

多重フォーカス画像を用いた実時間 3 次元距離計測

松 山 隆 司[†] 竹 村 岳[†]

本論文では、多重フォーカス画像（カメラのフォーカスを規則的に変化させながら撮影した複数枚の画像）を用いた実時間 3 次元距離計測のためのカメラシステムの開発、距離計測アルゴリズムの提案および、それらの性能評価について述べる。以前提案した距離計測法⁵⁾では多数枚の画像を用いる必要があったが、今回提案するアルゴリズムでは、3 枚の多重フォーカス画像から高精度に距離計測ができる。これは、多重フォーカス画像から生成した spatio-focal 画像における明度分布の対称性を利用した高精度モデル当てはめ法によるものである。さらに、このアルゴリズムでは、最適モデル当てはめを反復計算なしに求める計算法をとっており高速計算が可能となっている。論文の後半では、3 枚の多重フォーカス画像を同時に撮影することが可能なカメラシステムの開発について述べ、カメラおよびアルゴリズムの性能を実験によって評価する。一般に距離計測精度は様々なカメラパラメータに影響されるが、今回開発したシステムでは、良い条件の下での計測誤差は 0.3% となっている。

Real-time Depth Sensing from Multi-focus Images

TAKASHI MATSUYAMA[†] and GAKU TAKEMURA[†]

This paper first describes a novel algorithm for real-time 3D depth sensing from *multi-focus images* (a set of images taken by systematically varying the camera focus). Whereas the former algorithm proposed in Ref. 5) required lots of defocused images, the proposed algorithm can compute accurate 3D depth from only three defocused images. This improvement is ascribed to the use of the global symmetry constraint to evaluate the brightness distribution in a *spatio-focal image* generated from the *multi-focus images*. Moreover, the introduction of non-iterative optimization enables fast execution of the algorithm. In the latter half of the paper, we develop a video camera system which can capture three defocused images simultaneously. Using this camera system, we evaluate the performance of the 3D depth sensing method. Experiments show that while the accuracy of the method varies depending on camera parameters, 0.3% relative depth errors can be attained under optimal environments.

1. はじめに

一般に単一のカメラで撮影した 1 枚の画像の持つ情報は不完全かつ不正確である。こうした問題を解決し、信頼性が高くかつ多様なシーン情報を得るための方法として、カメラパラメータを規則的に変化させながら多数枚の画像を撮影し、得られた多重画像の持つ情報を統合しようとする方式がある¹⁾。

この考え方をを用いた方法の一例として、フォーカス制御に基づく距離計測がある。これは、カメラのフォーカス変化にともなって発生する画像のぼけを解析することによって合焦フォーカス位置を求め、それから対象までの 3 次元距離を計算するものである。他の様々な視覚センサによる距離計測法²⁾と比較して、この距

離計測法には、次の 2 つの大きな利点がある。

- (1) 受動型計測：レーザ・レンジファインダや光切断法のように光の照射を必要としないため、測定対象までの距離や範囲を広くすることが可能であるうえ、多様な光環境の下でも距離計測が行える。
- (2) 単一カメラシステム：ステレオ視のように複数のカメラ間の調整や画像間の対応付けといった複雑な処理が不要であるうえ、隠蔽などによって対応付け不能（距離計測不能）となる領域が生じることがなく、簡便かつ画面全体にわたる完全な距離計測が可能である。

これらの利点を活かし実用性のある実時間 3 次元距離センサを開発しようというのが本研究の目的である。フォーカス制御に基づく距離計測法としてはこれまでにいろいろな方法が提案されてきたが^{1), 2)}、それらは次の 2 つに大別できる。

[†] 京都大学大学院情報科学研究科知能情報学専攻
Department of Intelligence Science and Technology,
Graduate School of Informatics, Kyoto University

(1) Depth from Focus (DFF): フォーカスを変えながら画像中のぼけの度合いを評価し、合焦フォーカス位置を探索・選択する。

(2) Depth from Defocus (DFD): ぼけモデルに基づいて、フォーカス変化によって生じるぼけの変化を解析し、合焦フォーカス位置を推定する。

このうち、DFFは合焦フォーカス位置を探索するのに多数枚の画像の撮影・評価を反復する必要があるが、処理時間および距離計測精度の面で問題が生じる²⁾。一方、DFDでは合焦フォーカス位置はモデルから推定されるため、合焦画像を含まない少数枚の画像からでも距離計測が可能で、精度の向上も期待できる^{3),4)}。

最近提案されたDFDに基づく3次元距離計測法としては次の2つがある。

- (1) 小領域内の空間周波数スペクトルの変化を解析する方法^{3),4)}
- (2) 直線エッジにおけるぼけの明度分布変化を解析する方法^{5),6)}

文献3),4)では、小領域内に様なテクスチャが存在することを仮定し、フォーカス変化にともなう領域内の空間周波数スペクトルの変化から距離を計算している。これらの方法では、2枚のぼけた画像から高精度に距離計測を行うアルゴリズムが示されており、実時間化が可能である。しかし文献3)の方法では、特定の空間周波数を持った光パターンの投影が必要で受動型計測とはいえない。また、文献4)の方法は受動型ではあるが、非常に精密な(1/10画素程度)光学系の調整が必要で実用性に問題がある。

一方、文献5)の方法では直線ステップエッジを仮定し、エッジを検出したうえでエッジにおけるぼけの明度分布変化を解析することによって距離を計算している。文献6)ではDFFの原理を併用して精度をあげている。しかしいずれの方法でも多数枚の画像の撮影を必要とし、実時間化が困難であった。

本論文では、多重フォーカス画像(カメラのフォーカスを規則的に変化させながら撮影した複数枚の画像)を用いた距離計測法⁵⁾を基本として、3枚^{*}の画像から高精度に3次元距離を計測するアルゴリズムを提案し、そのためのカメラシステムの開発と、カメラおよびアルゴリズムの性能評価について述べる。

2. 多重フォーカス画像の特性

カメラのレンズ系を単一凸レンズモデルで表した場

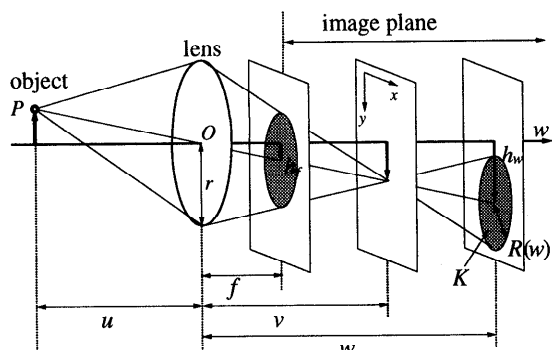


図1 カメラモデル

Fig. 1 Camera model.

合、フォーカス w の変化は撮像面位置の変化としてモデル化でき、撮像面の位置によりぼけの度合いが変化することになる。ここでは、多重フォーカス画像の特性を簡単にまとめる。詳細については文献5)を参照されたい。

2.1 ぼけモデル

図1のような薄凸レンズモデルでのぼけ現象について考える。フォーカス位置 w で得られるぼけ画像 $B(x, y, w)$ は、その位置におけるぼけのない理想的な画像 $J(x, y, w)$ およびぼけの点広がり関数 $K(x, y, w)$ を用いて、

$$B(x, y, w) = J(x, y, w) * K(x, y, w) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $*$ は畳込み積分を表す。 $K(x, y, w)$ としては、次式のような等方的かつ有限の大きさのものを考える。

$$K(x, y, w) = \begin{cases} D\left(\frac{t}{R(w)}\right) & t \leq R(w) \\ 0 & R(w) < t \end{cases} \quad (2)$$

ただし、

$$\int_0^{R(w)} 2\pi t D\left(\frac{t}{R(w)}\right) dt = 1 \quad (3)$$

とする。 $R(w)$ は、 w により決まるぼけ円の半径を表し、図1より次式で定義される。

$$R(w) = \frac{r|w - v|}{v} \quad (4)$$

ただし、 r はレンズの開口半径、 v は合焦フォーカス位置を表し、対象までの距離 u とレンズの焦点距離 f との間には $1/f = 1/u + 1/v$ が成り立つ。

2.2 spatio-focal 画像

以下では被写体として次のような直線ステップエッジを考える。

- 光軸に垂直な平面上に存在する。
- 両側の明度が一様に I_1, I_2 ($I_1 > I_2$) で、エッジ

^{*} 対象までの距離があらかじめ限定されている場合は、文献3),4)と同じく2枚でよい。

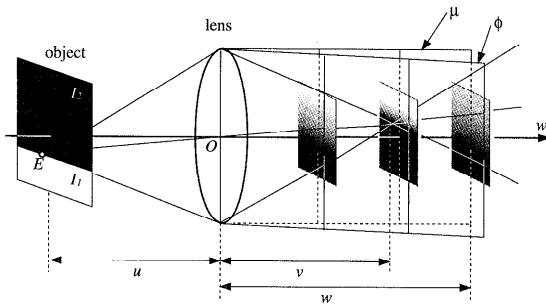


図2 直線エッジ撮影時の多重フォーカス画像空間
Fig. 2 Multi-focus images of an ideal step edge.

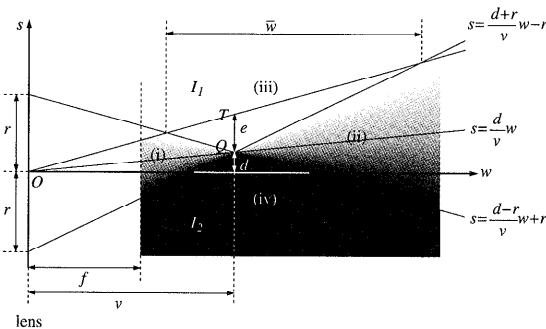


図3 spatio-focal 画像
Fig. 3 Spatio-focal image.

ジ上で明度がステップ状に変化する。

また、議論を簡単にするため、エッジは画像の x 軸 (水平軸) に平行であるとする。

この直線ステップエッジを撮影したときの多重フォーカス画像空間を図2に示す。エッジ上の1点 E 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において点 E のぼけ像の中心点を結ぶ直線となる。この直線を含む平面のうち、直線ステップエッジ像に直交する平面を ϕ とする。また、平面 ϕ が通るレンズ直径を含む平面のうち、光軸を含む平面を μ とする。このとき、多重フォーカス画像空間を平面 ϕ で切断したときに得られる断面画像を、平面 μ に正射影して得られる画像を spatio-focal 画像 (図3) と呼ぶ。

式(4)から、ぼけ円の半径はフォーカス位置 w に対し線形に変化する。このため、spatio-focal 画像は2直線 $s = \frac{d+r}{v}w - r$, $s = \frac{d-r}{v}w + r$ により、次の4つの部分に分けられる (図3)。ただし、 d は合焦エッジ点の光軸からの距離を表す。

- (i), (ii): ぼけ領域。 w (フォーカス値), s (光軸からの距離) の値により明度が $I_2 < I < I_1$ の範囲で変化する。
- (iii), (iv): 合焦明度領域。明度は I_1 (I_2) で一定。

2.3 ぼけ領域における明度変化

フォーカス位置 w における画像平面 P_w 上で、ぼけのない理想的な画像 $J(x, y, w)$ 上のエッジ像から距離 $\rho(w) (< R(w))$ だけ I_1 側に離れたエッジに平行な直線を考え、その直線と ϕ の交点 C を考える。このとき、

$$\tau = \int_{-\rho(w)}^{R(w)} \int_{-\rho(w)}^{R(w)} K(x, y, w) dx dy \quad (5)$$

とおくと、点 C の明度 I は次式のように表すことができる。

$$I = \tau I_1 + (1 - \tau) I_2 \quad (6)$$

このことから、次のことが導かれる。

- (1) 点 C の明度は τ により決まる。
- (2) 式(2), (4)より、 τ は $\frac{\rho(w)}{R(w)}$ により決まる。したがって、 λ を $0 < \lambda < 1$ の定数とおいて w を変化させたとき、 $\rho(w) = \lambda R(w)$ を満たす点の明度は一定となる。

以上のことを spatio-focal 画像 (図3) 上で考えると、ぼけたエッジ像の中心を結ぶ直線は $s = \frac{d}{v}w$ であることから、各 w においてこのエッジ像から $\rho(w) = \lambda R(w)$ だけ離れた点、すなわち $s = \frac{d}{v}w + \rho(w) = \frac{d}{v}w + \lambda R(w)$ の点はすべて同一の明度 $I_1 - \delta$ を持つ。ここで δ は $\lambda = \frac{\rho(w)}{R(w)}$ をある定数としたとき、式(5), (6)から定まる明度変化分を表す。このことと式(4)より、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、

$$s = \frac{d - \lambda r}{v}w + \lambda r, \quad s = \frac{d + \lambda r}{v}w - \lambda r \quad (7)$$

となる。同様に、 I_2 側での明度 $I_2 + \delta$ 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、

$$s = \frac{d + \lambda r}{v}w - \lambda r, \quad s = \frac{d - \lambda r}{v}w + \lambda r \quad (8)$$

となる。

2.4 aligned spatio-focal 画像

文献5)では、spatio-focal 画像をそのまま用いて処理を行っていたが、ここでは以下の方法によってまず aligned spatio-focal 画像を作り、それに対してモデル当てはめ、合焦フォーカス位置の推定を行う。

具体的には、spatio-focal 画像上での合焦エッジ位置を通る直線 $s = \frac{d}{v}w$ がフォーカス軸 w に一致するように、spatio-focal 画像の変形を行う。変形前の spatio-focal 画像上の明度分布を $I_0(w, s)$, 変形後の明度分布を $I_{\text{aligned}}(w, s)$ とすると、この変形は次の

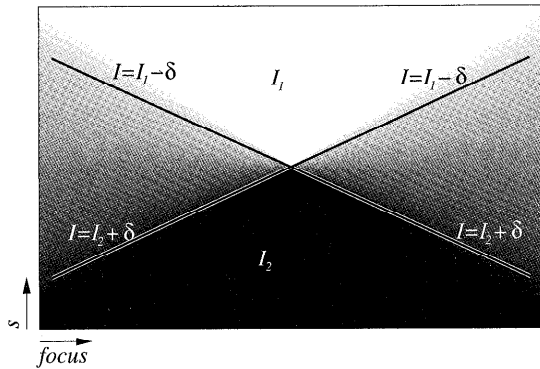


図4 aligned spatio-focal 画像
Fig. 4 Aligned spatio-focal image.

式で表される.

$$I_{aligned}(w, s) = I_0 \left(w, s + \frac{d}{v} w \right) \quad (9)$$

この画像を aligned spatio-focal 画像と呼ぶ. この変形により, 式 (7), 式 (8) の明度 $I_1 - \delta$, $I_2 + \delta$ の等明度直線はそれぞれ次のような式となる.

$$s = -\frac{\lambda r}{v} w + \lambda r, \quad s = \frac{\lambda r}{v} w - \lambda r \quad (10)$$

$$s = \frac{\lambda r}{v} w - \lambda r, \quad s = -\frac{\lambda r}{v} w + \lambda r \quad (11)$$

すなわち, aligned spatio-focal 画像上の $I_1 - \delta$, $I_2 + \delta$ の等明度直線は, 次の 2 つの性質を持つ.

- (1) 合焦エッジ点を通るフォーカス軸に対し線対称
 - (2) 合焦エッジ点を通る直線 $w = v$ に対し線対称
- 言い換えると, aligned spatio-focal 画像は左右対称であり, 明度変化は上下対称となる (図 4).

3. 距離計測アルゴリズム

本論文で提案する多重フォーカス画像を用いた距離計測の手順は以下のようになる.

- (1) 多重フォーカス画像からエッジ点を抽出する.
- (2) 検出された各エッジ点を中心とした aligned spatio-focal 画像を作成し, 明度分布のモデル当てはめにより合焦フォーカス位置を求め, その値から距離を計算する.

3.1 分散値画像を用いたエッジ検出

多重フォーカス画像からエッジを検出する方法として, 文献 5) で提案した方法は, ノイズに対して安定にエッジ検出を行うことができるが, 角付近では検出されるエッジ位置が不正確になってしまうという問題点があった. 本研究ではこの問題を解決するために, フォーカス変化によって生じる, ある点での明度変化の分散を画素値とする分散値画像 $V(x, y)$ を用いてエッジ検出を行う.

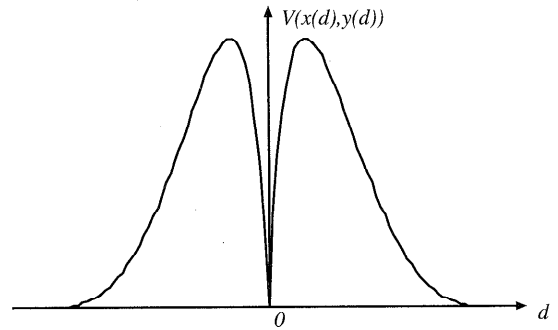


図5 分散値画像におけるエッジ周辺の画素値変化
Fig. 5 Pixel value profile across an edge in the variance image.

具体的にはまず, 多重フォーカス画像はフォーカス w に依存して像の大きさが変わるため, 画像サイズの正規化を行う. 基準となるフォーカスを w_0 としたとき, フォーカス w_0 の画像 $B(x, y, w_0)$ に対する, フォーカス w の画像 $B(x, y, w)$ の拡大率 M は $M = \frac{w}{w_0}$ となる (図 3). したがって, 観測された多重フォーカス画像 $B(x, y, w)$ に対し,

$$B_c(x, y, w) = B(Mx, My, w) \quad (12)$$

とおけば, 画像サイズが正規化された多重フォーカス画像 $B_c(x, y, w)$ が得られる.

これを用いると, 分散値画像 $V(x, y)$ は,

$$V(x, y) = \frac{\int_f^{w_{\max}} (B_c(x, y, w) - \overline{B_c(x, y, w)})^2 dw}{\int_f^{w_{\max}} dw} \quad (13)$$

となる. ここで,

$$\overline{B_c(x, y, w)} = \frac{\int_f^{w_{\max}} B_c(x, y, w) dw}{\int_f^{w_{\max}} dw} \quad (14)$$

である. 理想的な直線ステップエッジの場合, エッジからの距離 d の関数 $V(x(d), y(d))$ として分散値の変化を描いたグラフを図 5 に示す^{*}.

図から分かるように, 分散値はエッジ上で鋭い谷を作ることから, 次のようにすればエッジが検出できる.

- (1) 分散値画像に線検出オペレータを適用し, 分散値の谷線上の点を検出する.
- (2) 検出された点に対し, 分散値の小さな点を閾値処理によって求め, それをエッジ点とする.

図 6 に示す多重フォーカス画像から, 文献 5) の方法および上記の方法によってエッジ検出を行った結果を, それぞれ図 7 (a), (b) に示す. 前者の方法では角

^{*} ばけ関数としては, ばけ円内の値が一律な円盤関数を用いた.

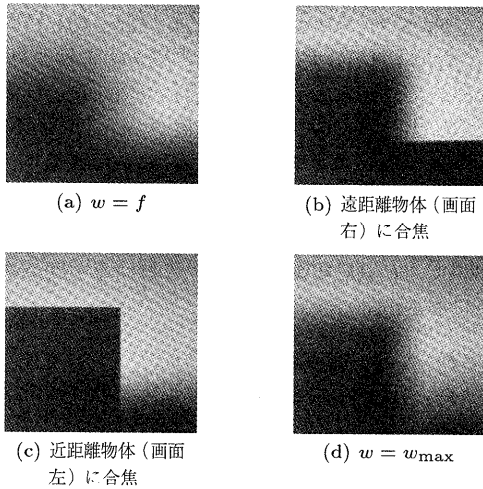


図6 多重フォーカス画像
Fig. 6 Multi-focus images.

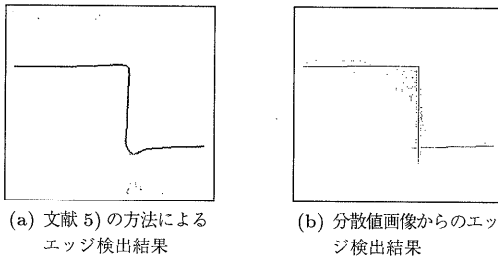


図7 多重フォーカス画像からのエッジ検出
Fig. 7 Detecting edges from multi-focus images.

の部分でのエッジ位置が不正確になっているのに対して、後者の方法では非常に正確に角が検出できることが分かる。また、後者の結果に含まれる雑音は後の合焦フォーカス位置推定処理の中で削除できるので問題ない。

3.2 等明度直線束モデル

抽出された各エッジ点に対して、多重フォーカス画像から aligned spatio-focal 画像を作り、その明度分布に対してモデル当てはめを行うことによって合焦フォーカス位置（3次元距離）を求める。以下ではその具体的方法を述べる。

文献5)では、spatio-focal 画像中の等明度点が直線状に並ぶという弱い制約しか用いていなかったため、精度を上げるために多数枚の多重フォーカス画像が必要となっていた。これに対して本論文では2.4節で述べた aligned spatio-focal 画像の持つ対称性という大局的な制約を等明度直線束モデル（図8）として表し、それを用いたモデル当てはめを行う。これによって少数枚の多重フォーカス画像の場合でも合焦フォーカス位置の高精度推定が可能となる。

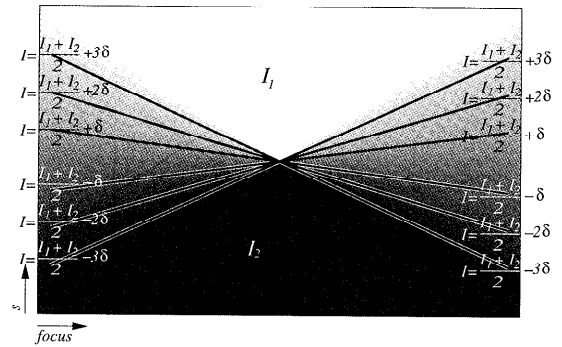


図8 等明度直線束モデル
Fig. 8 A bundle of constant intensity lines.

具体的手順は以下のようになる。

- (1) 明度 $\frac{I_1 + I_2}{2} \pm j\delta$ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) の等明度直線束を aligned spatio-focal 画像上に仮定する。ただし、 n, δ は $n\delta < \frac{I_1 - I_2}{2}$ を満たす適当な定数である。
- (2) 直線束上の各点におけるモデル明度と観測明度との誤差を最小にするような直線束の位置パラメータを最適化によって求める。

aligned spatio-focal 画像の持つ対称性を満たす、明度 $\frac{I_1 + I_2}{2} \pm j\delta$ の等明度直線束の形状モデルを次式で表す。

$$\begin{cases} s = s_0 + c_j(w - v_0) \\ s = s_0 - c_j(w - v_0) \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

これらの直線をそれぞれ l_j, m_j と表す。ここで、 (v_0, s_0) は直線束の交点で、合焦エッジ位置を表す未知パラメータである^{*}。直線の傾きを表すパラメータ $c_j > 0$ ($j = 1, 2, \dots, n$) は先に述べたばけモデルから次のような制約を満たす。

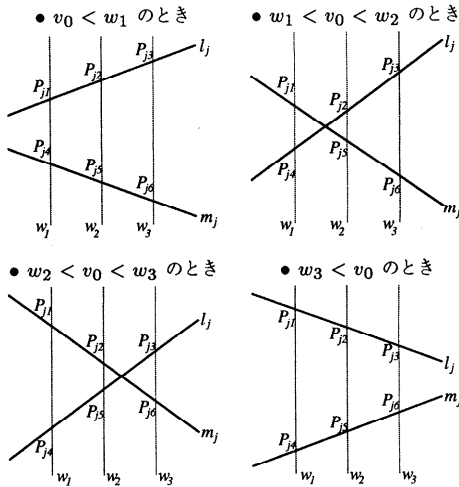
式(4)より $R(w) = \frac{r|w - v_0|}{v_0}$ である。また、各 w において、式(15)の直線上の点からばけたエッジ像の中心位置までの距離は $\rho(w) = c_j|w - v_0|$ である。これらを式(5)に代入すると、

$$\tau(w) = \int_{c_j|w - v_0|}^{\frac{r|w - v_0|}{v_0}} \int_{-\frac{r|w - v_0|}{v_0}}^{\frac{r|w - v_0|}{v_0}} K(x, y, w) dx dy \quad (16)$$

一方、式(6)において $I = \frac{I_1 + I_2}{2} + j\delta$ とおくことにより、

$$\tau(w) = \frac{j\delta}{I_1 - I_2} + \frac{1}{2} \quad (17)$$

^{*} エッジ検出の結果、画素単位では s_0 の値は分かっているが、精度を高めるため、モデル当てはめ計算では未知数として計算を行う。

図9 v_0 と w_1, w_2, w_3 の関係Fig. 9 Possible relations between v_0, w_1, w_2 , and w_3 .

したがって、式 (16), (17) より

$$\int_{-c_j|w-v_0|}^{\frac{r|w-v_0|}{v_0}} \int_{-\frac{r|w-v_0|}{v_0}}^{\frac{r|w-v_0|}{v_0}} K(x, y, w) dx dy = \frac{j\delta}{I_1 - I_2} + \frac{1}{2} \quad (18)$$

という制約式が得られる。ここで、 $j, \delta, I_1, I_2, r, K$ は既知であり、上式は、 w と c_j, v_0 の関係を表す制約式となっている。

3.3 最適化

ここでは、式 (18) の制約の下で最適化すべき評価関数を求める。

今、フォーカス w_1, w_2, w_3 ($w_1 < w_2 < w_3$) で画像を撮影し、3枚の多重フォーカス画像 $B(x, y, w_1), B(x, y, w_2), B(x, y, w_3)$ が得られたとする。これらから作られる (3つの1次元画像からなる) aligned spatio-focal 画像 $I(w, s)$ を次のように表す。

$$\begin{aligned} I(w_1, s) &= I_{w_1}(s) \\ I(w_2, s) &= I_{w_2}(s) \\ I(w_3, s) &= I_{w_3}(s) \end{aligned} \quad (19)$$

このとき、合焦フォーカス位置 v_0 と w_1, w_2, w_3 との関係により図9のように4通りの場合が存在する。ただし、図9では簡単のため、等明度直線を2本 (l_j, m_j) しか描いていない。図9の等明度直線 l_j, m_j と、 $w = w_1, w = w_2, w = w_3$ との交点 $P_{jk} (k = 1, 2, \dots, 6)$ を以下のように定義する。

- (1) $v_0 < w_1$ のとき P_{j1}, P_{j2}, P_{j3} は直線 l_j 上、 P_{j4}, P_{j5}, P_{j6} は直線 m_j 上にある。

- (2) $w_1 < v_0 < w_2$ のとき P_{j2}, P_{j3}, P_{j4} は直線 l_j 上、 P_{j1}, P_{j5}, P_{j6} は直線 m_j 上にある。
- (3) $w_2 < v_0 < w_3$ のとき P_{j3}, P_{j4}, P_{j5} は直線 l_j 上、 P_{j1}, P_{j2}, P_{j6} は直線 m_j 上にある。
- (4) $w_3 < v_0$ のとき P_{j4}, P_{j5}, P_{j6} は直線 l_j 上、 P_{j1}, P_{j2}, P_{j3} は直線 m_j 上にある。

よって、式 (15) より、式 (19) で表される観測画像上において、 $P_{jk} (k = 1, 2, \dots, 6)$ における明度は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{j1} &: I_{w_1}(s_0 + c_j\sigma_1(w_1 - v_0)) \\ P_{j2} &: I_{w_2}(s_0 + c_j\sigma_2(w_2 - v_0)) \\ P_{j3} &: I_{w_3}(s_0 + c_j\sigma_3(w_3 - v_0)) \\ P_{j4} &: I_{w_1}(s_0 - c_j\sigma_1(w_1 - v_0)) \\ P_{j5} &: I_{w_2}(s_0 - c_j\sigma_2(w_2 - v_0)) \\ P_{j6} &: I_{w_3}(s_0 - c_j\sigma_3(w_3 - v_0)) \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は場合分けパラメータで以下のように定義される。

- (1) $v_0 < w_1$ のとき $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1$
- (2) $w_1 < v_0 < w_2$ のとき $\sigma_1 = -1, \sigma_2 = \sigma_3 = 1$
- (3) $w_2 < v_0 < w_3$ のとき $\sigma_1 = \sigma_2 = -1, \sigma_3 = 1$
- (4) $w_3 < v_0$ のとき $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -1$

一方、等明度直線束モデルより、2直線 l_j, m_j 上の点 P_{j1}, P_{j2}, P_{j3} の明度は $\frac{I_1 + I_2}{2} + j\delta$ 、 P_{j4}, P_{j5}, P_{j6} の明度は $\frac{I_1 + I_2}{2} - j\delta$ で与えられる。そこで、 l_j, m_j の妥当性を評価する尺度として、モデル明度と観測明度の差の2乗和 S を次のように定義する。

$$\begin{aligned} S &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^3 \left[\left\{ \frac{I_1 + I_2}{2} + j\delta - I_{w_i}(s_0 + c_j\sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{I_1 + I_2}{2} - j\delta - I_{w_i}(s_0 - c_j\sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (21)$$

すなわち、式 (18) の制約の下で式 (21) を最小化する v_0, s_0, c_j, σ_i を求めることができれば、図9の場合分けと抽出したエッジ点に対する合焦フォーカス位置が計算できたことになる。

3.4 問題の簡化 (1)

上記の最小化は次のような理由から困難である。

- 使用するレンズ系の特性から、式 (18) 中の関数 $K(x, y, w)$ の具体的な形を求める必要がある。
- 式 (18) は、 c_j, v_0 に関する積分関数であり、解析的に解くことは難しい。
- さらに、本研究では実時間処理を大きな目的とし

ているため、反復計算による数値解法をとることもできない。

そこで、解析解を求めるための第1の仮定として、次の仮定を導入する。

仮定1: aligned spatio-focal 画像中のぼけ領域における空間 (s) 軸方向の明度変化は、ある区間においては線形である。

すなわち、式 (15) において $c_j = jc_0$ ($j = 1, 2, \dots, n$) のようにおけるものとする。このとき、式 (15) は次のようになる。

$$\begin{cases} s = s_0 + jc_0(w - v_0) \\ s = s_0 - jc_0(w - v_0) \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (22)$$

このことから、aligned spatio-focal 画像中の、仮定1が成り立つぼけ領域内 (各 w に対して $s_1(w) < s < s_2(w)$ とする) の点 (w, s) において、明度 I は次のように表される。

$$I = \frac{I_1 + I_2}{2} + \frac{s - s_0}{c_0|w - v_0|} \delta \quad (23)$$

これがモデル化された明度である。

このモデルを用いると、明度が線形に変化するぼけ領域において、式 (19) で示した観測画像の明度 $I(w_i, s)$ は $\frac{I_1 + I_2}{2} + \frac{s - s_0}{c_0\sigma_i(w_i - v_0)} \delta$ に一致しなければならない。したがって、合焦位置 (v_0, s_0) の妥当性を評価する尺度 S は次のように定義される。

$$S = \sum_{s_1(w) \leq s \leq s_2(w)} \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{I_1 + I_2}{2} + \frac{s - s_0}{c_0\sigma_i(w_i - v_0)} \delta - I(w_i, s) \right\}^2 \quad (24)$$

ただし、この式は、式 (15) の $2n$ 本の等明度直線束ではなく、aligned spatio-focal 画像中で、仮定1が満たされる区間 $s_1(w) \leq s \leq s_2(w)$ 内に存在するすべてのデータ点における誤差を表しており、 σ_i は式 (20) で導入したものと同様の場合分け変数を表す。また、仮定の導入により、式 (18) の制約条件はなくなる。

3.5 問題の簡単化 (2)

(v_0, s_0) について式 (24) を最小化する問題は非線形最適化となり、解析解を計算するのは困難である。そこで、さらに問題を簡単化するため、先に述べた仮定1に加え次の仮定を導入する。

仮定2: 仮定1が成り立つ範囲内において、aligned spatio-focal 画像の明度分布 $I(w_i, s)$ ($i = 1, 2, 3$) に対してそれぞれ直線当てはめを行うことにより、以下の係数

a_i, b_i ($i = 1, 2, 3$) をあらかじめ求めることができる。

$$\begin{aligned} I(w_1, s) &= a_1 + b_1 s \\ I(w_2, s) &= a_2 + b_2 s \\ I(w_3, s) &= a_3 + b_3 s \end{aligned} \quad (25)$$

以下ではこれを観測された明度として扱う。

このとき図9に示した点 P_{jk} ($k = 1, 2, \dots, 6$) で観測される明度は

$$\begin{aligned} P_{j1} &: a_1 + b_1(s_0 + jc_0\sigma_1(w_1 - v_0)) \\ P_{j2} &: a_2 + b_2(s_0 + jc_0\sigma_2(w_2 - v_0)) \\ P_{j3} &: a_3 + b_3(s_0 + jc_0\sigma_3(w_3 - v_0)) \\ P_{j4} &: a_1 + b_1(s_0 - jc_0\sigma_1(w_1 - v_0)) \\ P_{j5} &: a_2 + b_2(s_0 - jc_0\sigma_2(w_2 - v_0)) \\ P_{j6} &: a_3 + b_3(s_0 - jc_0\sigma_3(w_3 - v_0)) \end{aligned} \quad (26)$$

となる。この結果、式 (24) の評価関数は次のようになる。

$$\begin{aligned} S &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{I_1 + I_2}{2} + j\delta - a_i - b_i(s_0 + jc_0\sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 \\ &+ \left\{ \frac{I_1 + I_2}{2} - j\delta - a_i - b_i(s_0 - jc_0\sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 \end{aligned} \quad (27)$$

3.6 最適解

式 (27) を最小化する v_0, s_0, c_0 は解析的に求めることができ、以下のようになる。

$$\begin{cases} v_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 \sigma_i b_i w_i \sum_{i=1}^3 b_i^2 w_i - \sum_{i=1}^3 \sigma_i b_i \sum_{i=1}^3 b_i^2 w_i^2}{\sum_{i=1}^3 b_i^2 \sum_{i=1}^3 \sigma_i b_i w_i - \sum_{i=1}^3 \sigma_i b_i \sum_{i=1}^3 b_i^2 w_i} \\ s_0 = \frac{\frac{I_1 + I_2}{2} \sum_{i=1}^3 b_i - \sum_{i=1}^3 a_i b_i}{\sum_{i=1}^3 b_i^2} \\ c_0 = \delta \cdot \frac{\sum_{i=1}^3 b_i^2 \sum_{i=1}^3 \sigma_i b_i w_i - \sum_{i=1}^3 \sigma_i b_i \sum_{i=1}^3 b_i^2 w_i}{\sum_{i=1}^3 b_i^2 w_i^2 \sum_{i=1}^3 b_i^2 - \left(\sum_{i=1}^3 b_i^2 w_i \right)^2} \end{cases} \quad (28)$$

上式を求めるときは $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を定数としているため、図9の場合分けは次のようにして行う。4通りの場合について、それぞれ式 (28) を用いて合焦エッジ位置 (v_0, s_0) を計算し、式 (27) の S の値を最小とす

るものを解とする．最終的に得られた S の値は，解の精度を表している．

本来 aligned spatio-focal 画像はあらかじめ検出されたエッジ点を中心に作成するものである．したがって，合焦エッジ位置 (v_0, s_0) は理想的な場合には aligned spatio-focal 画像の空間軸上に位置し，観測データがモデルからずれると軸上からずれる．つまり式 (28) で計算された s_0 の値は，この解自身の精度およびエッジ検出の精度を表していることになる．詳細は省略するが，実際のプログラムでは S や s_0 の値を用いて雑音によるエッジ点の検出・除去を行っている．

4. 多重フォーカスカメラの開発

以上述べたアルゴリズムを用いて実際に実時間距離計測を行うには，3枚の多重フォーカス画像を同時に撮影するカメラシステムが必要になる．そのための方法として本研究では，3CCD カメラの改造を考えた．3CCD カメラは，R, G, B の3つの画像をそれぞれ別の CCD で撮影するカメラである．したがって，CCD の光軸方向の位置を互いにずらせば撮像面位置（フォーカス）が変化し，フォーカスの異なる3枚の画像が同時に撮影できる．この原理図および試作した多重フォーカスカメラの写真を図 10 に示す．

4.1 多重フォーカスカメラの設計

開発した多重フォーカスカメラは市販の 3CCD ビデオカメラを改良したもので，撮像素子：1/3 インチ CCD，画素数：768 × 494，水平解像度：750TV 本，出力：RGB，ガンマ：1，となっている．出力される RGB ビデオ信号を非圧縮 RGB ビデオキャプチャボードによってデジタル化することにより，それぞれが 640 × 480，8 ビットの 3 枚の多重フォーカス画像が得られる．

多重フォーカスカメラを設計するうえで最も重要な事項として，3枚の CCD の光学的な間隔，つまり CCD をずらす量がある．我々は C マウントのレンズを固定するためのネジを回転させることにより物理的に CCD 面の空間位置を移動させ，安定な距離計測を実現するのに必要なばけ量を発生させる CCD のずれの大きさを計測し，3枚の CCD を 1mm 程度ずつずらせばよいという結果を得た⁷⁾．

4.2 多重フォーカスカメラのキャリブレーション

多重フォーカスカメラを用いて距離計測を行ううえで，事前に計測しておかなければならないカメラパラメータとして次の 6 つがある．

- (1) 各 CCD の多重フォーカス画像空間内でのフォーカス軸方向の位置

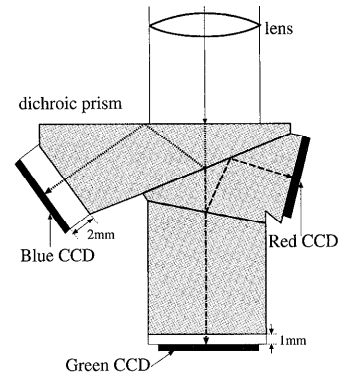


図 10 多重フォーカスカメラ

Fig. 10 Multi-focus camera.

- (2) 各 CCD の多重フォーカス画像空間内での空間軸方向の位置
- (3) 各画像における像の拡大率，拡大中心の位置
- (4) 画像間の像の回転角度，回転中心
- (5) 各 CCD に対する実効的な絞り量^{*}
- (6) 各 CCD のゲイン，バイアス量

4.3 多重フォーカスカメラの性能評価

上記のキャリブレーションを行った後，単純な直線ステップエッジを描いた平面を対象として実験を行い，距離計測の性能を評価した．以下では，対象までの距離を u ，R, G, B の CCD が合焦となる距離をそれぞれ u_R, u_G, u_B とおく．なお，キャリブレーションおよび以下で述べる距離計測実験・評価の詳細は文献 7) を参照していただきたい．

レンズは Canon J6 × 11REA-IA-II ズームレンズ（焦点距離は 69mm で固定）を用い，絞りは開放 (1:1.6) とした．レンズのフォーカス目盛を 60^{**} に設定したときの距離計測結果として，図 11 が得られた． $u = 200$ cm としたときの相対誤差は RMS エラー

^{*} 物理的には絞りは 1 つであるが，精度を上げるには各 CCD に対する実効的な絞りを独立に求める必要がある．

^{**} $u_R = 337$ cm, $u_G = 194$ cm, $u_B = 137$ cm となるフォーカス目盛．

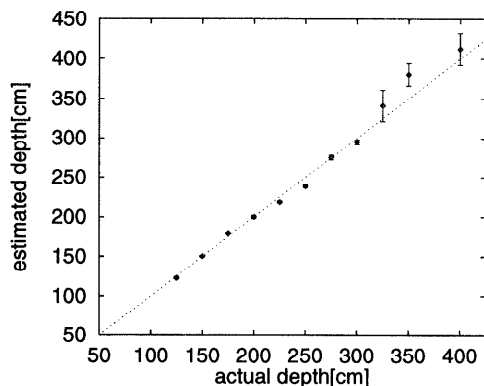


図 11 距離計測結果

Fig. 11 Result of depth sensing.

で 0.8%, $u = 150$ cm としたときは 0.64% となっている。 $u_B < u < u_R$ の区間は相対精度が高く、この区間をはずれると、相対精度が急速に悪化している。しかし、これは実用上問題とはならない。なぜなら、レンズの焦点距離やフォーカスを変えることによって u_R , u_G , u_B を変えることができる（後述）ため、測定したい距離に合った焦点距離やフォーカスを選ぶべきからである。また、 $u \geq 225$ cm では絶対誤差も大きくなっているが、これは今後のカメラキャリブレーションの改良により解決可能であると考えている。

一方、フォーカス目盛を 220 に $\star$ 設定し、 $u = 75$ cm として距離計測した結果、相対誤差は RMS エラーで 0.32% となり、最良の精度が得られた。

レンズのフォーカスを変化させることによって、このシステムで距離計測ができる範囲がどのように変わるかを図 12 に示す。ここでは、距離計測結果の相対精度が 5% 以下になる場合、距離計測可能であるとしている。横軸はレンズのフォーカス目盛、縦軸は対象までの距離を示す。また、図中の 3 本の曲線はそれぞれ u_R , u_G , u_B を示す。

本論文で提案した、直線ステップエッジにおけるぼけモデルを利用した距離計測法では、シーン中のエッジ間隔が狭くなると隣接エッジのぼけ像が互いに重なり距離計測ができなくなる。そこで、エッジ間隔がどの程度までであれば距離計測が可能であるかを調べるため、平面上に白・黒の正方形からなる市松模様を描き、正方形の大きさおよび平面までの距離を変化させながら距離計測実験を行った。その結果、図 12 に基づきレンズのフォーカスをうまく調整すれば、200 cm 離れた平面上でエッジ間隔が 1 cm 程度以上あれば精

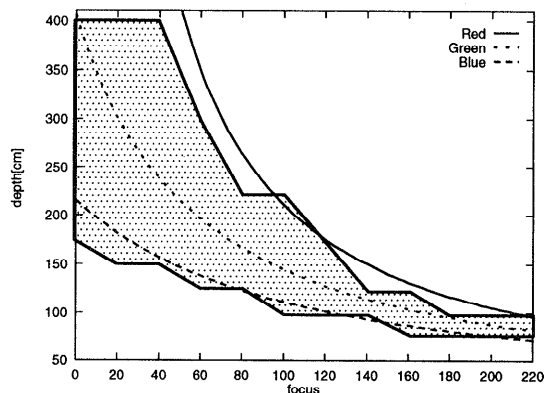


図 12 距離計測可能範囲

Fig. 12 Range of measurable depth.

度良く距離計測ができることが分かった。この値は、試作した多重フォーカスカメラ（焦点距離 69 mm）で距離計測可能なシーンの模様の複雑さを表しており、対象までの距離に比例して変わる $\star\star$ 。

5. おわりに

本論文では、3 枚の多重フォーカス画像から反復計算を行わずに高精度に 3 次元距離を計算するアルゴリズムを示した。また、3 枚の多重フォーカス画像を同時に撮影できるカメラシステムを 3CCD カメラを改造することにより実現し、相対精度が最高 0.3% と優れた距離計測が可能であることを実証した。

今後は以下の点について検討、改良を加え、多重フォーカスカメラを用いた実時間 3 次元距離計測装置の実用化を目指す予定である。

- 非分光 3CCD カメラ：現在の多重フォーカスカメラでは、通常の分光プリズムを用いているため、入射光が R, G, B に分光され、距離計測対象が異なる色で構成されている場合には使用できない。これについては現在、RGB 分光を行わない多重フォーカスカメラを設計・製作している。
- 高精度化：現在得られているエッジ検出、距離計測精度は完全に満足のいくものではなく、カメラキャリブレーションと合わせてアルゴリズムのさらなる改良を行う必要がある。
- 高速化：現在の距離計算は、DEC ALPHA (400 MHz) を用いて約 0.35 秒かかっており、ピ

$\star$ $u_R = 99$ cm, $u_G = 82$ cm, $u_B = 73$ cm となるフォーカス目盛。

$\star\star$ 具体的には、対象までの距離に応じてレンズのフォーカスを調整し、3 枚の CCD のうち、中央の GreenCCD がちょうど合焦となるようにする。こうすると、400 cm 先の間隔 2 cm のエッジ、100 cm 先の間隔 0.5 cm のエッジといった複雑さを持つ対象の距離が測れる。

デオレート処理はできていない。しかし、プログラムの改良と DSP や並列処理の利用を考えれば、1/30 秒以内での計算を容易に実現できると考えている。特に、提案した計算アルゴリズムが反復計算を含まず、各画素独立に処理を行えることから、単純な画面分割による並列処理だけで十分な高速化が実現できる。

- 距離・完全合焦画像の生成：現在の方法で得られる最終結果は、3 次元距離付きエッジ画像である。今後は、そこから距離画像や完全合焦画像を作成するアルゴリズムを考案し、より多くの応用に利用可能な情報を作り出すことを考える必要がある。
- 能動的距離計測：多重フォーカスカメラを用いた 3 次元距離計測の利点としては、先にあげた受動型計測、単一カメラシステムに加え、カメラパラメータの変更により距離計測範囲や精度が動的に変えられるという柔軟性がある。この特長を活かすことにより、多様な環境において柔軟かつ頑健に動作する能動的距離計測装置が実現できる。

本研究を行うにあたり、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業 (JSPS-RFTF 96P00501) および文部省科学研究費 (基盤研究 (A)(2)07558047) の補助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 松山隆司, 浅田尚紀: 多重画像の統合—高精度画像計測と多機能画像生成, 電子情報通信学会誌, Vol.79, No.5, pp.490-499 (1996).
- 2) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).
- 3) Nayer, S.K., Watanabe, M. and Noguchi, M.: Real-time focus range finder, *Proc. 5th Int. Conf. on Computer Vision*, pp.995-1001 (1995).
- 4) Watanabe, M. and Nayer, S.K.: Minimal Operator Set for Passive Depth from Defocus, *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.431-438 (1996).
- 5) 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-D-II, No.6, pp.1048-1058 (1994).
- 6) 藤原久永: 多重フォーカスレンジセンサー, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU '96, pp.II241-II246 (1996).
- 7) 竹村 岳: 多重フォーカス画像を用いた実時間 3 次元距離計測, 修士論文, 京都大学大学院工学研究科 (1997).

(平成 9 年 6 月 23 日受付)

(平成 10 年 4 月 3 日採録)

松山 隆司 (正会員)



昭和 26 年生。昭和 51 年京都大学大学院修士課程修了。京都大学助手, 東北大学助教授, 岡山大学教授を経て平成 7 年より京都大学教授。現在京都大学大学院情報学研究科知

能情報学専攻教授。工学博士。画像理解, 人工知能, 分散協調処理の研究に従事。昭和 55 年情報処理学会創立 20 周年記念論文賞, 平成 2 年人工知能学会論文賞, 平成 5 年情報処理学会論文賞, 平成 6 年電子情報通信学会論文賞, 平成 7 年第 5 回国際コンピュータビジョン会議 Marr Prize, 平成 8 年国際パターン認識連合 Fellow。本学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会前主査, フロンティア領域委員会委員長。

竹村 岳



昭和 48 年生。平成 9 年京都大学大学院工学研究科電子通信工学専攻修了。現在 (株) 東芝勤務。