UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

BEFORE THE PATENT TRIAL AND APPEAL BOARD

CANON, INC.

Petitioner

v.

OPTIMUM IMAGING TECHNOLOGY, LLC

Patent No. 7,612,805

Issue Date: Nov. 3, 2009

Title: Digital Imaging System and Methods for Selective Image Filtration

---

DECLARATION OF KIYOTO NAGAI

1. My name is Kiyoto Nagai.

2. I belong to the Business Strategy Planning Section of Business Strategy Planning Department of Business Strategy & Planning Center of Digital Business Group of Ricoh Company, Ltd. ("Ricoh"), and my current title is Senior Specialist.

3. I joined Ricoh in March 1995.

4. My name appeared in the editorial postscript page of "Ricoh Technical Report No. 31" dated December 1, 2005 as a "Secretariat" "in charge of Web [version]" of that document.

5. I was engaged in publishing the web version of Ricoh Technical Report published on Ricoh's website from 1997 to 2008.

6. After December 1, 2005 when the book version of Ricoh Technical Report No. 31 was published, I prepared the web version of Ricoh Technical Report No. 31 and uploaded it to a server for preparation for publication in Ricoh's website.

7. The web version of Ricoh Technical Report No. 31 I prepared was published in Ricoh's website prior to July 11, 2006.

8. Ricoh Technical Report No. 31 was originally posted at the following URL of Ricoh: http://www.ricoh.co.jp/about/business_overview/report/31/ ("Original URL"), which can be viewed now at the following URL: https://jp.ricoh.com/technology/techreport/31/ ("Current URL").

9. At the Original URL as well as the Current URL, the technical papers from the overall Technical Report were available through individual links.

10. As can be seen from the Original URL as well as the Current URL, one such Technical Paper in Ricoh Technical Report No. 31 was titled "Digital Image Correcting Method for Digital Camera," written by Haike GUAN, Kenji SHIRAISHI, Kazumitsu WATANABE, Hiroki FUKUOKA and Kazuyasu OHASHI.

11. Attached to this declaration is a copy of the web version of Technical Paper "Digital Image Correcting Method for Digital Camera," I prepared for publication in Ricoh's website in 2005.

12. I declare under penalty of perjury that the foregoing is true and correct.

Date: July 15, 2020

永井清登

Kiyoto Nagai

デジタルカメラにおける画像補正技術

Digital Image Correcting Method for Digital Camera

関　海克*　白石　賢二**　渡辺　一光**　福岡　宏樹**　大橋　和泰***

Haike GUAN　Kenji SHIRAISHI　Kazumitsu WATANABE　Hiroki FUKUOKA　Kazuyasu OHASHI

要　　旨

リコーでは「撮影領域の拡大」をキーワードにデジタルカメラの開発を行っており，その手段のひとつとして，広角からのズームレンズの採用が挙げられる．しかし，広角化に伴って歪曲収差，色収差や周辺光量の低下などが発生しやすくなり，光学設計上の工夫だけでこれらの収差を小さく抑えたり，豊富な周辺光量を確保することは，レンズの小型化に対する障害となる．そこで，我々は，画像の歪曲や周辺減光等を，画像処理を用いて補正する技術を開発した．本手法により，デジタルカメラで撮影した画像を，ソフトウェア処理でより高画質化することが可能となる．高速化の工夫により，特殊なハードウェアを用いることなく，カメラ内のソフトウェアのみでこれら各種劣化を補正する．実際にデジタルカメラで撮影した画像を用いて画像補正実験を行い，補正画像の画質とカメラ内部での処理時間を評価し，その有効性を確認した．

ABSTRACT

Wide-angle zoom lens is applied to make wide field of view of a digital camera. But the zoom lens tends to have much more aberration, such as distortion and chromatic aberration, than standard lens. Intensity also falls more sharply from center to the edge of an image taken by the wide-angle lens camera. The aberrations can be well corrected by optical methods, but it is very difficult to keep the camera compact and small at same time.

We propose a new method to correct the aberrations and intensity of a small compact digital camera with a wide-angle zoom lens. In this method, correction is made by image processing software embedded in the digital camera. Experiments were made by using images of the cameras with wide-angle lens to show effectiveness of the method. Correcting results of the images and processing time of the camera are also described.

*　ソフトウェア研究開発本部　ドキュメント研究所
Document Lab, Software R&D Group

**　パーソナルマルチメディアカンパニー，ICS事業部
ICS Division, Personal Multimedia Products Company

***　画像エンジン開発本部　モジュール開発センター
Module Development Center,Imaging Engine Develoment Division

1. はじめに

近年，デジタルカメラの市場は急速に拡大し，それに伴って，多画素化，小型化，液晶の大画面化，ズームの高倍率化などが進んでいる．従来，コンパクトタイプのデジタルカメラでは，広角領域からスタートするズームレンズの搭載が困難とされてきたが，リコーのデジタルカメラCaplioシリーズは，広角端焦点距離28mm相当のズームレンズの搭載を，高度な光学設計技術と機構設計技術を駆使して実現している．

Caplioシリーズに搭載しているズームレンズは，小型でありながら高画質対応を達成しているが，わずかに残存する歪曲収差，倍率色収差，周辺光量低下の影響を低減できれば，画質はさらに改善する．

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結像倍率が異なるために起きるものである[1]．レンズに歪曲収差が残存していると撮影された画像の歪曲となって表れ，例えば直線が曲線に，円形が歪んだ楕円となるような現象が発生する．また複数枚の画像を貼り合わせ，パノラマ画像を合成する場合，つなぎ目で画像が不連続になってしまう問題が発生する[2]．

倍率色収差は光の波長によってレンズの結像倍率が異なるために起きるものであり，この収差が残存していると画像周辺部での色ずれ現象（画像のエッジ部への着色）として現れる．特に明暗差の激しい被写体を撮影する場合に，この現象は目立つ．

周辺光量低下は輝度が一様な物体を結像しても像の中心から離れるに従って照度が低下する現象であり，撮影した画像には周辺減光（周辺部の陰り）となって現れる[3]．

もちろん，カメラで撮影した画像には，歪曲，色ずれ，周辺減光のないことが望ましい．

従来法では光学設計上の工夫により，歪曲収差と倍率色収差を十分なレベルに低減している．しかし特にズームレンズの場合，広角端から望遠端まで，すべての焦点距離において収差を完全になくすことは極めて困難である．周辺光量低下に関しては，理論上，光学設計の工夫だけでは完全な補正が不可能である[3]．

これに対し、デジタル画像処理により歪曲を補正する方法が提案されている．テストチャートなどの校正用対象物を撮影し，歪曲の係数を求め，画像を補正する方法である[5)~8)]．しかし，歪曲収差はズームポジション（使用した焦点距離）と撮影距離に依存する．撮影条件を固定できれば，計測した歪曲係数で補正すれば良いが，通常撮影の場合，撮影条件は変化するので，すべての撮影条件に関して予め係数を測定しておくのは多大な労力が必要である．周辺光量低下はズームポジションと撮影距離に依存し，また，レンズの絞り値（使用したFナンバ）にも関係する．

市販の画像処理ソフトウェアにも歪曲補正の機能が付属している場合がある．しかし，この方式はスクロールバーにより歪曲収差のパラメータを調整しながら画像を補正し，補正した画像を目視で確認する。そして，パラメータを決定し，その歪曲係数を用いて画像を補正する．この手法ではパラメータの入力には人手が必要なうえ，画像全体を1つのパラメータで近似しているため，十分な精度が得られない．異なる方向で撮影した2枚の画像を用いて歪曲収差を自動補正する方法が提案されたが[2]，1枚の画像を補正するのに2枚の画像が必要となる欠点がある．

前述したように撮影した画像に対して画像補正を行うにはユーザに負担がかかり，かつ画像データに撮影時のカメラ情報が十分に記録されていないので，十分な精度で補正するのは困難である．

本論文ではデジタル画像処理により歪曲，周辺減光，色ずれを補正する方法を提案する．本手法は，補正に必要な撮影条件を付属情報として利用，精度良く補正することを可能とした．本論文はまず画像補正の原理について説明する．次にデジタルカメラで撮影した画像への適用実験結果を紹介し，補正精度の評価結果を述べる．最後に，本技術をデジタルカメラの本体へ搭載した結果について説明する．

2. 技術

2-1 歪曲補正

2-1-1 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.2に示す．Fig.1に示すように物体面上で光軸からyの距離にある点が結像面上でy'の位置に結像し，それ

ぞれが前側および後側主点で光軸となす角をθ_0およびθ，物体面から前側主点までの距離をa，後ろ側主点から結像面までの距離をbとするとき，

$$\beta = \frac{b\tan(\theta)}{a\tan(\theta_0)} = \frac{y'}{y} \qquad (1)$$

を横倍率（ここでは近軸的な横倍率のことではない）とよび，これがθ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，$\theta = \theta_0$であり，歪曲収差は存在しない．もし，画像の中央部より周辺部での横倍率が小さい場合，すなわちθ_0の増加に対してβが減少する場合，Fig.2(c)に示すような樽型の歪曲が発生する．逆に中央部より周辺部の横倍率が大きい場合，Fig.2(b)に示すような糸巻型の歪曲が発生する．デジタルカメラ用のズームレンズでは，その構成上，広角端で樽型の歪曲収差を持つことが多い．樽型の歪曲収差と糸巻型の歪曲収差が混在する，いわゆる陣笠タイプの歪曲収差もある。

歪曲収差は次のように定義する．Fig.3に示すように長方形のものを結像するとき，理想的な結像位置をAとし，歪曲収差が生じたときの結像位置をBとする．AOの長さを理想像高y'0とする．BOは実像高であり，y'とする．歪曲収差は式(2)で定量的に表せる．ここで，歪曲収差Dは光学ディストーションとも呼ばれる．

$$D = \frac{y' - y'_0}{y'_0} \times 100\% \qquad (2)$$

カメラ用のズームレンズにおいては，歪曲収差はズームポジション，撮影距離に依存する[1)]．

また，TVディストーションDtは式(3)で定義する．

$$Dt = \frac{dH}{2H} \times 100\% \qquad (3)$$

$$D \approx 3 \times Dt \qquad (4)$$

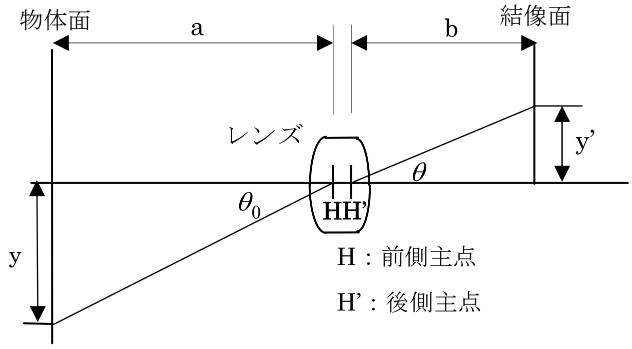

Fig.1　Imaging of lens with distortion.

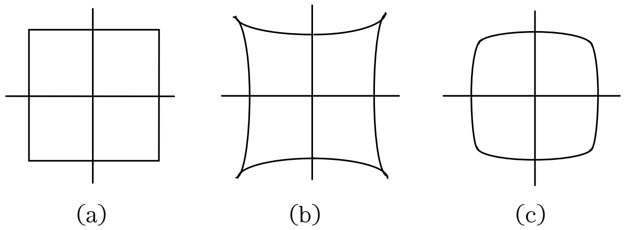

Fig.2　Imaging of a rectangular object screen shown with (a) no distortion, (b) pincushion, and (c) barrel distortion.

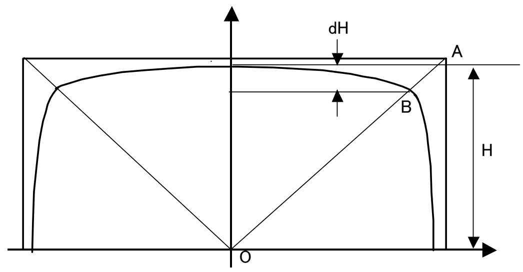

Fig.3　Definition of distortion.

ここで，dHは横長長方形の長辺の曲がり量，2Hは画像の高さである．一般的な場合，歪曲収差は像高の2乗に比例し，光学ディストーションDはTVディストーションDtの約3倍である．

2-1-2　歪曲の補正

提案する方法について説明する．Fig.3に示すように画像中心Oから最大像高AOの高さを1とする．最大像高より低い像高はh（h ＜ 1）とする．光学シミュレーションツールを用いて，レンズのズームポジション，撮影距離の条件ごとに歪曲収差を式(2)の定義で計算する．Fig.4はある条件における歪曲収差の概念図であり，この場合，収差は負の値となって

いるので，樽型の歪曲となる．

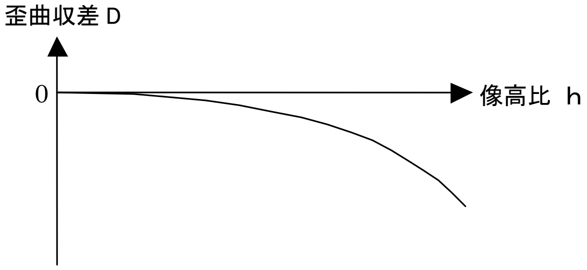

Fig.4　Distortion of digital camera lens.

ここで，歪曲収差は，ズームポジション，撮影距離，像高の離散的な値に対してしか計算できない．Fig.4の場合，計算した像高は数少ない離散的な点だけであるが，例えば500万画素のイメージャで撮影した画像の場合，画素ごとの像高数は，光学シミュレーションツールを用いて計算した像高数より遥かに多い．しかし，画素ごとに歪曲収差データを計算すると膨大な量になる．そこで，不連続性を解消するためにデータとデータの間を補間する必要がある．ここで，レンズの光線追跡で求めたデータを用いてn次多項式で近似し，画素ごとに歪曲係数を求める．

$$D = A0 + A1 \times Y^1 + A2 \times Y^2 + \ldots + An \times Y^n \qquad (5)$$

式(5)に示すように歪曲収差DをA0,...,Anの多項式係数（歪曲収差係数）で表す．像高比($Y_1, Y_2, Y_3, \ldots, Y_m$)での歪曲収差のシミュレーション計算値($D_1, D_2, D_3, \ldots, D_m$)を既知として，最小二乗近似法で，歪曲収差係数($A_0, A_1, A_2, \ldots, A_n$)を求める．これらの歪曲収差係数を用いて，収差のない正しい画素位置（x0,y0）から補正前の画素位置（x,y）を式(6)(7)で求める．

$$x = x_0(1 + A0 + A1 \times Y^1 + A2 \times Y^2 + \ldots + An \times Y^n) \qquad (6)$$

$$y = y_0(1 + A0 + A1 \times Y^1 + A2 \times Y^2 + \ldots + An \times Y^n) \qquad (7)$$

しかし，Fig.5に示すように歪曲補正前の画像位置は小数になる場合があるので，四捨五入最近傍の画素を使うと補正後の画像の不連続が発生してしまう．それを防ぐため，線形補間処理を行う．式(8)を用いて，補正前の画像座標（x,y）での輝度値を近傍の4画素を用いて計算する．これにより画像が滑らかに補正される．

$$\begin{aligned} f(x,y) = {} & (f(i,j)*(1-dx) + f(i+1,j)*dx)*(1-dy) \\ & + (f(i,j+1)*(1-dx) + f(i+1,j+1)*dx)dy \end{aligned} \qquad (8)$$

本手法は特に歪曲収差のタイプに依存するものではないので、樽型の歪曲に限らず，糸巻型の歪曲や，陣笠タイプの歪曲にも，もちろん対応可能である．

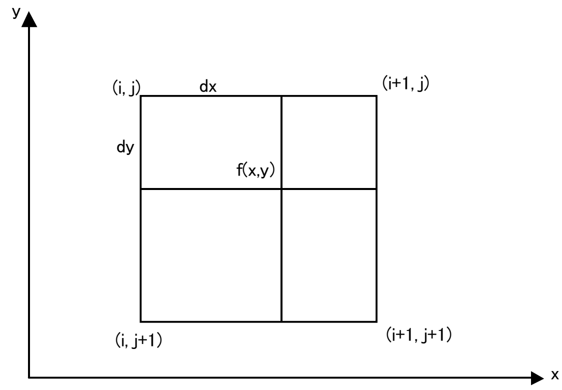

Fig.5　Linear interpolation.

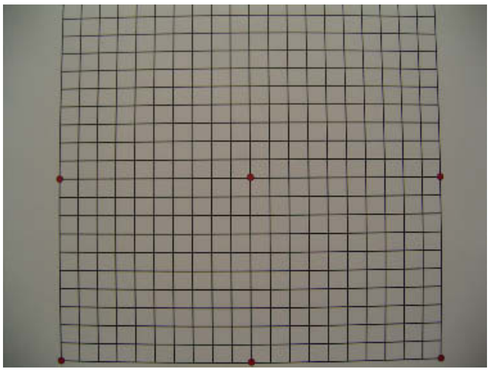

Fig.6　Image with distortion.

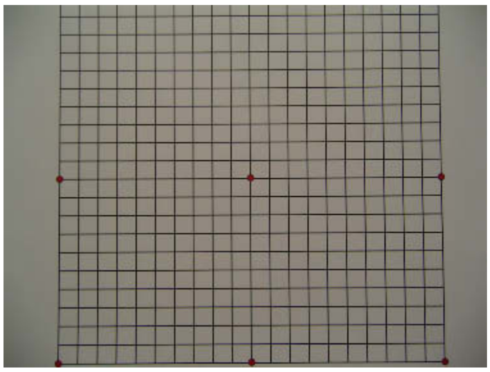

Fig.7　Corrected Image.

2-1-3　歪曲補正の実験結果とカメラ本体搭載

実験用試作デジタルカメラを用いて，画像データを収集し，データ解析及び歪曲収差補正実験を行った．撮影距離300mm，1000mm，2500mm，4000mm，5000mm以上の各条件に対し，ズームポジションを変化させながら画像を撮影した．画像サイズは2048×1536ピクセル（324万画素）である．直線を含む画像を計250枚撮影した．

光学シミュレーションで求めた歪曲収差の設計値を用いて，ズームポジションと撮影距離のデータから250枚すべての画像データの歪曲補正実験をPC上で行った．撮影距離300mmの補正例をFig.6，Fig.7に示す．

本手法の補正精度について実験を行った．テストチャートや撮影画像にある建物の直線を利用して，補正結果を評価した．式(3)を用いて，TVディストーション Dtを測定することにより歪曲の補正精度評価を行った．補正された画像にある直線に画像処理ツールで直線を引いて，補正された直線と引いた直線の最大距離dHを測る．歪曲補正画像135枚すべての画像の中では，最大距離が3ピクセルであった．式(3)によりDtは約0.1%である．

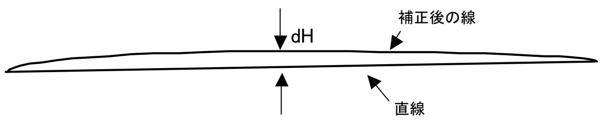

Fig.8　Evaluation of accuracy of distortion correction.

本アルゴリズムをカメラ本体に搭載し，実験を行った．ファームウェアに補正プログラムを実装した．カメラ本体で高速化処理するため以下の工夫を行った．

(1)YCrCb4:1:1のデータ利用することで計算量を削減する．

(2)画像の対称性を利用して，共通部分の座標計算を削減する．

(3)画像中心部の歪曲が少ない部分を補正せず，周辺部のみ補正することで，演算量を削減する．

画像サイズ2048×1560ピクセルの場合の補正処理時間をTable 1に示す．全画素に対して補正した場合は29.5秒かかるが、上述した周辺部のみ補正する工夫によって高速化が図られる。例えば、補正領域を画像中心から対角線50%の長さを半径とする円の外の部分しか処理しない場合の処理時間は約15秒である．

Table 1　Processing time of distortion correction.

補正領域	処理時間（秒）
100%	29.5
50%	15.1
40%	9.4
30%	4.5

2-2　周辺減光補正

2-2-1　周辺光量について

レンズの光軸に垂直な均一輝度の平面を撮影しても，光軸に対する入射光の角度θが大きくなると，撮像面上の光量が低下する現象が知られている．この照度低下はレンズと撮像面で構成される結像モデルの画像生成過程から幾何学的に導くことができ，レンズの入射瞳半径をl，入射光線がレンズの光軸となす角度をθ，レンズから撮像面までの距離をz，物体表面の放射輝度をLとすると，撮像面上の照度Eは以下のように表される．zはレンズの焦点距離と物体からレンズまでの距離によって決まる．[3)]

$$E = \frac{L\pi l^2 \cos^4\theta}{z^2} \tag{9}$$

式(9)は，輝度Lが均一の平面を結像した場合には，像の周辺部に行くにしたがって$\cos^4\theta$の率で照度が低下することを表している．これはコサイン4乗則と言われる．θが大きくなるに従って急激に値が低下する関数であることから，画角の大きい広角レンズでは画像周辺部で大きな照度低下を生じることになる．周辺光量の低下はレンズのズームポジション，撮影距離および絞り値に依存する．

2-2-2　周辺減光補正

提案する周辺減光補正方法について説明する．歪曲補正と同じように，光学シミュレーションツールを用いて像高毎に周辺光量の値を求める．ここで周辺光量比Pを式(10)に定義する．

$$P = \frac{E_p}{E_c} \tag{10}$$

E_p は周辺部の照度で，E_c は画像中心部の照度である．

Fig.9はレンズの周辺光量低下の概念図である．ここで，周辺光量比は，ズームポジション，撮影距離，絞り値および像高の離散的な値に対してしか計算できない．Fig.9の場合，計算した像高は数少ない離散的な点だけであるが，例えば500万画素のイメージャで撮影した画像の場合，画素ごとの像高数は，光学シミュレーションツールを用いて計算した像高数より遥かに多い．レンズの周辺光量データをそのまま使うと画像の不連続が生じてしまい，擬似輪郭が発生する．しかし，画素ごとに周辺光量データを計算すると膨大な量になる．そこで，不連続性を解消するためデータとデータの間を補間する必要がある．ここで，レンズの光線追跡したデータを用いてn次多項式で近似し，画素ごとに周辺光量係数を求める．

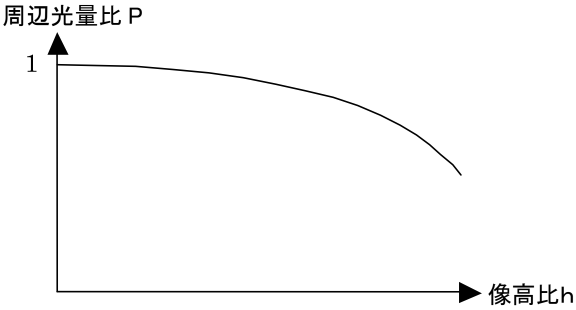

Fig.9　Image intensity of digital camera lens.

$$P = B0 + B1 \times Y^1 + B2 \times Y^2 + \ldots + Bn \times Y^n \qquad (11)$$

式(11)に示すように周辺光量比データ P を多項式係数B0,...,Bnで表す．像高 $(Y_1, Y_2, Y_3, \ldots, Y_m)$ での光線追跡計算値 $(P_1, P_2, P_3, \ldots, P_m)$ を既知として，最小二乗近似法で，周辺光量係数 $(B_0, B_1, B_2, \ldots, B_n)$ を求める．これらの周辺光量係数を用いて，画素位置（x0,y0）での周辺光量比を算出し，画素を補正する．

$$I_0 = \frac{I_p}{P} \qquad (12)$$

周辺減光補正は式(12)で表される．I_p は周辺部の画素値である．P は式(10)で定義している周辺光量比である．I_0 は補正後の画素値である．

光学シミュレーションで求めた周辺光量比データは照度の比率を表しており，画素値の比率に変換する必要がある．そのため，CCDガンマデータを利用して，式(10)の周辺光量比をあらかじめ補正しておく．もしくは，式(10)で求めた補正後の画素値に，直接ガンマ補正を加える．

2-2-3　周辺減光補正の実験結果とカメラ本体搭載

実験用試作デジタルカメラを用いて，画像データを収集し，周辺減光補正実験を行った．撮影距離300mm，1000mm，2500mm，4000mm，5000mm以上の各条件に対し，ズームポジションを変化させながら画像を撮影した．画像サイズは2048×1536ピクセル（324万画素）である．計250枚の画像を撮影した．

光学シミュレーションで求めた周辺光量比の設計値を用いて，ズームポジションと撮影距離のデータから250枚すべての画像データの周辺減光補正実験をPC上で行った．補正した画像を目視で有効性を確認した．撮影距離300mm場合の補正例をFig.10，Fig.11に示す．

本周辺減光補正アルゴリズムをカメラ本体にも搭載し，実験を行った．カメラファームウェアに補正プログラムを実装するにあたり、カメラ本体で高速化処理するため以下の工夫を行った．

(1)YCrCb4:1:1のデータ利用することで計算量を削減する

(2)画像の対称性を利用して，共通部分の座標計算を削減する

(3)画像中心部の減光が少ない部分を補正せず，周辺部のみ補正することで，演算量を削減する

画像サイズ2048×1560ピクセルの場合の補正処理時間をTable 2に示す．画像中心から対角線70%の長さを半径とする円の外の部分しか処理しない場合でも，周辺減光は7.5%と非常に小さくなる．特に最周辺部分での光量の急激な落ち込みを補正するには十分な効果が望める．この場合の処理速度は1.8秒と実用レベルである．

Table 2　Processing time of shading correction.

補正領域	処理時間（秒）
100%	7.0
50%	4.1
40%	3.0
30%	1.8

Fig.10 Image without shading correction.

Fig.11 Image after shading correction.

2-3 色ずれ補正

2-3-1 倍率色収差について

倍率色収差は光の波長によってレンズの結像倍率が異なるために発生する収差である．Fig.1に示した高さyの点が y'_R，y'_G，y'_B の3つの点に結像される．ここで，RGB画像のG信号を基準とし，RおよびBの実像高をGの実像高で正規化した式(13)，(14)で表す．

$$M_R = \frac{y'_R - y'_G}{y'_G} \times 100\% \tag{13}$$

$$M_B = \frac{y'_B - y'_G}{y'_G} \times 100\% \tag{14}$$

倍率色収差 M_R，M_B は式(2)の歪曲収差Dと同じ形式となる．よって，歪曲補正の処理をそのまま利用できる．倍率色収差データは歪曲収差と同じく，ズームポジション，撮影距離に依存する．

光学シミュレーションツールを用いて，式(13)，(14)の倍率色収差データを計算した．多項式近似で，M_R，M_B のデータを補間し，画素ごとのデータを計算した．R信号とB信号の画像を補正して，G信号の位置に合わせる．実際にデジタルカメラで撮影した画像で実験を行った．Fig.12，Fig.13に示すように，色ずれ補正の効果を確認できた．

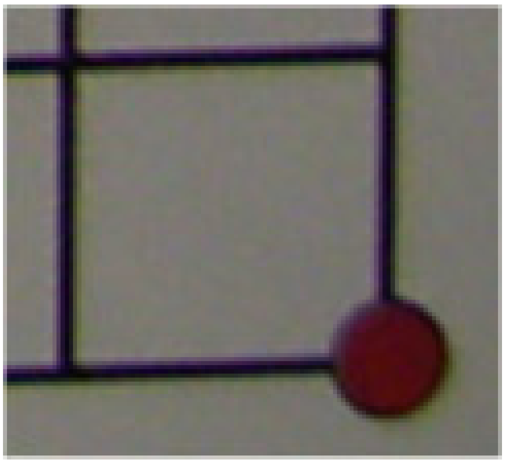

Fig.12 Chromatic difference of magnification.

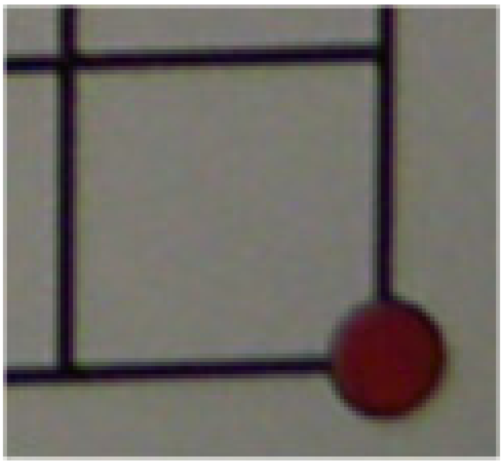

Fig.13 Correction of chromatic difference of magnification.

まとめ

本論文は画像処理による，歪曲補正，周辺減光補正，色ずれ補正の方法を提案した．本手法では光学シミュレーションツールを用いて計算した歪曲収差，倍率色収差および周辺光量データを保存しておいて，撮影時のレンズのズームポジション，撮影距離，絞り値からそれぞれに対応するデータを引き出して画像補正を行う．カメラの内部で処理するので，ユーザは意識することなく，歪曲，色ずれのない，均一な画

像が得られる．カメラ本体でなく，Exif形式の画像ファイルにズームポジション，撮影距離，絞り値を記録しておけば，歪曲収差，倍率色収差，周辺光量比のデータからPC上のソフトウェア処理でも画像を補正することができる．

今後の展開

現状はすべてソフトウェア処理であるため，処理時間が数秒かかり，リアルタイム処理ではない．今後カメラにハードウェアとして組み込み，更なる高速化を行えば，撮影間隔を短くすることができ，シャッターチャンスをのがすことがなくなる．

本論文は歪曲，周辺減光，色ずれについて検討したが，他の画像劣化についても，画像処理により補正可能なものがある．またカメラ光学系と画像処理を別々に設計，最適化するのではなく，統合的に光学系と画像処理系を最適設計すれば，従来にないまったく新しい光学系システムを生み出すことも可能であると思われる．

参考文献

1) 久保田　広，光学技術ハンドブック，朝倉書店，1975

2) 関　海克，青木　伸，江尻　公一：“画像処理による歪曲収差補正とパノラマ画像”リコーテクニカルレポート，No.23，1997，pp45-52

3) 天野　晃　他：“ズームレンズの光学的ひずみの解析と補正”，電子情報通信学会論文誌，D-II　Vol.J80-D-II　No.6,pp.1458-1465, 1997年6月

4) 野間孝幸　他：“カメラキャリブレーションソフトの開発とズームレンズ対応について”第9回画像センシングシンポジウム講演論文集，pp.35-40,2003

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