

I, Harumi Morota, hereby declare:

That I possess advanced knowledge of the Japanese and English languages. The attached Japanese into English translation has been translated by me and to the best of my knowledge and belief, it is a true and accurate translation of the document Guan et al., "Digital Image Correcting Method for Digital Camera," Ricoh Technical Report, No. 31, pp. 103-10, December 2005.

I declare that all statements made above of my own knowledge are true and that all statements made on information and belief are believed to be true. I have been warned and understand that willful false statements and the like are punishable by fine or imprisonment, or both, under § 1001 of Title 18 of the United States Code.

I declare (or certify, verify, or state) under penalty of perjury that the foregoing is true and correct.

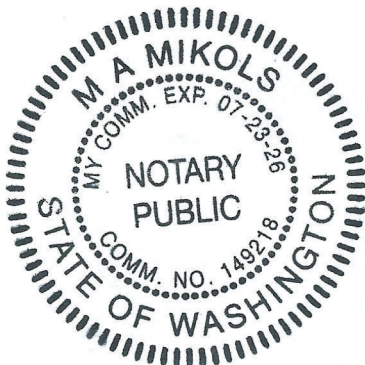
Executed on February 15, 2024 in Camas, Washington.

Harumi Morota

Harumi Morota

Notary Public

Notary Commission Expiry _____



WASHINGTON SHORT-FORM INDIVIDUAL ACKNOWLEDGEMENT
(RCW 41.44.100)

State of Washington
County of Clark

I certify that I know or have satisfactory evidence that

Harumi Morota

Name of Signer

Is the person who appeared before me, and said person acknowledged that he/she signed this instrument and acknowledged it to be his/her free and voluntary act for the uses and purposes mentioned in the instrument.

Date: February 15, 2024
Month/Day/Year

M A Mikols
Signature of Notarizing Officer

Notary Public
Title (Such as "Notary Public")

My appointment expires

July 23, 2026
Month/Day/Year of Appointment Expiration

Digital Image Correcting Method for Digital Camera

Digital Image Correcting Method for Digital Camera

Haike Guan*	Kenji Shiraishi**	Kazumitsu Watanabe**	Hiroki Fukuoka**	Kazuyasu Ohashi***
Haike GUAN	Kenji SHIRAISHI	Kazumitsu WATANABE	Hiroki FUKUOKA	Kazuyasu OHASHI

Abstract

At Ricoh, digital camera development has been performed with the keyword of "expanding the area of photographing," and one of the means to achieve this purpose is the adoption of wide-angle zoom lenses. However, distortion aberration, chromatic aberration, and decrease in the peripheral light amount tend to occur with wide-angle zoom lenses, and minimizing these aberrations and securing abundant peripheral light amount by optical design alone are obstacles to lens miniaturization. Thus, we have developed a technique to correct image distortion and decrease in the peripheral light amount using image processing. According to this method, it is possible to improve the image quality of an image taken with a digital camera by software processing. By implementing various speed-enhancing innovations, the software in the camera alone corrects these degradations without using any special hardware. We conducted image correction experiments using actual images photographed with a digital camera, evaluated the image quality of the corrected images and the processing time inside the camera, and checked and confirmed the effectiveness of this method.

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 the processing time of the camera are also described.

* Document Laboratory, Software Research and Development Division
Document Lab, Software R&D Group

** ICS Division, Personal Multimedia Company
ICS Division, Personal Multimedia Products Company

*** Module Development Center, Image Engine Development Division
Module Development Center, Imaging Engine Development Division

1. Introduction

In recent years, the market for digital cameras has been rapidly expanding, accompanied by the development of more pixels, smaller size, larger LCD screens, and higher zoom magnification. Conventionally, it has been difficult for compact-type digital cameras to incorporate a zoom lens that starts from a wide-angle range, but Ricoh's Caplio series of digital cameras has realized a zoom lens with a focal length equivalent to 28 mm at the wide-angle end by utilizing advanced optical design technology and mechanical design technology.

The zoom lenses in the Caplio series have achieved high image quality despite their compact size, but image quality would be further improved if the effects of slight residual distortion aberration, magnification chromatic aberration, and decrease in the peripheral light amount could be reduced.

Geometric distortion, known as distortion aberration, is caused by the difference in image formation magnification between the center and the periphery of the image.¹⁾ If distortion aberration remains in the lens, it will appear as distortion in the photographed image, for example, a straight line becomes a curve or a circular shape becomes a distorted ellipse. In addition, when multiple images are pasted together to form a panoramic image, discontinuity in the image at the joints can occur.²⁾

Magnification chromatic aberration occurs when the image formation magnification of a lens differs depending on the wavelength of light. If this aberration remains, it appears as a color shift phenomenon (coloration of image edges) at the peripheral part of the image. This phenomenon is particularly noticeable when photographing an object that has a large difference in brightness and darkness.

The decrease in the peripheral light amount is a phenomenon in which the illuminance decreases as an image moves away from the center of the image even when an object of uniform luminance is formed, and appears as a peripheral light decrease (shading of the peripheral part) in the photographed image.³⁾

Of course, it is desirable that the images photographed by the camera will be free of distortion, color shift, and peripheral light decrease.

In conventional methods, distortion aberration and magnification chromatic aberration are reduced to a sufficient level by optical design innovations. However, it is extremely difficult to completely eliminate aberration at all focal lengths from the wide-angle end to the telephoto end, especially in the case of zoom lenses. Regarding the decrease in the peripheral light amount, theoretically, it is not possible to completely correct it by optical design innovations alone.³⁾

In contrast, a method of correcting distortion by digital image processing has been proposed. In this method, an object to be calibrated, such as a test chart, is photographed, the coefficient of distortion is calculated, and then the image is

corrected.⁵⁾⁻⁸⁾ However, distortion aberration depends on the zoom position (the focal length used) and the photographing distance. If the photographing conditions can be fixed, the measured distortion coefficients can be used to correct this distortion aberration. However, in the case of normal photographing, the photographing conditions usually vary, so it is very time-consuming to measure the coefficients in advance for all the photographing conditions. The decrease in the peripheral light amount depends on the zoom position and photographing distance, and is also related to the aperture value of the lens (the f-number used).

Commercial image processing software may also come with a distortion correction function. However, this method corrects the image while adjusting the distortion aberration parameters using scroll bars, and the corrected image is visually checked. Then, the parameters are determined and the image is corrected using the distortion coefficients. This method requires manual input of parameters and approximates the entire image with a single parameter, so sufficient accuracy cannot be obtained. A method for automatically correcting distortion aberration using two images photographed in different orientations was proposed,²⁾ but it has the disadvantage of requiring two images to correct one image.

As mentioned above, image correction for photographed images is burdensome for the user, and because the image data does not contain sufficient camera information at the time of photographing, it is difficult to correct the image with sufficient accuracy.

This paper proposes a method for correcting distortion, peripheral light decrease, and color shift using digital image processing. The proposed method used the photographing conditions necessary for correction as auxiliary information, to enable accurate correction. This paper first explains the principle of image correction. Next, it introduces the experimental results of applying this technology to images photographed by a digital camera, and describes the results of evaluation of correction accuracy. Finally, the results of the application of this technology to the body of a digital camera will be explained.

2. Technology

2-1 Distortion aberration

2-1-1 Distortion aberration and image distortion

When an image is formed by a lens, the image distortion caused by the distortion aberration is as shown in Fig. 2. As shown in Fig. 1, when a point at a distance y from the optical axis on the object plane forms an image at y' on the image plane, and the angles of the front and rear principal points to the optical

axis are θ_0 and θ , respectively, and the distance from the object plane to the front principal point is a and the distance from the rear principal point to the image plane is b ,

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

is called the lateral magnification (here, we do not mean the near-axis lateral magnification), and if it is always constant regardless of the value of θ , for example, in case of a pinhole camera, it is $\theta = \theta_0$, and no distortion aberration exists. If the lateral magnification is smaller in the periphery than in the center of the image, i.e., if θ_0 increases while β decreases, a barrel-shaped distortion will occur as shown in Fig. 2(c). Conversely, when the lateral magnification at the periphery is larger than that at the center, a pincushion-shaped distortion occurs, as shown in Fig. 2(b). Zoom lenses for digital cameras often have barrel-shaped distortion aberration at the wide-angle end due to their construction. There is also the so-called *jingasa* [ancient Japanese soldier's hat]-type distortion aberration, in which the barrel-shaped distortion aberration and the pincushion-type distortion aberration are mixed.

The distortion aberration is defined as follows: When forming an image of a rectangular object as shown in Fig. 3, the ideal image formation position is assumed to be A, and the image position when the distortion aberration occurs is assumed to be B. The length of AO is assumed to be the ideal image height y'_0 . BO is the real image height, and is assumed to be y' . The distortion aberration can be quantitatively represented by Equation (2). Here, the distortion aberration D is also called optical distortion.

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

In camera zoom lenses, distortion aberration depends on zoom position and photographing distance.¹⁾

In addition, the TV distortion Dt is defined by Equation (3).

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

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

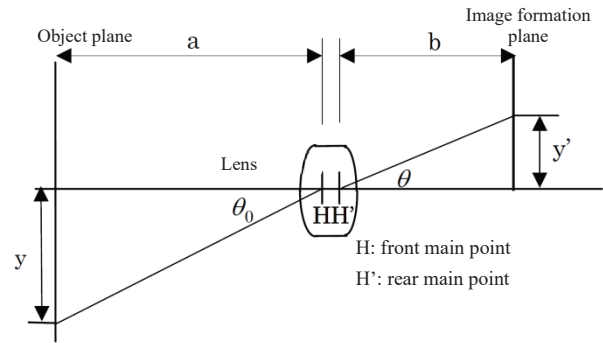


Fig. 1 Imaging of lens with distortion.

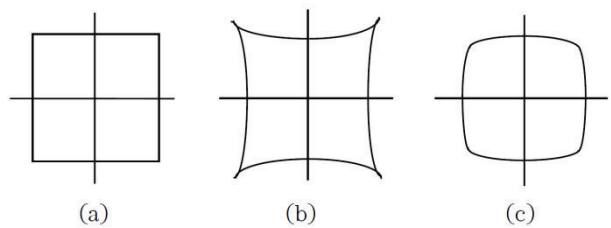


Fig. 2 Imaging of a rectangular object screen shown with (a) no distortion, (b) pincushion, and (c) barrel distortion.

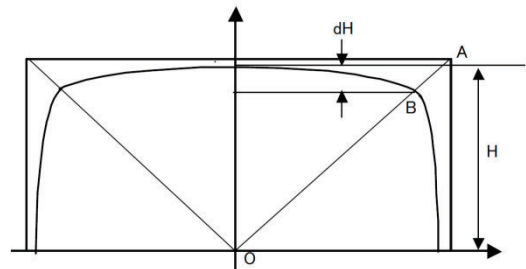


Fig. 3 Definition of distortion.

Here, dH is the amount of bending of the long side of the horizontal rectangle and $2H$ is the image height. In the general case, the distortion aberration is proportional to the square of the image height, and the optical distortion D is about three times the TV distortion Dt.

2-1-2 Correction of distortion

The proposed method will be described hereinafter: The height of the maximum image height AO from the image center O is set to 1, as shown in Fig. 3. The image height below the maximum image height is h ($h < 1$). Using an optical simulation tool, distortion aberration is calculated for each of the conditions of lens zoom position and photographing distance using the definition in Equation (2). In this case, aberration is a negative value, resulting in a barrel-shaped distortion.

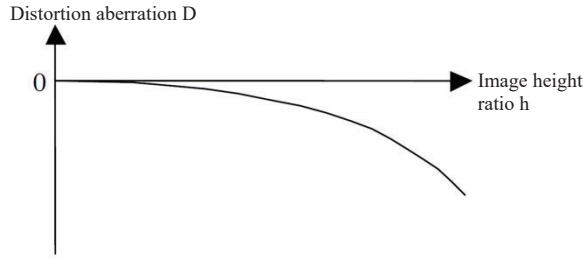


Fig. 4 Distortion of digital camera lens.

Here, the distortion aberration can only be calculated for discrete values of zoom position, photographing distance, and image height. In the case of Fig. 4, the calculated image heights are only a few discrete points, but for an image photographed with a 5-megapixel imager, for example, the number of image heights per pixel is far more than the number calculated using optical simulation tools. However, the amount of distortion aberration data calculated for each pixel would be enormous. Thus, it is necessary to interpolate between the data to eliminate discontinuities. Here, the distortion coefficients are calculated for each pixel by approximating with an n th degree polynomial using the data obtained from the lens ray tracing.

$$D = A_0 + A_1 \times Y^1 + A_2 \times Y^2 + \dots + A_n \times Y^n \quad (5)$$

As shown in Equation (5), distortion aberration D is represented in terms of polynomial coefficients (distortion aberration coefficients) of $A_0, \dots, A_n$. Using the known values of the simulated calculated values ($D_1, D_2, D_3, \dots, D_m$) of distortion aberration at image height ratios ($Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m$), the distortion aberration coefficients will be calculated by the least-squares approximation method. Using these distortion aberration coefficients, the pixel position before correction (x, y) will be calculated from the correct pixel position without aberration (x_0, y_0) using Equations (6) and (7).

$$x = x_0 (1 + A_0 + A_1 \times Y^1 + A_2 \times Y^2 + \dots + A_n \times Y^n) \quad (6)$$

$$y = y_0 (1 + A_0 + A_1 \times Y^1 + A_2 \times Y^2 + \dots + A_n \times Y^n) \quad (7)$$

However, as shown in Fig. 5, the image position before distortion correction may be a fractional number, so when using rounded nearest neighbor pixels, discontinuities in the corrected image will have occurred. In order to prevent the occurrence of such discontinuities, a linear interpolation process will be performed. Using Equation (8), the luminance value at the image coordinates (x, y) before correction will be calculated using the four neighboring pixels. This will result in a smooth correction of the image.

$$f(x, y) = \frac{(f(i, j) * (1 - dx) + f(i + 1, j) * dx) * (1 - dy) + (f(i, j + 1) * (1 - dx) + f(i + 1, j + 1) * dx) * dy}{4} \quad (8)$$

Since this method is not particularly dependent on the type of distortion aberration, it can of course be applied not only to barrel-shaped distortion, but also to pincushion-shaped distortion and *jingasa*-type distortion.

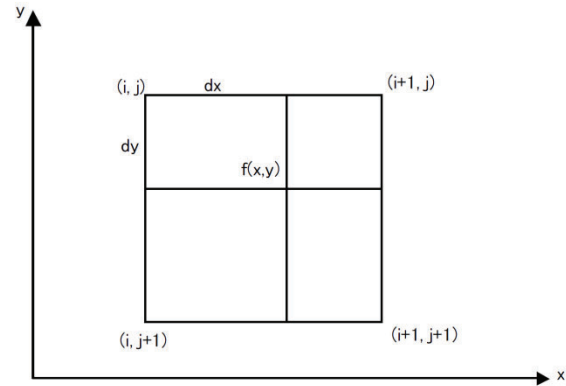


Fig. 5 Linear interpolation.

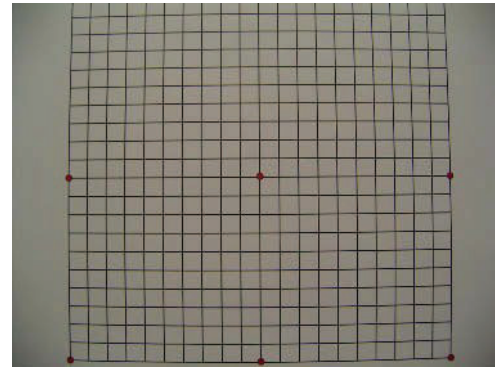


Fig. 6 Image with distortion.

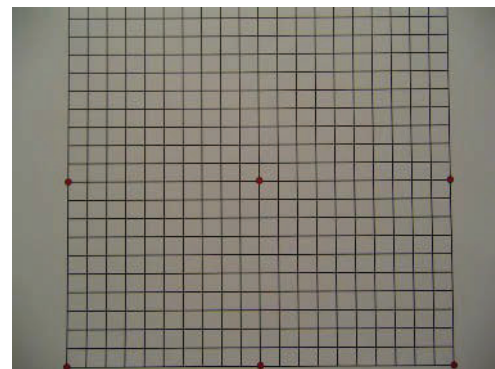


Fig. 7 Corrected Image.

2-1-3 Experimental results of distortion correction and camera body mounting

Image data was collected using an experimental prototype digital camera, data was analyzed, and experiments for distortion aberration correction were performed. Images were photographed at distances of 300mm, 1000mm, 2500mm, 4000mm, and 5000mm or more, while changing the zoom position. The image size was 2048×1536 pixels (3.24 million pixels). A total of 250 images, including straight lines, were photographed.

Using the design value of distortion aberration obtained by optical simulation, an experiment was performed on a PC to correct the distortion of all 250 images based on the data of zoom position and photographing distance. The examples of correction at a photographing distance of 300mm are shown in Fig. 6 and Fig. 7.

About the correction accuracy of this method, experiments were performed. The correction results were evaluated using the straight lines of the buildings in the test chart and in the photographed images. The correction accuracy of the distortion was evaluated by measuring the TV distortion D_t using Equation (3). A straight line was drawn in the corrected image using an image processing tool, and then the maximum distance dH between the corrected line and the drawn line was measured. The maximum distance was 3 pixels in all 135 corrected distortion images. According to Equation (3), D_t is about 0.1%.

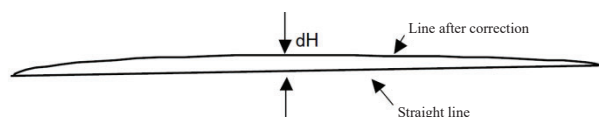


Fig. 8 Evaluation of accuracy of distortion correction.

The algorithm was mounted on the camera body and experiments were conducted. The correction program was implemented in the firmware. The following innovations were made to speed up the processing in the camera.

- (1) Reduce the amount of computation by utilizing YCrCb4:1:1 data.
- (2) Reduce the computation of coordinates of common areas by utilizing the symmetry of images.
- (3) Reduce the amount of computation by correcting only the peripheral areas of the image without correcting the less distorted areas in the center of the image.

Table 1 shows the correction processing time for an image size of 2048×1560 pixels. When all pixels are corrected, it takes 29.5 seconds, but the above-mentioned innovation of correcting only the peripheral areas will speed up the process. For example, if the correction area is processed only outside the circle of which the radius

is 50% of the diagonal length from the image center, the processing time will be about 15 seconds.

Table 1 Processing time of distortion correction.

Corrected area	Processing time (seconds)
100%	29.5
50%	15.1
40%	9.4
30%	4.5

2-2 Correction for the peripheral light decrease

2-2-1 About the peripheral light amount

A phenomenon is known that even when photographing a plane of uniform luminance perpendicular to the optical axis of the lens, the amount of light on the imaging plane decreases as the angle θ of the incident light relative to the optical axis increases. This decrease in luminance can be derived geometrically from the image generation process of the image formation model consisting of the lens and the imaging plane. If the pupil radius of the lens is assumed to be l , the angle of the incident light ray to the optical axis of the lens is assumed to be θ , the distance from the lens to the imaging surface is assumed to be z , and the radiant luminance on the object surface is assumed to be L , the illuminance E on the imaging plane is represented as follows. z is determined by the focal length of the lens and the distance from the object to the lens.³⁾

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

Equation (9) shows that when a plane of uniform luminance L is formed, the illuminance decreases at a rate of $\cos^4 \theta$ toward the periphery of the image. This is called the cosine quadrature law. Since θ is a function that rapidly decreases as θ increases, a wide-angle lens with a large angle of view will cause a large decrease in luminance at the periphery of the image. The decrease in the peripheral light amount depends on the zoom position of the lens, photographing distance and aperture value.

2-2-2 Correction for the peripheral light decrease

The proposed peripheral light decrease correction method will be explained hereinafter. The same as distortion correction, an optical simulation tool is used to obtain the value of peripheral light amount for each image height. Here, the peripheral light amount ratio P is defined as in Equation (10).

$$P = \frac{E_p}{E_c} \quad (10)$$

E_p is the illuminance at the periphery and E_c is the illuminance at the center of the image.

Fig. 9 shows a conceptual diagram of a decrease in the peripheral light amount of lens. Here, the peripheral light amount ratio can only be calculated for discrete values of zoom position, photographing distance, aperture value and image height. In the case of Fig. 9, the calculated image heights are only a few discrete points, but in the case of a photographed image with a 5-megapixel imager, for example, the number of image heights per pixel is far more than the number calculated using an optical simulation tool. If the peripheral light amount data of the lens is used as is, image discontinuities will have occurred, resulting in false contours. However, calculating the peripheral light amount data for each pixel would result in an enormous amount of data. Thus, it is necessary to interpolate between the data to eliminate discontinuities. Here, ray-traced data of the lens is used to approximate with an nth-order polynomial equation to calculate the peripheral light amount coefficient for each pixel.

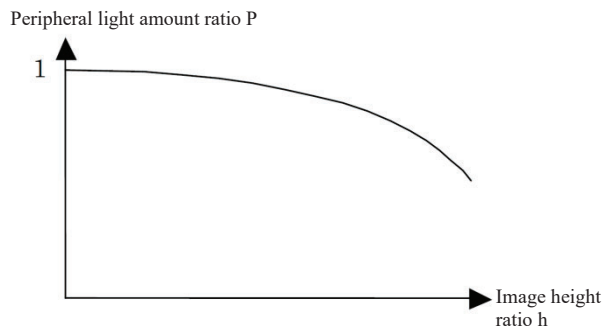


Fig. 9 Image intensity of digital camera lens.

$$P = B_0 + B_1 \times Y^1 + B_2 \times Y^2 + \dots + B_n \times Y^n \quad (11)$$

As shown in Equation (11), the peripheral light amount ratio data P is represented by polynomial coefficients $B_0, \dots, B_n$. Using the known ray tracing calculated values ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$) at image height ($Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m$), the least-squares approximation method is used to calculate the peripheral light amount coefficients ($B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$). Using these peripheral light amount coefficients, the peripheral light amount ratio at pixel position (x_0, y_0) is calculated and then the pixel is corrected.

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

The peripheral light decrease correction is represented by Equation (12). I_p is the peripheral pixel value. P is the peripheral light amount ratio defined in Equation (10). I_0 is the corrected pixel value.

The peripheral light amount ratio data calculated by optical simulation represents the illuminance ratio and needs to be converted to the pixel value ratio. Therefore, the peripheral light amount ratio in Equation (10) is corrected in advance using the CCD

gamma data. Alternatively, gamma correction is directly added to the corrected pixel value calculated by Equation (10).

2-2-3 Experimental results of peripheral light decrease correction and camera body mounting

Image data was collected using an experimental prototype digital camera, and peripheral light decrease correction experiments were conducted. The images were photographed at a distance of 300mm, 1000mm, 2500mm, 4000mm, and 5000mm or more, while changing the zoom position. The image size was 2048×1536 pixels (3.24 million pixels). A total of 250 images were photographed.

Using the designed value of peripheral light amount ratio calculated by optical simulation, peripheral light decrease correction experiments were conducted on a PC for all 250 images based on the zoom position and the photographing distance data. The validity of the corrected images was visually checked and confirmed. The examples of correction for a photographing distance of 300mm are shown in Fig. 10 and Fig. 11.

A peripheral light decrease correction algorithm was also mounted in the camera body, and experiments were conducted. When implementing the correction program in the camera firmware, the following innovations were made to speed up the processing in the camera body.

- (1) Reduce the amount of computation by utilizing the YCrCb4:1:1 data
- (2) Reduce computation of coordinates of common areas by utilizing image symmetry
- (3) Reduce the amount of computation by correcting only the peripheral areas of the image without correcting the central area of the image where there is little light decrease.

The correction processing time for an image size of 2048×1560 pixels is shown in Table 2. Even when only the area outside the circle with a radius of 70% of the diagonal length from the image center is processed, the peripheral light decrease is very small at 7.5%. This is sufficient to correct the sudden decrease in light amount, especially at the periphery of the image. In this case, the processing time is 1.8 seconds, which is at a practical level.

Table 2 Processing time of shading correction.

Corrected area	Processing time (seconds)
100%	7.0
50%	4.1
40%	3.0
30%	1.8



Fig. 10 Image without shading correction.

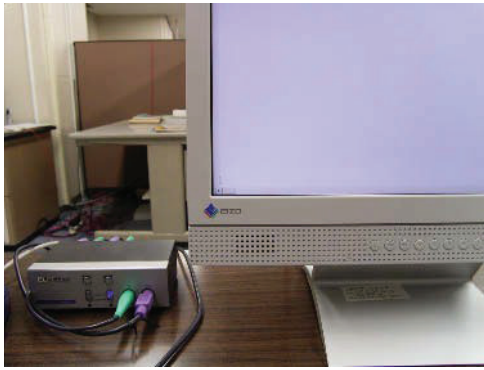


Fig. 11 Image after shading correction.

2-3 Color shift correction

2-3-1 About the magnification chromatic aberration

Magnification chromatic aberration is an aberration caused by the difference in the image formation magnification of the lens depending on the wavelength of light. The point with height y shown in Fig. 1 is formed at three points y'_R , y'_G and y'_B . Here, the G signal of the RGB image is used as the reference, and the real image heights of R and B are normalized by the real image height of G, using Equations (13) and (14).

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

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

The magnification chromatic aberration M_R and M_B have the same form as the distortion aberration D in Equation (2). Therefore, the distortion correction process can be used as is. The magnification chromatic aberration data, like the distortion aberration, depends on the zoom position and the photographing distance.

Optical simulation tools were used to calculate the magnification chromatic aberration data in Equations (13) and (14). Using a polynomial approximation, the M_R and M_B data were interpolated and the per-pixel data was computed. The R and B signals are corrected and aligned with the G signal. The experiment was conducted on images photographed by a digital camera, as shown in Fig. 12 and Fig. 13, and then the effect of color shift correction was checked and confirmed.

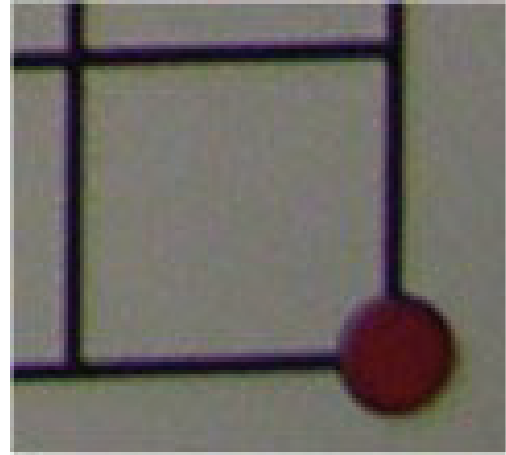


Fig. 12 Chromatic difference of magnification.

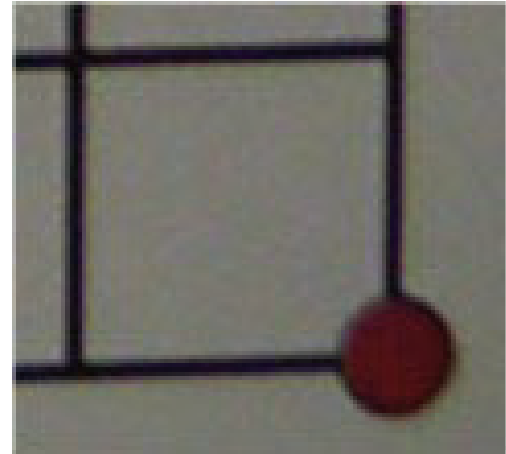


Fig. 13 Correction of chromatic difference of magnification.

Summary

This paper proposes a method for correcting distortion, peripheral light decrease, and color shift by image processing. The method stores in advance distortion aberration, magnification chromatic aberration, and peripheral light amount data calculated using an optical simulation tool, and then performs image correction by extracting the data corresponding to the zoom position of the lens at the time of photographing, the

photographing distance, and the aperture value. Since the processing is done inside the camera, a uniform image without distortion or color shift can be obtained while the user is not aware of this processing. If the zoom position, photographing distance, and aperture value are recorded in advance in an Exif format image file, rather than in the camera itself, the image can be corrected by software processing on a PC using distortion aberration, magnification chromatic aberration, and peripheral light amount ratio data.

Future Developments

Currently, all processing is done in software, so the processing time takes several seconds and is not real-time processing. If the system is integrated into a camera as hardware and further speeded up, it will be possible to shorten the photographing interval and prevent missed shutter opportunities.

This paper examined and discussed distortion, peripheral light decrease, and color shift, but other image degradations can also be corrected by image processing. In addition, it is thought that it is also possible to create a completely new optical system that has never existed before, if the optics and image processing systems are optimally designed in an integrated manner, instead of designing and optimizing the camera optics and image processing separately.

Reference literature

- 1) Hiroshi Kubota, Handbook of Optical Technology, Asakura Shoten, 1975
- 2) Haikuan Guan, Shin Aoki, Koichi Ejiri: "Distortion aberration correction and panoramic images by image processing," Ricoh Technical Report, No. 23, 1997, pp. 45-52
- 3) Akira Amano et al.: "Analysis and correction of optical distortion of zoom lenses," Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, D-II, Vol. J80-D-II No. 6, pp. 1458- 1465, June 1997
- 4) Takayuki Noma et al: "About Development of Camera Calibration Software and Support for Zoom Lenses," Proceedings of the 9th Symposium on Image Sensing, 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

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*
Haike GUAN

白石 賢二**
Kenji SHIRAISHI

渡辺 一光**
Kazumitsu WATANABE

福岡 宏樹**
Hiroki FUKUOKA

大橋 和泰***
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 Development 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,

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

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。

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

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。

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

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

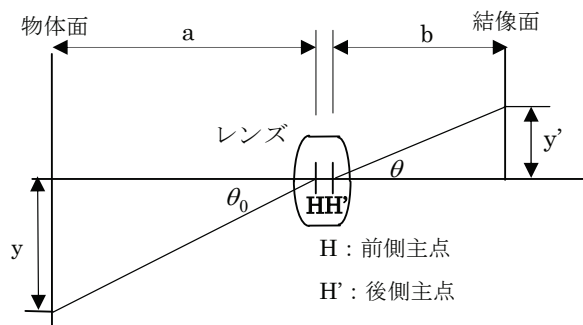


Fig.1 Imaging of lens with distortion.

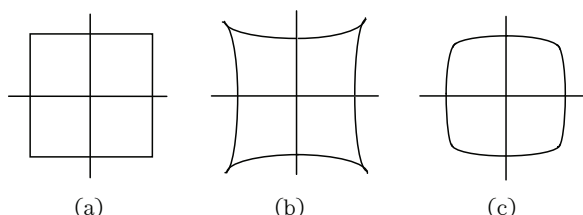


Fig.2 Imaging of a rectangular object screen shown with (a) no distortion, (b) pincushion, and (c) barrel distortion.

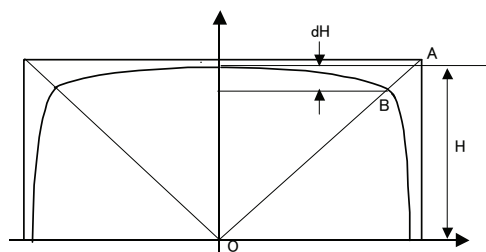


Fig.3 Definition of distortion.

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。

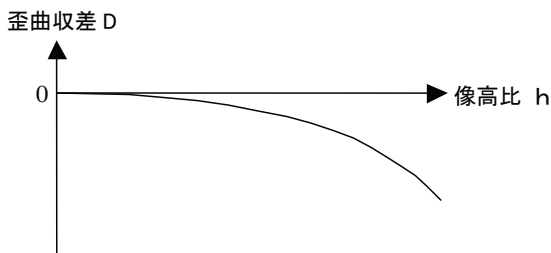


Fig.4 Distortion of digital camera lens.

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。

$$D = A_0 + A_1 \times Y^1 + A_2 \times Y^2 + \dots + A_n \times Y^n \quad (5)$$

式(5)に示すように歪曲収差Dを $A_0, \dots, A_n$ の多項式係数（歪曲収差係数）で表す。像高比 $(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m)$ での歪曲収差のシミュレーション計算値 $(D_1, D_2, D_3, \dots, D_m)$ を既知として、最小二乗近似法で、歪曲収差係数 $(A_0, A_1, A_2, \dots, A_n)$ 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 (x_0, y_0) から補正前の画素位置 (x, y) を式(6)(7)で求める。

$$x = x_0(1 + A_0 + A_1 \times Y^1 + A_2 \times Y^2 + \dots + A_n \times Y^n) \quad (6)$$

$$y = y_0(1 + A_0 + A_1 \times Y^1 + A_2 \times Y^2 + \dots + A_n \times Y^n) \quad (7)$$

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。

$$f(x, y) = (f(i, j) * (1 - dx) + f(i + 1, j) * dx) * (1 - dy) + (f(i, j + 1) * (1 - dx) + f(i + 1, j + 1) * dx) * dy \quad (8)$$

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。

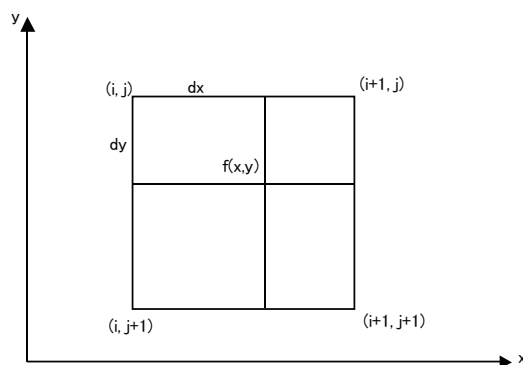


Fig.5 Linear interpolation.

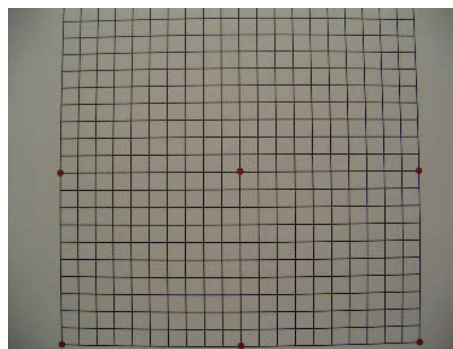


Fig.6 Image with distortion.

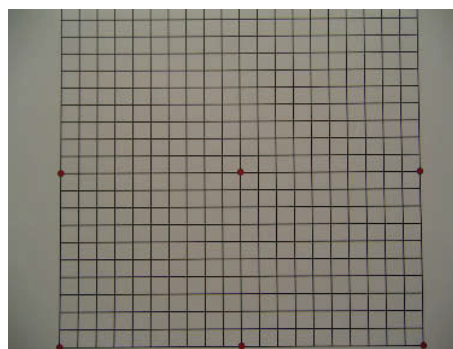


Fig.7 Corrected Image.

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。

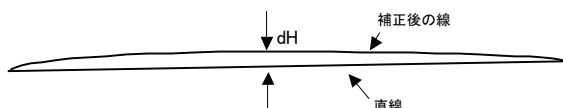


Fig.8 Evaluation of accuracy of distortion correction.

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⁾

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

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。

$$P = \frac{E_p}{E_c} \quad (10)$$

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。

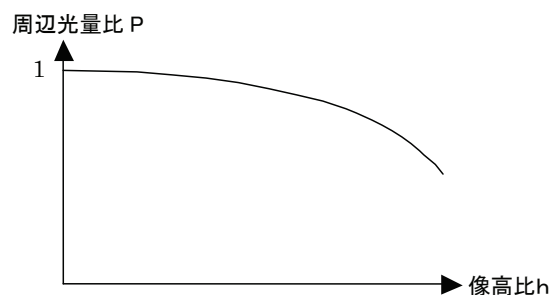


Fig.9 Image intensity of digital camera lens.

$$P = B_0 + B_1 \times Y^1 + B_2 \times Y^2 + \dots + B_n \times Y^n \quad (11)$$

式(11)に示すように周辺光量比データ P を多項式係数 $B_0, \dots, B_n$ で表す。像高 ($Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m$) での光線追跡計算値 ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$) を既知として、最小二乗近似法で、周辺光量係数 ($B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$) を求める。これらの周辺光量係数を用いて、画素位置 (x_0, y_0) での周辺光量比を算出し、画素を補正する。

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

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。

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

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

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。

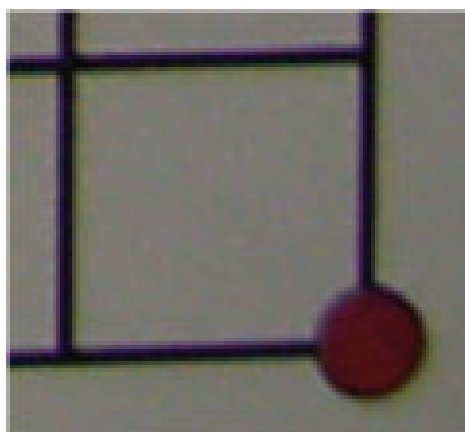


Fig.12 Chromatic difference of magnification.

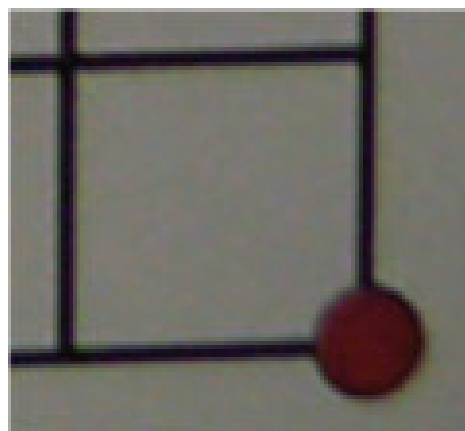


Fig.13 Correction of chromatic difference of magnification.

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減光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