

## 多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測

浅田 尚紀<sup>†</sup> 藤原 久永<sup>‡</sup> 松山 隆司<sup>†</sup><sup>†</sup>岡山大学工学部情報工学科<sup>‡</sup>岡山県工業技術センター

本論文では、センサレベルにおける情報統合 [1] の具体例として、カメラのフォーカスを連続的に変化させながら撮影した複数枚の画像 (多重フォーカス画像) を対象とした情報の統合アルゴリズムを示す。従来の Depth from (De)Focus では画像の局所的特徴に基づくボケの解析方法が主に議論されていたが、本研究では多重フォーカス画像が構成する 3 次元画像空間の性質を直線エッジモデルに基づいて明らかにし、エッジ付近のボケ変化からエッジの 2 次元位置と合焦フォーカス位置 (3 次元距離) が高精度に決定できることを示す。本論文では、まずカメラモデルに基づいて多重フォーカス画像間の画素の対応付けとボケのモデル化を行う。次に、多重フォーカス画像におけるボケ変化分をフォーカス軸方向に累積した accumulated defocus 画像のゼロクロス点としてエッジ点が安定に抽出できることを示す。さらに、抽出した各エッジ点周辺のフォーカス軸方向のボケ変化を表す spatio-focal 画像を構成し、その画像上で合焦フォーカス位置を高精度に求めるためのアルゴリズムを示す。最後に以上の原理に基づいて実験を行い、本手法の有効性を検証する。

## Edge and Depth from Focus

Naoki ASADA<sup>†</sup> Hisanaga FUJIWARA<sup>‡</sup> Takashi MATSUYAMA<sup>†</sup><sup>†</sup>Department of Information Technology, Okayama University<sup>‡</sup>Industrial Research Center of Okayama

An important problem in computer vision is how to extract the reliable scene information from images deteriorated by noise and distortion. We have been investigating integration methods of multiple images taken by systematically varying camera parameters. Such integration enables us to extract the reliable information which cannot or hardly be obtained from a single image. In this paper, we give deep consideration to the camera parameter *focus* based on the optical geometry, and propose a new method for the stable edge detection and the reliable depth estimation from multiple images taken with several different focuses, *multi-focus images*. The multi-focus images define the three dimensional geometric space with the x-y image coordinates and the focus axis. This paper first discusses the fundamental characteristics of the focusing: the pixel correspondence between the multi-focus images and the change of blur according to the continuous modification of the focus. Then, the multi-focus images are analyzed along the focus axis to yield two types of images representing integrated information; one is an *accumulated defocus image* whose zero-crossings correspond to edges of the scene, and the other a *spatio-focal image* with which the depth of the edges can be estimated. The quantitative evaluation of the experimental results shows that the proposed method realizes both the stable edge detection and the reliable depth estimation.

## 1 はじめに

画像理解を実現するには、画像から信頼性の高いシーン情報を安定に抽出することが求められる。我々は、不完全で不正確な部分情報から安定で信頼性の高い情報を得るための枠組として「多角的情報の統合」という考え方を提案している [1]。本研究は、この考え方を画像入力段階（センサレベル）に適用したもので、フォーカスを連続的に変化させながら撮影した複数枚の画像（多重フォーカス画像）から、シーンの理解に必要なエッジ情報と距離情報が安定に抽出できることを明らかにする。

カメラによって撮影された画像は、

- 3次元世界を2次元平面に投影したものであり、本質的に真行き情報が欠落している
- 撮影環境や撮像装置に起因する雑音や歪みが含まれている

という点で不完全で不正確なものである。このような不完全な情報を補い、誤った情報を排除するには、カメラパラメータを連続的に変化させながら撮影した多重画像を用いて情報の統合を行うことが有効である。こうした多重画像の統合の基本的な考え方は、2次元画像平面に1次元のパラメータ軸を加えた3次元多重画像空間を構成し、パラメータ軸方向に情報を解析・評価・統合することによって、信頼性の高い情報を抽出しようというものである。この考え方に基づいて先に行った多重絞りカラー画像の解析 [2] では、絞り軸方向に沿ったカラー情報の変化を評価することによって、安定で信頼性の高いシーン情報（色度および明度）が抽出できることを明らかにした。本論文では、多重画像を得るためのカメラパラメータとしてフォーカスに着目し、多重フォーカス画像からシーン中のエッジを安定に抽出する方法と、エッジ点における信頼性の高い距離計測法を提案する。

フォーカスは、従来から単一カメラでシーンの距離情報を得るために利用されてきた [3][4][5][6][7]。これはフォーカス調節にともなって変化する画像中のボケの度合いを連続的に評価することによって合焦画像が得られるフォーカス位置を推定し、レンズから物体までの距離を求めるもので Depth from Focus と呼ばれている。すなわち、焦点距離が  $f$  の凸レンズにおいて、レンズから物体までの距離を  $u$ 、レンズから結像位置までの距離を  $v$  とした時に成立するレンズの公式

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (1)$$

に基づいて、合焦画像が得られるフォーカス位置  $v$  からレンズと物体間の距離  $u$  を求めるものである。

一方、エッジモデルとボケモデルに基づいて、フォーカス調節あるいは絞り調節によって生じるボケの変化を解析し、2枚程度の少数枚の画像から距離を求める研究 (Depth from Defocus) も報告されている [8][9][10][11][12]。先の Depth from Focus が多数枚の画像から合焦画像が得られるフォーカス位置を探索する問題であったのに対し、Depth from Defocus ではボケの生成過程をモデル化し、その逆問題を解くことによってシーンの距離情報を求めている。

これら Depth from (De)Focus のいずれにおいても重要なことは、ボケの変化に基づいて合焦評価ができるのは画像上でエッジが存在する付近に限られ、しかも距離計測はエッジ点に関してのみ可能であるという点である。従来の研究ではいずれも画像中に局所領域を設定し、空間微分あるいはフーリエ変換によって得られる局所特徴量に基づいてエッジ付近のボケを解析していた。ところが、実際の画像上でエッジを適切に含む局所領域を設定することは必ずしも容易ではない。これは、領域サイズを大きくするほど特徴量が安定する反面、領域内に距離の異なる複数枚のエッジが含まれる可能性が高くなり、特徴量が不安定になるという問題を生じるためである。この問題を避

け、安定したエッジ検出と信頼性の高い距離計測を行うには、局所領域を設定することなしに、画像中のエッジ検出と抽出したエッジ点における合焦評価を同時に行う方法を考えることが必要である。

こうした考えに基づき本論文では、まず多重フォーカス画像におけるボケ変化分をフォーカス軸方向に累積した accumulated defocus 画像のゼロクロス点としてエッジ点が安定に抽出できることを示す。次に、抽出した各エッジ点周辺のフォーカス軸方向のボケ変化を表す spatio-focal 画像を構成し、その画像上で合焦時のフォーカス位置を精度よく求めるためのアルゴリズムを示す。エッジ抽出における処理の安定性は、局所領域の設定が不要であることに加え、情報の統合（データの累積）を行うことによって実現される。また、合焦時のフォーカス位置推定の高精度性は、カメラモデルに基づいたモデル当てはめを、多重観測によって得られた多数枚の画像全体に適用することによって得られる。

以下では、まずカメラモデルに基づいて多重フォーカス画像における画素の対応付けとボケのモデル化を行う。次に、多重フォーカス画像が構成する3次元画像空間の性質を直線エッジモデルに基づいて明らかにし、エッジの検出とエッジ点における距離推定法について述べる。最後に実験結果を示し、考察とまとめを述べる。

## 2 カメラモデル

### 2.1 多重フォーカス画像

一般にカメラのレンズは複数枚のレンズで構成されているが、これを焦点距離  $f$  が固定の1枚の円形開口薄凸レンズと考え、幾何光学的にフォーカスの性質を明らかにする。ただし以下の議論では、光の回折およびレンズの収差は無視できるものとし、レンズの公式 (1) が成立する光軸近傍の現象について考える。

(1) 式から明らかなように、距離無限遠 ( $u \rightarrow \infty$ ) からの光は  $v = f$  において結像し、カメラから物体までの距離  $u$  が減少するにしたがってレンズから結像位置までの距離  $v$  は  $f$  からしだいに増加する。フォーカス調節は図1におけるレンズと撮像面間の距離  $w$  を変化させることよって行われ、 $w$  が結像位置  $v$  に一致する時、合焦画像が得られる。フォーカスを順次変化させて撮影した多数枚の画像を、対応する撮像面位置に並べることによって3次元画像空間を構成することができる。この3次元画像空間に関する用語の定義を以下に与える。

フォーカス軸：光軸上に、レンズ位置を原点とし撮像面側を正方向とするフォーカス軸  $w$  を定める。

フォーカス位置：フォーカス軸上の撮像面位置をフォーカス位置と呼ぶ。フォーカス位置の変化範囲は  $f \leq w \leq w_{max}$  とし<sup>1)</sup>、その間に距離計測対象の合焦画像が得られるフォーカス位置（合焦フォーカス位置）が含まれているものとする。このことは、距離計測範囲に関する制約であり、シーン中の対象の合焦画像が撮影されていることを要求するものではない。

2次元画像平面：フォーカス位置  $w$  において、光軸に垂直な平面（撮像面）上に、光軸位置を原点とする2次元直交座標  $x-y$  を定める（図1）。

多重フォーカス画像空間：2次元画像平面とフォーカス軸によって構成される3次元多重フォーカス画像空間を直交座標系  $x-y-w$  によって表し、座標  $(x, y, w)$  における明度を  $B(x, y, w)$  と表す。

<sup>1)</sup>  $0 < w < f$  のフォーカス範囲では実像を得ることはできない。

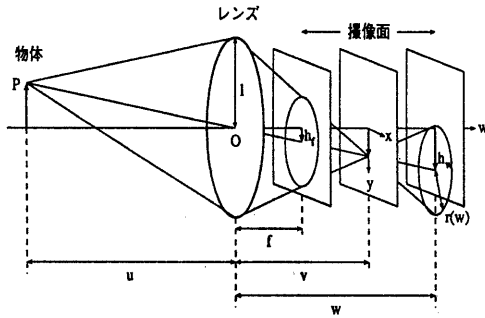


図1: カメラモデル

## 2.2 画素の対応付け

無限遠からしだいに近距離に焦点が合うようにフォーカスを調節した時、レンズと撮像面間の距離  $w$  は  $f$  からしだいに増加する。この時、物体上の点  $P$  の像は、ボケがしだいに小さくなり、 $w = v$  で合焦、そして再びボケが大きくなるだけでなく、ボケ像の中心点が点  $P$  とレンズ中心  $O$  を結ぶ直線に沿って移動し撮像面上での位置が変化する。このことは、フォーカス変化によって、ボケだけでなく撮像面上での像の大きさが変化するを意味する。フォーカス位置を  $w = f$  とした時の撮像面上での像の大きさ  $h_f$  と、任意のフォーカス位置  $w$  での像の大きさ  $h_w$  との比の値  $m$  は、図1から次のようになる。

$$m = \frac{h_w}{h_f} = \frac{w}{f} \quad (2)$$

したがって、フォーカス位置  $f$  において得られる画像中の点  $(x, y, f)$  は、フォーカス位置  $w$  において得られる画像中の点  $(mx, my, w)$  に対応することになる。この関係を用いることによって、多重フォーカス画像におけるフォーカス軸方向の画素の対応付けを行うことができる。

なお、撮像面上の像の大きさが  $m$  倍になると1画素に入射する光強度が  $\frac{1}{m^2}$  に低下することになる。したがってフォーカス軸方向に沿った明度変化を解析する際には、画素の対応付けとともに  $m$  の変化にともなう明度補正を行う必要がある<sup>2</sup>。

## 2.3 ボケモデル

一般に、あるフォーカス位置  $w$  で得られるボケ画像  $B(x, y, w)$  は、そのフォーカス位置におけるボケのない理想的な画像  $I(x, y, w)$ <sup>3</sup> とボケの点ひろがり関数  $K(x, y, w)$  のたたみ込み積分としてモデル化することができる。

$$B(x, y, w) = I(x, y, w) * K(x, y, w) \quad (3)$$

レンズからある一定距離離れた位置に置かれた光軸に垂直な平面を撮影した場合、フォーカス位置に応じて決まるボケの点ひろがり関数は画像上の位置に依存せず一定となる。しかし、光軸に垂直ではあるがレンズからの距離が不連続に変化するoccluding edge の場合には、エッジの両側でそれぞれ異なる点ひろがり関数を用いてたたみ込み積分を行う必要がある。ただし、occluding edge 自身のボケは、カメラから近い側の平面に対する点ひろがり関数が適用されたボケとして観測されることになる<sup>4</sup>。

<sup>2</sup> 具体的な明度補正法については後述する。

<sup>3</sup> (2)式によって大きさが拡大された画像

<sup>4</sup> 文献 [13] では、エッジの両側で異なった点ひろがり関数を用いて別々に求めたボケ画像を加算することによって occluding edge のボケが表現できるとしている。しかし我々の解析では、光の回折を無視し occluding edge を生じさせている3次元物体による光の遮断効果を考えると、occluding edge 自身

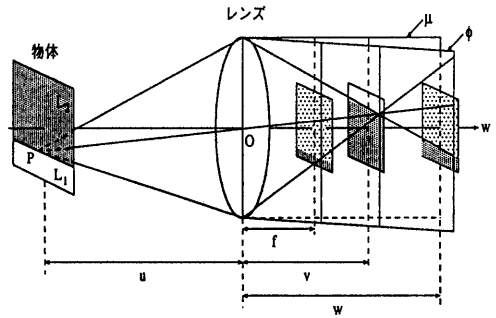


図2: 直線エッジ撮影時の多重フォーカス画像空間

本研究では円形開口レンズで生じる一般的なボケのモデルとして、フォーカス位置  $w$  に応じて決まる半径  $r(w)$  の有限な円内で、半径  $t (= \sqrt{x^2 + y^2})$  に対して等方的な光強度分布を持つ点ひろがり関数  $K(x, y, w)$  を考える<sup>5</sup>。

$$K(x, y, w) = \begin{cases} D\left(\frac{t}{r(w)}\right) & t \leq r(w) \\ 0 & r(w) < t \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{ただし、} \int_0^{r(w)} 2\pi t D\left(\frac{t}{r(w)}\right) dt = 1$$

図1から明らかなように、半径  $r(w)$  は合焦フォーカス位置  $v$  に対する撮像面の位置  $w$  で決まり、レンズの開口半径  $l$  を用いて、次のように表される。

$$r(w) = \frac{l |w - v|}{v} \quad (5)$$

## 3 多重フォーカス画像の解析

### 3.1 spatio-focal 画像

多重フォーカス画像が構成する3次元画像空間の性質を明らかにするために、次のような直線エッジモデルを考える。

- 直線エッジはレンズの光軸に垂直な平面物体上に存在する。
- 直線エッジの両側はそれぞれ明度  $L_1, L_2$  の一様領域である。(以下では、 $L_1 > L_2$  と仮定する)

この直線エッジを撮影した時の多重フォーカス画像空間の様子を図2に示す。エッジ上の1点  $P$  とレンズの中心  $O$  を結ぶ直線は、多重フォーカス画像空間内で点  $P$  のボケ像の中心点を結ぶ直線となっている。この直線を含む平面のうち、2次元画像平面との交線が直線エッジ像と直交する平面  $\phi$  を考える。明らかに、平面  $\phi$  と平面物体との交線は、物体上の直線エッジとも直交する。多重フォーカス画像空間を平面  $\phi$  で切断した時に得られる断面画像は、エッジ点  $P$  に対応する点を結んだ直線周辺の、フォーカス変化にともなったボケの変化を表している。このボケ変化をフォーカス軸  $w$  に沿って解析するために、断面画像を次のような平面  $\mu$  に正射影する。

- 平面  $\mu$  はフォーカス軸を含む
- 平面  $\mu$  は、平面  $\phi$  が通るレンズ直径を含む

のボケはカメラから近い側の面上でのボケと同一になることが示され、そのことは実験的にも確認できている。こうしたoccluding edge のボケに関する詳細な議論は、稿を改めて述べる。

<sup>5</sup> ボケの点ひろがり関数としてよく用いられる2次元ガウス分布やボケ円内の光強度分布が一般的な円盤モデルはこの性質を満たしている。

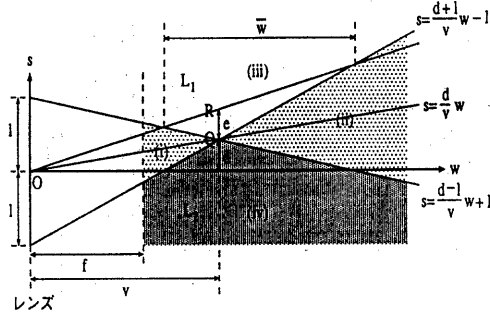


図 3: spatio-focal 画像

このような平面 $\mu$ に投影して得られた断面画像の明度分布の様子を図3に示す。この画像は、フォーカス軸 $w$ (横軸)とフォーカス軸に直交する空間軸 $s$ (縦軸)とで表されるので以後 spatio-focal 画像と呼ぶことにする。

図3では、エッジ点 $P$ に対応する点を結んだ直線が、レンズの中心 $O(0,0)$ と合焦時のエッジ像の位置 $Q(v,d)$ を通る直線 $s = \frac{d}{v}w$ として描かれ、直線の上側は平面物体上の $L_1$ 領域に、下側は $L_2$ 側に対応する。この直線に沿った点 $P$ 周辺のボケ変化は、ボケ円の半径 $r(w)$ が(5)式で示されるようにフォーカス位置 $w$ に対して線形に変化するので、 $Q(v,d)$ で交差する2直線

$$s = \frac{d+l}{v}w - l, \quad s = \frac{d-l}{v}w + l \quad (6)$$

によって、(i)遠距離側ボケ領域、(ii)近距離側ボケ領域、(iii) $L_1$ 側合焦明度領域、(iv) $L_2$ 側合焦明度領域の4領域に分割することができる。すなわち、(i)および(ii)のボケ領域では $w$ および $s$ の値によって観測明度 $L$ は $L_2 < L < L_1$ の範囲内で変化するのに対して、(iii)および(iv)の合焦明度領域では $w$ および $s$ の値にかかわらずそれぞれ一定明度 $L_1, L_2$ が観測されることになる。

### 3.1.1 ボケ領域における明度変化特性

フォーカス位置 $w_0$ における画像平面 $B(x,y,w_0)$ 上で、ボケのない理想的な画像 $I(x,y,w_0)$ 中のエッジ像と平行で距離 $\rho_0 (< r(w_0))$ だけ $L_1$ 側に離れた直線を考える。この直線と先に述べた平面 $\phi$ との交点を点 $C$ とする。spatio-focal 画像上で点 $C$ に対応する点はボケ領域に属し、その明度は以下のようにして求めることができる。

点 $C$ の明度は、点 $C$ を中心とするボケの点ひろがり関数 $K_C(x,y,w_0)$ を考え、それと $I(x,y,w_0)$ との点毎の積と計算を行うことによって与えられる。 $K_C(x,y,w_0)$ は点 $C$ を中心とした半径 $r(w_0)$ の円( $C$ のボケ円という)の内部でのみ0でない値を持つ。点 $C$ からエッジまでの距離は $\rho_0 (< r(w_0))$ だから、 $C$ のボケ円は、画像 $I(x,y,w_0)$ 上のエッジを横切り $L_2$ 側を一部覆うことになる。以上のことから点 $C$ の明度 $L$ は、 $L_1$ 側および $L_2$ 側領域に含まれるボケ円内の $K_C(x,y,w_0)$ の積分値

$$\begin{aligned} \tau &= \int_{\text{ボケ円の } L_1 \text{ 側部分}} K_C(x,y,w_0) dx dy \\ &= 1 - \int_{\text{ボケ円の } L_2 \text{ 側部分}} K_C(x,y,w_0) dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

を用いて、

$$L = \tau L_1 + (1 - \tau) L_2 \quad (8)$$

と表すことができる。

このことは、点 $C$ の明度 $L$ は $\tau$ の値のみによって決まり、その $\tau$ の値はボケ円の半径 $r(w_0)$ に対する $\rho_0$ の大きさによって決ま

ることを示している。すなわち、画像平面をフォーカス軸方向に移動させ $w_0$ が $w_1$ に変化したとしても、画像平面 $B(x,y,w_1)$ 上で、 $\rho_0/r(w_0) = \rho_1/r(w_1)$ を満たす距離 $\rho_1$ だけエッジから離れた点の明度は点 $C$ と同一のものとなる。言い換えると、 $\tau$ が一定、すなわちボケ領域内の点の明度がフォーカス位置 $w$ によらず一定となるのは、エッジからの距離 $\rho(w)$ が $\lambda$ を比例定数として $\rho(w) = \lambda r(w)$ と表せるときである。ただし、 $0 < \lambda < 1$ とする。

以上のことを spatio-focal 画像上で考えると、各画像平面 $B(x,y,w)$ におけるエッジ像からの距離 $\rho(w)$ は、図3中のエッジ点 $P$ を表す直線 $s = \frac{d}{v}w$ からの $s$ 軸方向のずれを表す。したがって、spatio-focal 画像上で $L_1$ 領域に属する点の座標を $(w,s)$ とすると、その点のエッジからの距離は $\rho(w) = s - \frac{d}{v}w$ となる。これを $\lambda_1 r(w)$ とおくと、 $r(w)$ は(5)式で与えられるので、spatio-focal 画像上での等明度線は、フォーカス範囲 $f \leq w < v$ 、および $v < w \leq w_{max}$ に対してそれぞれ、

$$s = \frac{d - \lambda_1 l}{v}w + \lambda_1 l, \quad s = \frac{d + \lambda_1 l}{v}w - \lambda_1 l \quad (9)$$

と表され、合焦エッジ点 $(v,d)$ を通るV字型の2本の半直線となる。同様のことが $L_2$ 側に対しても言え、 $L_2$ 側のボケ領域における等明度線はエッジ点 $(v,d)$ を通るA字型の2本の半直線となる。すなわち、 $\frac{d}{v}w - s = \lambda_2 r(w)$ を解くと、フォーカス範囲 $f \leq w < v$ 、および $v < w \leq w_{max}$ に対してそれぞれ、

$$s = \frac{d + \lambda_2 l}{v}w - \lambda_2 l, \quad s = \frac{d - \lambda_2 l}{v}w + \lambda_2 l \quad (10)$$

が得られる。

任意の $w$ においてエッジから $L_1$ 側および $L_2$ 側に同じ距離 $\rho$ 離れた点の明度は、それぞれ $L'_1 = \tau L_1 + (1 - \tau) L_2$ および $L'_2 = (1 - \tau) L_1 + \tau L_2$ と表されるので、 $|L_1 - L'_1| = |L_2 - L'_2|$ 、すなわち $L_1$ および $L_2$ からの明度差 $\delta$ は同じとなる。一方、 $L_1$ 側および $L_2$ 側に同じ距離 $\rho$ 離れていることから $\lambda_1 r(w) = \lambda_2 r(w)$ 、すなわち $\lambda_1 = \lambda_2$ が成立し、(9)式の左式と(10)式の右式、および(9)式の右式と(10)式の左式は一致する。したがって、spatio-focal 画像のボケ領域において、 $L_1 - \delta$ のV字型等明度線と $L_2 + \delta$ のA字型等明度線は合焦エッジ点 $(v,d)$ で交差する2本の直線となる。ただし、 $0 < \delta < \frac{L_1 + L_2}{2}$ とする。

### 3.1.2 フォーカス軸方向の明度変化特性

合焦画像上( $w = v$ )でエッジ点から $e$ 離れた点 $R$ について考える(図3)。点 $R$ に対応する画素を結んだ直線 $s = \frac{d+e}{v}w$ 上のフォーカス軸方向の明度変化は、点 $R$ が $L_1$ 側( $e > 0$ )の場合は $\frac{1}{1+e} \leq w \leq \frac{1}{1-e}$ のフォーカス範囲で明度 $L_1$ となり、 $L_2$ 側( $e < 0$ )の場合は $\frac{1}{1-e} \leq w \leq \frac{1}{1+e}$ のフォーカス範囲で明度 $L_2$ となる。したがっていずれの側でも合焦時の明度 $L_1$ または $L_2$ が観測される合焦明度フォーカス範囲 $\bar{w}$ は、

$$\bar{w} = \frac{2|v|e|}{l^2 - e^2} \quad (11)$$

となり、注目点 $R$ からエッジまでの距離 $|e|$ に依存して合焦明度フォーカス範囲 $\bar{w}$ が変化することが分かる。

以上のことから、直線エッジを撮影した時の多重フォーカス画像空間における、エッジ付近の注目点 $R$ のフォーカス軸方向の明度変化特性を整理すると、以下の2点になる。

**定量的変化:** (11)式が示すように、注目点 $R$ がエッジに近づく( $e \rightarrow 0$ )にしたがって合焦明度フォーカス範囲は狭くなり( $\bar{w} \rightarrow 0$ )、エッジ点では合焦明度フォーカス範囲が0となる。

**定性的変化:** 注目点 $R$ が $L_1$ 側の場合、その明度は $\nearrow L_1 \searrow$ と変化し、 $L_2$ 側の場合は $\searrow L_2 \nearrow$ と変化し、エッジを境と

してその両側で明度の増減パターンが逆転する。また、 $R$  がエッジ点の場合、その明度はフォーカス位置にかかわらず一定となる。

### 3.2 エッジ検出アルゴリズム

前述の多重フォーカス画像の性質は、

1. ある2次元画像平面上の各点に対して、それと対応する多重フォーカス画像中の画素集合を(2)式によって求める。
2. 画素集合からフォーカス軸方向に沿った明度変化を特徴付ける量を計算し、それを画像平面上の点の値とする画像を構成する。
3. 構成された画像上で明度変化特徴量の空間分布を調べる。

という処理を行うことによって、シーン中のエッジ位置が決定できることを示唆している。

本論文では、安定なエッジ検出を実現するために、以下のアルゴリズムを用いた。まず、フォーカス軸方向の明度変化特徴量としては、次に示す手順で計算される明度差分の累積値を用いる。

1.  $w = f$  における画像  $B(x, y, f)$  を基準とし、画像中の各点  $(x_0, y_0)$  に対して以下の処理を行う。
2. 2つの明度値  $B(x_0, y_0, f)$  と  $B(m_x_0, m_y_0, w_{max})$  をフォーカス軸方向に線形補間し、フォーカス軸方向の基準明度値  $B_{base(x_0, y_0)}(w)$  を求める。

$$B_{base(x_0, y_0)}(w) = \frac{B(m_x_0, m_y_0, w_{max}) - B(x_0, y_0, f)}{w_{max} - f} w + B(x_0, y_0, f) \quad (12)$$

3. 各  $w$  において対応する画素の明度値  $B(m_x_0, m_y_0, w)$  と基準明度値  $B_{base(x_0, y_0)}(w)$  との差を求め、それらを累積する。

$$B_{accumulate}(x_0, y_0) = \sum_{w=f}^{w_{max}} (B(m_x_0, m_y_0, w) - B_{base(x_0, y_0)}(w)) \quad (13)$$

以上の操作を画像  $B(x, y, f)$  上の全ての画素に対して行い、明度差分累積画像  $B_{accumulate}(x, y)$  を作成する。この画像は、フォーカス変化にもなるボケ変化の累積値の空間分布を表すので accumulated defocus 画像と呼ぶことにする。先に述べたフォーカス軸方向の明度変化の定量的および定性的性質から明らかのように、accumulated defocus 画像を構成する累積値  $B_{accumulate}(x_0, y_0)$  は、

- 点  $(x_0, y_0)$  がエッジ上の場合  $B_{accumulate}(x_0, y_0) = 0$
- エッジ付近の  $L_1$  側の場合  $B_{accumulate}(x_0, y_0) > 0$
- エッジ付近の  $L_2$  側の場合  $B_{accumulate}(x_0, y_0) < 0$

という性質がある。すなわち accumulated defocus 画像では、エッジ点をはさんで画素値が正から負へ滑らかに変化するので、ゼロクロス点をエッジ点として検出すればよいことが分かる。しかも、accumulated defocus 画像は累積値で構成されているので、

- ノイズの影響が少ない
- ゼロクロスの両側で大きな山と深い谷が生じる

という特徴を持ち、安定なゼロクロス点検出が可能となっている。

2.2で述べたように、フォーカス調整にともなって撮像面上での像の大きさが変化するので、フォーカス軸方向に沿った明度変化を安定に解析するには、像の拡大にもなる明度変化をうまく補正する必要がある。しかし、こうした明度補正として、先に述べた純粋な像の拡大  $m^2$  による明度変化の補正  $\frac{1}{m^2}$  だけでは十分とは言えない。これは、実際のカメラレンズは多数枚のレンズで構成され、レンズと絞りの間の距離変化にもなる入射光量の変化やレンズの収差などによっても明度が変化するためである。すなわち、像の拡大は撮像面上での位置変化を引き起こし、位置に依存したレンズ系の明度歪の影響を受け、さらに明度歪はフォーカス位置に依存して変化する。こうした明度歪を完全にモデル化するのは非常に困難であるが、何らかの方法で明度補正を行わなければ、エッジ検出の安定性が損なわれる。上記のアルゴリズムでは、各点  $(x_0, y_0)$  に対して求めた  $B_{base(x_0, y_0)}(w)$  を各  $w$  における明度  $B(m_x_0, m_y_0, w)$  を評価するための基準明度値として用いることにより、カメラ固有の明度歪の補正を行っている。これにより、明度歪の影響がかなり低減されることが実験的に確認されている。

### 3.3 距離計測アルゴリズム

画像中のエッジ点に対応する物体上の実エッジ点からレンズまでの距離  $u$  を求めるには、エッジ点の合焦フォーカス位置  $v$  を正確に求め、(1)式に代入する必要がある。ところが多重フォーカス画像では、離散的にフォーカスを変化させて撮影を繰り返すので、一般にフォーカス軸方向の分解能は低く、必ずしもエッジの合焦フォーカス位置で画像が撮影されているとは限らない。したがって距離計測を高精度に行うためには、離散的なフォーカス位置において観測されるエッジ付近のボケ変化を連続的な変化として評価し、合焦フォーカス位置を正確に推定する方法を考える必要がある。以下では、spatio-focal 画像の性質を利用して合焦フォーカス位置を高精度に推定する方法について述べる。

まず accumulated defocus 画像上で検出した各エッジ点に対して、spatio-focal 画像を構成する。この spatio-focal 画像上では、合焦明度領域とボケ領域の境界を表す2直線の交点のフォーカス座標  $w$  がエッジ点の合焦フォーカス位置  $v$  に相当する(図3)。しかし、

- ノイズのために合焦明度領域の値は必ずしも一定とは限らない
- 合焦明度領域とボケ領域の境界では連続的に明度が変化している

という性質があるので、合焦明度領域とボケ領域の境界を決定するためのしきい値を正確に求めることは一般に困難である。

ところが3.1.1で述べたように、spatio-focal 画像はエッジ点に対応する点を結んだ直線  $s = \frac{d}{w}$  を中心として、空間軸  $s$  方向のボケ領域の幅が対称になるという性質を持つ。この性質を利用すれば、必ずしも厳密に合焦明度領域とボケ領域を分割する必要はなく、以下のアルゴリズムによってエッジ点に対する合焦フォーカス位置を精度よく推定することができる。

1. spatio-focal 画像中の最大、最小明度をそれぞれ  $L_1, L_2$  とする。最大(最小)明度点が存在する上(下)あるいは下(上)半分を  $L_1(L_2)$  側領域という。
2. 以下の条件を満たすしきい値の組  $(\omega_1, \omega_2)$  で  $L_1, L_2$  側領域をそれぞれしきい値処理し、抽出された領域の境界点を求める。

$$\begin{aligned} L_1 \text{側しきい値} & \quad \omega_1 = L_1 - \delta \\ L_2 \text{側しきい値} & \quad \omega_2 = L_2 + \delta \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $0 < \delta < \frac{L_1 - L_2}{2}$  とする。また、しきい値処理は、

- $L_1$  側領域では  $\omega_1$  以上の明度を持つ画素を 1 その他を 0
- $L_2$  側領域では  $\omega_2$  以下の明度を持つ画素を 1 その他を 0 とする。

3.  $L_1$  および  $L_2$  側の抽出領域の境界点を合わせた境界点集合に対して、最小 2 乗法による 2 直線のあてはめを行い、その交点を求める。
4.  $\delta$  の値を少しずつ変化させ、上記の処理を繰り返す。
5. 異なった  $\delta$  の値で求めた交点の平均位置を求め、その  $w$  座標をエッジ点の合焦フォーカス位置  $v$  とする。

この合焦フォーカス位置推定アルゴリズムでは、

- 各しきい値の組によって得られた境界点集合に対して最小 2 乗法で直線をあてはめる
- 複数のしきい値の組で得られた 2 直線の交点の平均位置を求める

ことによって、ノイズの影響を受けにくく安定で高精度な距離計測を実現している。なお、各しきい値の組によって得られた交点の位置の変動を用いて、合焦フォーカス位置およびエッジ位置の安定性を定量的に評価することができる(後述)。

## 4 実験と性能評価

実験には RGB3 板式 CCD ビデオカメラ SONY DXC-325 およびレンズ Canon VCL-810BX を使い、ビデオ信号をデジタル化し、明度分解能 8 ビット、画像サイズ  $512 \times 480$  画素のデジタル画像を得た。実験は室内で行い、照明光は蛍光灯を使用した。また、レンズの焦点深度を浅くして距離計測の精度を向上させるために、絞りは開放の 1.4 に、ズームは最大の 80mm にそれぞれ固定して撮影した。

この実験環境でカメラキャリブレーションを行い、カメラ固有のパラメータとして、単一凸レンズとしての焦点距離は 433.7mm、画像平面上での光軸座標 (FOE) は (209, 271)、カメラモデルのレンズ位置と実際のカメラレンズの距離計測の基準位置 (前面レンズ) 間の距離は 703.9mm、という値を得た [14]。

### 4.1 多重フォーカス画像空間の構成

図 4 に示すように、

近距離対象平面 (左側)	上 $\frac{2}{3}$ が白, 下 $\frac{1}{3}$ が黒
遠距離対象平面 (右側)	上 $\frac{1}{3}$ が黒, 下 $\frac{2}{3}$ が白

の 2 枚の対象平面を、それぞれカメラレンズの前面から約 2.4m と約 5.9m の距離に置き、画面中央の縦線が occluding edge となるように配置した。なお各対象平面は、おおよそ光軸と垂直になるように置いた。

フォーカスを無限遠から約 1.5m までフォーカスリング角度にして  $0.05$  radian ごとに順次変化させ、全部で 31 枚の画像を撮った。得られた多重フォーカス画像のうち、遠距離対象平面および近距離対象平面がほぼ合焦となった時の画像を図 5 に示す。

$w = f(\theta = 0)$  の画像  $B(x, y, f)$  の中各画素に対して、先に求めた FOE の位置と (2) 式から計算される画像の拡大率  $m$  を用いて多重フォーカス画像中の画素の対応付けを行った。図 4 中のエッジ 4 近傍の白領域側および黒領域側の点を表す画素に対して、フォーカス軸方向の明度変化を求めた結果を図 6 に示す。上に凸の曲線が白領域側に、下に凸の曲線が黒領域側に相当し、それぞれの曲線の始点と終点を結ぶ点線は、光学系によって生じるフォーカス軸方向の明度歪を補正する  $B_{base(x_0, y_0)}(w)$  を表している。この図から分かるように、フォーカス変化にとも

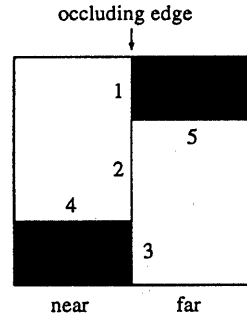


図 4: 撮影対象

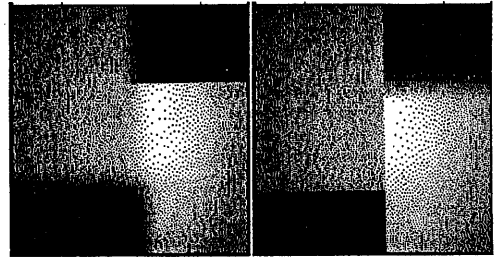


図 5: 多重フォーカス画像

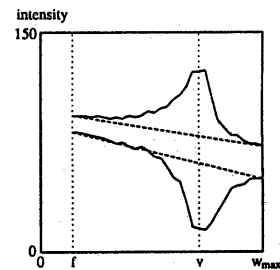


図 6: フォーカス軸方向の明度変化

なって、かなり大きな明度歪が生じており、それを補正しなければ 3.1 で述べた多重フォーカス画像の持つ特徴をうまく捉えることは困難である。

### 4.2 エッジ検出結果

撮影した多重フォーカス画像から 3.2 で述べたアルゴリズムによって構成した accumulated defocus 画像を図 7 に示す。エッジ検出では、まず accumulated defocus 画像からゼロクロス点を求め、次に各ゼロクロス点の両側で正負それぞれの最大振幅を調べ、その差がしきい値  $\epsilon$  を越える点をエッジ点とした (図 8)。今回の実験では、最も明度差が少ないエッジ 2 (図 4) が検出できるように、しきい値  $\epsilon$  を設定した<sup>6</sup>。なおゼロクロス点の検出では、画素値の符号の反転を生じる正側と負側の 2 点をゼロクロス点として検出しているため、エッジは平均 2 画素の幅を持つことになる。

エッジ画像において図 4 のエッジ 1, 3, 4, 5 はほぼ良好に検出されているが、エッジ 2 はエッジ 1, 3 につながる上下部分が検出されていない。これは、エッジ 2 の両側では明度差がほとん

<sup>6</sup> accumulated defocus 画像は明度差分の累積値で構成されるので、 $\epsilon$  の値はエッジのコントラストだけでなく多重フォーカス画像の枚数にも依存する。

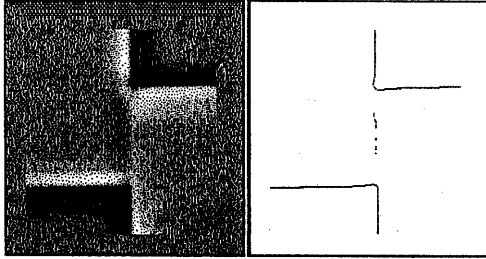


図 7: accumulated defocus 画像 図 8: エッジ画像

どなくボケによる明度変化が微小であるのに対して、エッジ 2 の上下部分では図 4 の右上および左下の黒領域がボケることによって生じた大きな明度変化がエッジ 2 の像に重畳し、エッジ 2 の微妙な明度変化が検出できなくなったことが原因である。

一方、遠距離対象平面上のエッジ 5 の左端部分は、occluding edge に近いため、エッジ 5 の合焦時(図 5 左図)には occluding edge のボケがその部分を覆い、occluding edge の合焦時(図 5 右図)にはエッジ 5 自身がボケ、どのフォーカス位置で撮影しても必ずボケが観測される部分である。しかし、図 8 から分かるように、そうした合焦画像が全く得られない部分からもエッジをうまく検出することができている。この理由は次のように考えられる。エッジ 5 の左端部分では、エッジ 5 本来のボケ変化に occluding edge によるボケ変化が重畳した明度変化が観測されることになる。しかし、3.2 で述べたエッジ検出アルゴリズムを用いると、occluding edge によるボケ変化がレンズ系の明度歪補正によってうまく排除され、エッジ 5 本来のボケ変化が accumulated defocus 画像として捉えられた結果、エッジ 5 の左端部分もうまくエッジ点として抽出できたと考えられる。常にこうした部分でのエッジ検出がうまくいく保証はないが、accumulated defocus 画像を構成する際の情報の統合メカニズムが種々の変動に対して安定な解析を可能にしていることは明らかである。

図 4 では、エッジ 4 はエッジ 5 と類似した状況にあるが、エッジ 4 は近距離対象平面上のエッジであり、occluding edge の合焦時(図 5 右図)に合焦となるため、全区間に渡って安定にエッジが検出される。

#### 4.3 距離計測処理

合焦フォーカス位置を求めるために、図 8 の各エッジ点に対して spatio-focal 画像を作成した。実験では、 $w = f$  の画像  $B(x, y, f)$  においてエッジ点を中心にエッジと直交する方向に幅 16 画素の線分を設定し、それを spatio-focal 画像における  $w = f$  の空間軸  $s$  の幅とした。これは、今回構成した accumulated defocus 画像において、ゼロクロス点の両側での明度振幅が十分大きい範囲を含む幅となっている。

距離計測法としては、3.3 で述べたアルゴリズムを用いたが、そこで用いるしきい値パラメータ  $\delta$  は、 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$  の 16%、23%、30% の 3 種類とした。図 4 のエッジ 4 上点に対する spatio-focal 画像の例と、16% のしきい値で得られた 2 直線を図 9 に示す。この図から分かるように、求めた 2 直線の交点としてかなり正確に合焦フォーカス位置が推定されている。

#### 4.4 精度評価

距離計測の精度評価として、図 4 の 1 から 5 の各エッジに対して求めた距離の平均値  $\bar{u}$  と標準偏差  $\sigma_u$  を表 1 に示す。ただしエッジ 1, 3, 4, 5 は直線エッジモデルが成立する直線部分と、他のエッジの影響を受ける端部分に分けて評価した。エッジ 1,

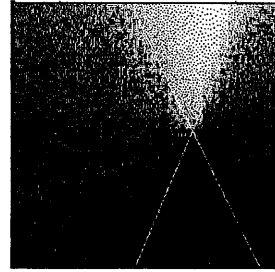


図 9: spatio-focal 画像上の合焦フォーカス位置

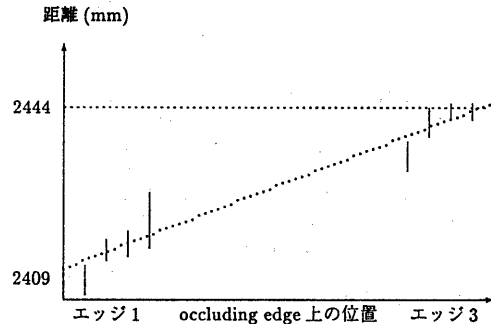


図 10: 近距離対象平面上の光軸に対する傾き

3, 4 の直線部分は、エッジ両側の明度差が大きく安定した評価が行えるので、標準偏差が 5mm 程度と算出され非常に高精度の距離計測が可能であることが示された。一方、エッジ 1, 3, 4 の端部分では標準偏差が 2~3 倍に増大している。これは、他のエッジと交差する角部分では、フォーカス軸方向の明度変化が直線エッジモデルと異なっているためと考えられる。また、エッジ 2 およびエッジ 5 の直線部分の距離計測結果が、他のエッジと比べて不安定になっている原因は、エッジ 2 は明度差が少なく spatio-focal 画像における明度変化の S/N 比が低下している、エッジ 5 は距離が遠くなることによって撮像面上の像が小さくなり画像の空間分解能が低下している、ためであると考えられる。エッジ 5 の左端部分が極端に不安定となっているのは、明度差が大きく、しかもエッジ 5 自身のボケと近距離対象物の白部分のボケが重なることによって直線エッジモデルとは大きく異なる明度変化を示すためと考えられる。

エッジ 1, 2, 3, 4 からレンズと近距離対象平面間の距離がほぼ 2.4m であることが分かるが、標準偏差が小さく信頼性の高

表 1: 距離計測およびエッジ位置の精度評価

エッジ番号	エッジ点数	距離 (mm)		位置 (画素)	
		$\bar{u}$	$\sigma_u$	$\bar{s}$	$\sigma_s$
1 (直線)	153	2412	5.4	-0.29	0.56
1 (下端)	57	2447	18.9	2.42	1.49
2	72	2463	57.2	0.75	1.15
3 (上端)	34	2429	6.2	-1.50	0.50
3 (直線)	145	2441	3.5	-0.63	0.62
4 (直線)	425	2431	5.1	0.11	0.71
4 (右端)	20	2450	16.7	3.15	0.85
5 (直線)	282	5826	20.2	-0.30	0.49
5 (左端)	86	5346	787.6	-1.33	0.88

い距離が得られたエッジ1, 3の直線部分をさらに20画素程度の区間に分け、それぞれの区間内の平均距離と標準偏差を求めた。各区間での平均距離を用いてoccluding edgeに沿った距離の変化を調べた結果、図10に示すように近距離対象平面の上部と下部ではレンズからの距離に約35mmの差があることが示された。これは、近距離対象平面がレンズの光軸に対して完全に垂直ではなく、わずかに傾いていたためと考えられる。

また、各エッジ点に対応したspatio-focal画像上で求めた2直線の交点の空間座標 $s$ の変動を調べることにより、エッジ検出および距離計測アルゴリズムの安定性を評価することができる。具体的には、各エッジ点から求めたspatio-focal画像において、異なったしきい値 $\delta$ で求めた2直線の交点の空間座標 $s$ の値をそれぞれ求める。エッジ検出および距離計測アルゴリズムがともに正確に動作していれば $s$ 座標の値は0となる。図4の1から5の各エッジに対して求めた $s$ 座標の平均値 $\bar{s}$ と標準偏差 $\sigma_s$ を表1の右側の欄に示す。この結果から、次のことが言える。

- 先の距離計測で信頼性の低かったエッジ2, 5も含めたすべてのエッジに対して、 $s$ 座標の平均値、すなわちaccumulated defocus画像のゼロクロス点として求めたエッジ位置とspatio-focal画像上の2直線の交点として求めたエッジ位置のずれは全体で2画素程度、直線部分で1画素以内に収まっている。これは、エッジ幅が平均2画素であることを考えると、accumulated defocus画像のゼロクロス点によって非常に高精度にエッジ位置が求められていることを意味する。
- $s$ 座標の標準偏差は、spatio-focal画像上で2直線の交点計算法の安定性を示しており、いずれのエッジに対しても標準偏差が非常に小さく安定に交点が計算できているのが分かる。

## 5 まとめ

本論文では、多重フォーカス画像が構成する3次元画像空間の性質について考察し、フォーカス軸方向の明度解析によって安定なエッジ検出および高精度な距離計測が可能であることを示した。以下では、本手法の特徴と今後の課題について考察する。

### (1) ボケモデル

本研究では、ボケモデルを一般的な円形の点ひろがり関数として多重フォーカス画像の性質を明らかにした。この点ひろがり関数を2次元ガウス分布と考えると、accumulated defocus画像を作成する際の画像間差分は、異なる $\sigma$ (標準偏差)を持つガウス関数でしかされた画像間の差を計算していることになり、DOG(Difference of Gaussian)フィルタに相当すると考えられる。文献[15]ではこの考え方に基づいて、合焦時に撮影した画像とわずかにボケた画像間の差分からエッジ検出が可能であることを示している。本論文で提案したaccumulated defocus画像は、多数の異なるDOGフィルタで得られた画像を加算蓄積したものに相当し、差分という本質的にノイズに弱い演算で得られる情報を積算によって安定化している点が大きな特徴である。

### (2) 直線エッジモデル

本論文ではステップ状の明度変化を持つ直線エッジモデルを考えた。しかし本論文で提案したアルゴリズムは、対象が直線エッジで単調な明度勾配を持つエッジでありさえすれば、正しくエッジを検出することができる。その場合には明度勾配の中央がaccumulated defocus画像のゼロクロス点となり、エッジ点として検出されることになる。また直線でないエッジに対しては、次に述べるフォーカス軸方向の詳細な明度変化解析によって、近似的に直線とみなせるフォーカス範囲を求め、その

範囲内でアルゴリズムを適用することによってエッジ検出が可能となると考えられる。

### (3) フォーカス軸方向の明度変化解析

図8において一部のエッジが検出できなかったり、表1に示したようにエッジの一部で距離計測の精度が低下するのは、エッジ周辺に3つ以上の領域が存在し、それらのボケが互いに重畳することによってフォーカス軸方向の明度が複雑に変化するためである。この問題を解決するには、フォーカス軸方向の明度変化を詳細に解析することによって、本論文で考えた2領域で扱われた直線エッジモデルがあてはまるフォーカス範囲を求めればよい。実際、図8において検出できなかったエッジ2の一部は、処理対象とするフォーカス範囲を適切に設定することにより検出できるようになることを確認している。

今後は本論文で提案したアルゴリズムのより詳細な精度評価と多様なシーンへの適用可能性について検討を加える予定である。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(一般研究C: 課題番号05680298)によって行った。

## 参考文献

- [1] 松山隆司: 多角的視覚情報の統合, 電子情報通信学会誌, Vol.74, No.4, pp.349-353, 1991.
- [2] 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊: 多重絞りカラー画像の解析, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.10, pp.1338-1348, 1991.
- [3] Jarvis, R.A.: A perspective on range finding techniques for computer vision, IEEE PAMI, Vol.5, No.2, pp.122-139, 1983.
- [4] Krotkov, E.: Focusing, IJCV, Vol.1, No.3, pp.223-237, 1987.
- [5] Darrell, T., Worn, K.: Pyramid based depth from focus, CVPR, pp.504-509, 1988.
- [6] Nair, H.N., Stewart, C.V.: Robust focus ranging, CVPR, pp.309-314, 1992.
- [7] Nayar, S.K.: Shape from focus system, CVPR, pp.302-308, 1992.
- [8] Grossmann, P.: Depth from focus, Pattern Recognition Letters Vol.5, pp.63-69, 1987.
- [9] Pentland, A.P.: A new sense for depth of field, IEEE PAMI, Vol.9, No.4, pp.523-531, 1987.
- [10] Subbarao, M.: Parallel depth recovery by changing camera parameters, ICCV, pp.149-155, 1988.
- [11] Lai, S.H., Fu, C.W., Chang, S.: A generalized depth estimation algorithm with a single image, IEEE PAMI, Vol.14, No.4, pp.405-411, 1992.
- [12] Ens, J., Lawrence, P.: An investigation of methods for determining depth from focus, IEEE PAMI, Vol.15, No.2, pp.97-108, 1993.
- [13] Nguyen, T.C., Huang, T.S.: Image blurring effects due to depth discontinuities: Blurring that creates emergent image details, ECCV, pp.347-362, 1992.
- [14] 浅田尚紀, 松山隆司: 多重フォーカスカラー画像の解析, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU'92, pp.II45-II52, 1992.
- [15] Zhu, Q.M., Hung, Y.Y., Tang, H., Shi, D.H.: Edge extraction by active defocusing, Spatial Vision, Vol.5, No.4, pp.253-267, 1991.