

薄凸ズームレンズモデルを用いた多重ズームぼけ画像からの距離計測

馬場 雅志[†] 小田 愛[†] 浅田 尚紀[†] 山下 英生^{††}

Depth from Defocus by Zooming Using Thin Lens Based Zoom Lens Model

Masashi BABA[†], Ai ODA[†], Naoki ASADA[†], and Hideo YAMASHITA^{††}

あらまし 従来の Depth from Zoom では、ピンホールカメラモデルを使用しズーム変化によるピンホール位置の前後移動を利用して距離計測を行っていた。本論文では、ぼけの変化から距離を計測する Depth from Focus/Iris と同様に、ズーム変化によるぼけ変化から距離を求める方法について述べる。まず、ズームレンズのズーム、フォーカス、アイリスの関係を統一的に記述する薄凸ズームレンズモデルについて述べる。このカメラモデルでは、有効焦点距離と有効開口径がズーム、フォーカス、アイリスの関数となり、これらの関係からぼけモデルを導く。次に、エッジのぼけ幅から距離を計測する方法を述べ、実画像を用いた実験により多重ズームぼけ画像から安定に距離が計測できることを示す。最後に、本手法によって得られた距離情報を画像合成に適用した例を示す。

キーワード ズームレンズ, 距離計測, カメラモデル, 薄凸レンズ, 多重ズーム画像

1. ま え が き

コンピュータビジョン (CV) では、奥行情報がシーンの理解や物体認識を行うための重要な手掛りとなる。一方、コンピュータグラフィックス (CG) でも、実写画像と仮想物体の合成や実物体のモデル化において、シーンの奥行情報が重要である。

従来から CV の分野では、フォーカスやアイリス (絞り) の変化に伴う画像のぼけ変化から距離を求める Depth from Focus [1]~[3] あるいは Depth from Iris [4]~[7] の研究が数多く行われてきた。一方、ズームレンズのズーム変化を利用した Depth from Zoom [8], [9] の研究も行われている。しかし、これはぼけを生じない理想モデルであるピンホールカメラモデルを用いて、ズーム変化によるピンホール位置の前後移動の運動視差を利用したもので、凸レンズモデルを用いたぼけ解析から距離を求める Depth from Focus/Iris とは本質的に異なる手法である。

実際の撮影においてピンホールカメラを用いることはなく、距離の異なる物体が複数存在するシーンをズームレンズで撮影すると、画像中には必ずぼけが観測される。そしてフォーカスやアイリスによってぼけが変化すると同様に、ズームによってもぼけの程度が変化する。このことは、Depth from Focus/Iris と同様に、ズームによるぼけ変化からシーンの奥行情報が得られることを示唆している。

以下、本論文では、まずズーム、フォーカス、アイリスの関係を統一的に記述する薄凸ズームレンズモデルを用いてズーム変化とぼけ変化の関係を解析する。次に、ぼけモデルに基づく距離計測の方法を述べ、任意のズーム、フォーカス、アイリス設定で距離計測が可能であることを示す [10]。更に、連続的にズームを変化させた多重ズーム画像を利用することによって、距離計測が安定に行えることを実画像を用いて検証する。最後に、多重ズーム画像から求めた距離情報を用いた画像合成の例を示す。

2. 薄凸ズームレンズモデル

2.1 ズームレンズの性質

ズームによるぼけ変化の様子を図 1 に示す。(a) のシーンを対象にズームを望遠側に設定して撮影すると (b) が得られる。一方、(a) の画像の中央部を補間処理で拡大すると (c) が得られる。ズームによる拡大と画

[†] 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, 731-3194 Japan

^{††} 広島大学大学院工学研究科情報工学専攻, 東広島市
Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashi-hiroshima-shi, 739-8527 Japan

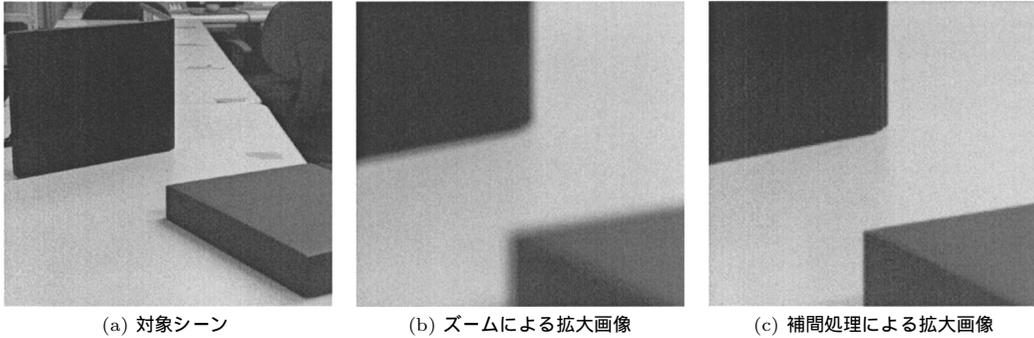


図1 ズームによるぼけ変化
Fig. 1 Blurring effect by zooming.

素補間による拡大ではぼけの程度が異なることから、ズーム変化は単に画像の拡大だけでなくぼけの程度にも影響していることがわかる。

このような現象は、ズームによってレンズの焦点距離が変化し、その結果画像が拡大縮小するという従来のピンホールカメラモデルに基づくズームレンズモデルでは解析不可能であり、ズームを凸レンズモデルのフォーカスやアイリスと関係したパラメータとして記述する新たなカメラモデルの必要性を示している。

そこで本研究では、ズーム、フォーカス、アイリスの関係を統一的に記述するカメラモデルを用いてぼけモデルを導く。このカメラモデルでは、ズームレンズのズーム、フォーカス、アイリスの性質を、有効焦点距離（レンズ中心と撮像面間の距離）と有効開口径（レンズの開口径）で表現する。すなわち、ズームの「画角（倍率）が変化する」「ピントがずれない」性質と、フォーカスの「ピントが変化する」「画角が変化する」性質を有効焦点距離の変化として記述する。一方、アイリスの「明度が変化する」「被写界深度が変化する」性質と、ズームとフォーカスの「明度が変化するしない^(注1)」性質を有効開口径の変化として記述する。

2.2 薄凸ズームレンズモデルの設計

一般に、ズームレンズのように複雑な光学的特性をもつレンズのモデル化には厚凸レンズモデルが用いられる[12]。しかし、本研究で注目している画像のぼけは、レンズと撮像面の関係によって生じる現象であり、薄凸レンズモデルの内部パラメータ（上述の有効焦点距離と有効開口径を含む）を用いて記述することができる。カメラモデルは注目する光学現象が記述できれば、画像の解析や合成のためにはできるだけ単純なモデルを選択することが望ましい。そこで、本論文では

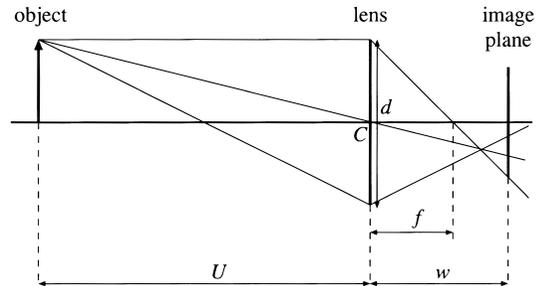


図2 薄凸ズームレンズモデル
Fig. 2 Thin lens based zoom lens model.

ズームレンズの位置・姿勢固定という制限を設けることによって外部パラメータ（世界座標に対する位置ベクトルと回転行列）は扱わないこととし、薄凸レンズモデルを用いてズームレンズモデル（以下、薄凸ズームレンズモデルと呼ぶ）を構成する^(注2)（図2）。

薄凸ズームレンズモデルでは、ズームレンズを制御する実パラメータ、レンズ固有の光学的特性を表すレンズパラメータ、モデルの特性を記述するモデルパラメータの3種類に分類して各種パラメータを記述する。実パラメータ：ズーム制御値 Z 、フォーカス制御値 F 、アイリス制御値 I を用いる（具体的な数値は後述する）

レンズパラメータ：焦点距離 f [mm]、合焦距離

(注1): ズームレンズでは焦点距離に比例して入射瞳径が変化するが、理論上の入射瞳径が実際のレンズ前玉径より大きくなると明度低下が生じる[11]。本論文では、画像の明度が変化するズーム範囲をモデル化の対象とする。

(注2): ズームレンズの位置・姿勢を記述するには世界座標に対するレンズ中心（厚凸レンズモデルの前主点）位置と光軸方向を表す必要がある。ズームレンズのモデル化における厚凸と薄凸の関係については稿を改めて述べる。

U [m], 絞り値 A を用いる.

モデルパラメータ: 有効焦点距離 (レンズと撮像面間の距離) w [mm], レンズの有効開口径 d [mm], 有効絞り値 $B (= w/d)$ を用いる.

これらのパラメータを用いて, ズームレンズモデルが備えるべき性質を整理すると以下のようになる.

- (1) ズーム制御値 Z に対して焦点距離 f が変化する.
- (2) フォーカス制御値 F に対して合焦点距離 U が変化する.
- (3) アイリス制御値 I に対して絞り値 A が変化する.
- (4) ピント調節のため, フォーカス制御値 F に対して有効焦点距離 w が変化する. 更に, 焦点距離 f が変化してもピントがずれないように f の変化に応じて有効焦点距離 w が変化する.
- (5) 絞り値 A に対して有効開口径 d が変化する. 更に, 有効焦点距離 w が変化しても画像の明度が変動しないように (有効絞り値 B が一定になるように), 有効焦点距離 w の変化に応じて有効開口径 d が変化する.

このように薄凸ズームレンズモデルでは, 有効焦点距離 w によってズームとフォーカスの相互関係を記述し, 有効開口径 d によってズーム, フォーカス, アイリスの相互関係を記述している^(注3). 以下, これら二つのモデルパラメータとぼけモデルについて述べる.

2.3 有効焦点距離 w

図 2 において, 合焦時にはレンズの公式から $U^{-1} + w^{-1} = f^{-1}$ が成立し, $w = f + f^2(U - f)^{-1}$ が得られる. この式は, フォーカスが無限遠に合焦したとき ($U \rightarrow \infty$), 有効焦点距離 w はレンズの焦点距離 f と一致し, 合焦点距離が近くなるに従って有効焦点距離 w は増加することを表している. これは, w が焦点距離 f とフォーカス制御値 F の関数となることを示し, 上記の性質 (4) とも合致する. 本研究の目的は, ズームレンズの構造を厳密にモデル化することではなく, ぼけ現象解析のための単純化した実用的なモデルを構成することであり, 実際のパラメータ変化範囲において十分な近似ができればよい. そこで, 無限遠合焦時のフォーカス制御値を $F = 0$ とし, F の増加に対する w の増分を F の多項式で近似することを考える.

$$w(f, F) = f + \sum_{n=1}^N \alpha_n(f) F^n \quad (1)$$

ここで $\alpha_n(f)$ は焦点距離 f の多項式を表し, これによってズームが変化 (焦点距離 f が変化) しても, ピントがずれないように w を調節する機能を記述する.

2.4 有効開口径 d

放射輝度 L の物体表面の微小領域からの光がレンズにより撮像面上の微小領域に結像したときの放射照度 E は, 入射光が光軸となす角を θ とすると,

$$E = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{w} \right)^2 \cos^4 \theta \quad (2)$$

と表される [13]. ここで, w/d は有効絞り値 B を表す.

この式において, ズーム, フォーカスの変化で有効焦点距離 w が変化しても明度が変化しないという性質を満たすには, 有効絞り値 B が一定になるように d が w に比例しなければならないことがわかる (上述の性質 (5)).

2.5 ぼけモデル

フォーカスによるピントのずれ, ズームによる画像の拡大率の変化, そしてアイリスによる被写界深度の変化によって画像上のぼけが変化する. このような複数のパラメータによって変化するぼけの性質を, 薄凸ズームレンズモデルでは次のように表す.

図 3 において, レンズから距離 s の位置にある非合焦点 P の像の画像上のぼけ幅 b は次式で与えられる.

$$b = wd \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right| = \frac{w^2}{B} \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right| \quad (3)$$

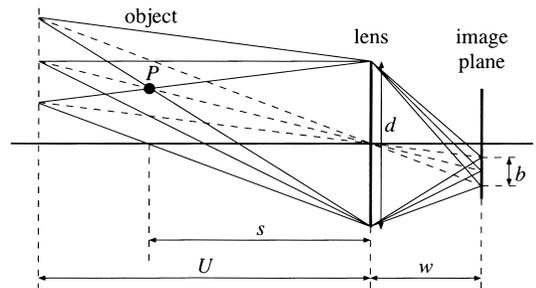


図 3 非合焦点 P のぼけ幅 b
Fig. 3 Width of blur b of a defocused point P .

(注3): 実際のズームレンズでは, ズーム, フォーカス, アイリスは独立に変更でき連動しているわけではない. しかし, 薄凸ズームレンズモデルでは, ズームレンズの光学的性質を簡潔に記述するために, ズーム, フォーカス, アイリスの相互関係 (連動) として有効焦点距離と有効開口径を表現している.

アイリス制御値 I を固定したとき絞り値 A ,そして有効絞り値 B は一定となり,フォーカス制御値 F を固定したとき合焦距離 U は一定となる.したがって,この式は,ぼけ幅 b の変化がズーム制御値 Z によって変化する有効焦点距離 w の 2 乗に比例することを示している.

2.6 ぼけ幅からの距離計測

式 (3) を距離 s について解くと次式が得られる.

$$s = \begin{cases} \frac{wdU}{wd + Ub} & (s < U) \\ \frac{wdU}{wd - Ub} & (s > U) \end{cases} \quad (4)$$

ここで合焦距離 U はフォーカス制御値 F によって決まり,有効焦点距離 w はズーム制御値 Z とフォーカス制御値 F によって決まる.そして,有効開口径 d はアイリス制御値 I と有効焦点距離 w によって決まるので,この式は 1 枚の画像から検出したぼけ幅 b から距離 s が算出可能であることを示している.

一方,ズームを連続的に変化した多重ズーム画像のぼけ幅変化から距離計測を行う方法は次のようになる.まず,式 (3) からぼけ幅 b が有効焦点距離 w の 2 乗に比例するので,その傾き g を求める.

$$g = \frac{1}{B} \left| \frac{1}{s} - \frac{1}{U} \right| \quad (5)$$

この g を用いて距離 s を求めると次式のようになる.

$$s = \begin{cases} \frac{U}{1 + gBU} & (s < U) \\ \frac{U}{1 - gBU} & (s > U) \end{cases} \quad (6)$$

ここで,合焦距離 U と有効絞り値 B はフォーカス制御値 F とアイリス制御値 I によって決まるので, F と I を固定してズーム制御値 Z を変化しながら撮影した多重ズーム画像から g を求めると,距離 s が得られることがわかる.

3. 実験と評価

3.1 カメラキャリブレーション

CCD カメラ SONY XC-007(有効画素数 768×493)と電動ズームレンズ CANON J16×9.5B4RAS を用いて薄凸ズームレンズモデルのキャリブレーションを行った.ズームレンズの光学特性は,焦点距離=9.5~152 [mm],合焦距離= 1.0~∞ [m],開放絞り値 (F ナンバ)=1.8 である.ズーム,フォーカス,アイリスの制

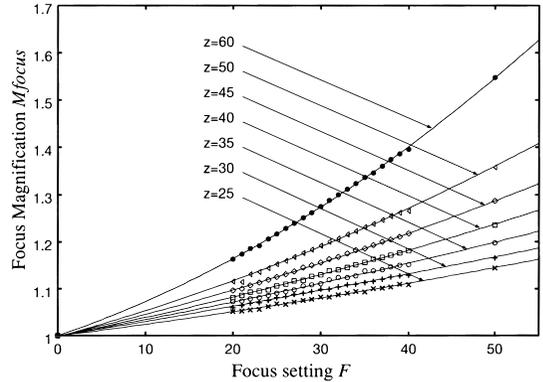


図 4 フォーカス拡大率
Fig. 4 Focus magnification.

御値には,ズームレンズの制御電圧を換算した整数値を用いた.具体的には, $Z=25$ (広角時)~ 75 (望遠時), $F=0$ (無限遠合焦時)~ 50 (最近端合焦点時), $I=25$ (開放時)~ 75 (閉鎖時)とした.また,カメラからの出力は NEXUS 600 で A-D 変換を行い,画像サイズ 512 × 480, RGB それぞれ濃度値 256 段階の画像を得た.

カメラキャリブレーションは以下の手順で行った.

(1) 規則的なパターンを Z, F を変化させて撮影し画像中心座標を決定する.

(2) 撮影画像及びレンズの規格から実パラメータとレンズパラメータの関係 ($f(Z), U(F), A(I)$) を求める.

(3) フォーカスが無限遠合焦時 ($w = f$) を基準とした F に対する画像拡大率 (フォーカス拡大率 $M_{focus} = w/f$) を求め,式 (1) を用いて曲線当てはめを行う (図 4).これによって w の F と f の次数を 2 と決定した.

(4) F 及び Z を変化させたときのステップエッジのぼけ幅^{注 4)}の変化から, w と d の関係を求める.

得られたキャリブレーション結果を表 1 に示す.

3.2 単一距離物体の距離計測

ズームによるぼけ変化から距離計測が可能であること,そして多重ズーム画像を用いた距離計測の安定性を評価するための基礎実験を行った.左半分が黒,右

(注 4): 画像からのぼけ幅計測は,まずおおよそのエッジ位置を手で与え,次にエッジに直交する方向の明度プロファイルを求め,最後にステップエッジのぼけの理論式 (ステップエッジと錯乱円の畳込みによって得られる明度変化関数) を当てはめることによってぼけ幅とエッジ位置を決定した.以下の実験においても同様の方法でぼけ幅を求めた.

表 1 カメラキャリブレーション結果
Table 1 Camera calibration results.

焦点距離	$f(Z) = 4.73 \times 10^{-2} Z^2 - 2.37Z + 4.27 \times 10$
合焦距離	$U(F) = 4.25 \times 10F^{-1} + 5.25 \times 10^{-2}$
絞り値	$A(I) = 1.8\sqrt{2}(1.75 \times 10^{-1}I - 4.39)$
有効焦点距離	$w(f, F) = f + (5.88 \times 10^{-5}f^2 + 2.38 \times 10^{-3}f)F + (1.48 \times 10^{-6}f^2 - 1.62 \times 10^{-5}f)F^2$
有効開口径	$d(w, A) = 6.66 \times 10^{-1}wA^{-1}$

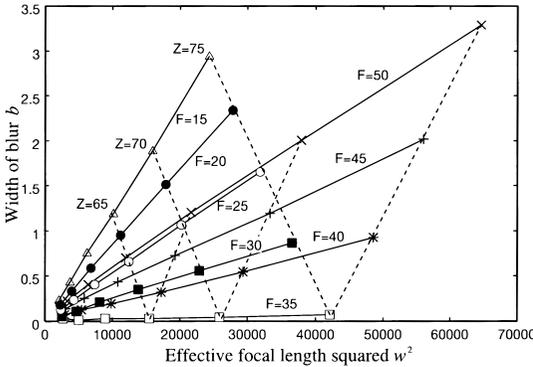


図 5 有効焦点距離の 2 乗 w^2 とぼけ幅 b の関係
Fig. 5 Relationship between effective focal length squared w^2 and width of blur b .

半分が白の直線ステップエッジを描いた平面ターゲットをカメラ前面から 1250 mm の距離に配置し、アイリス 4 段階、フォーカス 8 段階、ズーム 6 段階の計 192 枚の画像からぼけ幅を計測した

ぼけ幅が最も安定に計測できた $I = 35$ のときの有効焦点距離 w の 2 乗 (横軸) とぼけ幅 b (縦軸) の関係を図 5 に示す。実線は、フォーカスを固定したときのズーム変化によるぼけ幅 b を表し、この場合の b が w^2 に比例するという式 (3) の性質を確認することができた。一方、グラフの破線は、ズームを固定したときのフォーカス変化によるぼけ幅 b を表している。この変化は Depth from Focus で用いられる “V” 型となり、V の谷のフォーカス値 $F = 35$ からターゲットまでの距離 $U(35) = 1260 \text{ mm}$ が得られる。

各画像でぼけ幅から式 (4) を用いて距離計測を行った結果を図 6 に破線で示し、多重ズーム画像のぼけ変化 (図 5 の実線の傾き) から式 (6) を用いて距離計測を行った結果を実線で示す。単一画像からの距離計測の結果は平均距離 1236 mm、標準偏差 27.4 mm であり、多重ズーム画像を用いた場合の平均距離は 1233 mm、標準偏差 19.8 mm であった。単一画像も

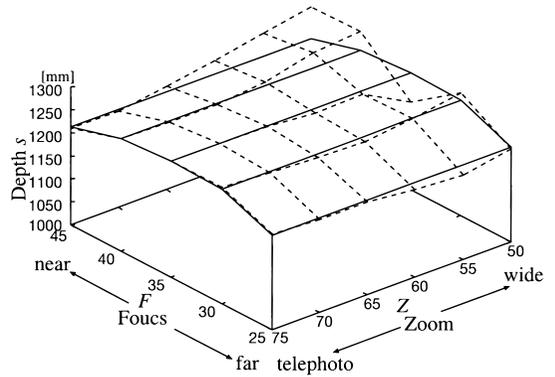


図 6 単一及び多重ズーム画像からの距離計測結果
Fig. 6 Comparison of depth from single and multi-zoom images.

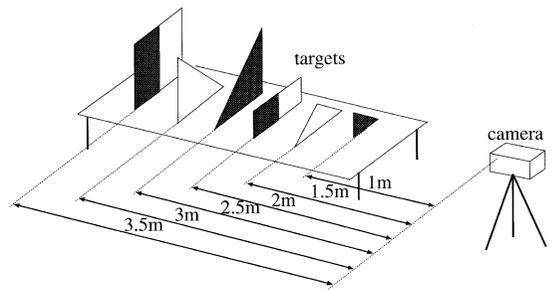


図 7 複数距離物体の配置
Fig. 7 Experimental configuration of multiple depth target.

多重ズーム画像も全体の平均距離は真値 (1250 mm) に対して約 1% の誤差しかなく十分高い精度が得られているが、標準偏差は単一画像の方が大きく不安定であることがわかる。また、単一画像の望遠側は安定しているが、広角側では不安定になる傾向がある。これは、広角側で撮影した画像の空間分解能が低下するためぼけ計測の精度が低下するためと考えられる。これらの結果をまとめると以下ようになる。

- ズームとフォーカスによるぼけ変化の実験結果 (図 5) は、薄凸ズームレンズモデルとぼけモデルから導いた式 (3) とよく合致し、モデルの妥当性と同時に、ズームによるぼけ変化からの距離計測が可能であることを確認した。

- 単一画像より多重ズーム画像を用いた方が距離計測結果が安定する傾向がある。このことは多重画像解析 [14] の有効性を示している。

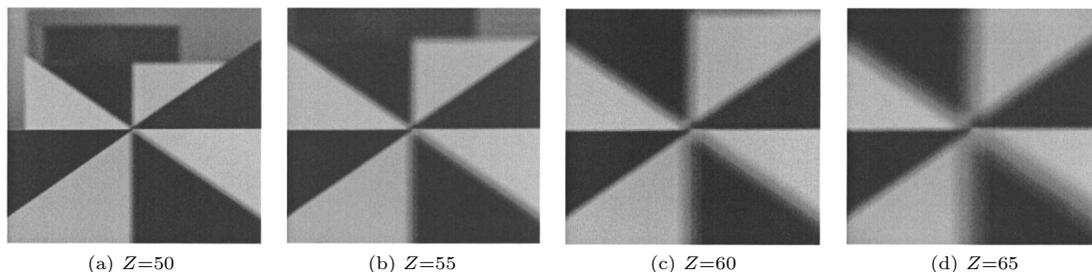


図 8 複数距離物体を撮影した多重ズーム画像系列
Fig. 8 Image sequence of zooming-in of the multiple depth target.

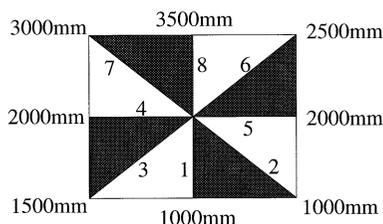


図 9 複数距離物体のエッジ番号
Fig. 9 Frontal view of multiple depth target and edge labels.

3.3 複数距離物体の距離計測

距離の異なる複数の物体が同時に存在するシーンとして、図 7 のように 6 枚の平面ターゲットを 1000 mm から 3500 mm の距離に配置した。アイリス制御値は $I = 35$ に固定し、フォーカス制御値は $F = 15, 20, 25$ の 3 段階、ズーム制御値は $Z = 50, 55, 60, 65$ の 4 段階で撮影を行った。 $F = 20$ のときの多重ズーム画像を図 8 に、エッジ番号を図 9 に示す。

各画像の拡大率に基づいて画素の対応付けを行い、それぞれのエッジに対して多重ズーム画像から距離計測を行った結果を図 10 に示す^(注 5)。図の横軸はカメラから各エッジまでの距離（真値）であり、縦軸はぼけから求めた各エッジまでの推定距離と真値との差（誤差）を示している。図中の矢印が指す黒点は、3 種類のズーム画像系列の各フォーカス制御値 $F = 15, 20, 25$ が表す合焦距離とそのときの誤差を示している。表 2 には、 $F = 20$ のときの各エッジの推定距離の平均値、誤差、標準偏差を示す。図 10 と表 2 からわかることを整理すると以下ようになる。

- いずれのズーム画像系列においても、合焦距離付近では誤差が少なく高精度な距離推定が行える。
- 推定した距離は、合焦距離より手前では実際の

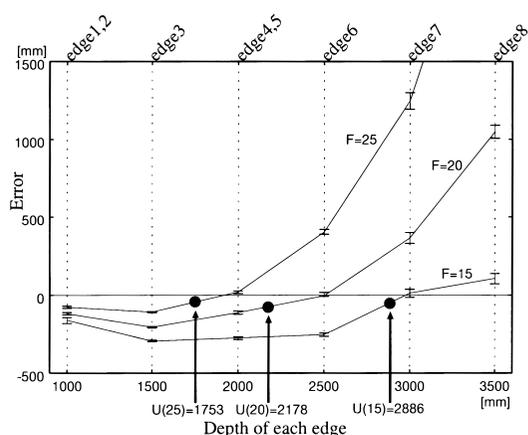


図 10 複数距離の計測結果
Fig. 10 Depth error between different focus settings.

表 2 複数距離計測の精度評価（単位 mm）
Table 2 Accuracy evaluation of multiple depth recovery at $F = 20$.

エッジ	真値	平均値	誤差	標準偏差
1,2	1000	881.4	-118.6	6.7
3	1500	1294.5	-205.5	3.4
4,5	2000	1887.0	-113.0	10.1
6	2500	2496.4	-3.6	12.1
7	3000	3364.4	364.4	33.6
8	3500	4545.9	1045.9	42.4

距離より小さく、合焦距離より遠くでは実際の距離より大きく算出される傾向がある。

- 距離の誤差は、合焦距離より手前では相対的に小さく、距離が遠くなると急速に増大する。標準偏差も距離が遠くなると増加する傾向がある。

(注 5): この実験では、エッジ 8 が平面エッジ、それ以外は遮へいエッジである。この実験環境では、遮へいエッジのぼけは近距離側の平面エッジのぼけと同じ性質になる [15] ので、ぼけから求めた距離は近距離側の平面までの距離を求めていることになる。

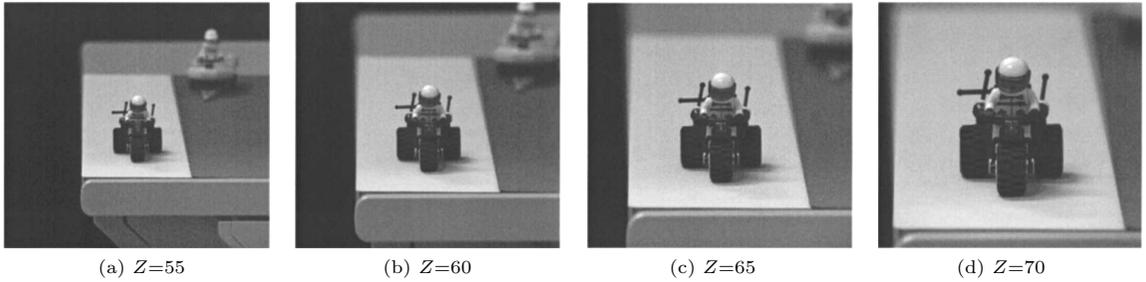


図 11 距離が連続的に変化するシーンの多重ズーム画像
 Fig. 11 Image sequence of zooming-in of a scene including depth varying edges.

合焦距離から大きく離れたり遠距離になると精度や安定性が低下する傾向は、画像のぼけから距離を求める手法 (Depth from Focus/Iris) に共通に見られる現象である。これは、ぼけすぎたエッジや空間分解能の低い画像からは信頼できるぼけ情報が得られないためである。これらの性質を考慮すると、多重ズーム画像からの距離計測手法は、合焦距離前後の距離推定に適していることがわかる。

3.4 連続的に変化する距離の計測

より現実的な状況での本手法の適用可能性を調べるため以下の実験を行った。机の上に模型の三輪車を置き、オートフォーカス、オートアイリスのカメラを想定して、画像中央の物体にピントが合うようにフォーカスを設定し、適正明度にアイリスを固定して、ズームを広角から望遠に変化させた画像系列を得た。このときの実パラメータは、 $I = 35, F = 24, Z = 55, 60, 65, 70$ であり、得られた多重ズーム画像を図 11 に示す。フォーカスは三輪車の前輪に合焦し、フォーカス制御値から求めた合焦距離は $U(24) = 1823$ mm である。模型の下の方形平面の左右の辺は、カメラからの距離が連続的に変化するエッジであり、ぼけも連続的に変化している。そこで、このエッジに沿ったぼけ変化に本手法を適用して距離計測を行った。

図 12 に多重ズーム画像から左右のエッジの距離を求めた結果とそれらの回帰直線を示す。横軸が画像の y 座標 (画像の左上が原点, 下向きが正方向), 縦軸がカメラからの距離を表す。エッジに沿った距離が直線状に変化するという結果はシーン構成と一致し、回帰直線の相関係数が左右とも 0.99 以上であることから、ぼけが連続的に変化する場合にも本手法が有効であり、高精度の距離計測が可能であることが確認できた。

左右エッジの距離情報からカメラと平面の 3 次元位

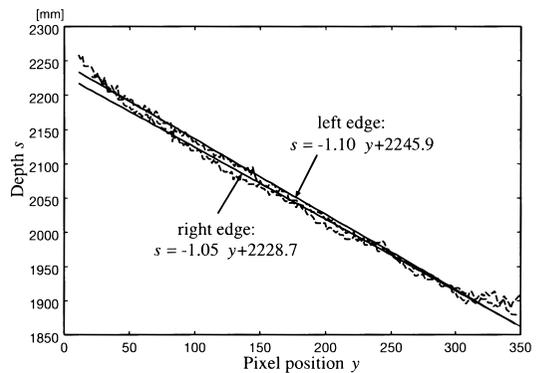


図 12 距離が連続的に変化するエッジの距離計測結果
 Fig. 12 Depth along both sides of the plane.

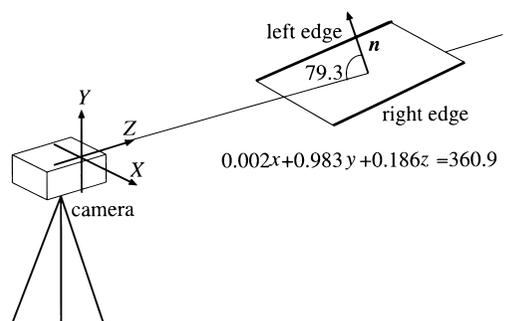


図 13 距離情報から求めたカメラと平面の位置関係
 Fig. 13 Recovered 3D geometry of the plane.

置関係を復元した結果を図 13 に示す。実画像中に含まれる物体の位置姿勢をカメラ中心座標系で記述することができれば、シーン構成に幾何学的に整合した仮想物体を合成することが可能である。実画像 (図 11) 中の平面の周囲に煉瓦ブロックを仮想的に配置した合成画像を図 14 に示す。なお、カメラモデルと平面の

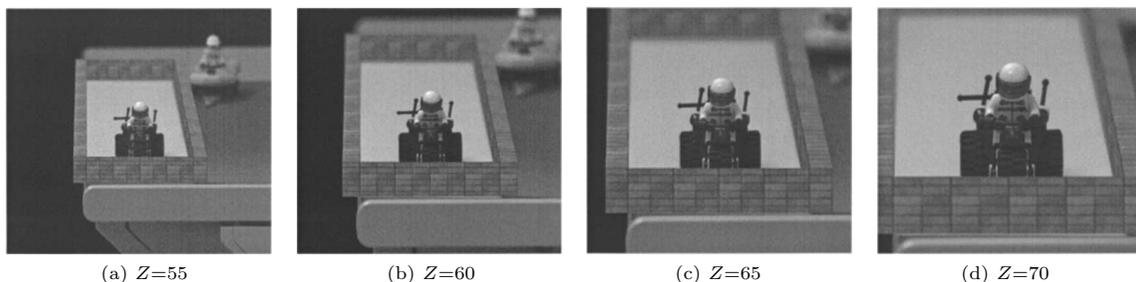


図 14 実画像に仮想煉瓦ブロックを埋め込んだ多重ズーム合成画像
 Fig. 14 Synthesized image sequence made from Fig.11 with virtual bricks around the plane.

3次元情報に基づいて実画像に仮想物体を埋め込んでいるので、煉瓦ブロックには実画像と同等のぼけが付加されている。

4. む す び

本論文は、フォーカスやアイリスと同様にズームにも画像のぼけを制御する効果があることに着目し、ズームによるぼけ変化から距離計測が可能であることを理論的及び実験的に示した。本研究の特徴と今後の課題を整理すると以下ようになる。

4.1 カメラモデル

ズームレンズの性質を整理し、ズーム、フォーカス、アイリスの変化を有効焦点距離と有効開口径の変化として記述する薄凸ズームレンズモデルを構成した。これによって、従来のピンホールカメラモデルでは扱えなかったズームレンズのぼけ現象を解析することが可能となり、距離計測方法を導出することができた。更に、実画像を用いた距離計測と画像合成の実験によって、カメラモデルの検証と評価を行った。その結果、薄凸ズームレンズモデルは位置・姿勢が固定という制約があるものの、ズーム、フォーカス、アイリスによるぼけ変化について画像の解析と生成に十分な記述能力があることがわかった。今後の課題としては、厚凸レンズモデルの適用を検討し、位置・姿勢の記述、距離精度の向上、多様な場面での距離計測の可能性などについて調べる必要がある。

4.2 距離計測

本手法は、複数距離物体の実験で述べたように、フォーカスによって定まる合焦距離前後の距離計測において高い精度が得られるという性質がある。そのため、合焦となる物体までの距離はフォーカス設定から求め、その前後の物体の距離情報に本手法を適用する

ことが期待される。このような状況は、ズームレンズを用いた撮影でしばしば生じる。すなわち、ズームの広角側でシーンを広く観察し、注目する物体を発見した後に、その物体を画像中央にとらえて位置姿勢固定の状態ですズームアップすると、図 11 のような多重ズーム画像を得ることができる。一方、距離計測の精度評価については、基礎実験による定量評価と実シーンをを用いた応用実験を行った。特に、連続的に距離が変化するエッジに対しても本手法が問題なく機能することがわかり、実環境への適用可能性を確認することができた。また、距離計測の精度評価と本手法の応用の観点から画像合成を試みた。その結果、実画像中の物体に対して幾何学的かつ光学的に整合した仮想物体を埋め込んだ高品質な画像が合成可能であることがわかった。今後の課題としては、本手法の実用性を更に高めるためにエッジの検出とぼけ幅の計測を高速かつ高精度に行う方法を開発する必要がある。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C) No.12680357 及び広島市立大学特定研究費 No.0018 の補助を受けた。

文 献

- [1] E. Krotkov, "Focusing," IJCV, vol.1, no.3, pp.223-237, 1987.
- [2] M. Subbrarao, "Parallel depth recovery by changing camera parameters," Proc. ICCV, pp.149-155, 1988.
- [3] 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.
- [4] J. Ens and P. Lawrence, "An investigation of methods for determining depth from focus," IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.15, no.2, pp.97-108, 1993.
- [5] A. Pentland, "A new sense for depth of field," IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.9, no.4,

pp.523-531, 1987.

- [6] G. Surya and M. Subbarao, "Depth from defocus by changing camera aperture: A spatial domain approach," Proc. CVPR, pp.61-67, 1993.
- [7] 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊, "多重絞りカラー画像の解析;" 情処学論, vol.32, no.10, pp.1338-1347, 1991.
- [8] J. Ma and S. Olsen, "Depth from zooming," J. Opt. Soc. Am. A, vol.7, no.10, pp.1883-1890, 1990.
- [9] J.M. Lavest, G. Rives, and M. Dhome, "Three-dimensional reconstruction by zooming," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.9, no.2, pp.196-207, 1993.
- [10] 馬場雅志, 小田 愛, 浅田尚紀, "ズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデルを用いた多重ズーム画像からの距離計測;" 画像の認識・理解シンポジウム, vol.II, pp.37-42, 2000.
- [11] 天野 晃, 浅田尚紀, 馬場雅志, "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;" 信学論(D-II), vol.J80-D-II, no.6, pp.1458-1465, June 1997.
- [12] R. Kingslake, Optical System Design, Academic Press, 1983.
- [13] Horn 著, NTT ヒューマンインターフェース研究所訳, ロボットビジョン, 朝倉書店, 1993.
- [14] 松山隆司, 浅田尚紀, "多重画像の統合による多機能高精度画像計測;" 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, 松山隆司, 久野義徳, 井宮 淳(編), pp.25-36, 1998.
- [15] 浅田尚紀, 藤原久永, 松山隆司, "逆投影ぼけモデルを用いた遮へいエッジの光学的性質の解析;" 信学論(D-II), vol.J78-D-II, no.2, pp.248-262, Feb. 1995.

(平成13年8月3日受付, 14年4月9日再受付)

浅田 尚紀 (正員)



1979 京大・工・電気卒. 同大学院博士課程了, 福井医科大学医学部助手, 京都大学工学部助手, 岡山大学工学部助教授を経て1995から広島市立大学情報科学部教授, 現在に至る. 1989 シカゴ大学客員研究員. 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, 文書画像理解, 医用画像診断支援の研究に従事. 1993 情報処理学会論文賞受賞. 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.

山下 英生 (正員)



1968 広島大大学院修士課程了. 同年広島大工学部電気工学科助手, 1992 同教授. 現在, 同大学院工学研究科情報工学専攻知的システムモデリング教育科目を担当. この間 1981年2月より1年6か月間アメリカ・クラークソン工科大学へ出張. 主として, 有限要素法による電気機器の電界・磁界解析, 最適化設計問題・逆問題解法, サイエントフィックビジュアライゼーションに関する研究に従事. 工博. 電気学会, 情報処理学会, 日本シミュレーション学会, 日本 AEM 学会, IEEE, 日本計算工学会, 画像電子学会各会員.

馬場 雅志 (正員)



1990 広島大・工・第二类(電気系)卒. 1992 同大学院博士課程前期了. 同年トヨタ自動車(株)入社. 1995より広島市立大学情報科学部助手. コンピュータグラフィックス, コンピュータビジョンの研究に従事. 情報処理学会会員.

小田 愛



2000 広島市立大・情報科学・知能情報システム工卒. 2002 同大学院博士前期課程了. 現在(株)日立情報システムズ勤務. 2000年10月本会パターン認識メディア理解研究会アルゴリズムコンテスト優秀賞受賞.