

## [研究論文]

## 魚眼レンズ写真の矯正

立花康夫<sup>1</sup>・河合敏勝<sup>1</sup>

1 情報学部情報メディア学科

## Correction of the picture taken by a fish eye lens

Yasuo TACHIBANA<sup>1</sup>, Toshikatsu KAWAI<sup>1</sup>

## Abstract

In this paper we present a calibration method for the photo pictures taken by a 35mm single-lens reflex camera attaching a fisheye lens with focal distance 15mm. The proposed method is applicable to the four projection methods which are used to produce the fisheye lens in industries. Also it is able to use arbitrary 35mm camera with any size of CCD or COMS sensor. The procedure of the proposed methods does not contain any iteration process. Therefore the calibration image is produced uniquely and fast by only two parameters. In order to show the effect of the proposed method we compare the actual pictures taken by the 20mm focal distance lens for a reference and the calibration pictures generated by the four projections from a fisheye picture. Defining the criterion function which is obtained by the maximum value of the phase only correlation function between the calibrated picture and reference photo picture, we will show that the most preferable projection is the equidistance projection.

Keywords: Fisheye Lens, Equidistance Projection, Picture Correction, Phase Only Correlation

## 1. はじめに

魚眼レンズ写真を矯正して歪みの無い画像に変換する手法についてはこれまでも各種の提案がなされている[1],[2]. 著者等は, 魚眼レンズで撮影した写真から, 同じ位置で直線が直線に映る通常のレンズで撮影した写真と同等の画像となるような矯正画像を作る手法を提案した[2]. この提案手法はレンズの設計で用いられる4つの射影法[3]のいずれにも適用できる. 使用した魚眼レンズがいずれの射影法で作られたものかは公称的には不明であるが, 通常レンズで撮影した写真と比較することにより, そのいずれかを判断することが可能である[3].

本論文では魚眼レンズの同定過程を位相限定相関法[4]による画像マッチング度合いで実施している. 合わせて比較のため通常の相関関数を計算し評価の比較を行っている. 客観的かつ定量的に検討するため鉛直な平面に格子の絵を描きこれを魚眼レンズで撮影した写真を作る. また比較参照のため広角の通常レン

ズで同じカメラで同じ位置で撮影した写真を作る. 魚眼レンズ写真から提案手法に矯正した画像と参照通常レンズ写真との一致性をしらべる. これら処理のためのプログラムを作成して4つの射影法による矯正画像の比較を行った結果, 等距離射影法による矯正が最も通常写真に近い画像を生成することを示す. この射影法により焦点距離 5mm, 10mm という超広角の矯正画像が得られ, 十分鑑賞に堪えるものであることを示す.

## 2. 相関関数と位相限定相関関数

ここで $n$ は正の整数とし $N=2^n$ とする.  $N \times N$ に切りだされた画像を $u(k, \ell)$ と $v(k, \ell)$ とする( $0 \leq k, \ell < N$ ). これらの画像の一致を評価する. 正方面像 $u(k, \ell)$ と $v(k, \ell)$ の有限 Fourier 変換[5]を $U(p, q), V(p, q)$ ( $0 \leq p, q < N$ )とすると

$$U(p, q) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\ell=0}^{N-1} u(k, \ell) e^{-j \frac{2\pi}{N} (pk + q\ell)} \quad (1)$$

$$V(p, q) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\ell=0}^{N-1} v(k, \ell) e^{-j \frac{2\pi}{N} (pk + q\ell)} \quad (2)$$

である. これらの相関スペクトルは

$$C_{\text{cor}}(p, q) = U(p, q) \bar{V}(p, q) \quad (3)$$

で与えられる. また, 相関関数は逆 Fourier 変換

$$c_{\text{cor}}(k, \ell) = \frac{1}{N^2} \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} C_{\text{cor}}(p, q) e^{j \frac{2\pi}{N} (pk + q\ell)} \quad (4)$$

で与えられる. ここで $C_{\text{cor}}(0, 0)/N^2$ は平均を表すので,

$$C_{\text{cor}}(0, 0) = 0 \quad (5)$$

とすることにより $c_{\text{cor}}(k, \ell)$ のペースを調整する.

一方, 位相限定相関スペクトルは

$$C(p, q) = \frac{U(p, q) \bar{V}(p, q)}{|U(p, q)| |V(p, q)|} \quad (6)$$

で与えられ, 位相限定相関関数は $k, \ell = 0, 1, \dots, N-1$ に対して, 逆 Fourier 変換

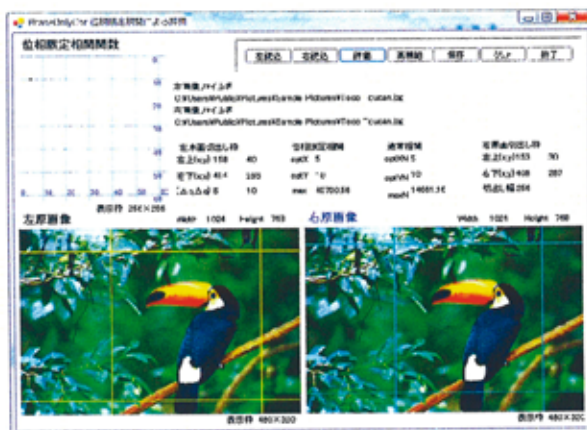


図1 位相限定相関の試験プログラム



$$c(k, \ell) = \frac{1}{N^2} \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} C(p, q) e^{j \frac{kp + \ell q}{N}} \quad (7)$$

で与えられる[4]。

従来、2つの画像の一致の度合いを評価するには相関関数の絶対値  $|c(k, \ell)|$  が最大となる点を見つけ、その時の  $k$  と  $\ell$  が画像のずれを示していた。この場合には、画像全体の輝度(振幅)が  $|c(k, \ell)|$  の値に大きく影響し、最大値を求めること自身困難な場合が生じた。画像の輝度に依存しないで対象の形状の一致を評価するための工夫として位相限定相関法が考察されてきた。図1のように全く同じ画像を正方に切り出して一方を少しずらせた画像を  $u$  と  $v$  として通常の相関関数と位相限定相関関数を計算して図示したものが図2と図3である。ピーク位置は同じであるが、その形状は著しく異なる。この例から見ても位相限定相関関数の効果は際立つものがある。  $N$  として2のべき2<sup>n</sup>を用いているので、有限 Fourier 変換の計算はFFT (2次元FFT) により実施することができる。

### 3. レンズによる結像

議論を明確にするために、この論文では、カメラは35mm フィルム用の一眼レフカメラとする。また、直線が直線に写る一般のレンズを通常レンズと呼ぶ。魚眼レンズ写真を矯正するために、通常レンズによる写真画像と魚眼レンズによる写真画像の関係を調べる。

#### 3.1 通常レンズ

通常レンズの付いたカメラを水平に置く。図4のようにカメラの撮像面に  $X-Y$  直交座標を設け、 $X$  軸は水平で  $Y$  は上方を向ける。レンズ光軸を  $Z$  軸にとり  $X-Y-Z$  軸は右手系とすると  $Z$  軸は被写体からカメラに向かう。座標軸の原点を  $O_s$  とする。被写体平面に  $U-V$  直交座標を設け光軸上に原点  $O$  を置く。 $U$  軸は水平で  $V$  軸は上方を向ける。光軸上に  $W$  軸を設け  $U-V-W$  が右手直交系を成すようにする。中心  $L_s$  にあるレンズの焦点は光軸  $OO_s$  上にある。次に被写体面に原点  $O$  を中心にして半径  $A$  の円  $\Gamma$  を描く。円  $\Gamma$  は撮像面の中心  $O_s$  半径  $p_s$  の円  $\Sigma_s$  に写像される。円  $\Gamma$  上の点  $S$  は円  $\Sigma_s$  上の点  $P_s$  に写る。通常レンズで結像すると図4に示すように  $P_s, O_s, L_s, O, S, S'$  は1平面上にあるからレンズの焦点距離を  $f_s$  とすると、次の結像の式が成立する。

$$\frac{1}{r_s} + \frac{1}{R} = \frac{1}{f_s} \quad (8)$$

ここで、 $r_s = O_s L_s, R = O L_s$  とする。レンズを固定すると  $r_s$  は定数である。これらに比較してレンズから被写体面までの距離  $R$  が十分大きければ ( $r_s \ll R$ )  $r_s$  はほぼレンズの焦点距離  $f_s$  と同じ値となるので

$$r_s = f_s \quad (9)$$

とする。また、点  $S$  の原点  $O$  に対称な点を  $S'$  とする。 $O_s P_s$  と  $X$  軸のなす角度を  $\theta$  とすれば  $OS'$  と  $U$  軸のなす角度は  $\theta$  であり  $OS$  と  $U$  軸のなす角度は  $\theta + \pi$  となる。レンズから被写体  $S$  の見込み角を光軸から測り  $\varphi$  とすると  $\angle O L_s S = \angle O_s L_s P = \varphi$  である。便宜上  $S'$  の座

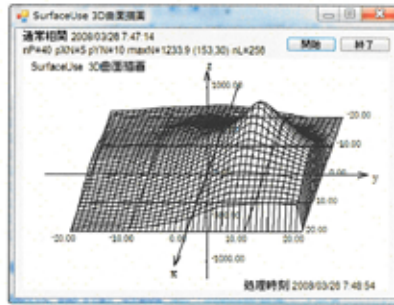


図2 通常相関関数

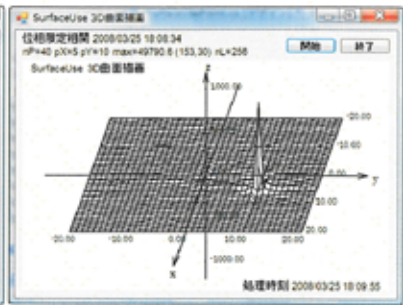


図3 位相限定相関関数

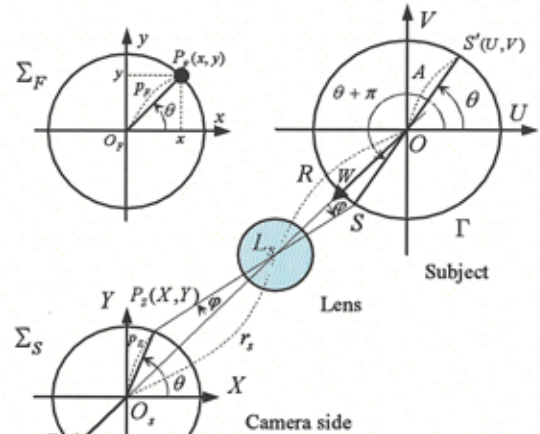


図4 対象と撮像面

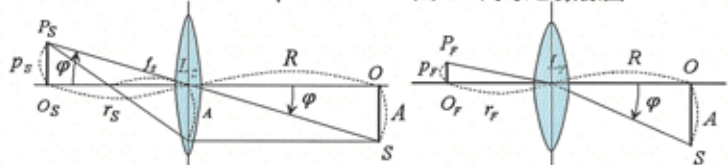


図5 通常レンズの結像

図6 魚眼レンズの結像

標を  $(U, V)$  で、 $P_s$  の座標を  $(X, Y)$  で表す。このとき図4より明らかな関係

$$U = A \cos \theta \quad V = A \sin \theta \quad (10)$$

$$X = p_s \cos \theta \quad Y = p_s \sin \theta \quad (11)$$

が成り立つ。ここで角度  $\theta$  は

$$-\pi \leq \theta \leq \pi \quad (12)$$

の範囲を変化する。通常レンズでは結像の式(1)が成立し図5のように被写体と像が相似三角形を成す。市販されているレンズの場合  $\varphi$  の上限は超広角レンズでも  $\pi/3(60^\circ)$  程度である。この論文では通常レンズは実在する必要がなく仮想的なレンズとし

$$0 \leq \varphi \leq \pi/2 \quad (13)$$

の範囲で図5の相似三角形の結像原理が成立するものとする。図5と式(9)を考慮して関係式

$$\tan \varphi = A / O L_s = p_s / f_s \quad (14)$$

従って、下記の式を得る。

$$p_s = r_s \tan \varphi \quad (15)$$

実際には、広角レンズの場合、 $r_s, f_s \leq 50[\text{mm}]$  であり、被写体までの距離は  $R \gg 1,000[\text{mm}]$  と考えると、式(8)より  $r_s = f_s$  としてよい。そこで、通常レンズでは下記の式が成立する。

$$p_s = f_s \tan \varphi \quad (16)$$

#### 3.2 魚眼レンズ

中心が通常レンズと同じ位置にある魚眼レンズ  $L_p$  の場合も通常レンズと同じようにフィルム面に

$x-y-z$  座標軸を設ける. この座標軸の原点は  $O_F$  で  $x, y, z$  軸の方向はそれぞれ  $X, Y, Z$  軸と一致するものとする. すなわち, 被写体面上の円  $\Gamma$  は同じように円  $\Sigma_F$  に写像される. しかし, その半径は  $p_F$  となる. 点  $S$  の像は点  $P_F(x, y)$  に結像する. ところで  $O_F, P_F, L_F, S, O$  は 1 平面上にあるから図 3 のように  $OO_F$  と  $x$  軸のなす角度は  $\theta$  である. そこで,

$$x = p_F \cos \theta \quad y = p_F \sin \theta \quad (17)$$

が成り立つ. 魚眼レンズ  $L_F$  の場合では一般に図 4 のように 3 点  $S, L_F, P_F$  は直線上にはなく, 通常レンズで成立する相似三角形の関係が成り立たなくなる. ここで,  $r_F = O_F L_F, R = OL_F$  とすると,  $r_F$  は定数となり, 被写体が離れている場合 ( $r_F \ll R$ ) には  $r_F$  はほぼレンズの焦点距離  $f_F = r_F$  となる. 半径  $p_F$  は通常レンズの式 (16) と同様に  $f_F, \varphi$  の関数であるが魚眼レンズの作り方により式が異なる. 普通, 魚眼レンズを購入しても, この製造方式についての記載は無い. 実際に用いられている典型的な製造方式は次の 4 つである [3].

[a] 立体射影 (stereographic projection)

$$p_F = 2f_F \tan(\varphi/2) \quad (18)$$

[b] 等距離射影 (equidistance projection)

$$p_F = f_F \varphi \quad (19)$$

[c] 等立体角射影 (equisolid angle projection)

$$p_F = 2f_F \sin(\varphi/2) \quad (20)$$

[d] 正射影 (orthogonal projection)

$$p_F = f_F \sin(\varphi) \quad (21)$$

#### 4. 通常レンズ像から魚眼レンズ像へ

対象点  $S$  の通常レンズ写真上の点  $P_F(X, Y)$  から魚眼レンズ写真上の点  $P_F(x, y)$  への変換を導く. 式 (11) から

$$\theta = \text{gatan}(X, Y) \quad (22)$$

となる. ここで  $\tan^{-1}()$  は主値 ( $|\tan^{-1}(x)| \leq \pi/2$ ) を表し

$$\text{gatan}(X, Y) = \begin{cases} \tan^{-1}(Y/X) & X \geq 0 \\ \pi \text{sgn}(Y) + \tan^{-1}(Y/X) & X < 0 \end{cases} \quad (23)$$

である.  $-\pi \leq \text{gatan}(X, Y) \leq \pi$  となる. 再び式 (11) より

$$p_S = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (24)$$

式 (16) から次式が得られる.

$$\varphi = \tan^{-1}(p_S/f_S) \quad (25)$$

例えば魚眼レンズが立体射影方式ならば, 式 (18) より

$$p_F = 2f_F \tan(\varphi/2) \quad (26)$$

となる. 方式 [a] ~ [d] により式 (18) から式 (21) を用いる. 最後に  $x, y$  は式 (17) より求められる. 便宜上, 上記  $(X, Y)$  から  $(x, y)$  への変換を下記のように書く.

$$x = F_x(X, Y; f_S, f_F) \quad y = F_y(X, Y; f_S, f_F) \quad (27)$$

#### 5. デジタル画像

カメラ撮像センサ面の幅を  $w_F$  [mm] で高さを  $h_F$  [mm] とする. センサ面の中心は光軸と交わる. 撮影されるセンサ面範囲は座標  $x-y$  で

$$-w_F/2 \leq x \leq w_F/2 \quad -h_F/2 \leq y \leq h_F/2 \quad (28)$$

である. デジタル画像では一定間隔  $d_F$  の格子状に赤と緑と青の信号情報が横  $M_F$  点縦  $N_F$  点の格子状に埋

め込まれ画素と呼ばれる. 実際には

$$M_F : N_F = 3 : 2 \quad (29)$$

と設定され  $M_F, N_F$  は偶数である. 格子の幅は,

$$d_F = w_F / (M_F - 1) = h_F / (N_F - 1) \quad (30)$$

となる. 画素は 2 つの整数  $i_F, j_F$  ( $0 \leq i_F < M_F, 0 \leq j_F < N_F$ ) で確定し魚眼格子と呼ぶ. 魚眼格子  $(i_F, j_F)$  は  $x-y$  座標で表すと次式となる.

$$x = i_F \cdot d_F - w_F/2 \quad (0 \leq i_F < M_F) \quad (31)$$

$$y = j_F \cdot d_F - h_F/2 \quad (0 \leq j_F < N_F) \quad (32)$$

点  $(i_F, j_F)$  での赤, 緑, 青の信号レベルを夫々  $\xi_R(i_F, j_F)$ ,  $\xi_G(i_F, j_F)$ ,  $\xi_B(i_F, j_F)$  とする.

通常レンズによる像は, 仮想的にどのような大きさの範囲にも描くことができる. そこで, この像は, 格子間隔  $d_S$  で, 横幅が  $M_S$  点, 高さが  $N_S$  点の格子に描かれるとする.  $M_S, N_S$  は正の整数ならどのような値でも良いが, 35mm カメラの写真と同じ画像にするには,

$$M_S : N_S = 3 : 2 \quad (33)$$

と選ぶ. また, 画像の幅と高さは

$$w_S = (M_S - 1)d_S \quad (34)$$

$$h_S = (N_S - 1)d_S \quad (35)$$

となる. 式 (33) より  $h_S$  は  $w_S$  より求まる. 通常レンズ画像の画素を定める格子を通常格子と呼ぶ. 通常格子  $(i_S, j_S)$  を  $X-Y$  で表すと

$$X = i_S d_S - w_S/2 \quad (0 \leq i_S < M_S) \quad (36)$$

$$Y = j_S d_S - h_S/2 \quad (0 \leq j_S < N_S) \quad (37)$$

となる. 格子点  $(i_S, j_S)$  での赤, 緑, 青の信号レベルを  $\eta_R(i_S, j_S), \eta_G(i_S, j_S), \eta_B(i_S, j_S)$  とする. これらの量は未知の量でこれから求めることになる. 実際には下記とする.

$$w_S = w_F \quad (38)$$

#### 6. 魚眼写真矯正法の提案

魚眼レンズ写真から通常レンズ画像を作成する方法を提案する. これは点  $(i_S, j_S)$  の色情報を魚眼レンズ写真から作り出す方法を示すことである. 点  $(i_S, j_S)$  の座標  $(X, Y)$  は  $F_x(X, Y; f_S, f_F), F_y(X, Y; f_S, f_F)$  により点  $(x, y)$  に写像される. 点  $(x, y)$  に対応する魚眼格子  $(i_F, j_F)$  は式 (31), (32) から

$$i_F = (x + w_F/2) / d_F \quad (39)$$

$$j_F = (y + h_F/2) / d_F \quad (40)$$

となるが, 式 (39), (40) の右辺の値は常に整数とはならない. そこで,

$$p = [(x + w_F/2) / d_F] \quad (41)$$

$$q = [(y + h_F/2) / d_F] \quad (42)$$

とする. ここで  $[x]$  は  $x$  を超えない最大の整数を表す. 次に

$$r = (x + w_F/2) / d_F - p \quad (43)$$

$$s = (y + h_F/2) / d_F - q \quad (44)$$

とすると,  $0 \leq r, s < 1$  である. そこで, 荷重平均により  $* = R, G, B$  として,

$$\eta_*(i_S, j_S) = s\{r\xi_*(p, q) + (1-r)\xi_*(p+1, q)\} + (1-s)\{r\xi_*(p, q+1) + (1-r)\xi_*(p+1, q+1)\} \quad (45)$$

とする. これで格子  $(i_S, j_S)$  での色情報が決定する. 従って  $f_F, M_F, w_F, f_S, M_S, w_S$  が定まると魚眼レンズ写真から通常レンズ画像が得られる.  $M_F, w_F (= w_S)$  はカメラで,  $f_F$  は魚眼レンズで決まっているから自由に設



定出来るのは  $f_s, M_s$  である。

## 7. 実験結果

使用カメラは Canon EOS5D で撮像面は公称 35.8 × 23.9mm,  $M_F = 4,368$  である。図 7 は矯正画像評価プログラムの主フォームである。図 7 左上(図 10)に対象の魚眼写真を示す。対象は部屋の白い壁面で黒いテープで格子を作っている。図 7 下左の図(図 11)は同じ位置で 20mm の広角レンズで撮影した写真である。図 7 の下右の図(図 12~図 17)は 20mm 通常レンズの写真と同等になるよう左上の魚眼写真を矯正した画像である。矯正画像上にカーソルを置き左上点をクリックすることで矯正の度合いを評価するための切り出し範囲を定める。切り出し幅は  $N$  ドットとする。図 7 の場合  $N = 2^8 = 256$  で表示枠は 480 × 320 である。切り出し左上座標を  $(xP, yP)$  とし  $xP = 10, 30, 50, \dots, 210$  と  $yP = 10, 30, 50$  と変えた。これによりほぼ表示画面をくまなく切り出し面が分布する。参照画像と矯正画像の位相限定相関関数最大値と通常相関関数最大値を 4 つの射影法で求め図示したのが図 8 と図 9 である。いずれも横方向は 0[pixel]で縦方向は 2[pixel]の位置でピークが現れる。この様子は  $xP = 70, yP = 30$  の場合に図 18~図 25 に示されている。図 8 と図 9 を見るといずれの場合も等距離射影が最も大きな値を示している。 $xP$  の小さい部分、すなわち画像の左側に近い方では立体射影の値が大きくなる場合もあるが、この場合には枠に切り出された画像の中の格子線が少なくなり、比較が難しくなるからと考えられる。図 10 は魚眼写真、図 11 は比較参照用の広角レンズ写真、図 12 から図 15 は図 11 と同じ焦点距離で 4 つの射影法で矯正した画像である。図 18, 20, 22, 24 は  $xP = 70, yP = 30$  の場合の位相限定相関関数の分布、図 19, 21, 23, 25 は通常相関関数の分布である。これらから見ても位相限定相関関数による画像の一致性の判断は明確であることがわかる。図 16 は  $f_s = 10\text{mm}$ 、図 17 は  $f_s = 5\text{mm}$  とした場合の矯正画像である。このような写真は実際のカメラでは撮影することはできない。

## 8. まとめ

魚眼レンズで撮影した写真から、同じ位置で直線は直線に写像される任意の焦点距離の通常レンズで撮影した写真と同等の画像に矯正できる手法を提案した。手法は魚眼レンズの製造に関わる 4 つの射影法全てに適用できる。使用したレンズの射影法として矯正画像と同じ焦点距離の通常レンズ写真との位相限定相関関数最大値が最大となるものを選んだ。この結果使用したレンズでは等距離射影法が最適であることを示した。この射影法により実際には存在しない 5mm

程度の広角レンズ写真と同等の画像を作り、それが十分に鑑賞に堪えるものであることを示した。

### 参考文献

- [1] 駒形英樹, 石井郁夫, 高橋章, 若月大輔, 今井博英, 「魚眼カメラ内部パラメータの幾何学的キャリブレーション法」, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J89-D, No.1, pp.64-73, 2006.1
- [2] 立花康夫, 「魚眼写真での射影法の同定」信学技法 SIP2007-69, pp.29-34, 2007.8
- [3] 中川治平「レンズ設計工学」東海大学出版会, 1986
- [4] 長嶋聖, 青木孝文, 樋口龍雄, 小林孝次「位相限定相関法に基づくサブピクセル画像マッチングの高性能化」, 計測自動制御学会東北支部第 218 回研究集会, 2004.10.9
- [5] 木村英紀「Fourier-Laplace 解析」岩波書店, 1993

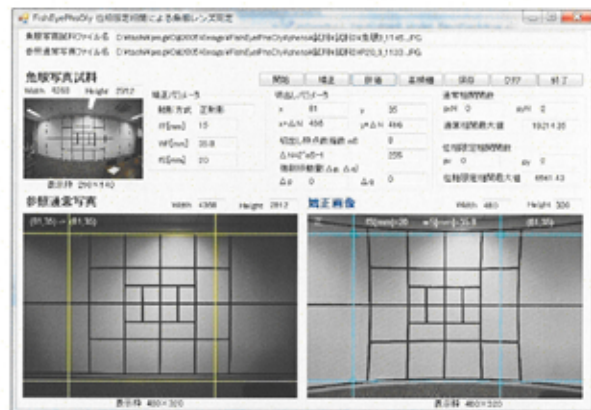


図 7 矯正画像評価プログラム

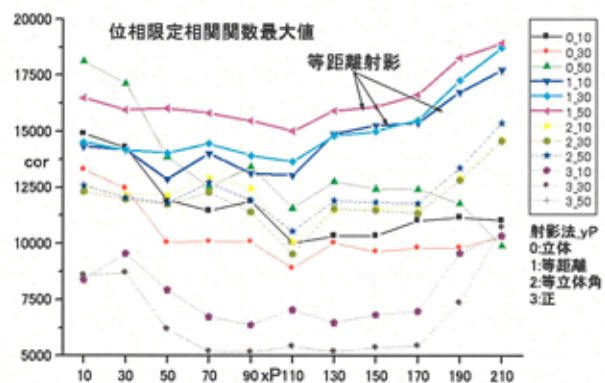


図 8 位相限定相関関数最大値の分布

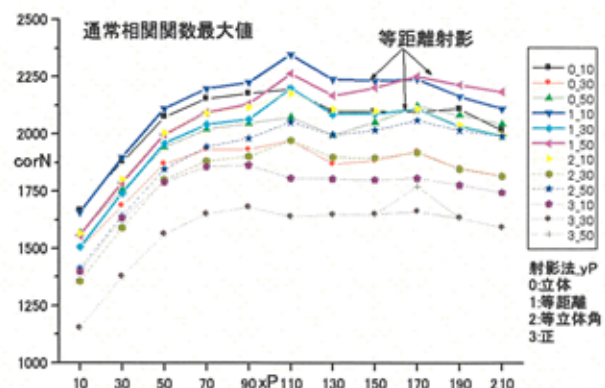


図 9 通常相関関数最大値の分布

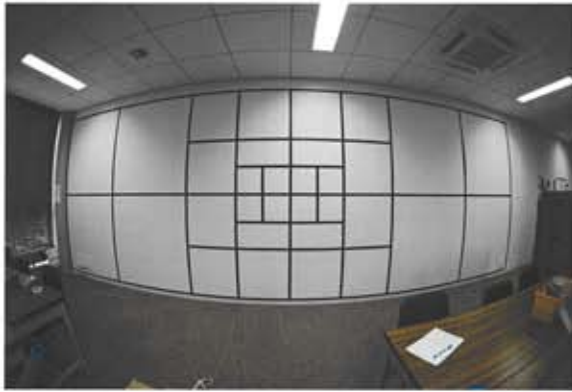
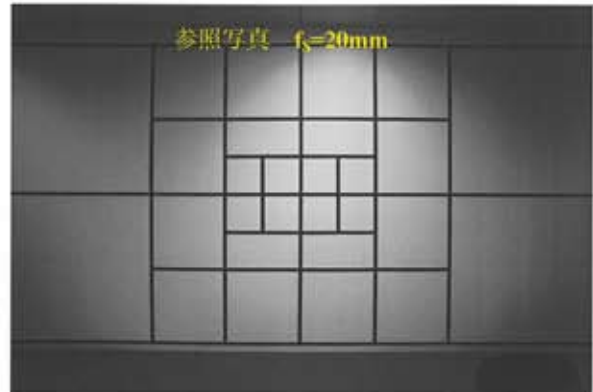
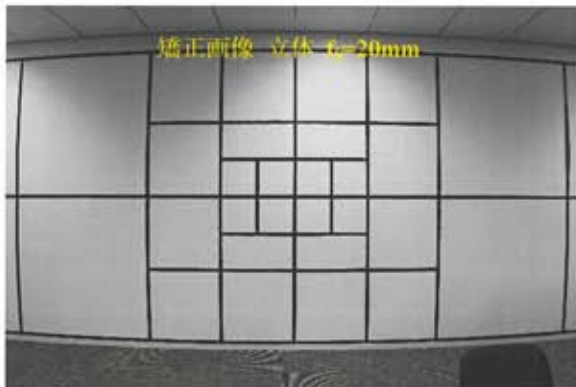
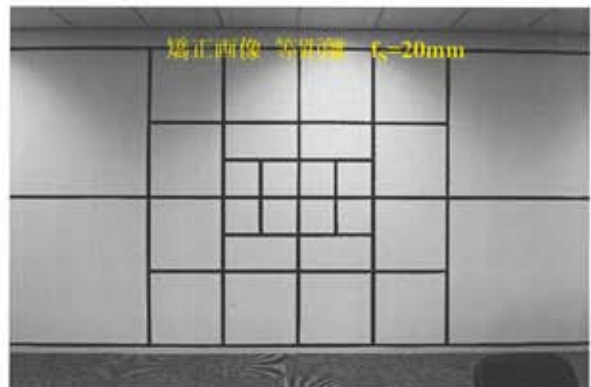
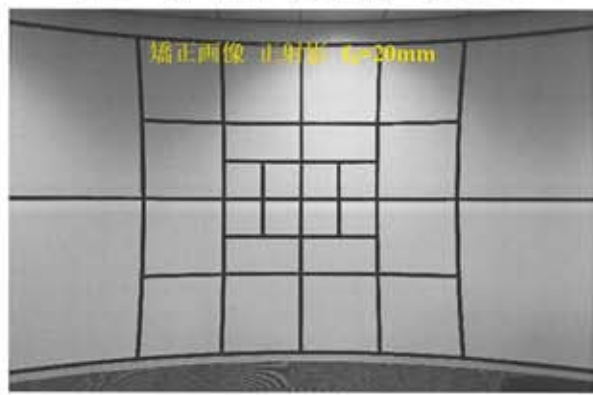


図 10 壁面に描いた格子(魚眼レンズ写真)

図 11 参照写真  $f_s=20\text{mm}$ 図 12 矯正画像 立体射影  $f_s=20\text{mm}$ 図 13 矯正画像 等距離射影  $f_s=20\text{mm}$ 図 14 矯正画像 等立体角射影  $f_s=20\text{mm}$ 図 15 矯正画像 正射影  $f_s=20\text{mm}$ 図 16  $f_s=10\text{mm}$  としての矯正画像図 17  $f_s=5\text{mm}$  としての矯正画像



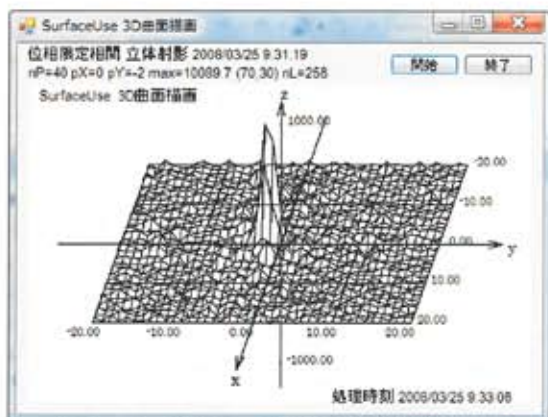


図 18 立体射影の位相限定相関関数

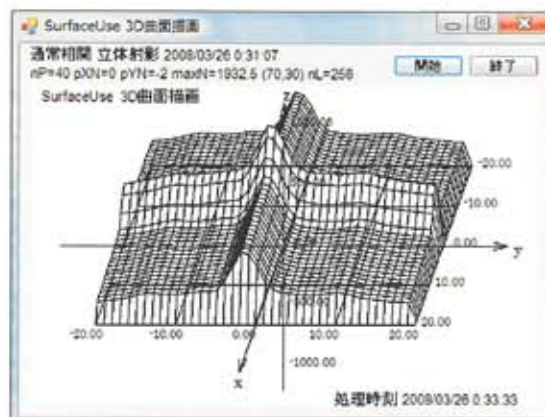


図 19 立体射影の通常相関関数

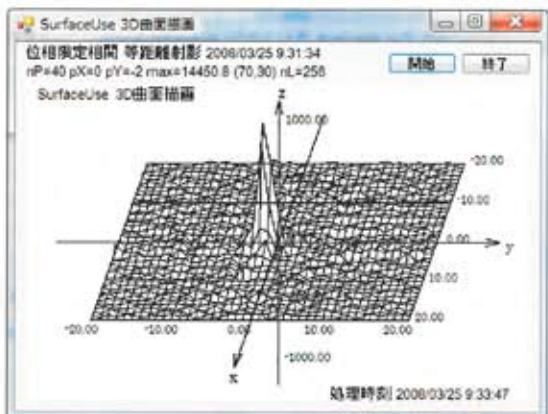


図 20 等距離射影の位相限定相関関数

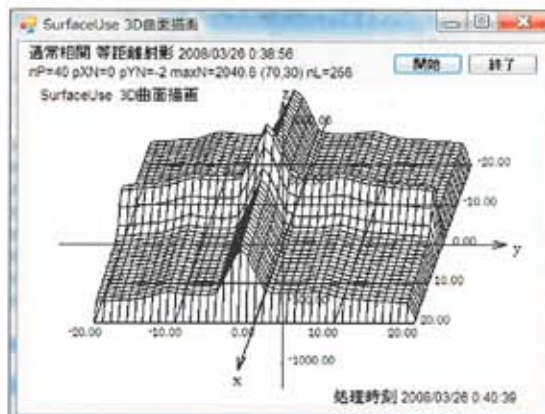


図 21 等距離射影の通常相関関数

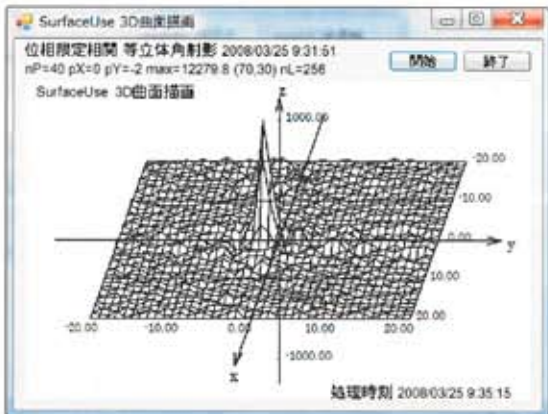


図 22 等立体角射影の位相限定相関関数

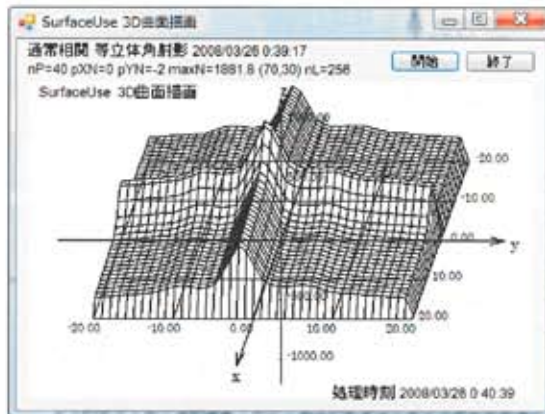


図 23 等立体角射影の通常相関関数

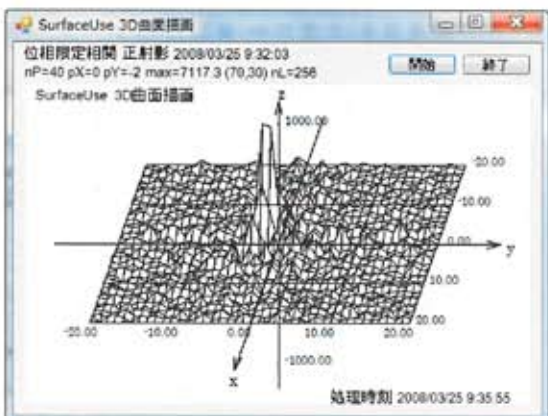


図 24 正射影の位相限定相関関数

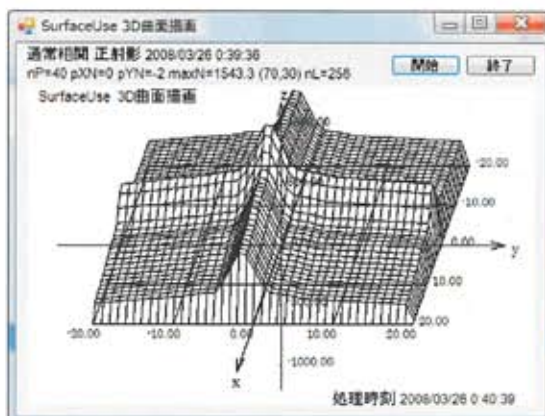


図 25 正射影の通常相関関数