使用するカラーCCDカメラは、赤(R)、緑(G)、青(B)の三原色の光刺激に対して応答する色選択性を持った3チャンネルのセンサを持っている。その入出力は線形応答するものとする。すなわちその出力電圧は各三原色の入射光強度が*i*のとき感度の定数を κ, λ, η として次式で表せる。

$$R(i) = \kappa i, \quad G(i) = \lambda i, \quad B(i) = \eta i$$

3.2.3 投影パターン

投影パターンは本文に記述したように、その色相変化がX軸に対して直線的であることだけが必要条件である。

これを論理投影パターン(Theoretical pattern)と呼ぶことにする。ところがこのパターンはRGB表色空間の自由度からその実現方法は一通りには限定されない。ここではわかりやすい例として、投影装置への設定値で表してFig.3のようなパターンを考える。

Fig.3において、区間 $0 \leq \text{Hue} < 1$ では、横軸を*x*で表し、(1)式からその分母を一定値 $Red + Green = Const.(= 1)$ 、 $Min = 0$ として、 $Hue = x$ を構成する。これから以下のようなパターンが得られる。

$$\begin{aligned} Green &= x \\ Red &= 1 - x \\ Blue &= 0 \end{aligned}$$

他の区間についても同様にすれば、Fig.3のPattern No.1が得られる。

Pattern No.2, No.3はそれを $1/3$ 周期ずつずらして作成する。

3.2.4 物体表面の色

物体表面の色をRGB成分の反射率で表し、 (u, v, w) とする。ただし黒($u = v = w = 0$)の場合は除く。

3.2.5 証明

以上の条件のもとで論理投影パターン中の任意の点の色相が、各投影パターンに対応する3枚の画像から合成した合成画像中で

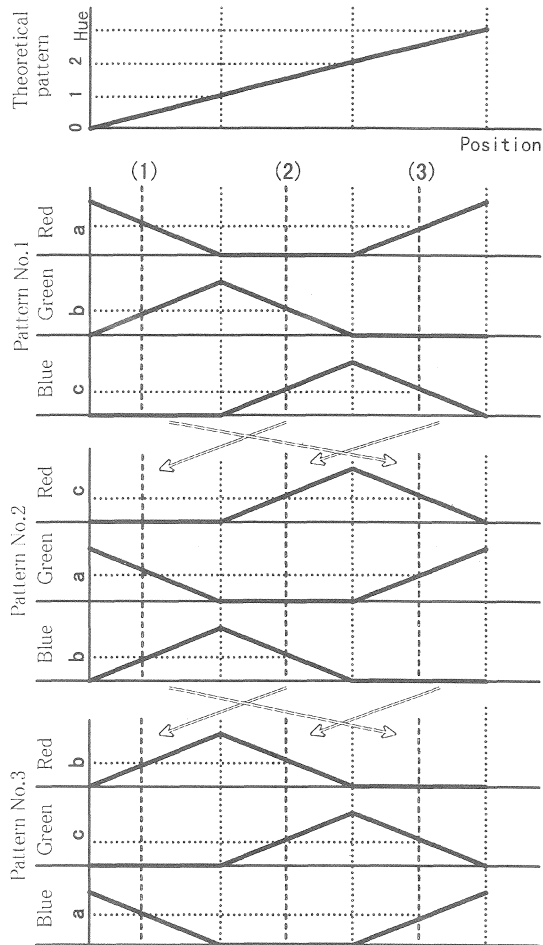


Fig.3 投影パターン

正確に検出されることを示す。なお色成分の表示にはRGB表色系を用いて (R, G, B) で表す。

(a) $0 \leq H < 1$ の場合

論理投影パターン上の任意の点の色成分を $(a, b, 0)$ としたときこの点の投影光の色相は以下のように表される。

$$H^{(1)} = \frac{b}{a+b}$$

このときパターンNo.1を投影すれば投影光強度、受光強度、CCDカメラ出力のRGB成分はそれぞれ順に以下ようになる。

$$\begin{aligned} L_{R1} &= \alpha a & L_{G1} &= \beta b & L_{B1} &= 0 \\ i_{R1} &= u\alpha a & i_{G1} &= v\beta b & i_{B1} &= 0 \\ R_1 &= \kappa u\alpha a & G_1 &= \lambda v\beta b & B_1 &= 0 \end{aligned}$$

次にパターンNo.2を投影すれば、

$$\begin{aligned} L_{R2} &= 0 & L_{G2} &= \beta a & L_{B2} &= \gamma b \\ i_{R2} &= 0 & i_{G2} &= v\beta a & i_{B2} &= w\gamma b \\ R_2 &= 0 & G_2 &= \lambda v\beta a & B_2 &= \eta w\gamma b \end{aligned}$$

同じようにパターンNo.3を投影すれば、

$$\begin{aligned} L_{R3} &= \alpha b & L_{G3} &= 0 & L_{B3} &= \gamma a \\ i_{R3} &= u\alpha b & i_{G3} &= 0 & i_{B3} &= w\gamma a \\ R_3 &= \kappa u\alpha b & G_3 &= 0 & B_3 &= \eta w\gamma a \end{aligned}$$

したがって合成画像 $(\tilde{R}^{(1)}, \tilde{G}^{(1)}, \tilde{B}^{(1)})$ は,

$$\begin{aligned} \tilde{R}^{(1)} &= R_1 + G_2 + B_3 \\ &= \kappa u\alpha a + \lambda v\beta a + \eta w\gamma a \\ &= (\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{G}^{(1)} &= G_1 + B_2 + R_3 \\ &= \lambda v\beta b + \eta w\gamma b + \kappa u\alpha b \\ &= (\lambda v\beta + \eta w\gamma + \kappa u\alpha)b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}^{(1)} &= B_1 + R_2 + G_3 \\ &= 0 \end{aligned}$$

となり、その色相は(1)式により次のようになる。

$$\text{Min} = \tilde{B}^{(1)} = 0, \quad R' = \tilde{R}^{(1)}, \quad G' = \tilde{G}^{(1)}$$

$$\begin{aligned} \tilde{H}^{(1)} &= \frac{G'}{R' + G'} = \frac{\tilde{G}^{(1)}}{\tilde{R}^{(1)} + \tilde{G}^{(1)}} \\ &= \frac{(\lambda v\beta + \eta w\gamma + \kappa u\alpha)b}{\{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)a + (\lambda v\beta + \eta w\gamma + \kappa u\alpha)b\}} \\ &= \frac{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)b}{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)(a + b)} \\ &= \frac{b}{a + b} = H^{(1)} \end{aligned}$$

(b) $1 \leq H < 2$ の場合

前の場合と同様に論理投影パターン上の任意の点の色成分を $(0, b, c)$ とすれば、この点の投影光の色相は以下で表される。

$$H^{(2)} = \frac{c}{b + c} + 1$$

このとき合成画像 $(\tilde{R}^{(2)}, \tilde{G}^{(2)}, \tilde{B}^{(2)})$ は以下となり、

$$\begin{aligned} \tilde{R}^{(2)} &= 0 \\ \tilde{G}^{(2)} &= (\lambda v\beta + \eta w\gamma + \kappa u\alpha)b \\ \tilde{B}^{(2)} &= (\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)c \end{aligned}$$

その色相は次のようになる。

$$\begin{aligned} \tilde{H}^{(2)} &= \frac{\tilde{B}^{(2)}}{\tilde{G}^{(2)} + \tilde{B}^{(2)}} + 1 \\ &= \frac{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)c}{\{(\lambda v\beta + \eta w\gamma + \kappa u\alpha)b + (\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)c\}} + 1 \\ &= \frac{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)c}{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)(b + c)} + 1 \\ &= \frac{c}{b + c} + 1 = H^{(2)} \end{aligned}$$

(c) $2 \leq H < 3$ の場合

前の場合と同様に論理投影パターン上の任意の点の色成分を $(a, 0, c)$ とすればこの点の投影光の色相は以下で表される。

$$H^{(3)} = \frac{a}{c + a} + 2$$

このとき合成画像 $(\tilde{R}^{(3)}, \tilde{G}^{(3)}, \tilde{B}^{(3)})$ は以下となり、

$$\begin{aligned} \tilde{R}^{(3)} &= (\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)a \\ \tilde{G}^{(3)} &= 0 \\ \tilde{B}^{(3)} &= (\eta w\gamma + \kappa u\alpha + \lambda v\beta)c \end{aligned}$$

その色相は次のようになる。

$$\begin{aligned} \tilde{H}^{(3)} &= \frac{\tilde{R}^{(3)}}{\tilde{B}^{(3)} + \tilde{R}^{(3)}} + 2 \\ &= \frac{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)a}{\{(\eta w\gamma + \kappa u\alpha + \lambda v\beta)c + (\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)a\}} + 2 \\ &= \frac{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)a}{(\kappa u\alpha + \lambda v\beta + \eta w\gamma)(c + a)} + 2 \\ &= \frac{a}{c + a} + 2 = H^{(3)} \end{aligned}$$

以上より投影パターン中の任意の点の色相が合成画像中で物体表面におけるRGB成分の反射率 u, v, w に関係なく正確に再現されており、黒の場合を除けば計測対象の色の影響を受けないということがわかる。しかも定数 $\alpha, \beta, \gamma, \kappa, \lambda, \eta$ にも依存していないことから、液晶プロジェクタとカラーCCDカメラについてはRGB間の感度ばらつきにはあまり注意を払わなくてよいということもわかる。

4. 計測精度の評価

距離計測精度の評価実験としては、厚さの異なる5種類のセラミックゲージブロックを用意し、その厚さをそれぞれについて10回計測した。結果はゲージブロック公称寸法との誤差の絶対値で評価した。結果をFig.4に示す。

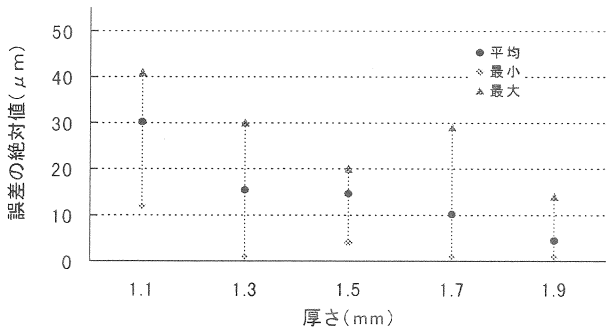
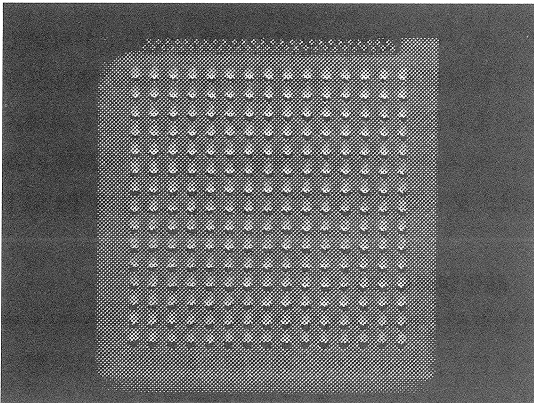


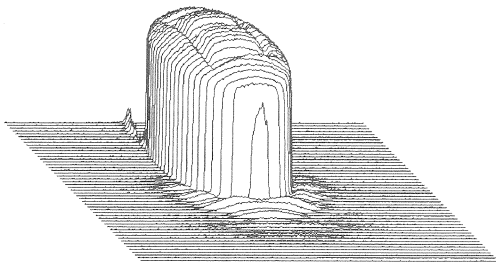
Fig.4 計測精度の評価

この結果から現状での距離計測誤差は最大値で約 $\pm 40\mu m$ ($1\%F.S.$)と考えられる。

形状計測の結果例としてLSIパッケージであるBGAを実際に計測した距離画像と、錠剤を計測したときのプロファイルを図.5に示す。距離画像では高さの高い部分を明るく、低い部分を暗く表示してある。



(a) BGA の計測例



(b) 錠剤の計測例

Fig.5 計測結果の例

5. むすび

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た。色相の変化率が一定となるように設計した縞模様のカラーパターンを白色光で投影し、対象物体の凹凸に応じて生じる縞模様の歪み量を基準面からの色相差で検出する方法を採っている。

一般にカラーパターン投影法では計測対象とする物体表面の色の違いにより誤差が発生するが、この誤差もキャンセルできた。

この計測手法は、(1)少なくとも3 frame timeを要するのでビデオレートとはいかないが、全視野を一括計測できるので原理的に高速、(2)カラーパターン投影法の実現例であるRainbow Range Finderと比べて回折格子などの特殊な光学系を必要としない、(3)市販の液晶プロジェクタとCCDカメラで実現できるので低コスト化可能、(4)投影パターンが自由に制御可能なため繰り返しパターンにより距離計測範囲は狭まるが精度向上がはかれる、等の特徴を有している。

本論文では理想的な状況での投影光および拡散反射光のR,G,B成分に基づいた説明と実験例により物体表面の色の影響を受けにくい距離計測手法を提案したが、プロジェクタとカメラのスペクトル特性や分光反射率などに基づく、より厳密な理論的説明、鏡面反射成分の相互反射(inter reflection)による計測誤差、プロジェクタおよびカメラ座標と基準面(物体座標)の整合を含めたキャリブレーションの方法、投影パターンの最適設計など課題も多く残されている。今後はこれらについて研究を行い性能向上や実用化を目指す予定である。

また、カラーCCDカメラを使用しているため、得られた形状データと画素ずれのないカラー画像取得が可能という特徴もある。この特徴を活かした応用についても研究していきたい。

最後に、この研究の機会を与えていただき、またカラー情報の処理について多くの助言をいただいた南條基 前大分県産業科学技術センター長(現 福井工業大学)に深く感謝致します。

文献

- [1]井口征士, 佐藤宏介:“三次元画像計測”, 昭晃堂(1990)
- [2]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)
- [3]Johji Tajima:“Rainbow range finder principle for range data acquisition”, Proc. IEEE International Workshop on Industrial Application of Machine Intelligence, Seiken Symposium, pp.381-386(Feb.2-5, 1987)
- [4]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)
- [5]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)
- [6]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)
- [5] 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, Vol51, No.12, PP2133-2140(1997-12)