

多重フォーカス画像を用いた実時間 3 次元距離計測 —分散協調視覚システムのための多機能高精度センサの開発—

竹村 岳 松山 隆司

京都大学大学院工学研究科 電子通信工学専攻

実世界で柔軟かつ頑健に機能する視覚システムを実現するには、実時間で 3 次元距離が計測できる視覚センサを開発することが望まれる。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 次元距離計測アルゴリズムの提案および、そのためのセンサの開発と性能評価について述べる。以前提案した多重フォーカス画像を用いた距離計測法 [5] では多数枚の画像を用いる必要があったが、本研究で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でも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によるものである。さらに、今回提案するアルゴリズムは、最適モデル当てはめを反復計算なしに求める計算法を採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、そ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パラメータに影響されるが、今回開発したセンサでは、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

G. Takemura T. Matsuyama

Kyoto University

A real-time 3D depth sensor is useful to develop a robust and flexible vision system which can work persistently in the real world. This paper first describes a novel algorithm for real-time 3D depth sensing using *multi-focus images* and a video camera system which can capture three defocused images simultaneously. Then we evaluate the performance of the 3D depth sensing method with several experiments. Whereas the depth sensing algorithm proposed in [5] required lots of *multi-focus images*, the algorithm proposed in this paper can compute accurate 3D depth from only three defocused images. This improvement is ascribed to the use of the global symmetry constraint to evaluate brightness distribution in a *spatio-focal image*, which is generated from *multi-focus images*. Moreover, the introduction of non-iterative optimization enables fast execution of the algorithm. Experiments show that the best depth accuracy of the sensor is 0.3%.

1 はじめに

実世界の動的状況理解とその柔軟な映像生成を目指す分散協調視覚システム [1] では、多機能高精度な視覚センサの利用が不可欠である。しかし、単一のカメラで撮影した単一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、カメラから多角的な情報を得るための方法として、カメラの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 [2]。

この考え方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。これはレンズのフォーカスを変化させることにより発生する画像のぼけの変化を解析し、対象までの 3 次元距離を求めるものである。この距離計測法には、次の 2 つの大きな特長がある。

1. 受動型: 光源の照射を必要としないので、測定対象や範囲を広くすることが可能である。
2. 単一カメラ: 設備や調整、計算を簡便にすることが可能である。

これまでに提案されたフォーカス制御に基づく距離計測法にはいろいろな方法がある [2] が、それらは次の 2 つに大別することができる。

1. Depth from Focus (DFF): フォーカス調節を行ない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する手法
2. Depth from Defocus (DFD): ぼけモデルに基づいて、フォーカス調節あるいは絞り調節によって生じるぼけの変化を解析し、距離を推定する手法
このうち、DFF は合焦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、実時間化は不可能である。それに対し DFD では合焦位置はぼけモデルから推定されるため、合焦画像を含まない少数の画像からでも距離計算が可能で、実時間化できる可能性を持つ。

最近提案された DFD に基づく 3 次元距離計測法として次の 2 つがある。

1. 小領域の空間周波数スペクトルを解析する方法 [3][4]
2. 直線エッジにおけるぼけの明度分布を解析する方法 [5][6]

文献 [3][4] の方法では小領域内に一様なテクスチャが存在することを仮定し、その小領域の空間周波数スペクトルを解析して距離を計算している。[4] では、2 枚の画像から高精度に距離計測を行なう方法が示されており、実時間化が可能である。しかしこの方法では、小領域内に単一のエッジのみが存在する場合や隠蔽エッジ付近では、モデルの適合性が損なわれ、精度が低下すると考えられる。一方、文献 [5][6] の方法では直線ステップエッジを仮定し、エッジを検出した上でそのエッジのぼけの明度分布を解析し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

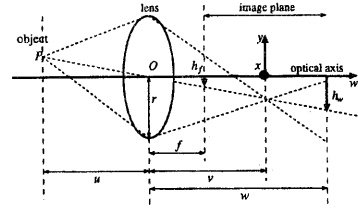


図 1: カメラモデル

度をあげている。しかし [5][6] の方法では多数枚の画像と計算時間を必要とし、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 枚程度の少数の画像から高精度に距離計測するアルゴリズムを提案する。以下ではまず、多重フォーカス画像の特性をまとめ、次に分散値画像を用いたエッジ検出法について述べる。次に、多重フォーカス画像から作られる spatio-focal 画像における明度分布のモデルとして等明度直線束モデルを考え、反復計算なしに高精度に合焦位置を求めるアルゴリズムを述べる。最後に、フォーカスの異なる 3 枚の画像を同時に撮影するカメラシステムの開発について述べ、このカメラシステムの性能評価を実験により行なう。

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合、レンズのフォーカス 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状態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。この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、次のようにモデル化できる。

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

ここで、 $*$ は畳み込み積分を表し、点広がり関数 $K(x, y, w)$ 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、

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

とし、 $R(w)$ は w により決まるぼけ円の半径とする。

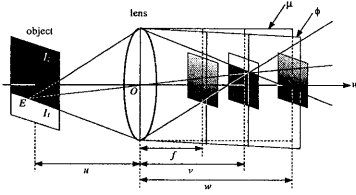


図 2: 直線エッジ撮影時の多重フォーカス画像空間

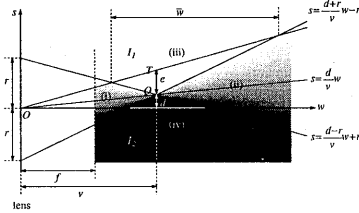


図 3: spatio-focal 画像

また、図 1 より $R(w)$ は次式で表される。

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

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 、レンズの焦点距離 f との間に $1/f = 1/u + 1/v$ が成り立つ。

2.2 spatio-focal 画像

被写体として、以下では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。
- 画像の x 軸 (水平軸) に平行である。
- 両側の明度が一樣に I_1, I_2 ($I_1 > I_2$) で、明度がステップ状に変化する。

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。エッジ上の一点 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ような平面を 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) に示すように、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と仮定している。そのため、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、図 3 に示すように次の 4 つの部分に分けることができる。ただし、 d は合焦エッジ点の光軸からの距離を表す (図 3)。

(i), (ii): ぼけ領域。 w, s の値により明度が

$$I_2 < I < I_1 \text{ の範囲で変化する。}$$

(iii): 合焦明度領域。明度は I_1 で一定。

(iv): 合焦明度領域。明度は 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 $P(x, y, w)$ 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、

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

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 画像上で考えると、エッジ像を通る直線は $s = \frac{d}{v}w$ (図 3) 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 $s = \frac{d}{v}w + \rho(w) = \frac{d}{v}w + \lambda R(w)$ の点は全て同一の明度 $I_1 - \delta$ 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

ここで、spatio-focal 画像上でのエッジ位置を通る直線 $s = \frac{d}{v}w$ がフォーカス軸に一致するように、spatio-focal 画像の変形を行なう。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 $I_{\text{aligned}}(w, s)$ で表すとすると、この変形は次の式で表される。

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

この画像を aligned spatio-focal 画像と呼ぶ。この変形により、式 (7) の明度 $I_1 - \delta$ の等明度直線は次のような式となる。

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

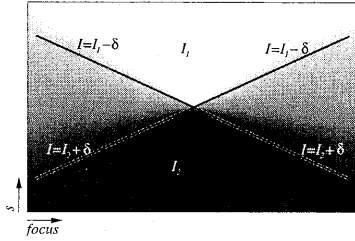


図 4: aligned spatio-focal 画像

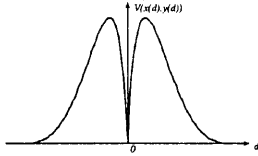


図 5: エッジ周辺の分散値画像の画素値の変化

同様に式 (8) の明度 $I_2 + \delta$ の等明度直線は次のような式となる。

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

すなわちこの変形により aligned spatio-focal 画像上の $I_1 - \delta$, $I_2 + \delta$ の等明度直線は、次の 2 つの性質を持つことになる。

- (*) $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ 合焦エッジ点を通りフォーカス軸に平行な直線に対し線対称} \\ \bullet \text{ 合焦エッジ点を通る直線 } w = v \text{ に対し線対称} \end{array} \right.$

すなわち 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

多重フォーカス画像を用いた距離計測の手順は以下になる。

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、Accumulated Defocus 画像の零交差を用いる方法が提案されている [5]。この方法は、ぼけた画像のみから直線エッジを検出するために考案された手法であり、ノイズに対して安定にエッジ検出を行なうことができるが、非直線エッジに対して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

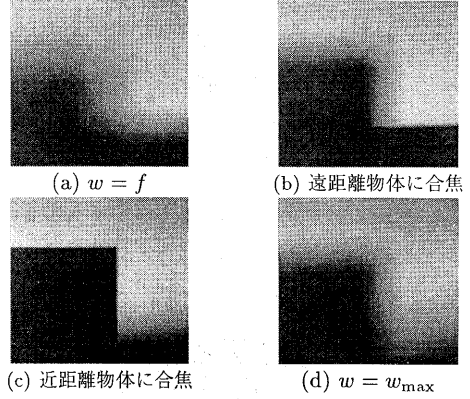


図 6: 多重フォーカス画像

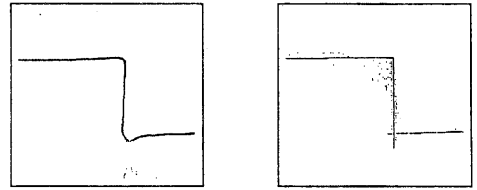


図 7: エッジ検出結果の比較

出を行なう [7]。この方法では、 90° 以下の角度で折れ曲がっている鋭角 (270° 以上の鈍角) エッジの折れ曲がり部分に関しては正確なエッジ位置が検出できる保証はないが、それ以外の場合には正確なエッジ位置を求めることができる。

具体的にはまず、多重フォーカス画像はフォーカス w が大きくなるにつれて像が拡大するため、同一点での明度変化の分散値を計算するには画素の対応づけを行わなければならない。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 は図 3 から明らかなように $M = \frac{w}{w_0}$ である。したがって、フォーカス w_0 において (x, y) である点に対応する点は (Mx, My) となる。つまり、元の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、画素の対応づけがな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 $V(x, y)$ は次のように表される。

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

但し、

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

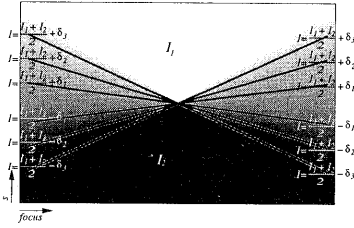


図 8: 等明度直線束モデル

である。この分散値をエッジからの距離 d の関数 $V(x(d), y(d))$ として描いたグラフを図 5 に示す¹。このように、分散値画像はエッジ上で極小値をとることから、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、分散値の閾値処理を行なう。例として、図 6 に示す多重フォーカス画像から、Accumulated Defocus 画像、分散値画像を用いてエッジ検出を行なった結果を、それぞれ図 7(a), (b) に示す。Accumulated Defocus 画像を用いた結果では、エッジが折れ曲がる部分でのエッジ位置が不正確になっているのに対して、分散値画像を用いた方法では非常に正確に検出できることが確認できる。

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 aligned spatio-focal 画像を作り、その明度分布から合焦フォーカス位置を求め。以下ではその具体的方法を述べる。

文献 [5] では、等明度点が直線状に並ぶという条件しか用いていなかったが、本論文では 2.4 節で述べた aligned spatio-focal 画像の性質 (*) に基づき、等明度直線束モデル (図 8) によって表現された明度分布の大域的な性質を利用して、合焦フォーカス位置の高精度推定を実現する。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、ぼけモデルおよび (*) の性質を踏まえて 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. 直線束上の各点の明度が、観測した明度に一致しているかどうかを評価関数で評価する。
3. 評価関数が最適となるように、等明度直線束のパラメータを最適化する。

aligned spatio-focal 画像の性質 (*) 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のモデルは次の式で表される。

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

ここで、 (v_0, s_0) はこれらの直線の交点で、合焦位置を表す。そして、 $c_j > 0 (j = 1, 2, \dots, n)$ とおく。また、これらの直線をそれぞれ、 l_j, m_j と表す。

¹エッジは直線エッジ、ぼけ関数としては、ぼけ円内の値が一樣な円盤関数を用いている。

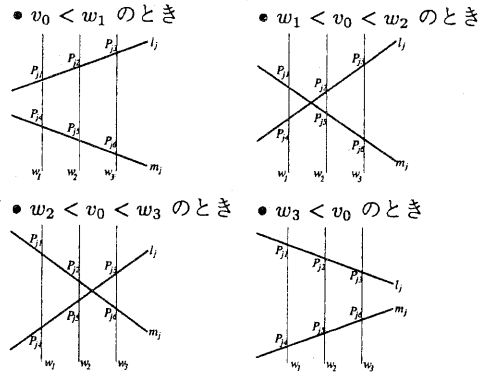


図 9: v_0 と w_1, w_2, w_3 の関係

このとき、式 (4) より $R(w) = \frac{\tau|w-v_0|}{v_0}$ であり、各 w における直線上の点からエッジ像までの距離は $\rho(w) = c_j|w - v_0|$ であるから、式 (5) より、

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

一方、式 (6) において $I = \frac{I_1+I_2}{2} + j\delta$ とおけば $j\delta = (\tau(w) - \frac{1}{2})(I_1 - I_2)$ であるから、

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

したがって、式 (16), (17) より

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

という直線束上の明度に関する制約式が得られる。ここで、 $j, \delta, I_1, I_2, \tau, x, y$ は既知であり、上式は、 w と c_j, v_0 の関係を定義する式となっている。

3.3 最適化

フォーカス w_1, w_2, w_3 ($w_1 < w_2 < w_3$) で画像を撮影し、多重フォーカス画像 $B(x, y, w_1), B(x, y, w_2), B(x, y, w_3)$ が得られたものとする。これらを用いて作成される aligned spatio-focal 画像 $I(w, s)$ を次のようにとる。

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

このとき、合焦位置 (v_0, s_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、直線を 2 本 (l_j, m_j) のみ描いている。図 9 の直線 l_j, m_j と、 $w = w_1, w = w_2, w = w_3$ との交点を P_{jk} ($k = 1, 2, \dots, 6$) とする。このとき、 P_{jk} ($k = 1, 2, \dots, 6$) は次のようになる。

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。

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

ただし、

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 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -1$

である。

2 直線 l_j, m_j 上の点 P_{j1}, P_{j2}, P_{j3} の明度は $\frac{l_1 + l_2}{2} + j\delta$ 、 P_{j4}, P_{j5}, P_{j6} の明度は $\frac{l_1 + l_2}{2} - j\delta$ 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、観測画像上での P_{j1}, P_{j2}, P_{j3} の明度と $\frac{l_1 + l_2}{2} + j\delta$ のずれ、観測画像上での P_{j4}, P_{j5}, P_{j6} の明度と $\frac{l_1 + l_2}{2} - j\delta$ のずれの 2 乗の和 S を次のように定義する。

$$S = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^3 \left[\left\{ \frac{l_1 + l_2}{2} + j\delta - I_{w_i}(s_0 + c_j \sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 + \left\{ \frac{l_1 + l_2}{2} - j\delta - I_{w_i}(s_0 - c_j \sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 \right] \quad (21)$$

式 (18) の制約のもとで式 (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、 v_0 の値により、図 9 の場合分けと合焦位置が計算できたことになる。

3.4 問題の簡単化 (1)

上記の最小化は次のような理由から、厳密な計算は事実上不可能である。

- 使用するレンズ系の特性から、式 (18) の $K(x, y, w)$ 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採用することもできない。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 画像において明度の空間方向 (縦軸方向) の変化は、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。

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

このとき、aligned spatio-focal 画像中の仮定 1 が成り立つほけ領域内 (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。

明度が線形に変化するほけ領域において、式 (19) で示した観測画像の明度 $I(w_i, s)$ は $\frac{l_1 + l_2}{2} + \frac{s - s_0}{c_0 \sigma_i(w_i - v_0)} \delta$ に一致しなければならない (ただし、 $i = 1, 2, 3$ 。 σ_i は式 (20) で導入された場合分けのための変数を表す)。そこで、 l_j, m_j の妥当性を評価する尺度 S を次のように定義する。

$$S = \sum_{s_1(w) \leq s \leq s_2(w)} \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{l_1 + l_2}{2} + \frac{s - s_0}{c_0 \sigma_i(w_i - v_0)} \delta - I(w_i, s) \right\}^2 \quad (24)$$

3.5 問題の簡単化 (2)

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ことを考える。

先に述べた仮定 1 に加え次の仮定を導入する。

仮定 2: 観測された aligned spatio-focal 画像の明度分布 $I(w_i, s)$ ($i = 1, 2, 3$) に対し直線当てはめを行ない、次のように表す。

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

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_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) で観測された明度は次のようになる。

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

モデル上の P_{j1}, P_{j2}, P_{j3} の明度は $\frac{l_1 + l_2}{2} + j\delta$ に、 P_{j4}, P_{j5}, P_{j6} の明度は $\frac{l_1 + l_2}{2} - j\delta$ に一致しなければならない。そこで、誤差関数は次のようになる。

$$S = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^3 \left[\left\{ \frac{l_1 + l_2}{2} + j\delta - a_i - b_i(s_0 + jc_0 \sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 + \left\{ \frac{l_1 + l_2}{2} - j\delta - a_i - b_i(s_0 - jc_0 \sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 \right]$$

$$\left\{ \frac{I_1 + I_2}{2} - j\delta - a_i - b_i(s_0 - jc_0\sigma_i(w_i - v_0)) \right\}^2 \quad (27)$$

3.6 最適解

式 (27) を最小化する v_0, s_0, c_0 を求める。 S を最小化する v_0, s_0, c_0 は、 $\frac{dS}{dv_0} = 0, \frac{dS}{ds_0} = 0, \frac{dS}{dc_0} = 0$ の連立方程式の解である。これを解くと、

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

図 9 で示したように、合焦位置 v_0 と w_1, w_2, w_3 の関係により 4 通りに場合分けされる。この 4 通りについて、それぞれ式 (28) を用いて合焦位置を計算する。求められた 4 通りの合焦位置のうち、式 (27) により計算される S の値の最小なものを解とすればよい。

ここで、 S の値は、解の精度を表している。また、aligned spatio-focal 画像は検出されたエッジに対して、エッジ位置を中心に作成するものである。したがって、解 s_0 は理想の場合に aligned spatio-focal 画像の空間軸（縦軸）方向の中心位置をとり、誤差が大きくなるに従い中心からずれる。つまり解 s_0 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 の値を用いてエッジや解の良さを判定し、雑音によるエッジ点の除去を行なっている。

4 多重フォーカスカメラの開発

前節までに説明したアルゴリズムを用いて実際に実時間距離計測を行なうには、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が、この 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、同時に 3 つの異なるフォーカスの画像が撮影できる。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。

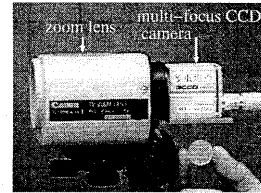
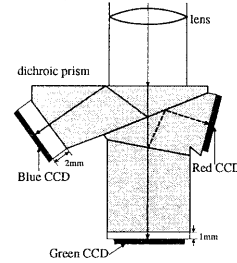


図 10: 多重フォーカスカメラ

4.1 多重フォーカスカメラの設計

図 10 のようなカメラを設計する上で決定しなければならない事項として、3 枚の CCD の光学的な間隔、つまり CCD をずらす量がある。そこで、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、距離計測に必要なばけ量を発生させるために必要な CCD のずれの大きさを計測し、互いに 1mm 程度ずらせばよいという結果を得た [8]。

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から得られる画像を使用して距離計測する上で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. R, G, B の 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
2. R, G, B の 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. R, G, B の画像間の像の拡大率、拡大中心
4. R, G, B の画像間の像の回転角度、回転中心
5. R, G, B の CCD のそれぞれの実効的な絞り量²
6. R, G, B の明度のゲイン、バイアス量

4.3 多重フォーカスカメラの性能評価

4.2 節で示したキャリブレーションすべきカメラパラメータを計測した上 [8] で、実際に距離計測を行ない、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。

レンズは Canon J6×11REA-IA-II（焦点距離 69mm）を用いた。距離計測対象としては単純な直線ステップエッジを使用した。絞りを開放（1:1.6）、レ

²物理的には R, G, B で同一のレンズを用いているが、実効的な絞りが異なってしまい、発生するばけの量に差異が生じる。

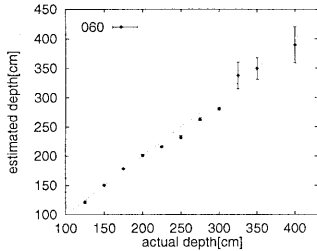


図 11: 距離計測結果

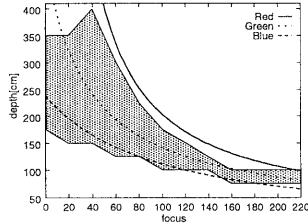


図 12: 距離計測可能範囲

レンズのフォーカス目盛を 60 に³ 設定したときの距離計測結果として、図 11 が得られた。 $u = 200\text{cm}$ としたときの相対誤差は RMS エラーで 0.8%、 $u = 150\text{cm}$ としたときの相対誤差は RMS エラーで 0.64% となっている。 $u_B < u < u_R$ の区間は相対精度が高く、この区間を逸脱すると、相対精度が急速に悪化している。また、 $u \geq 225\text{cm}$ では絶対誤差も大きく生じているが、これは今後のカメラキャリブレーションにより解決可能であると考えている。また、フォーカス目盛を 220 に⁴ 設定し、 $u = 75\text{cm}$ として距離計測した結果、相対誤差は RMS エラーで 0.32% となった。

距離計測実験から得られた、このシステムにより高精度に距離計測ができる範囲を図 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定義している。横軸はレンズのフォーカス目盛、縦軸は計測対象の距離を示す。また、図の 3 本の曲線はそれぞれ u_R , u_G , u_B を示す。

4.4 考察

次のような場合、精度は低下する。

1. $u > u_R$ あるいは $u < u_B$ のとき。
2. R, G, B の CCD のいずれかが合焦状態に近くなる時。これは次のような理由による。
 - (a) 式 (25) の a_i, b_i ($i = 1, 2, 3$) を計算する際、合焦状態に近い CCD に対応する a_i, b_i の値の信頼性は低い。これは、合焦状態に近い場合は a_i, b_i の計算のための直線当てはめを行なう際に、使用するデータ数が少なくなってしまうためである。

³ $u_R = 337\text{cm}$, $u_G = 194\text{cm}$, $u_B = 137\text{cm}$ となるフォーカス目盛。
⁴ $u_R = 99\text{cm}$, $u_G = 82\text{cm}$, $u_B = 73\text{cm}$ となるフォーカス目盛。

- (b) 合焦状態に近い CCD に対応する b_i の大きさが大きいとき、式 (27) の値が急激に変化しやすくなり、解が不安定となる。

3. 対象の距離が遠いとき

これは、レンズの公式 $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ より $\frac{du}{dv} = -\left(\frac{v}{f} - 1\right)^2$ となるため、距離 u が大きくなると、フォーカス位置の変化に伴う距離の変化の大きさ $|du/dv|$ が大きくなるためである。これはレンズを、焦点距離が長いものに交換することにより解決できる。

図 12 に示す計測可能領域が、距離の小さい側に片寄っている現象が見られるが、これは上の 3. が原因であると考えられる。

距離計測対象が u_R を超えると精度が急に悪化する現象が見られるが、これは 1., 2., 3. が同時に発生しているためと考えられる。

5 おわりに

本論文では、多重フォーカス画像から反復計算を行わずに高精度に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、距離計測性能の評価を行なった。相対精度は最高 0.3% と優れた精度が出ているが、絶対精度が悪い例がある。今後は今回提案した方法の改善および [4] の方法との比較を行ない、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現を目指す予定である。

また、現在の多重フォーカスカメラは R, G, B の分光を行なっており、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、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。

参考文献

- [1] 松山隆司, 浅田稔, 美濃導彦, 和田俊和: 分散協調視覚プロジェクト, 情報処理学会 CVIM 研究会資料, CVIM103-4, 1996
- [2] 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
- [3] S. K. Nayer, M. Watanabe, M. Noguchi: Real-time focus range finder, Proc. of 5th Int. Conf. on Computer Vision, pp.995-1001, 1995.
- [4] M. Watanabe, S. K. Nayer: Minimal Operator Set for Passive Depth from Defocus, Proc. of 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 (D-II), J77-D-II, 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.II 241-II 246, 1996.
- [7] 三好忠晴: 多重フォーカス画像を用いた高精度エッジ検出法に関する研究, 修士論文, 岡山大学工学部情報工学科, 1996.
- [8] 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.