

カメラ特性を再現するカメラシミュレータの構築と 簡便なパラメータ取得手法の提案*

岡留直人** 新垣洋平*** 下村倫子*** 梅田和昇†

A Camera Simulator That Simulates Camera Properties and Simple Methods to Obtain Its Parameters

Naoto OKADOME, Yohei ARAGAKI, Noriko SHIMOMURA and Kazunori UMEDA

In this paper, a camera simulator that simulates camera properties and simple methods to obtain its parameters are proposed. The camera simulator simulates distortion, limb darkening, blur by defocus, blur by aberration, motion blur, variation of pixel sensitivity, random noise, gamma correction, and salt and pepper noise. As for methods to obtain camera parameters, parameters of blur by aberration and distortion are obtained by getting an image of a stripe pattern, and parameters of limb darkening, variation of pixel sensitivity, random noise and salt and pepper noise are obtained by getting a number of images using a camera covered by a diffuser. Fundamental experiments show that the constructed Camera Simulator and the proposed methods to obtain camera parameters are effective.

Key words: camera simulator, camera calibration, distortion, blur, limb darkening

1. 緒 言

近年、ロボット、自動車、防犯など様々な分野でカメラが利用されており、カメラから得られる画像を用いて様々な画像処理が行われている。代表的な例として人物認識、物体認識、欠陥検査などが挙げられる。それらで使用されているカメラは様々であり、カメラの違い、レンズの違い、設定の違いによって得られる画像は異なる。そこで、カメラ特性を様々な再現できるカメラシミュレータの必要性が高まってきている。カメラシミュレータにより、一つのシーンにおいてカメラの違いや設定の違いに応じた画像を生成することができる。また、カメラ特性を再現することにより、CGなどで生成された仮想的なシーンを実カメラで得られる画像に近づけることができる。

3次元モデルから仮想的なシーンを生成するシステムがCGの分野などで提案されている。例えば Ibanez-Guzman らは、光源環境によって反射特性が変化するモデルを用いて仮想的なシーンを生成する Irradiance Model を構築している¹⁾。本研究では、このようなシステムで得られる仮想的なシーンを入力とし、実カメラをシミュレートして画像を出力するシミュレータを構築することを目的とする。様々なカメラ特性を考慮することで、実カメラで得られる画像に近い画像を出力する。また、カメラ特性をシミュレートするには、特性を表すカメラパラメータが必要である。本研究では、これらのパラメータを簡便な手順で取得する手法を提案することも併せて目的とする。

2. カメラシミュレータ

2.1 前提条件

本研究では簡便で実用的なカメラシミュレータの構築を目標

とする。そこで次の4つの条件を前提とする。

- (1) 個々の特性を独立して構築する
- (2) 必要のない特性は無視する
- (3) 似た効果を持つ特性は統合する
- (4) 対象とするカメラはモノクロとする

(1)により、必要な特性のみを組み合わせることで再現が可能となる。(2)、(3)によりモデルの簡略化を図る。(4)もモデルの簡略化のためであるが、カラー画像は複数枚(一般に3枚)のモノクロ画像から構成されており、モノクロからカラーへの拡張は難しくないと考えられる。

2.2 考慮するカメラ特性

カメラ特性を再現するために必要となる特性とパラメータを考える。まず仕様から得られる必要なパラメータを示す。次に図1に示すような単純なカメラのモデルを考え、光学系、イメージセンサ、後処理それぞれの特性を考慮する。

2.2.1 仕様から与えられるパラメータ

まず仕様から与えられると考えられるパラメータを列挙する。

- ・画角[deg]
- ・焦点距離[m]
- ・CCDサイズ[m×m]

これら三つのパラメータは依存しており、二つが与えられれば残りの一つは計算で求まる。

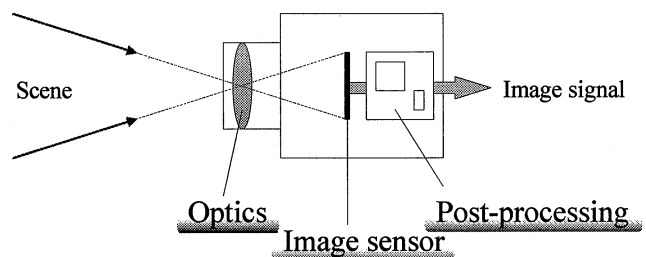


Fig.1 Categories of parameters to consider for camera simulator

* 原稿受付 平成 19 年 11 月 9 日

** 学生会員 中央大学大学院 (東京都文京区春日 1-13-27)

*** 日産自動車 モビリティ研究所 (神奈川県厚木市森の里青山 1-1)

† 正 会 員 中央大学 (東京都文京区春日 1-13-27)

- ・露光時間（シャッタースピード）[s]
- ・絞り（F 値）
- ・ゲイン[dB]
- ・感度

これらのパラメータは画像の輝度値に関係している。輝度値は露光時間とゲインに比例し、F 値の平方根に反比例する。

輝度値 I は次の式で与えられる。

$$I = k_1 \cdot \text{Gain} \cdot T \cdot E_{\text{CCD}}$$

k_1 は感度の係数、 Gain はゲイン、 T は露光時間、 E_{CCD} [W/m^2] は放射照度である。

- ・サンプリングレート[fps]

30fps(NTSC)または 25fps(PAL)が一般的である。

- ・画像サイズ[pixel × pixel]
- ・ビット数[bit]

2.2.2 光学系の特性

次に光学系の特性を考える。本研究では光学系の特性として、収差によるぼけ、ピンぼけ、モーションブラー、歪曲収差、周辺減光を考慮する。

- ・収差によるぼけ

ぼけは主に収差とピントのずれによって生じる。収差は球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、歪曲収差の五つに分類される²⁾。歪曲収差を除く四つがぼけを引き起こす要因となる。本研究では分類は考えず単純に収差によるぼけとし、ガウシアンフィルタを用いて再現する。

- ・ピンぼけ

ぼけはピントのずれによっても生じる。このぼけはピントが合っている距離と対象物までの距離による。これら二つの距離が与えられれば、ぼけの大きさは計算により求めることができる。これもガウシアンフィルタを用いて再現する。

- ・モーションブラー

撮影対象またはカメラが移動しているときにはモーションブラー（ぶれ）が発生する。もし対象・カメラの動きと対象物までの距離情報が与えられれば、モーションブラーを計算することができる。しかし本研究では簡便で実用的な使い方を指すため、仮想的なシーンの画像を高サンプリングレートで作成し、それらを平均することでモーションブラーを再現する。

- ・歪曲収差

この収差により画面周辺ほど物体と像の相似性が崩れる。本研究では次に示す単純なモデルを考える³⁾。

$$\begin{aligned} x' &= x(1 + kr^2) \\ y' &= y(1 + kr^2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 (x, y) は歪曲収差のない理想的な画像の座標、 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 、 (x', y') は歪曲収差のある画像の座標を表す。

- ・周辺減光

周辺減光のモデル図を図 2 に示す。周辺減光は理想的なレンズでは入射光と光軸のなす角度 θ に対し $\cos^4 \theta$ に比例する⁴⁾。しかし、多くのレンズが周辺減光を軽減させるよう設計されていることや、口径食による周辺減光も生じることから、このモデルは一般的には成り立たない。本研究では次に示す多項式のモデルを用いる。

$$I = I_0 \cdot \{1 - k_1(x^2 + y^2) - k_2(x^2 + y^2)^2\} = I_0 \cdot \{1 - k_1 r^2 - k_2 r^4\} \quad (2)$$

ここで、 I_0 は理想的な画像の輝度値、 I は周辺減光がある場合の輝度値を表す。なお、周辺減光は一般に F 値の影響を大きく受

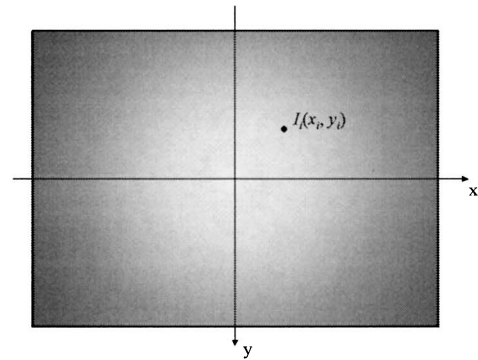


Fig.2 Limb darkening

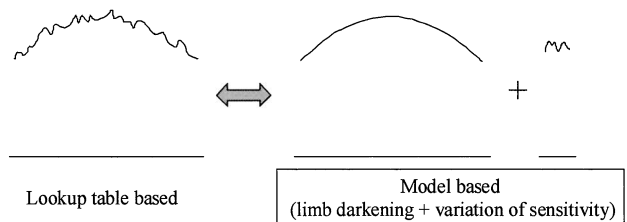


Fig.3 Two ways to consider the pixel sensitivity

けるので、パラメータ k_1, k_2 は F 値ごとに求めておく必要があると考えられる。

2.2.3 イメージセンサの特性

ランダムノイズとピクセル感度のばらつきを考える。ランダムノイズは暗電流などで生じるランダムな誤差である。また、イメージセンサのピクセル感度は全て一定というわけではなく、ばらつきが生じている。ピクセル感度のばらつきはカメラの固定ノイズとして再現する。つまり、連続画像においてランダムノイズは変化するが、ピクセル感度のばらつきのノイズは変化しない。

- ・ランダムノイズ

本研究では簡略化を図るためイメージセンサのノイズの物理的な詳細は考慮せず⁵⁾に、ランダムノイズとして正規乱数を用いて統計的に再現する。

- ・ピクセル感度のばらつき

ピクセル感度を考慮するには、二つの方法が考えられる。一つは全画素の感度を測定する方法、もう一つはピクセル感度のばらつきを統計的に得る方法である。二つの方法の概念図を図 3 に示す。前者であれば画素ごとに感度のパラメータを用意する必要があるのに対し、後者では標準偏差を持つのみで良い。本研究では後者を考える。周辺減光を分離して考え、正規乱数を用いて統計的に再現する。

2.2.4 後処理

後処理では、ガンマ補正とごま塩ノイズを考える。

- ・ガンマ補正

一般的に産業用カメラはガンマ値を 0.45 ないし 1 に変えることができる。本研究では次の式でガンマ補正を行う。

$$y = (2^n - 1) \left(\frac{x}{2^n - 1} \right)^\gamma$$

ここで、 x は入力画像の画素値、 y は出力画像の画素値、 n は画素値のビット数を表す。

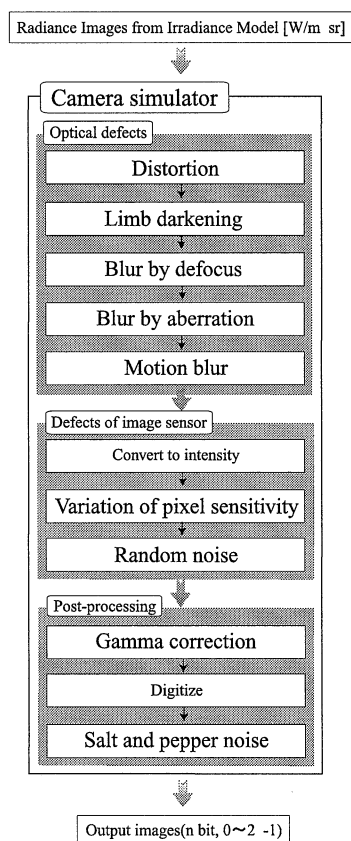


Fig.4 Flow of the camera simulator

・ごま塩ノイズ

ごま塩ノイズはランダムノイズの一種で、孤立した画素が真黒、もしくは真白に飛んでしまうノイズである。本研究では後処理として独立して考える。なお、近年の標準的なカメラではほとんど生じない。輝度値が 0 および 2^n-1 の割合を統計的に再現する。

3. 構築したカメラシミュレータ

構築したカメラシミュレータのフローを図 4 に示す。

入力画像は放射輝度（単位： $[W/(m^2 \text{ sr})]$ ）で与えられるとする。光学系の特性を順に考慮した後に、イメージセンサの段階で輝度値に変換するものとする。後処理のガンマ補正の後デジタル化し、出力画像とする。

4. パラメータ取得手法の提案

カメラ特性をシミュレートするには、特性を表すカメラパラメータが必要である。しかし、一般的な手法でカメラのパラメータを取得するには手間が多く掛かる。そこで本研究ではこれらのパラメータを簡便な手順で取得する手法を提案する。

構築したカメラシミュレータの特性でパラメータ取得が必要なものは、収差によるぼけ、歪曲収差、周辺減光、ランダムノイズ、ピクセル感度のばらつき、ごま塩ノイズの六つである。ピンぼけ、モーションブラーは前もって与えられるパラメータで算出でき、ガンマ補正のガンマも一般に与えられている。

4.1 収差によるぼけ

図 5 のようにストライプパターンを一枚撮像することで収差によるぼけを求める手法を構築する。

収差によるぼけがガウシアンフィルタで表されるとする。二次元のガウシアンフィルタは

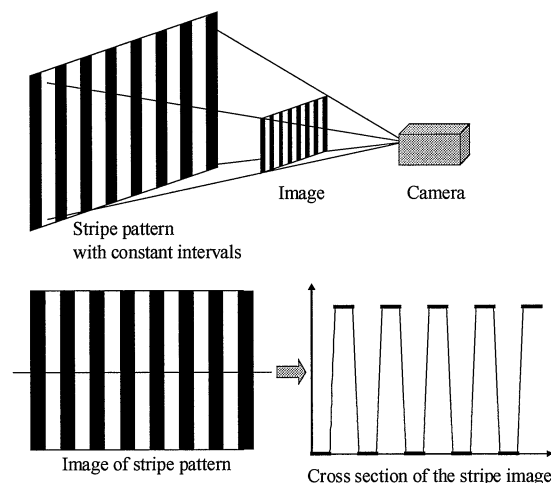


Fig.5 Identification of blur by aberration using a stripe pattern

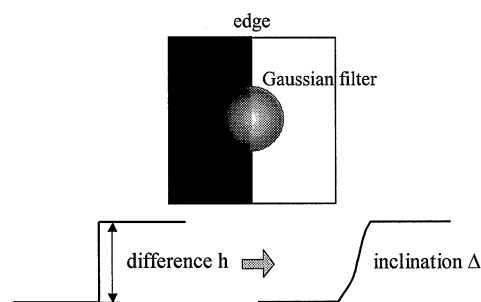


Fig.6 Gaussian filter at an edge

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

と表される。ただし (x, y) はフィルタを適用する点を原点とした画像座標、 σ はガウシアンフィルタの標準偏差でぼけの大きさを表す。

各ストライプのエッジに注目する。エッジの傾きは σ の関数となる。図 6 に示すようにエッジでの輝度値の差を h とすると、式(3)よりエッジの傾きの最大値 Δ が

$$\Delta = \frac{h}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

で与えられる。そこで、Prewitt オペレータなどの微分フィルタを用いて求めたエッジの傾きから σ を

$$\sigma = \frac{h}{\sqrt{2\pi}\Delta}$$

で算出する。

4.2 歪曲収差

このパラメータは Zhang のキャリブレーション手法⁹⁾などを用いることで内部パラメータと同時に得ることができる。しかし、これらの手法では多数枚の画像を撮像する必要がある。本研究ではより簡単に歪曲収差のパラメータを得るため、一枚のストライプパターンを撮像するだけでパラメータを得ることができる手法を提案する。

図 5 のようにカメラの正面に垂直にセットしたストライプパターンを撮影する。図 7 に示すように各ストライプのエッジを抽出し画像中心の水平線上の歪曲収差に注目する。まず、画像中心に最も近い線を基準線とする。歪曲収差のない画像の基準線からのストライプの幅を w 、歪曲収差がある画像の基準線からのストライプの幅を w_{2i} とすると式(1)より次の式が得られる。

$$\frac{w_{2i}}{2} = iw + i^3 kw^3 \equiv iw + i^3 k'$$

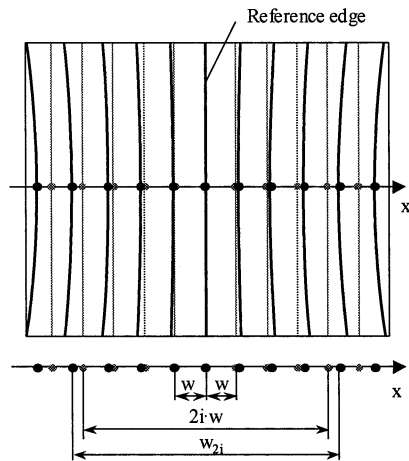


Fig.7 Observed edges of stripes and necessary parameters

歪曲収差のパラメータは、最小二乗法を用いて以下のように算出される。

$$k = \frac{4 \left\{ \sum_i i^2 \sum_i i^6 - \left(\sum_i i^4 \right)^2 \right\} \left(- \sum_i i^4 \sum_i i w_{2i} + \sum_i i^2 \sum_i i^3 w_{2i} \right)}{\left(\sum_i i^6 \sum_i i w_{2i} - \sum_i i^4 \sum_i i^3 w_{2i} \right)^3}$$

4.1, 4.2 より一枚のストライプパターンを撮像するだけで収差によるばけと歪曲収差のパラメータ取得が可能である。

4.3 周辺減光・ごま塩ノイズ

使用するカメラにホワイトバランスキャップまたはそれに代わるものを被せる。なるべく一様な明るさの対象を画素値が飽和しないように撮像する。最小二乗法を用いて式(2)の周辺減光のパラメータを算出する。以下の式で求められる。

$$\begin{bmatrix} k_2' \\ k_1' \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i^8 & \sum_i x_i^6 & \sum_i x_i^4 \\ \sum_i x_i^6 & \sum_i x_i^4 & \sum_i x_i^2 \\ \sum_i x_i^4 & \sum_i x_i^2 & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_i x_i^4 y_i \\ \sum_i x_i^2 y_i \\ \sum_i y_i \end{bmatrix}$$

$$k_1 = \frac{k_1'}{I_0} \quad k_2 = \frac{k_2'}{I_0}$$

また、輝度値が 0 および $2^n - 1$ の割合をそれぞれ求めたものをごま塩ノイズのパラメータとする。

4.4 ランダムノイズ・ピクセル感度のばらつき

4.3 で得られる画像を多数枚用意する。周辺減光の影響を取り除くため画像中心部のみで考える。画像中心部の各画素で多数枚の画像に対する平均と標準偏差を求める。得られた標準偏差の平均がランダムノイズのパラメータとなる。また、平均の標準偏差がピクセル感度の画素ごとのばらつきとなる。

4.3, 4.4 よりカメラにホワイトバランスキャップ等を被せてなるべく一様な明るさのものを多数枚撮像することで周辺減光、ごま塩ノイズ、ランダムノイズ、ピクセル感度のばらつきのパラメータを取得することができる。

5. 評価実験

構築したカメラシミュレータとパラメータ取得手法の評価を行うための実験を行った。

カメラシミュレータは PC (Pentium4 3.20GHz) 上に実装した。ソフトウェアは VisualC++6.0 と OpenCV を使用して構築した。カメラは SONY XC-77 を使用した。

5.1 シミュレータとパラメータ取得手法の評価

構築したカメラシミュレータと提案したカメラパラメータ取得

手法の妥当性の評価を行った。カメラシミュレータで特性を再現した画像を作成し、作成した画像に対してパラメータ取得を行った。こうすることで、シミュレータに用いるのに妥当なパラメータ取得が実現できることを検証することができる。なお、シミュレータでアクティブにするのは各項で対象とするパラメータのみであるので生成されるパラメータは信頼できるものと言え、よってパラメータ取得手法単体での妥当性も言えると考えている。

5.1.1 収差によるばけ

理想的なストライプパターン画像に対しカメラシミュレータで収差によるばけを加え、処理後の画像に対してパラメータ取得を行った。その結果を表 1 に示す。 σ が大きくなるほど誤差も大きくなる傾向が見られる。誤差が最大の $\sigma=3.0$ に対し、3.0 と同定された 3.263 とでのエッジ部のばけの生じ方の違いを図 8 に示す。両者でエッジ形状がほぼ一致していることから、誤差は十分小さいと言える。

5.1.2 歪曲収差

理想的なストライプパターンにカメラシミュレータで歪曲収差を加え、処理後の画像に対してパラメータ計測を行った。その結果を表 2 に示す。パラメータの絶対値が大きくなるほど誤差も大きくなる傾向が見られる。与えたパラメータと同定されたパラメータとでの歪曲収差の大きさの違いを図 9 に、さらに図 10 で歪曲収差が最大の場合の画像の比較を示す。図 9 より、与えたパラメータと同定されたパラメータとで生じる歪曲収差の大きさは比較的一致しているが、歪曲収差が大きい場合にはずれが生じており改善が必要である。ただし図 10 に示されるように、ずれが生じているのは歪曲収差が非常に大きな場合であり、実用的なカメラをモデル化する場合には大きな影響はないと考えられる。

5.1.3 周辺減光

実際のカメラで得られた画像と、一様な明るさの画像にカメラシミュレータで周辺減光を加えた画像との輝度分布変化を比較した。実際のカメラで得られた画像と、一様な明るさの画像にカメラシミュレータで周辺減光を加えた画像を図 11 に示す。画像の中心線の輝度分布を比較したものを図 12 に示す。十分再現できていると言える。

5.1.4 ごま塩ノイズ

一様な明るさの画像にカメラシミュレータでごま塩ノイズを加え、処理後の画像に対してパラメータ計測を行った。その結果を表 3 に示す。パラメータの絶対値が大きくなるほど誤差も大きくなる傾向が見られる。これは、カメラシミュレータでランダムに与えているためと考えられる。

5.1.5 ランダムノイズ

一様な明るさの画像にカメラシミュレータでランダムノイズの処理を加え、処理後の画像 100 枚、画像中心部 9×9 画素に対してパラメータ計測を行った。カメラシミュレータに与えたランダムノイズの標準偏差を 1.5, 5.0 としたとき、得られたパラメータは 1.518, 4.977 であった。誤差は十分小さいと言える。

5.1.6 ピクセル感度のばらつき

一様な明るさの画像にカメラシミュレータでピクセル感度のばらつきを与える処理を加え、処理後の画像 100 枚、画像中心部 9×9 画素に対してパラメータ計測を行った。カメラシミュレータに与えたパラメータを 0.003, 0.010 としたとき、得られたパラメータは 0.00305, 0.00924 であった。誤差は十分小さいと言える。

Table 1 Results of identifying parameters of blur by aberration

Parameters for the camera simulator σ	Identified parameters σ	Errors
1.0	1.025	0.025
1.5	1.533	0.033
2.0	2.108	0.108
2.5	2.622	0.122
3.0	3.263	0.263

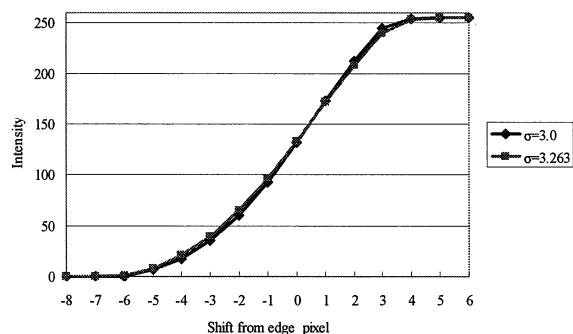

Fig.8 Comparison of blur by aberration on an edge

Table 2 Results of identifying distortion parameter

Parameters for the camera simulator ($\times 10^{-7}$)	Identified parameters ($\times 10^{-7}$)	Errors ($\times 10^{-7}$)
-20	-24.65	-4.65
-10	-9.90	0.10
-6	-5.96	0.04
-2	-2.04	-0.04
2	2.05	0.05
6	5.93	-0.07
10	11.17	1.17
20	23.35	3.35

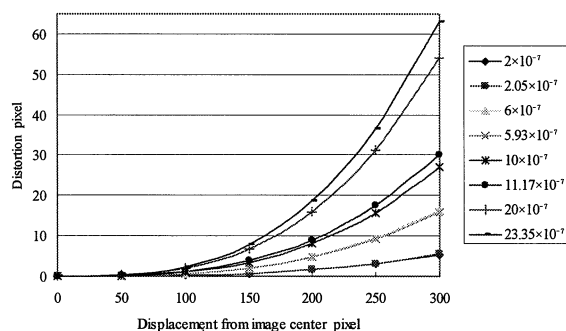
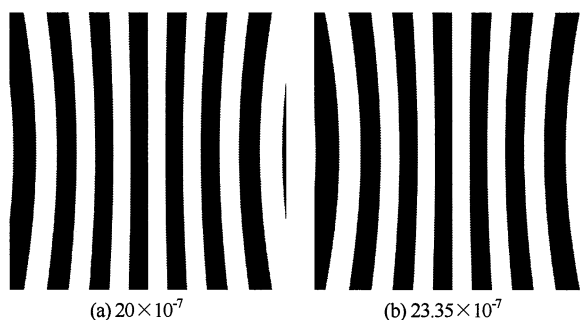
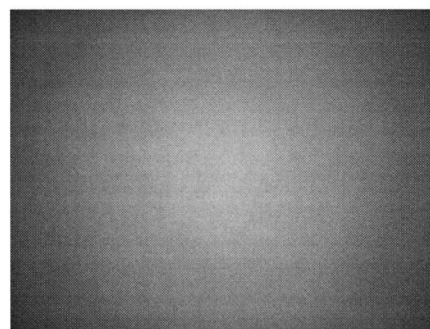
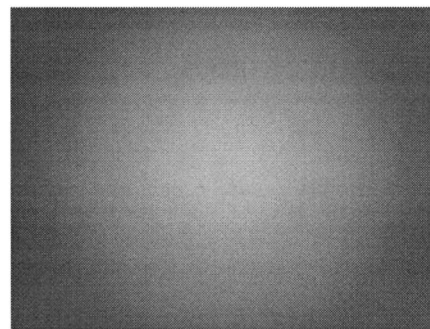

Fig.9 Comparison of distortion

Fig.10 Comparison of distortion by stripe pattern

(a) Real image

(b) Image generated by the camera simulator

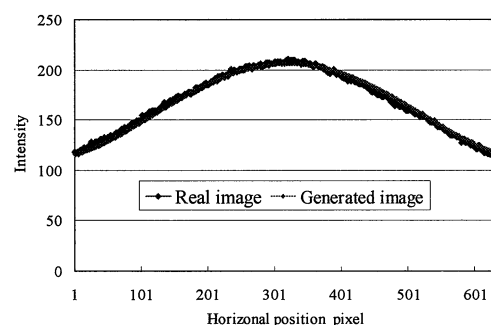
Fig.11 Comparison of real image and image generated by the camera simulator

Fig.12 Results of simulating limb darkening

Table 3 Results of identifying parameters of salt and pepper noise

Parameters for the camera simulator ($\times 10^{-6}$)	Identified parameters ($\times 10^{-6}$)	
	Salt	Pepper
200	202	202
400	454	393
600	652	561
800	904	759
1000	1072	984

5.2 実シーンでの評価実験

まず、使用するカメラのパラメータ取得を4章の手法を用いて行った。次に、固定したカメラの前を人が横切っていくシーンを撮影した。撮影したシーンを基に Irradiance Model¹⁾で生成した画像(図13参照)にカメラシミュレータの処理を適用し実際のシーンと比べた。このとき、モーションブレイク再現のため出力画像のサンプリングレート 30[fps]に対し、入力画像のサンプリングレートを10倍の300[fps]とし、距離情報は扱っていない。具体的に与えたパラメータを表4に示す。

図14はF値が8のときの実画像と出力画像であり、図15の(a),(b)はF値が図14の中心部の拡大図、(c),(d)はF値が16のと



Fig.13 Input image (Irradiance Model)

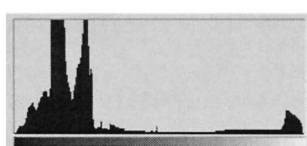


(a) Real image



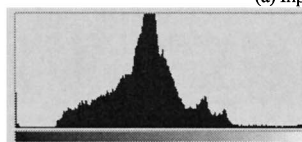
(b) Image generated by the camera simulator

Fig.14 Comparison of real image and image generated by the camera simulator (F=8)



Average : 59.58
Standard deviation : 53.18

(a) Input image



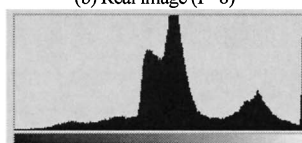
Average : 125.39
Standard deviation : 51.57

(b) Real image (F=8)



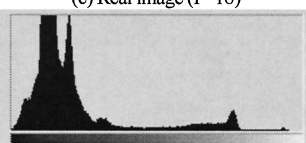
Average : 52.70
Standard deviation : 49.38

(c) Real image (F=16)



Average : 158.24
Standard deviation : 55.48

(d) Output image (F=8)



Average : 49.34
Standard deviation : 41.60

(e) Output image (F=16)

Fig.16 Histogram of image intensity



(a) Real image (F=8) (b) Output image by the camera simulator (F=8)



(c) Real image (F=16) (d) Output image by the camera simulator (F=16)

Fig.15 Enlarged images (F=8, 16)

Table 4 Input parameters

Size of output image	768×493 [pixel]
Bit depth of input image	8
fps of inputs	300 [fps]
fps of outputs	30 [fps]
Shutter speed	0.02 [s]
Focal length	0.008 [m]
F number	8, 16
Gamma	1
Sensitivity	10
Gain	0 [dB]
Distortion's parameter	6.050×10^{-7}
Parameter of blur by aberration	1.273
Parameter of limb darkening	F=8 : $k_2 = 2.31 \times 10^{-11}$ $k_1 = -3.10 \times 10^{-6}$ F=16 : $k_2 = 4.38 \times 10^{-11}$ $k_1 = -5.02 \times 10^{-6}$
Parameter of random noise	1.486
Parameter of variation of pixel sensitivity	2.679×10^{-3}
Parameter of Salt noise frequency	0
Parameter of pepper noise frequency	0

Table 5 Results of intensity average of subtraction image

	Average
Real image (F=8) & Input image	70.6
Real image (F=8) & Output image (F=8)	43.8
Real image (F=16) & Input image	18.6
Real image (F=16) & Output image (F=16)	19.0

きの中心部の拡大図である。図 14 より、人物の動きのブレ、人物の上半身の飽和具合、建物の歪みなどが再現されていることが分かる。また、図 15 より、F 値が 16 では人物の上半身は飽和することなく再現されている。

図 16 に各画像のヒストグラムを示す。入力画像に比べて、出力画像の方がどちらの場合も実画像に近い傾向が見て取れる。F 値が 8 と 16 との輝度値の差が、出力画像と比べて実画像の方が小さいが、本来はカメラのガンマ値が 1 であるので輝度値は 1/4 となるはずであるので、実際のカメラの F 値が正確ではないことが原因であり出力画像の傾向は妥当であると考えられる。

また、実画像と出力画像との類似度を、各画素の差の絶対値の平均により評価した。表 5 に結果を示す。F 値が 8 の場合では入力画像より出力画像の方が差が小さく、類似度が大きくなっていることが分かる。一方、F 値が 16 の場合では、値は変わらないが、いずれの場合も値は小さい。

この例では、人物モデルや背景の作り込みが必ずしも正確ではなく、以上の比較で類似性を十分定量的には言えないが、ある程度の有効性は示せていると考える。

6. 結 言

本研究では、カメラ特性を再現するカメラシミュレータの構築と、それに併せた簡便なカメラパラメータの取得手法を提案した。カメラシミュレータはモデルの簡略化を図り、簡便で実用的なシミュレータを構築した。パラメータ取得手法では、一

枚のストライプパターンを撮像するだけで収差によるぼけと歪曲収差のパラメータを得る手法を提案した。また、カメラにホワイトバランスキャップ等を被せ多数枚撮像することで周辺減光、ピクセル感度のばらつき、ランダムノイズ、ごま塩ノイズのパラメータを取得する手法を提案した。さらにカメラシミュレータ、パラメータ取得手法双方の評価を行い実用の可能性を示した。

今後の課題としては、パラメータ取得手法の改良と誤差解析、結果画像のさらなる定量的評価などが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) J. Ibanez-Guzman, J. Mousain, S. Cornou, D. Wautier, N. Shimomura, Y. Aragaki, H. Takahashi: "Virtual Environment for the Development of Perception Systems for Active Safety", FISITA (2006).
- 2) 永田信一, "レンズがわかる本", 日本実業出版社, (2006).
- 3) 奥富正敏編, "デジタル画像処理", CG-ARTS 協会, (2006).
- 4) 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳編, "コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望", 新技術コミュニケーションズ, (1999).
- 5) G.E. Healey and R. Kondepudy: "Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation", IEEE Trans. PAMI, **16**, 3, (1994) 267.
- 6) Z. Zhang: "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Trans. PAMI, **22**, 11, (2000) 1330.
- 7) 奥村文洋, 神原誠之, 横矢直和: "焦点外れによるぼけとモーションブラーの推定に基づく拡張現実感における光学的整合性の実現", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2006)講演論文集, (2006) 255.
- 8) 岡留直人, 新垣洋平, 梅田和昇, 下村倫子, 高橋宏: "カメラ特性をシミュレートする Camera Defects Model の構築", 動的画像処理実利用化ワークショップ(DIA2007)講演論文集, (2007) 55.