

ズームレンズの光学的ひずみの解析と補正——可変円筒モデルを用いた口径蝕現象の解析と画像周辺部明度低下の補正——

天野 晃[†] 浅田 尚紀[†] 馬場 雅志[†]

Photometric Calibration of Zoom Lens Systems: Analysis and Correction of Vignetting Distortion by the Variable Cylinder Model

Akira AMANO[†], Naoki ASADA[†], and Masashi BABA[†]

あらまし カメラキャリブレーションでは、各種カメラパラメータの決定と共に幾何学および光学的ひずみの補正が重要である。本論文では、ズームレンズの光学的ひずみである画像周辺部の明度低下現象について解析を行い、その補正法を提案する。まず、単一レンズの画像生成過程で生じる $\cos^4 \theta$ 現象による明度低下が主に広角レンズで問題となるのに対して、複数枚のレンズが構成する筒状の光路で生じる口径蝕現象による明度低下が主に望遠レンズで問題となることを明らかにする。次に、口径蝕現象を解析するために単一レンズの前面に可変円筒モデルを付加したカメラモデルを提案する。円筒長、入口半径、出口半径の三つのパラメータをもつ可変円筒モデルを用いることによって、出口半径が大きく（絞りを開き）入口半径が小さいまたは円筒長が長い（ズームを望遠にする）ほど画像周辺部に大きな明度低下を生じるという口径蝕現象を導くことができる。一様白色シーンを撮影した画像から求めたモデルパラメータを用いて実画像の明度低下の補正を行い、本モデルの妥当性と光学的ひずみ補正の有効性を示す。

キーワード カメラキャリブレーション、ズームレンズ、口径蝕、光学的ひずみ、カメラモデル

1. ま え が き

広角から望遠まで自由に視野範囲（画角）を設定することができるズームレンズは、シーンの状況や解析目的に応じて柔軟に動作するビジョンシステムを実現するための重要な構成要素である。例えば、「ズームレンズを広角側に設定して広視野の画像を撮影し、シーン中に存在する対象物のおおよその位置を検出する。次に、ズームレンズを望遠側に設定して高分解能の画像を撮影し、対象物の詳細な解析を行う」といった利用が考えられる。また、ズームレンズはズームと共に絞りとフォーカスを制御することができるので、レンズパラメータを連続的に変化させて撮影した複数枚の画像からシーンの多様な情報を高精度に獲得する多重画像解析 [1]~[3] を一つのビジョンシステムで実現することが可能である。

このように柔軟性に富み利用価値の高いズームレン

ズであるが、さまざまなレンズパラメータ設定で撮影した画像からシーンの情報を復元するには、ズームレンズのキャリブレーションを行う必要がある。従来からコンピュータビジョンの分野、特に physics-based vision では、画像生成過程のモデル化とセンサのひずみ補正の観点からカメラモデルとキャリブレーションに関する議論が数多くなされてきた [4]~[6]。しかし、ズームレンズは多数枚のレンズを組み合わせて複雑な光学系を構成しているため、そのモデル化やキャリブレーションは容易ではないと考えられている。確かに、固定焦点距離のレンズに比べてズームレンズは光学的に複雑なひずみ特性をもつことが知られているが、ズームレンズの特徴を生かした柔軟なビジョンシステムを実現するには、解析目的に応じたモデル化とキャリブレーション手法を確立することが重要である。

従来のカメラキャリブレーションの研究では、世界座標に対するカメラの位置（平行移動ベクトル）と向き（回転行列）、そして各種のカメラパラメータ（中心座標、焦点距離、幾何学的ひずみ係数）を高精度に求めることが主に議論されてきた [7]。最近報告さ

[†] 広島市立大学情報科学部知能情報システム工学科, 広島市 Dept. of Intelligent Systems, Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University, Hiroshima-shi, 731-31 Japan

れたズームレンズのキャリブレーションにおいても、同様の観点から hand-eye calibration が議論されている [8]。しかし、多くの画像解析アルゴリズムが画像に含まれる幾何学的情報と光学的情報に基づいて処理を行うことを考えると、幾何学的ひずみの補正と同時に光学的ひずみの補正もキャリブレーションの重要な課題である。

レンズを用いた撮像系では、輝度が一樣なシーンを撮影しても画像中心から離れるに従って明度が低下することが知られている。この原因として、単一レンズの画像生成過程で生じる $\cos^4 \theta$ 現象と、複数枚のレンズが筒状の光路を構成することで生じる口径蝕現象がある [9]。このような現象によって生じる画像周辺部の明度低下は、しきい値処理はもちろん shape from shading など明度分布に基づいて解析を行う場合に大きな誤差を生じる原因となる。現実のレンズでは、主に広角レンズで問題となる $\cos^4 \theta$ 現象を光学的に補正する工夫がなされている [10] が、主に望遠レンズで問題となる口径蝕現象はそのような補正がなされていないため、画像中央に比べて周辺部では 20% 以上の明度低下が生じることがある。このように口径蝕による画像周辺部の明度低下はズームレンズ特有の光学的ひずみであるにもかかわらず、ズームレンズのモデル化 [11] や特性解析 [12] の研究においてもほとんど議論されていないのが現状である。

本論文では、このような口径蝕現象を可変円筒モデルを用いて解析し、画像周辺部の明度低下特性を明らかにしてそのひずみの補正法を提案する。このモデルは、撮像面と 1 枚の凸レンズで構成されるカメラモデルのレンズ前面に、筒の長さ H と入口半径 R_1 および出口半径 R_2 をパラメータとする可変円筒を付加したもので、レンズの絞り f とズームの変化によってどの程度の口径蝕明度低下が生じるかを推定することができる。論文の後半では、一樣白色シーンをズームレンズで撮影した画像を用いて本モデルのパラメータ推定を行った後、実画像の明度低下の補正を行い、本モデルの妥当性と光学的ひずみ補正の有効性を示す。

2. ズームレンズの光学的ひずみ

2.1 $\cos^4 \theta$ 現象

レンズの光軸に垂直な一樣放射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。この明度低下は、凸レンズと撮像面で構成されるカメラモ

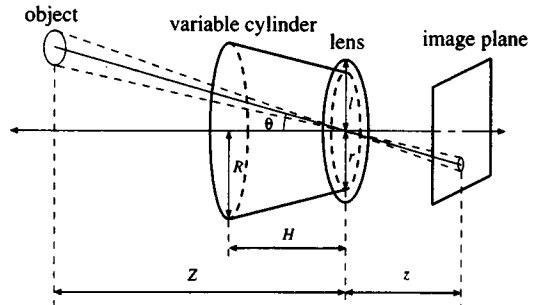


図1 可変円筒モデルを付加したカメラモデル
Fig.1 Camera model with the variable cylinder model.

デルの画像生成過程から幾何光学的に導くことができ、レンズの半径を 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、撮像面上の放射照度 E は以下のように表される [13]。

$$E = \frac{L\pi l^2 \cos^4 \theta}{z^2} \quad (1)$$

式 (1) は、放射輝度 L が一樣のシーンを撮影した画像では、レンズ径 (絞り) の値にかかわらず画像周辺部に行くに従って $\cos^4 \theta$ の率で明度が低下することを表している。 $\cos^4 \theta$ は 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明度低下を生じることになる。

後述の実験に使用したズームレンズの有効水平画角は広角時 (ズーム 9 mm) が 36.1° 、望遠時 (ズーム 144 mm) が 2.64° であるので、式 (1) による明度低下は広角時には 18.3%、望遠時には 0.11% と計算される。このことから $\cos^4 \theta$ 現象による画像周辺部の明度低下は、望遠時にはほとんど無視できることがわかる^(注1)。

2.2 口径蝕現象

口径蝕現象は、複数枚のレンズが円筒状の光路を構成する場合に、光軸に対して傾きをもって入射した光が前面のレンズを通過した後、後面のレンズの縁によってさえぎられることによって生じる。主に望遠レンズで生じるこの口径蝕現象を解析するために、凸レンズの前面に可変円筒を付加したカメラモデル (図 1) を考える。この可変円筒モデルは入口半径 R_1 、出口半

(注 1) : 実験に使用したズームレンズでは θ が大きくなると開口効率が 100% を超えるように設計されているので、 $\cos^4 \theta$ 現象による明度低下は広角時でさえ無視できる程度であった。

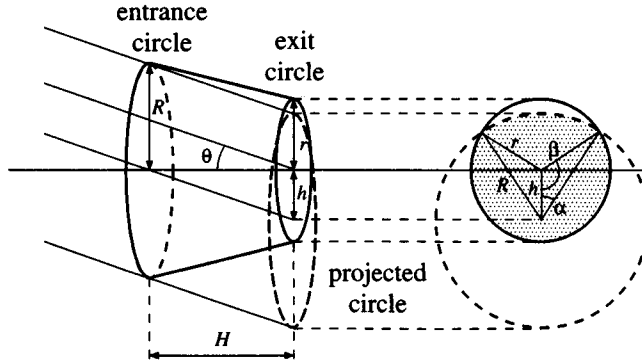


図2 可変円筒モデルによる口径蝕現象の解析
Fig.2 Effective opening area of the variable cylinder.

径 \$r (< R)\$, 円筒長 \$H\$ の三つのパラメータによって記述する。なお、円筒長 \$H\$ に対してレンズから物体までの距離 \$Z\$ は十分大きいと考えることができるので、可変円筒内を通過する光線は平行光として以下の議論を行う。

入射光線がレンズの光軸となす角度が \$\theta\$ のとき、入口円を光線方向に沿って出口円に投影した投影円と出口円との重なり部分の面積を \$A\$ とする (図2の斜線部分)。この面積 \$A\$ を求めることによって、入口円を通過した光のうち出口円を通過する光量を計算することができる。図中で定義した角度 \$\alpha\$ と \$\beta\$,

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{R^2 - r^2 + h^2}{2Rh}$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{r^2 - R^2 + h^2}{2rh}$$

を用いて面積 \$A\$ は次のように表される。

$$A = R^2(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) + r^2(\beta - \sin \beta \cos \beta) \tag{2}$$

但し、\$h = H \tan \theta\$ であり、\$A\$ は \$\theta\$ の関数である。\$A\$ をレンズの最大開口面積 \$\pi l^2\$ で正規化することによって、口径蝕現象による明度低下関数 \$B\$ が得られる。

$$B = \frac{A}{\pi l^2} \tag{3}$$

図2において投影円が出口円全体を含む \$\theta\$ の範囲内では口径蝕現象は生じない。このような \$\theta\$ の範囲は

$$|\theta| \leq \tan^{-1} \frac{R-r}{H} \tag{4}$$

と表され、式(3)において明度低下を生じない入射角度範囲 (画像中央部の明度平坦部分) に相当する。式

(4)から、円筒長 \$H\$ が長くなると明度が平坦となる \$\theta\$ の範囲は狭くなることがわかる。口径蝕現象による明度低下が生じる最小の \$\theta\$ は、レンズの中心から見た有効画角 (\$2 \tan^{-1} R/H\$) と \$r\$ の関係によって決まるので、円筒長 \$H\$ の代わりに入口半径 \$R\$ を変化させても同様の口径蝕現象が生じる。すなわち、\$R\$ を小さくするほど口径蝕現象が強く現れることになる。これらの \$H\$ および \$R\$ の変化はズームレンズのズームの変化に相当すると考えられ、画角が小さくなる (ズームを望遠にする) ほど口径蝕現象が強く現れることになる。一方、絞りの効果をもつ出口半径 \$r\$ については、式(4)から \$r\$ が大きく図3に示すようになるほど口径蝕現象が強く現れることがわかる。なお、\$r \to 0\$ としたピンホールカメラモデルでは口径蝕現象は生じない。以上のことから、ズームレンズではズームを望遠にするほど、そして絞りを開くほど口径蝕現象が顕著に現れることがわかる。なお、可変円筒モデルの三つのパラメータ (\$R, H, r\$) の幾何学的な関係から明らかなように、\$R : H : r\$ の比の値が同じパラメータの組は同一の口径蝕現象を表す。

以上、ズームと絞りの変化に対する口径蝕現象と \$\cos^4 \theta\$ 現象の関係を整理すると、\$\cos^4 \theta\$ 現象は絞りに関係なくズームが広角になるほど明度低下が顕著になり、口径蝕現象は絞りが開くほどそしてズームが望遠になるほど明度低下が顕著になる (図3)。

3. 実験

可変円筒モデルの妥当性を検証するために実験を行った。実験は室内環境下で、CCDカメラ (SONY XC-007) とズームレンズ (FUJINON A16×9BRM-

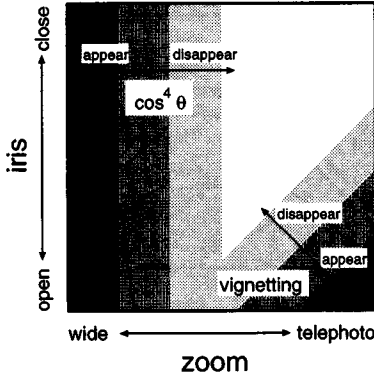


図3 ズームと絞りの変化に対する口径蝕現象と $\cos^4 \theta$ 現象の変化
 Fig.3 Vignetting and $\cos^4 \theta$ distortions with respect to zoom and iris parameters.

28) を使用した。レンズの光学的特性を表 1 に示す。実験では、開放 F 値がズームによって変化しない、ズーム 116 mm 以下の範囲を使用した。

放射輝度一様の白色シーンを撮影した画像を得るために、ズームレンズの前面に白色アクリル板を置き、拡散光がレンズに入射するようにして画像を取得した。入射光が十分に拡散されていることを確認するために、フォーカスを変化させて撮影した複数枚の画像を比較した。いずれの画像も画像中心部の明度分布が平坦になり、入射光が白色アクリル板によって十分に拡散されていることを確認した。なお、以下のモデルパラメータを求めるための実験ではフォーカスによる画角変化の影響を避けるため、フォーカスは無限大に固定して撮影を行った。

また、画像撮影時の絞りの値は画像中心の明度値の比率から決定した。すなわち、絞り開放 (1.8) 時の画像中心明度値に対して、ある絞りで撮影した画像中心明度値の比率が ρ であるとき、撮影時の絞りは $1.8/\sqrt{\rho}$ として求めた。一方、画像撮影時のズームの値は水平画角から決定した。すなわち、あるズーム値に設定したときの水平画角が θ であるとき、ズームを望遠端 (144 mm) に設定したときの水平画角 2.64° を用いて、ズーム値は $144 \tan(1.32^\circ) / \tan(\theta/2)$ として求めた。

3.1 絞りの変化

ズームを 116 mm、フォーカスを ∞ として絞りを 1.8 から 2.2 の間で変化させて白色シーンを撮影した画像中央水平線上の明度プロファイルを図 4 (a) に示す。

表 1 実験に使用したズームレンズの光学的特性
 Table 1 Optical characteristics of the zoom lens used in our experiment.

zoom	9 mm - 144 mm
iris	1.8 - close (9 mm - 116 mm) 2.3 - close (144 mm)
focus	0.9 m - ∞

式 (3) を用いて 2 乗誤差が最小になる出口半径 r を求めて描いた明度プロファイルを同図 (b) に示す。なお、入口半径は $R=1.0$ とし円筒長 H_{iris} は 2 乗誤差が最小になる値 14.9 を使用した。この図から、絞りの変化に対する画像周辺部の明度低下は本モデルの出口半径の変化として記述できることがわかる。

図 6 に絞り (iris) と出口半径 r の関係を示す。図から、絞りの変化に対して出口半径は線形に変化していることがわかる。最小 2 乗法によって得られた直線 (図中の実線) の式は

$$r(\text{iris}) = -0.540 \text{ iris} + 1.891 \tag{5}$$

と表され、相関係数は -0.995 であった。ズームを 92.9 mm に設定して同様の実験をした結果、絞りと出口半径の関係は式 (5) とほぼ平行な直線 (図 6 の点線) で表せることがわかった。

3.2 ズームの変化

絞りを 1.831、フォーカスを ∞ として、ズームを 73 mm から 116 mm の間で変化させて撮影した画像中央水平線上の明度プロファイルを図 5 (a) に示す。式 (3) を用いて 2 乗誤差が最小になる入口半径 R を求めて描いた明度プロファイルを同図 (b) に示す。なお、出口半径は $r=1.0$ とし円筒長 H_{zoom} は 2 乗誤差が最小になる値 16.56 を使用した。この図から、ズームの変化に対する画像周辺部の明度低下は本モデルの入口半径の変化として記述できることがわかる。

図 7 にズーム (zoom) と入口半径 R の関係を示す。図から、ズームの変化に対して入口半径は線形に変化していることがわかる。最小 2 乗法によって得られた直線 (図中の実線) の式は

$$R(\text{zoom}) = -0.0123 \text{ zoom} + 2.522 \tag{6}$$

と表され、相関係数は -0.994 であった。絞りを 2.086 に設定して同様の実験をした結果、ズームと入口半径の関係は式 (6) とほぼ平行な直線 (図 7 の破線) で表せることがわかった。

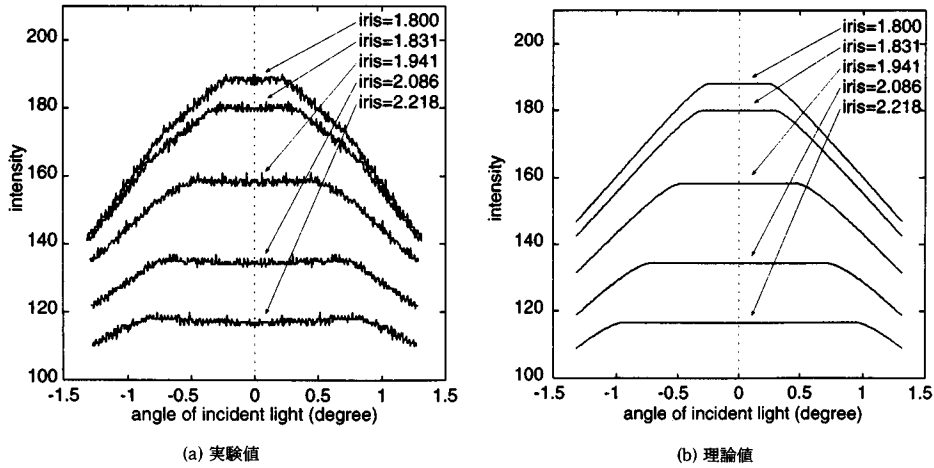


図4 絞りの変化による画像周辺部明度低下現象
 Fig. 4 Intensity profiles obtained from experimental results by varying iris setting (left), and from theoretical model by estimating r (right).

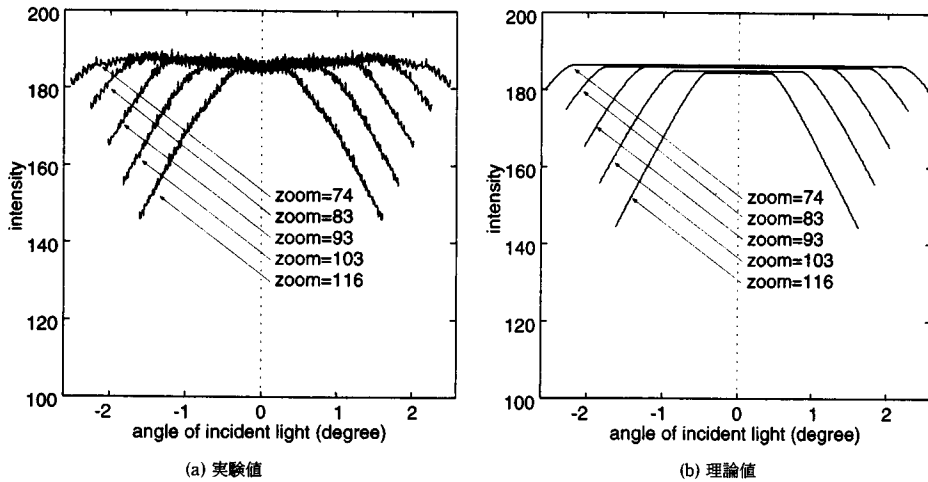


図5 ズームの変化による画像周辺部明度低下現象
 Fig. 5 Intensity profiles obtained from experimental results by varying zoom setting (left), and from theoretical model by estimating R (right).

3.3 画像周辺部の明度低下の補正

以上のことから、絞りの変化に対する出口半径の変化は $(R, H, r) = (1.0, H_{\text{iris}}, r(\text{iris}))$ と記述でき、ズームの変化に対する入口半径の変化は $(R(\text{zoom}), H_{\text{zoom}}, 1.0)$ と記述できることがわかった。先に述べたように、本モデルでは三つのパラメータ (R, H, r) を定数倍しても同一の明度低下曲線が得られる。そこで、円筒長を $H=1.0$ に正規化して R と

r の変化を記述すると、

$$(R, H, r) = \left(\frac{R(\text{zoom})}{H_{\text{zoom}}}, 1.0, \frac{r(\text{iris})}{H_{\text{iris}}} \right) \quad (7)$$

が得られる。 R と r の変化が式 (7) で表せることを、実験で設定した絞りとズームの各種組合せ (図 8) において確認した。

ここで、口径蝕によって生じる画像周辺部の明度低

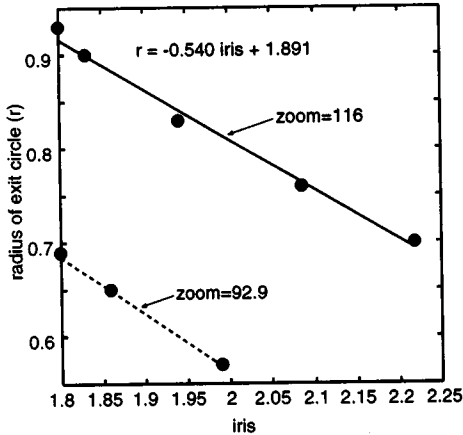


図6 絞りの変化に対する出口径の変化
Fig.6 Regression lines of r as a function of iris.

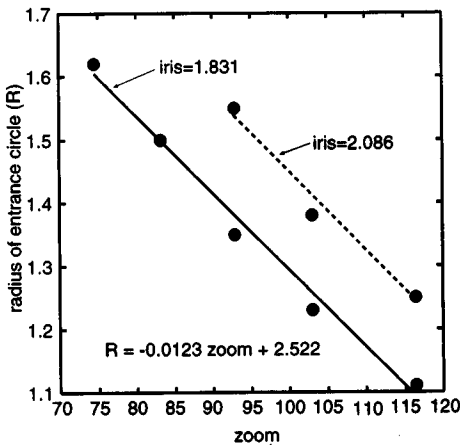


図7 ズームの変化に対する入口径の変化
Fig.7 Regression lines of R as a function of zoom.

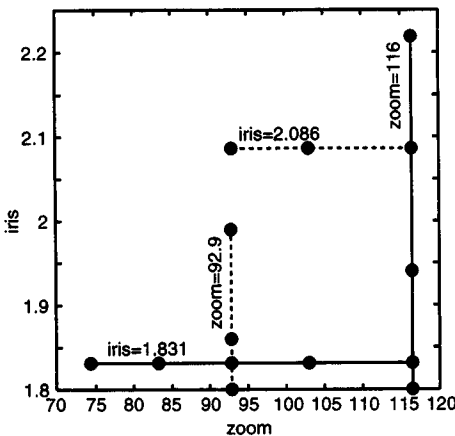


図8 絞りとズームの設定
Fig.8 Experimental setting pairs of zoom and iris parameters.

下の補正法を整理すると以下ようになる。

1. 式(7)を用いて、ズームレンズの絞り $iris$ とズーム $zoom$ の値から可変円筒モデルのパラメータ (R, H, r) を求める。

2. (R, H, r) を式(3)に代入して明度低下プロファイルを求める。

3. 2で求めた明度低下プロファイルを用いて画像の明度ひずみを補正する。

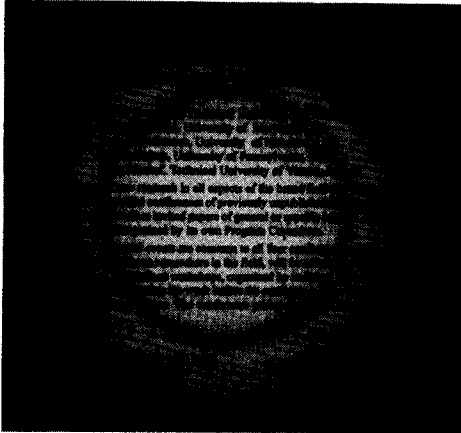
本モデルの妥当性と明度補正の有効性を検証するために実画像を用いて実験を行った。ほぼ均一輝度となるように照明したポスターをズーム 116 mm, 絞り 1.83, 被写体までの距離約 3.5 m の条件で撮影した。図 9(a) に撮影した画像の明度等高線を示す。明度等高線が年輪状の同心円となって現れ、口径蝕現象による明度低下が明度中心を中心として放射状に広がっていることがわかる。撮影時のレンズパラメータから求めた可変円筒モデルのパラメータ $(R, H, r) = (0.0661, 1.0, 0.0606)$ を用いて明度補正をした画像の明度等高線を同図 (b) に示す。本手法により口径蝕現象による明度ひずみがほぼ解消できていることがわかる。この画像に対して文字領域を抽出するしきい値処理を考えると、図 9(a) では画像周辺部の明度低下に応じてしきい値を段階的に変化させる必要があるが、同図 (b) では画像全体に対して単一のしきい値を設定することが可能である。

次に同じ設定のズームレンズで円柱物体を撮影した。図 10(a) に撮影した画像の明度等高線を示す。円柱側面に年輪状の明度等高線が生じ、この明度分布に基づいて 3次元形状を復元すると中央部が凸状にひずんだ円柱が得られることになる。口径蝕現象による明度低下を補正した画像の明度等高線を図 10(b) に示す。円柱側面の明度分布がほぼ補正された明度等高線が得られている。なお、補正後の画像においても円柱側面の明度等高線に多少のひずみがあるが、これは照明が理想的な平行光線ではないことによる明度分布の不均一さが原因であることを確認している。

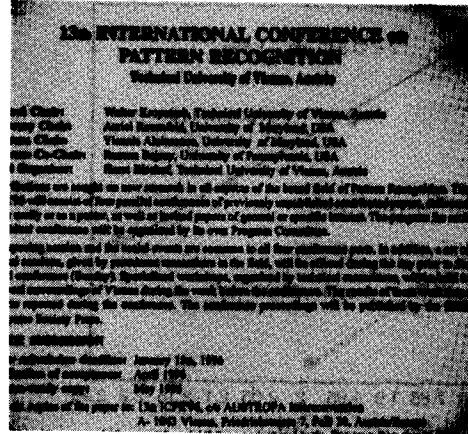
このようにセンサのひずみが原因でシーンの情報が誤って観測され、そのために画像処理や画像解析が困難になることを考えると、適切なカメラモデルを設定してキャリブレーションを行うことの意義は大きいと言える。

4. むすび

しきい値処理や Shape from Shading のように大域



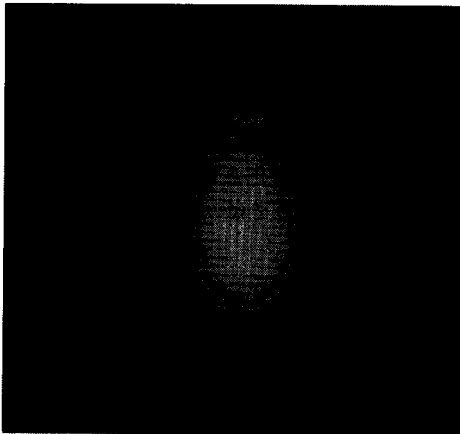
(a) 口径蝕現象による明度低下が生じた画像



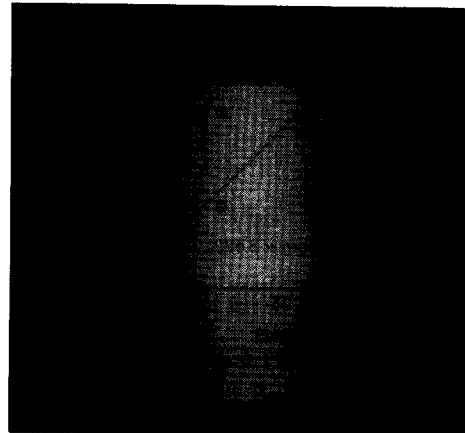
(b) 明度低下を補正した画像

図9 明度等高線画像 (ポスター)

Fig.9 Isointensity contours of a poster image deteriorated by vignetting (left) and its corrected image (right).



(a) 口径蝕現象による明度低下が生じた画像



(b) 明度低下を補正した画像

図10 明度等高線画像 (円柱)

Fig.10 Isointensity contours of a cylinder image deteriorated by vignetting (left) and its corrected image (right).

的な明度分布に基づいて画像解析を行う場合には、センサによって生じる光学的ひずみを可能な限り排除する必要がある。本論文では、ズームレンズで生じる口径蝕現象を解析するために可変円筒モデルを提案し、画像周辺部の明度低下を補正する手法を示した。そして、実験により本モデルの妥当性と明度補正の有効性を確認した。本手法では、レンズパラメータ (絞りとズーム) と可変円筒モデルのモデルパラメータ (出口

半径と入口半径) の関係を求めているので、撮影時のレンズパラメータ設定値から口径蝕現象を推定し画像周辺部の明度低下を補正することが可能となっている。単一の画像を用いた画像解析はもちろん、絞り、フォーカス、ズームを変化して得られる多重画像を解析する場合には、本手法を適用して得られる明度ひずみのない画像を解析することにより、従来よりも更に高精度な結果が得られることが期待できる。今後は、ズーム

レンズの広角側を含めたモデル化とキャリブレーション法について検討を加える予定である。

謝辞 実験で使用したズームレンズの資料および実験方法に関する有益な助言を頂いた富士写真光機(株)光学設計部の吉川和雄氏に謝意を表す。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号08680410)および広島市立大学特定研究(A419)の援助を受けて行った。

文 献

- [1] 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊, “多重絞りカラー画像の解析,” 情報学論, vol.32, no.10, pp.1338-1348, Oct. 1991.
- [2] 浅田尚紀, 藤原久永, 松山隆司, “多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測,” 信学論(D-II), vol.J77-D-II, no.6, pp.1048-1058, June 1994.
- [3] J. Ma and S.I. Olsen, “Depth from zooming,” Journal of Optical Society of America, vol.7, no.10, pp.1883-1890, 1990.
- [4] R.Y. Tsai, “An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision,” Comput. Vision and Pattern Recog., pp.364-374, 1986.
- [5] J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou, “Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell., vol.14, no.10, pp.965-980, 1992.
- [6] G.Q. Wei and S.D. Ma, “Implicit and explicit camera calibration: Theory and experiments,” IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell., vol.16, no.5, pp.469-480, 1994.
- [7] 出口光一郎, “カメラキャリブレーション手法の最近の動向,” 情報処理学会研究会報告CV, vol.82-1, pp.1-8, 1993.
- [8] K. Tarabanis, R.Y. Tsai, and D.S. Goodman, “Calibration of a computer controlled robotic vision sensor with a zoom lens,” Comput. Vision, Graphics and Image Processing: Image Understanding, vol.59, no.2, pp.226-241, 1994.
- [9] R. Kingslake, “Optical system design,” Academic Press, 1983.
- [10] 高野栄一, “レンズデザインガイド,” 写真工業出版社, 1993.
- [11] C. Kolb, D. Mitchell, and P. Hanrahan, “A realistic camera model for computer graphics,” SIGGRAPH'95, pp.317-324, 1995.
- [12] R.G. Willson and S.A. Shafer, “What is the center of the image?,” CMU Technical Report, CMU-CS-93-122, 1993.
- [13] B.K.P. Horn, “Robot Vision,” MIT Press, 1986.

(平成8年10月7日受付, 9年1月17日再受付)



天野 晃 (正員)

昭63京大・工・電気卒。平2同大大学院修士課程了。平5同博士課程単位取得退学。同年京大工学部助手。平7広島市立大学助教授。工博。画像処理における正則化に関する研究に従事。情報処理学会会員。



浅田 尚紀 (正員)

昭54京大・工・電気卒。昭56同大大学院修士課程了。昭59同博士課程単位取得退学。同年福井医科大学助手。昭62京大工学部助手。平2岡山大学工学部助教授。平7広島市立大学教授。工博。コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックス, 人工知能, 医用画像理解の研究に従事。IEEE CS, ACM, 情報処理学会, 人工知能学会, 医用画像工学会各会員



馬場 雅志

平2広島大・工・電気卒。平4同大大学院修士課程了。同年トヨタ自動車(株)入社。平7広島市立大学助手。CG, CVにおけるカメラモデルの研究に従事。情報処理学会会員。