

---

# 画像処理による歪曲収差補正とパノラマ画像

A New Method for Correcting Geometric Distortion in Digital Images and Its Application to Panorama Image Composition

関 海克\*      青木 伸\*\*      江尻 公一\*\*\*  
Haike GUAN      Shin AOKI      Koichi EJIRI

---

## 要 旨

カメラにより得られた複数のデジタル画像を貼り合わせ、一枚の大きい画像を合成するとき、例えば、360度パノラマ画像を合成する場合、次の問題点がある。

- (1) カメラレンズの歪曲収差が存在すると、画像がうまくつなげなく、つなぎめが生じる。
- (2) カメラが自動露出機構を持つため、同じ対象物に対して撮影方向が変わると露光量が異なり、画像をつなぎあわせるとき各画像境界で濃度変化が生じてしまう。

これらの問題点を解決するため、汎用性の高い幾何学的歪補正法を提案がなされた。すなわち任意の対象物に対して、カメラを回転させながらオーバーラップ部分がある二枚の画像を撮影する。二つの画像の対応点をマッチングし、対応点座標を求め、これによって歪係数を求め、画像の歪を補正する。従来法によく使われるテストチャートや画像上の直線情報などが必要はない。

画像を合成する際に、輝度と色補正の必要があるので、濃度と色補正法も併せて考案した。提案した歪補正と輝度補正法を360度パノラマ画像の合成に応用し、デジタルカメラによる実験結果について紹介する。

## ABSTRACT

A new method is proposed for correcting geometric distortion in digital images. In this method, the distortion is modeled with polynomials and two overlapped images which are taken from arbitrary objects by panning the camera are used to measure the distortion. Corresponding points of the two overlapped images are matched, then these matched coordinates are used to calculate the distortion coefficients so as to correct the distorted images. Calibration grids or straight lines which are often used in the conventional method are not necessary. Experiments were carried out using images taken by Ricoh DC-1 digital camera.

This method was applied to compose one 360-degree panorama image for combining several images with calibration of each component keeping the consistency at the joining area. Also techniques for matching the intensity and color of adjacent images are developed.

Using the developed algorithm, 360-degree panorama images which are free of distortion were composed.

---

\* リコーシステム開発株式会社  
Ricoh System Kaihatsu Co., Ltd.

\*\* 研究開発本部 中央研究所  
Research and Development Center,  
Research and Development Group

\*\*\* 研究開発本部 情報通信研究所  
Information and Communication R&D Center,  
Research and Development Group

## 1. 背景と目的

近年、デジタルカメラやデジタルビデオカメラなどの撮影デバイスが普及している。しかし解像度の高い撮影センサは高価なため、解像度の低いカメラにより同じ対象物を複数の画像に分けて撮影し、後でこれを貼り合わせて一枚の高解像度画像を合成する方法が提案された[1][2]。このようなとき、その構成要素となる1枚の画像に幾何学的歪が存在すると、画像を組み合わせて利用することは極めて難しくなる。歪が存在すると画像を精度良くつなげなく、つなぎ目が生じてしまう。

レンズを用いて撮影した画像にさまざまな収差が含まれているが、歪曲収差と言われる幾何学的歪は、画像の中心付近と周辺部での画像の拡大倍率が異なるために起きるもので、撮影された画像をつなぎ合わせるときしばしば問題になる。この歪曲収差は三次元画像合成や、三次元計測などを行うときにも問題になる。歪曲収差はレンズの焦点距離や絞りの大きさなどにより決まり、ズームレンズ系では、ズームの位置によって変化する。

従来法ではテストチャートや画像上の直線の情報などを用いて、歪曲収差を測定し、画像の歪を補正する[4] - [8]。このような方法では歪を測定するために特殊な対象物が必要であり、特にズームレンズの場合、各ズーム位置での歪補正は困難である。

本論文では汎用性の高い歪補正法を提案する。本手法ではテストチャートや画像上の直線情報などを使わない、得られた任意のデジタル画像から歪を測定する。同一対象物体を異なる条件で、例えば、カメラを左右に振り、撮影した複数の画像を利用して、歪係数を測定し、歪を補正する。

1つの例として本手法を360度パノラマ画像合成に応用する。カメラを一周回転させながら撮影した複数枚の要素画像を共通の円筒面へ投影し、貼り合わせ、360度パノラマ画像を合成する。歪を補正しない場合、画像がうまくつなげなく、つなぎ目が生じてしまうが本手法を用いて、画像の歪を簡単に補正でき、画像を精度良く合成できる。

カメラを用いて撮影するとき、カメラが自動露出機構を持つため、同じ対象物が視野によって異なる画素値として記録される。このようなデータをつなぎ合わせる場合、位置合わせが成功しても各画像の境界で濃度変化が生じてしまい、きれいな画像が得られない。本研究では要素画像の輝度補正法についても検討を行う。歪及び輝度補正を行い、画質のよいパノラマ画像を合成する方法を開発した。

本論文では提案した歪補正法および360度パノラマ画像合成と輝度補正法について述べる。リコーのデジタルカメラDC-1により行った実験結果を紹介する。

## 2. デジタル画像の幾何学的歪の補正

### 2-1 レンズの歪曲収差と画像の歪

レンズにより結像するとき歪曲収差の影響により生じた画像の歪をFig.1に示す。被写体が光軸からYの距離にある物点が結像面上でy'の位置に結像し、それぞれが入射および射出瞳で光軸となす角を  $\theta$  と  $\theta'$  としたとき

$$\beta = \frac{\tan(\theta')}{\tan(\theta)} \quad (2.1)$$

を横倍率とよび、これが  $\beta$  の値によらず常に一定であれば、例えばピンホールカメラの場合、歪曲収差は生じない。歪曲収差がないときの結像高はY'である。

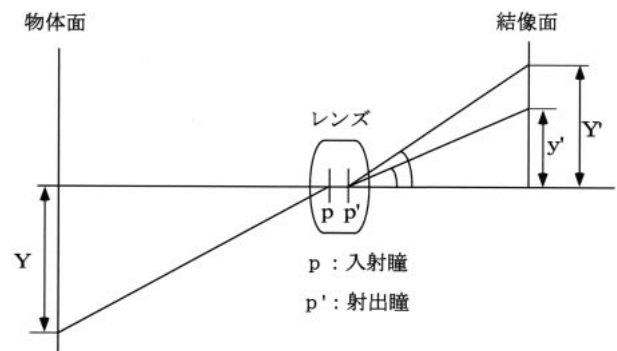


Fig.1 Imaging of lens with distortion

もし、画像の中央部に対して周辺部での横倍率が小さい場合、すなわち  $\beta$  の増加に対して  $\beta$  が減少する場合、Fig.2(c)に示すように正方状の図形が樽型に樽型歪曲が発生する。逆に中央部より周辺部の横倍率が大きい場合、Fig.2(b)に示すように糸巻型に糸巻型歪曲が発生する。実際にはレンズの構成上、光学系は樽型歪曲収差を持つことが多い。

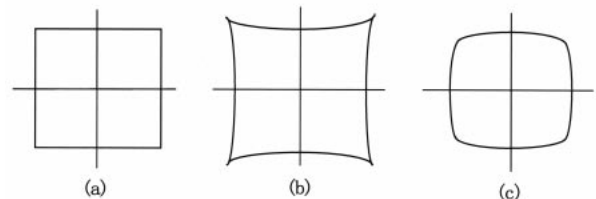


Fig.2 Imaging of a rectangular object screen shown with (a) no distortion, (b) pincushion, and (c) barrel distortion

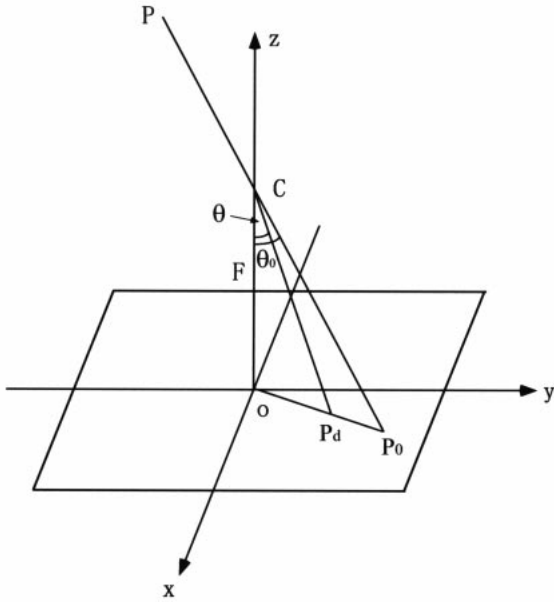


Fig.3 Pinhole camera model with lens distortion

レンズを用いて撮影するとき、さまざまな収差が生じるが、画像をつなぎ合わせるとき最も影響するのはやはり歪曲収差である。我々は歪曲収差により生じた幾何学的歪に着目し、この歪を補正する方法を提案する。

ここで、Fig.3に示すようにピンホールカメラモデルによるレンズの歪曲収差をモデル化する。Pは3次元空間での物点で、レンズにより結像面上に結像する。P<sub>d</sub>、P<sub>0</sub>はそれぞれ歪がある場合と歪のないときの結像であり、光軸となす角度は  $\theta$  と  $\theta_0$  である。ここでFはレンズの焦点距離を表しCはレンズの中心点を表す。本研究ではレンズが光軸に対称することを仮定する。レンズの歪曲収差も光軸に対称となる。理想的な結像点と歪んだ結像点がそれぞれ光軸となす角度の関係を次式に示す[3]。

$$\theta = \theta_0 f(\theta_0) \quad (2.2)$$

ここで、レンズの歪曲収差を次の多項式でモデル化する。

$$f(\theta_0) = 1 + A\theta_0^2 + B\theta_0^4 + C\theta_0^6 + \dots \quad (2.3)$$

A, B, Cは歪係数である。これらの係数を求められると、(2.2)式による画像の歪補正ができる。次に提案する歪補正法を説明する。

## 2-2 歪曲収差の補正

本手法では画像の歪を補正するため、見かけ上互にずれた二枚の画像の対応点を測定し対応点座標を用いて歪係数を計測する。そして画像の歪を補正する。任意の対象物を撮影するときカメラを回転させながらオーバーラップ領域がある二枚の画像を撮影する。カメラを回転させる前後撮影した画像とそれらによる補正した画像の概

念図をFig.4に示す。長方形の図形の頂点がレンズの歪曲収差によるFig.4.(a)にA, B, C, Dに結像しカメラを回転させた後A', B', C', D'に結像する。式(2.2)に示すように歪曲収差が非線形なので結像の形が変化する対応点(A, B, C, D)と(A', B', C', D')の座標を測定できると歪係数を測定できる。本手法ではFig.5に示すようなブロックマッチングにより画像の対応点座標を測定する。

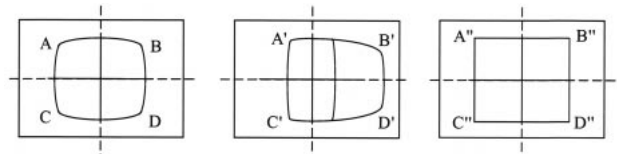


Fig.4 Measuring and correcting distortion with two overlapped images. (a) and (b) are distorted images obtained before and after panning the camera. (c) is corrected image of (a)

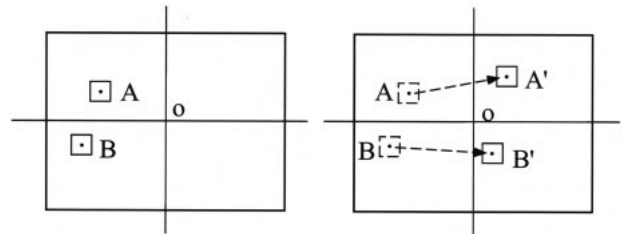


Fig.5 Finding corresponding points between two distorted images with block matching method

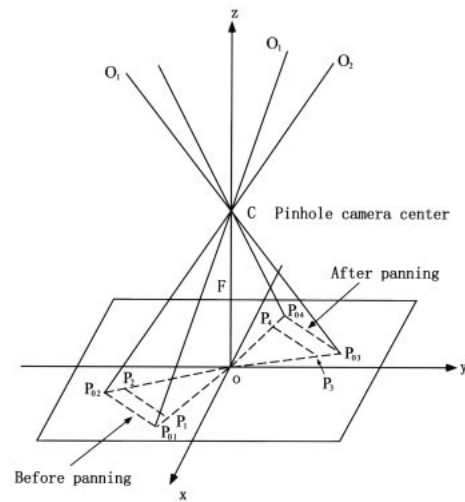


Fig.6 Imaging before and after panning the camera

### 2-2-1 画像対応点座標による歪係数の測定

対応する2枚の画像を撮影するときカメラを回転させる前後の結像関係をFig.6に示す。カメラを動かす前画像1での2つ結像点はP<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>とする。カメラを移動させた後画像2での結像点はP<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>とする。それぞれが歪のない結像がP<sub>01</sub>, P<sub>02</sub>, P<sub>03</sub>, P<sub>04</sub>とする。Cはピンホールカメラの中心であり、Fはレンズの焦点距離である。カメラを

中心Cに回転させるとき、レンズに歪のない場合、物体点 $O_1, O_2$ はカメラが回転前後の結像 $P_{01}, P_{02}$ と $P_{03}, P_{04}$ が中心Cになす角度は変化しない。すなわち次の式を満たす。

$$\angle P_{01}CP_{02} = \angle P_{03}CP_{04} \quad (2.4)$$

この式を拘束条件として使う。本研究では角度について5次までの歪しか考慮しない。このとき(2.2)式は展開されて、各対応点が光軸になす角度が次の式を満たす。

$$\theta_i = \theta_{0i} + A\theta_{0i}^3 + B\theta_{0i}^5 \quad (2.5)$$

Fig.6に示す4つの対応点の座標を用いて式(2.5)による4つの方程式を書ける。ここで角度 $\theta_i$ は次の式により求められる。

$$\sqrt{x_i^2 + y_i^2} = F \tan(\theta_i) \quad (2.6)$$

式(2.4)により次式も成り立つ、

$$\cos(\angle P_{01}CP_{02}) = \cos(\angle P_{03}CP_{04}) \quad (2.7)$$

式(2.7)を拘束条件として利用し、歪係数A, Bが求められる。式(2.7)により次の評価式が定義できる。

$$E = [\cos(\angle P_{01}CP_{02}) - \cos(\angle P_{03}CP_{04})]^2 \quad (2.8)$$

画像の座標  $P_i(x_i, y_i)$  を(2.8)式に代入すると

$$\cos(\angle P_{01}CP_{02}) = \frac{x_{01}x_{02} + y_{01}y_{02} + F^2}{\sqrt{(x_{01}^2 + y_{01}^2 + F^2)(x_{02}^2 + y_{02}^2 + F^2)}} \quad (2.9)$$

と

$$\cos(\angle P_{03}CP_{04}) = \frac{x_{03}x_{04} + y_{03}y_{04} + F^2}{\sqrt{(x_{03}^2 + y_{03}^2 + F^2)(x_{04}^2 + y_{04}^2 + F^2)}} \quad (2.10)$$

と表せる。

実際に歪係数を求めるとき、数値計算法を使って方程式を解く。Fig.6に示すように1枚の画像上の2つ点 $P_1, P_2$ とそのもう1枚の画像上のずれ後の対応点 $P_3, P_4$ の座標値は次の章で説明するブロックマッチング法によって測定でき、既知数である。それらの座標値を組み合わせて1つのデータ組として使う。4つの対応点 $P_1, P_2, P_3, P_4$ を式(2.5)に代入することより4つの方程式が書ける。評価式(2.8)のEを最小にすると次の手順で歪係数A, B

が求められる。

- (1)  $A = A_0$ と置く(初期値)
- (2) 二枚の画像の対応点座標から角度を計算する式(2.6)を用いて角度 $\theta_i$ を計算する。
- (3)(2.5)式に $\theta_i$ を代入し、ニュートン法による解 $\theta_{0i}$ を求める。ここで、 $B = 0$ と置く。
- (4)(2.8)式の評価関数Eを求め、if( $E < \text{Threshold}$ ) (8)へ  
しきい値(Threshold)は解の収束を判定するためのしきい値で、あらかじめ設定しておく。
- (5) Aの算出  
 $\Delta A$ を $\Delta E = \frac{\partial A}{\partial E} \Delta A$ の関係式から求める。 $\frac{\partial A}{\partial E}$ は式(2.5), (2.6), (2.8), (2.9), (2.10)を利用して、求められる。

- (6)  $A = A + \Delta A$
- (7) goto (4)
- (8) Aを出力
- (9) Aを定数、 $B = 0$ と置いて、上記(1)-(7)と同様に、別のデータ組を用いて、係数Bを決定する。

データの組が多い場合、まず各組を用いて、 $B = 0$ と置いてAを求めて平均し、そして、平均したAを定数として使う。それから、 $B = 0$ と置いて、平均Bを求める。

画像上二つの点とカメラ移動させた後の2つの対応点の座標値は1組のデータとして使う。N個の画像上の対応点から

$$M = \frac{N!}{(N-2)!2!} \quad (2.11)$$

のデータの組が作れる。データの組を選択したとき、2対応点間の距離をしきい値として使う。

以上の手順で歪み係数が求められる。データの数が大きい場合歪係数の平均によりノイズの影響を抑え、精度よく歪係数を求めることができる。

## 2-2-2 歪の補正

2-2-2章で求めた歪係数AとBを用いて歪補正を行う。歪補正を幾何学変換と考え、 $f(x_0, y_0)$ は歪のない画像とし、 $f(x, y)$ は歪がある画像とする。歪を補正するとき得られた歪んだ画像 $f(x, y)$ から歪のない画像に $(x_0, y_0)$ 点の輝度を求める。 $(x_0, y_0)$ から $(x, y)$ を次式によって計算する。

$$\theta = \theta_0(1 + A\theta_0^2 + B\theta_0^4) \quad (2.12)$$

ここで

$$\theta_0 = \arctan(\sqrt{x_0^2 + y_0^2} / F) \quad (2.13)$$

$$x = F \frac{x_0 \tan(\theta)}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (2.14)$$

と

$$y = F \frac{y_0 \tan(\theta)}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (2.15)$$

が成り立つ。Fはカメラレンズの焦点距離で、既知数である。(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)に対応する(x, y)が整数ではない場合、補間する必要がある。Fig.7に示すように(x, y)|ci < x < i + 1; j < y < j + 1の場合、まわりの4つの画素の値を用いて、線形補間し、f(x, y)を求める。このようにして歪が補正される。

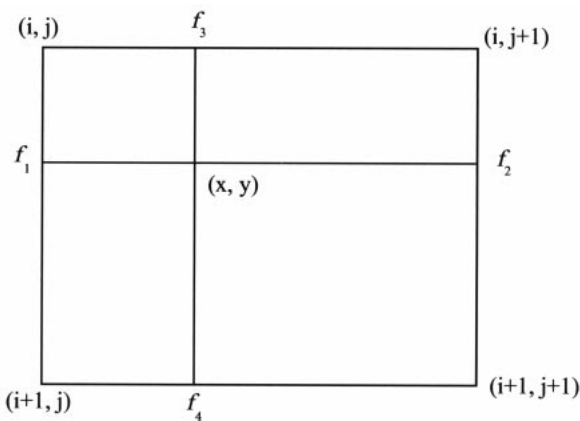


Fig.7 Bilinear interpolation

### 2-2-3 画像対応点座標の推定[9]

2-2-1章に説明したように歪係数を求めるため撮影した二枚の画像の対応点座標を測定する必要がある。まず画像上に模様強度しきい値を設定することによる対応点として使われるブロックを決める。次に画素単位の精度でマッチングしずれ量を測定する。そして画素単位以下の精度でずれ量を測定する。

まず画像の模様強度しきい値により、画像オーバーラップ領域内の対応点として使われるブロックを決める。模様強度を定義するため次の関数を利用する。

$$S_{ij} = \int \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial i \partial j} dx dy \quad i, j \in x, y \quad (2.16)$$

x, y微分はフレーム内上下左右の差分とする。積分はブロック内の和とする。(2.16)式を使って、

$$t = S_{xx} S_{yy} - S_{xy}^2 \quad (2.17)$$

の値を求める。この値は対応点のマッチングに有効な輝度模様の強さを示している。あるいは、画像のコントラ

ストを示している。設定したtのしきい値以上のブロックを対応点マッチングとして使う。式(2.17)は画像の対応点を選択する基準とする。対応点座標を測定するときFig.5に示すように画像をブロックに分割しマッチングする。

#### 2-2-3-1 画素単位でのずれ量の測定

基準画像と他方の一枚の画像を1画素ずつずらしながら重ね、各画素毎の差の絶対値の平均を計算し、その最小となる位置を求める。これにより対応点を画素単位での測定ができる。この計算は

$$E(u, v) = \frac{\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M |f(i, j) - g(i + u, j + v)|}{M \cdot N} \quad (2.18)$$

によって行い、Eは最小となるときの位置(u, v)を求める。ここでM・Nはブロックのサイズである。

#### 2-2-3-2 画素単位以下のずれ量の測定

画像の歪係数を精度良く測定するため、対応点の座標を画素以下の精度で測定必要がある。そこで画像の時空間微分を用いる方法を使用し、対応点の座標を求める[9]。

対象画像 f(x, y)が速度(u, v)で移動しているものとする。この対象を微小な時間間隔 tをおいて撮影した2枚の画像 f<sub>1</sub>(x, y), f<sub>2</sub>(x, y)は、

$$f_2(x, y) = f_1(x - u\Delta t, y - v\Delta t) \quad (2.19)$$

なる関係を満たす。f(x, y)を1次近似し、x, y, tでそれぞれ偏微分すると

$$u \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + v \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial t} \approx 0 \quad (2.20)$$

が成り立つ。この方程式を用いて、速度(u, v)を求められる。しかし、このままでは、1次近似からのずれや雑音などの影響による測定誤差が大きい。そこで、着目小さい領域では物体が均一の速度で動くことと仮定すると(2.20)式が成立していなければならない。(2.20)式の左辺の近傍領域内での2乗積分を評価関数とし、これを最小化すると速度(u, v)を

$$u = \frac{S_{yt} S_{xy} - S_{xt} S_{yy}}{S_{xx} S_{yy} - S_{xy}^2} \quad (2.21)$$

と

$$v = \frac{S_{xt} S_{xy} - S_{yt} S_{xx}}{S_{xx} S_{yy} - S_{xy}^2} \quad (2.22)$$

のように求まる。この式により対応点ずれ量を画素以下の精度で求められる。ここでS<sub>ij</sub>を式(2.16)で定義する。

画素単位で対応点を探るとき1画素ずつ探索すると大変時間がかかる．計算時間を短縮するため，ピラミッド処理法を使う．撮影画像による解像度の低い画像をつくる．例えば，4x4画素を平均し，1画素を作り階層的な画像を作る．対応点を探るとき，まず解像度の低い画像からマッチングし，測定したずれ量を利用して，次の層で捜査する．最後に実際撮影した画像でマッチングする．このように階層構造のピラミッド画像を利用すると，計算時間がかなり短縮できる．

ピラミッド画像を用いてマッチングするとき，解像度の低い層で測定するとき画像の平滑化処理が必要である．

### 2-3 歪補正実験

リコーのデジタルカメラDC-1を用いて，画像を撮影し，得られた画像の歪補正実験を行った．二枚の画像をカメラの回転によりずらして撮影する．2-2-3章に説明したようにまず画像間の対応点のずれ量を測定する．各画像のサイズは768x576画素である．対応点の測定速度を向上するため，4x4画素から1画素を作り3階層のピラミッド画像を作成した．まず解像度低い画像からマッチングし測定したずれ量の値を用いて，第2層の画像をマッチングする．そして最後に撮影した画像でずれ量を測定した．

対応点をマッチングするとき，まず画素単位で測定して，次に画素単位以下の精度でずれ量を測定する．対応点座標を測定した後，歪係数を計算する．得られた歪係数A,Bを用いて，画像の歪を補正した．

リコー製デジタルカメラDC-1により撮影した画像を用いて，実験を行った．補正前後の画像の一例をFig.8(a)(b)(c)に示す．画像Fig.8(a)(b)による画像の対応点をマッチングし，歪係数を計算した．それにより補正した画像をFig.8(c)に示す．

本手法により補正した画像の精度を評価するため，次の実験を行った．

#### 2-3-1 複数画像組による補正画像精度の評価

歪係数の真の値は不明なので多数の測定結果のバラツキを調べることで精度を評価した．

カメラの条件例えばレンズのズーム状態を固定し，カメラのレンズ中心を固定して同一対象物を異なる光軸方位角で撮影する．得られた複数の画像組を用いて，歪係数を測定し，歪係数の平均値と標準偏差値を計算した．異なる性質の画像は測定した歪係数の結果にどんな影響を及ぼすかを調べた．

カメラの焦点距離を7.1mm (1136画素) に設定し，30例の画像を撮影した．これを使って，歪係数A,Bの平均値と標準偏差を求めた．その結果をTable 1に示す．これらの歪係数の標準偏差は補正した画像上に反映すると画像周辺部での最大歪補正誤差は0.6画素である．こ

のときのオリジナルの画像周辺部の最大の歪は11画素であった．補正後の精度は1画素以下であることがわかった．



(a)



(b)



(c)

Fig.8 (a) and (b) are images obtained with digital camera DC-1 made by Ricoh, before and after panning the camera, respectively. (c) is the distortion compensated image of (a) with the proposed method.

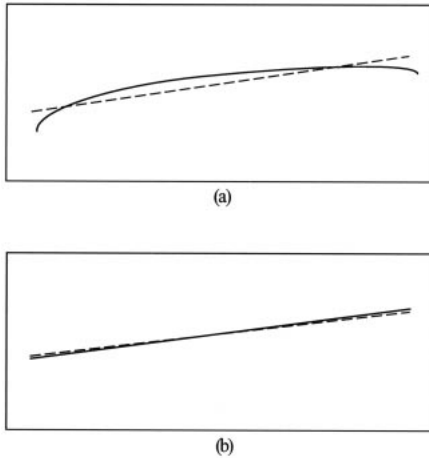


Fig.9 testing accuracy of the distortion correction method with straight lines on image (a) before correcting the distortion (b) after correcting the distortion

Table 1 Distortion coefficients

歪係数	平均値	標準偏差値
A	$-8.028 \times 10^{-5}$	$4.56 \times 10^{-6}$
B	$-5.013 \times 10^{-9}$	$1.71 \times 10^{-8}$

### 2-3-2 画像上の直線による評価

物体上に直線があるものを撮影し、直線情報を利用して、歪補正の精度を評価する。物体上にある直線はカメラレンズの歪曲収差により歪んだ場合Fig.9(a)に示すように曲線となる。ここで最小2乗法により近似した直線は点線で示し、曲線が直線からのずれ(標準偏差値)は歪の量と評価する。補正した画像Fig.9(b)中の直線の像を最小2乗近似直線からのずれ標準偏差値を計算し、歪補正の精度を調べた。まず、直線や稜線を含む画像を撮影した。次にエッジを抽出し細線化を行った。そして、補正前後直線の像が最小2乗法により近似した直線からのずれ(標準偏差値)を計算した。歪補正後直線の標準偏差値は1画素以下であり十分な精度が得られたことが分かった。

## 3. 360度パノラマ画像の合成

### 3-1 円筒面へ投影による貼り合わせ

Fig.10に示すようにカメラを360度一周回転させながら撮影した複数枚の画像をつなぎ合わせ360度パノラマ画像を合成する。画像を滑らかにつなぐため、各要素画

像を共通の円筒面へ投影し、円筒面に貼り合わせる。このように処理した要素画像を2-2-3章に説明した方法による隣り合う画像の位置ずれを測定し、位置を合わせ、一周分つなく。

このように作成した画像を用いて、仮想空間を作ることもできる[10]。仮想空間に画像をレンダリングするときは、円筒面の中心軸からの視線方向と垂直の平面へ逆投影すれば良い。

画像が精度良くつながるため各要素画像の歪補正が必要なので2章で説明した方法を用いて歪補正を行う。

カメラを用いて撮影するとき、カメラが自動露出機構を持つため、同じ対象物が視野によって異なる画素値として記録される。このようなデータをつなぎ合わせる場合、位置合わせが成功しても各画像の境界で濃度変化が生じてしまい、なめらかな画像が得られない。本研究では要素画像の輝度補正についても検討を行う。

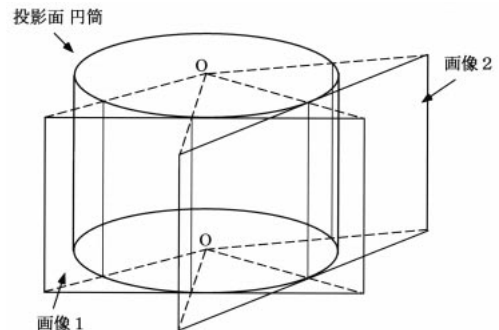


Fig.10 projecting images to a cylinder and composing a 360-degree panorama image

### 3-2 要素画像の歪補正

2章に説明したようにオーバーラップ領域がある二枚の画像を用いて歪係数を測定し、歪を補正する。360度パノラマ画像を合成する場合、各隣り合う要素画像がオーバーラップ領域があるので、撮影した複数の要素画像から隣り合う二枚の画像を選んで、歪係数を測定することができる。カメラを回転させながら撮影したとき、カメラの条件を固定し、二枚の画像から計算した歪係数を用いてすべての要素画像を補正する。

### 3-3 要素画像の輝度補正[11]

画像の濃度を補正するため、まず要素画像の中に一枚の要素画像を基準画像として指定する。それぞれ隣り合う二枚の画像について露光量の比を求めそして全体の画像を基準画像に対しての露光量比を求める。

隣り合う二枚の画像のオーバーラップ領域では同じ対象物がそれぞれを撮影したときの露光量で記録されるこの領域でのそれぞれの画素値を比較することで2回の撮影のときの露光量を推定することができる。二枚の画像データのオーバーラップ領域の各画素についてそれぞれの画素値を調べる。横軸が第1画像の画素値、縦軸が第

2画像の画素値をとり、点がそれぞれのRGB(カラー画像)の1プレーンの画素を示す図を作れる。この図では最小2乗近似した直線の傾斜率により第1画像データは第2画像データに対し同一の対象物を撮影した画像の輝度倍率を推定できる。同じようにすべての画像データの露光倍率を測定することができる。

使用したn枚のデータは360度円筒状に連続するものなので最後の画像の次は第1画像となる要素画像の露光倍率をすべて掛け合わせると1になるはずであるが、実際は推定誤差のため1にはならない。そこで誤差を各推定値に均等に分散させる。求めた各画像データの画素値を求めた露光量で割って統一したスケールでの記述が可能となる。

しかし、この統一スケールで記述したデータは一般に要素画像のビット数に収められるとは限らない。要素画像のビット数以下に正規化した画像を収めるため次のように工夫した。

まず合成画像のヒストグラムの平坦化による合成画像を要素画像のビット数に収める各要素画像の画素値の大小関係を保存しながら要素画像のビット数の範囲に収まるようテーブル変換行う。

360度パノラマ画像を一部分を切り出して見るとき例えばパソコンの画面上で表示するとき統一スケールデータを適当な範囲で切り出しその範囲内での画素値の平均が適当な範囲に収まるように画素値の倍率を決める。

#### 3-4 デジタルカメラによる実験

リコー製デジタルカメラDC-1を用いて360度パノラマ画像合成実験を行った。三脚を用いて、カメラを20度ずつ一周回転させながら、18枚の画像を撮影した。隣り合う要素画像は1/3程度のオーバーラップさせた。

画像合成するため、まず提案した歪補正法を用いて、各要素画像の歪を補正する。要素画像から隣り合う2枚の画像を選んで、この二つの画像によるカメラレンズの歪係数を測定する。

歪補正した要素画像を円筒面へ投影する。2-2-3章で説明した方法を用いて、画像の位置合せをする。画像の位置を決めた後に、各隣り合う要素画像のオーバーラップ領域を利用して要素画像間の輝度補正を行い、パノラマ画像データを作成した。つなぎ目のないなめらかな画像が得られた。

## 4. 結論と今後の展開

同じ対象物を複数の画像に分けて撮影し、貼り合わせにより1枚の画像に合成や3次元画像の合成などを行うときレンズの歪曲収差により生じた画像の歪はしばしば問題になる。ここでテストチャートや画像上の直線情報などは使わない、撮影した任意の濃淡画像から歪を測定す

る汎用性高い歪補正法を提案した。

カメラの回転による撮影した2枚の画像間の対応点座標を測定し、歪係数を求め歪を補正する。デジタルカメラにより撮影した画像を用いて、歪補正の実験を行い、本手法の有効性を確認した。歪の補正精度も調べた。

360度パノラマ画像の合成法について検討を行い、提案した歪補正法を応用した。画像を合成する際に画像の輝度差の問題が生じたが、我々は360度パノラマ画像の合成における輝度補正法を考案した。画質の良いパノラマ画像を合成する方法を開発した。リコーのデジタルカメラDC-1を用いて実験を行った。画像の歪と濃度を補正した後合成したパノラマ画像はつなぎ目がなくなり濃度のムラが解消しよい画像が得られた。

計算速度の向上や三次元計測などへの応用は今後の課題となる。

#### 参考文献

- 1) Pankaj Dani and Subhases Chaudhuri, "Automated assembling of images: image montage preparation", Pattern Recognition, Vol. 28, No. 3, pp. 432-445, 1995
- 2) Richard Szeliski, "Video mosaics for virtual environments", IEEE computer graphics and application, Vol. 16, No.2, 1996, pp. 22-30
- 3) 久保田 広, 光学技術ハンドブック, 朝倉書店, 1975
- 4) 関 靖夫, カメラの歪曲収差校正方法, 公開特許公報(A), 平3-242526, p165
- 5) B. Prescott and G.G.McLean, "Line-Based Correction of Radial Lens Distortion", Graphical Models and Image Processing, Vol. 59, No.2, January, pp. 39-47, 1997
- 6) Warren E. Smith, "Correction of distortion in endoscope images", IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 11, No. 1, March 1992, pp. 117 - 12
- 7) R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", IEEE Journal of Robotics and Automat., Vol. RA-3, No.4 pp. 323 - 344, Aug. 1987
- 8) Shishir Shah and J.K. Aggarwal, "Intrinsic parameter calibration for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation", Pattern Recognition, Vol. 29, No. 11, pp. 1775-1788, 1996
- 9) 安藤 繁, 画像時空間微分算法を用いた速度ベクトル分布計測システム, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 12, pp. 1330 - 1336, 1986
- 10) Shenchang Eric Chen, "QuickTime VR - an image-based approach to virtual environment navigation", Proc. SIGGRAPH'95, Los Angeles, California, August 6 - 11, 1995, pp. 29 - 38
- 11) 青木 伸画像データ貼り合わせのための濃度補正リコー技術メモ DRB07-01, 1996年4月16日