

カメラフォーカスを連続変化させた動画像を用いた奥行き分布検出

工藤朋之 三池秀敏

kudou@ab1609.sip.eee.yamaguchi-u.ac.jp

山口大学工学部 電気電子工学科

755 山口県宇部市常盤台 2557

本論文では、TVカメラを移動させることなく、TV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（連続フォーカス画像）を対象とした、奥行き検出アルゴリズムを示す。連続フォーカス画像には奥行き分布、濃淡分布の両情報が含まれており、本法では、ボケ具合を各画素周りの局所領域における分散の時間変化を計測することで評価した。画像にある程度のテクスチャー分布があれば明瞭なエッジ付近でなくとも、画像各点の合焦フレームが決定できる簡便な奥行き情報の検出法を提案する。又、本法を利用したボケのない全距離結像画像の合成法も示す。 (KEY WORD) 連続フォーカス画像, 奥行き分布, 全距離結像画像

Recovering 3D Shape from Image Sequence of Focus Series

Tomoyuki Kudou and Hidetoshi Miike

Department of Electrical and Electronic Engineering, Yamaguchi University.
Tokiwadai 2557, Ube 755, Japan

A simple method recovering 3D object function $g(x,y,D)$ from focus series is proposed. Not only the depth map $D(x,y)$ but also the focused brightness map $g_p(x,y)$ (a clear texture image observed by an ideal pinhole camera) are obtained simultaneously from image sequence under continuous focus change. The depth map (*2 1/2-D sketch*) of the scene is evaluated by detecting a distinct maximum of the point spread function exists in the focal plane. A variance of the local brightness distribution is computed to estimate the maximum. By gathering the brightness values from the respective focused frame the clear texture of the scene is obtained.

(KEY WORD) Shape from Focus, Focused Brightness Map, Variance

1 はじめに

フォーカスは、運動立体視と同様に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。これはフォーカスの調整によって変化する画像のボケ具合を評価することで、合焦となるフォーカス位置を決定し、レンズから対象物体までの距離を求めるもの^{[1]~[5]}で Depth from Focus と呼ばれている。一方、エッジモデルとぼけモデルに基づいて、フォーカス調整あるいは絞り調整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^{[6]~[10]} (Depth from Defocus) も報告されている。これらの方法は、ボケの変化に基づいた合焦評価からエッジ付近の距離情報を計算しており、そこでボケの変化からエッジ部分を安定に抽出して、精度よくエッジの奥行きを検出している^[11]。他のアプローチとして、対象物体にパターン光を照射して2台のカメラを使用したリアルタイムの Depth from Defocus も報告^[12]されており、かなりの精度で距離分布が検出されている。また、フォーカスの異なる画像フレーム間での濃淡値変化を利用した、画像の奥行き分布を検出した報告^[13]もある。

人間にとって対象物が“くっきり見える”状態とは、言うなれば対象物の表面や輪郭の空間分解能が最も高く知覚できるように焦点をあわせた状態であろう。本論文では対象物体の表面模様注目し、画面内の各局所領域での濃淡値の分散をフレーム方向に検索して合焦評価を行なった。つまり局所領域の分散が最大となるフレームで合焦したと判断し、その時のカメラのフォーカス距離を局所領域の奥行き $D(x,y)$ とする。この操作を画面分行なうことで、対象物体の表面にある程度の模様（濃淡値の空間変化や点ドットの分布）があれば、エッジ部分に限らない合焦フレームの決定が簡便にできることを示す。

ところで、カメラやTVカメラの撮影時において、対象物が近接の場合や絞りを開けて撮影する（焦点深度が浅くなる）場合はボケの影響が大きくなる。つまり焦点を合わせた部分しか明瞭に写らず、距離を異にする部分を一枚の画像で見ることは難しい。そこで本論文で提案する合焦フレームの評価方法を利用して、画像各点で決定された合焦フレームに存在する濃淡値を表示することで、奥行き異なる領域の結像画像を一画面で同時に観測できる（全域結像画像の抽出）ことも示す。以下では、まずフォーカスモデルから合焦時と非合焦時における濃淡値の変化を考え、本法のアルゴリズムとその有効性を実験を交えながら示し、最後に考察とまとめを述べる。

2 フォーカスモデル

図1はフォーカスの性質を幾何光学によって理解するためによく用いられる基本図である。レンズからの距離 D に存在する点 P より発せられた光のうち絞りを通過したものは、円形薄凸レンズにより屈折されレンズから合焦距離 d で再び結像する。無限遠点からの光（平行光）はレンズ固有の焦点距離 f で結像し、逆にレンズから物体側の距離 f' ($= f$) の点で発せられた光はレンズ通過後に平行光となり結像しない。つまり合焦画像が得られるのは $f < d < d_{max}$ であり、レンズの公式より D, d, f は次式であらわせる。カメラの焦点距離 f は既知として、画像各点の結像距離 d が得られれば画像の距離情報 D が計算できる。（ピンホールカメラのように、絞り（開口部）が極端に狭い場合は d に無関係に結像画像が得られ、画像から奥行き情報を得ることはできない。）

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \quad (1)$$

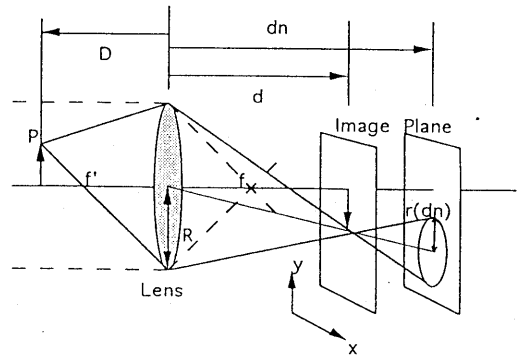


図1：フォーカスモデル

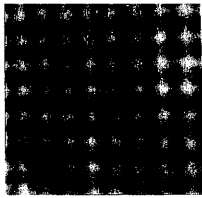
図1においてレンズから d_n の位置にある画像平面ではボケが円形に現れ、円の半径 $r(d_n)$ はレンズの開口部半径 R と結像位置 d から次式であらわせる。（この円内での濃淡分布は結像時の濃淡値と円中心からの距離により異なる。詳細は略す。）

$$r(d_n) = \frac{R|d_n - d|}{d} \quad (2)$$

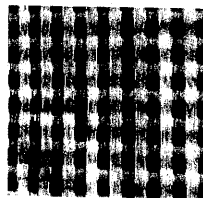
上式よりレンズの開口半径 R が大きいほどボケ円領域が大きくなる。画像平面のレンズからの移動に伴い、ボケの円形領域は (2) 式に従い半径が変化し、さらに中心がレンズの中心座標と結像座標とを結ぶ直線上を移

動してゆく。

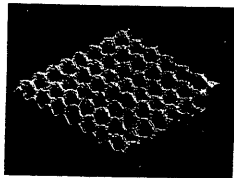
ここでP点の近傍に他の発光点がいくつか存在する場合、 d_n の位置にある画像平面上では各点の円形ボケ領域が部分的に重なり合って観測される。実際にボケによる画像の濃淡値の変化を観察するため、カメラの光軸に対して垂直な平面を撮影した画像とその濃淡分布を図2に示す。予想されるように焦点の合っている画像に比べ、ボケ画像は滑らかな変化の濃淡分布となっている。



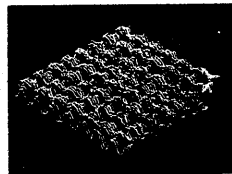
(a) ボケ画像



(b) 合焦画像



(c) ボケ画像の濃淡3D表示



(d) 合焦画像の濃淡3D表示

図2：ボケ画像と合焦画像の濃淡変化

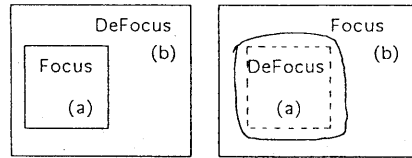
3 合焦フレームの検出アルゴリズムと実験

3.1 ボケによる濃淡値のフレーム変化

実際の画像の各画素の濃淡値は、カメラからほぼ等距離同位置に存在する局所的な濃淡値の分布と仮定して、フォーカスモデルの結果からボケによる濃淡値の変化を推測する。レンズからの距離 d にある画像平面上の座標 (x, y) に結像した点の濃淡値は、画像平面が d から移動するほど円形に広がりながらボケてゆき、かつ円領域の中心は座標 (x, y) から離れてゆく。このことは近傍の座標についても言えることで、座標 (x, y) には近傍の座標 $(x+i, y+j)$ において結像していた濃淡値のボケ円領域の一部が進入してくる。結局、個々の座

標で観測される濃淡値は互いに影響しあい、ボケが大きいかよった濃淡分布になると推測される。

では画像平面の局所領域に奥行き異なる物体の濃淡値がそれぞれ存在する場合、互いのボケ領域はどの



平面 (a) が合焦

平面 (b) が合焦

図3：距離エッジ付近のボケ領域の影響

ように影響すると考えればよいのだろうか。例として距離異なる2種類の平面の境界部分を示した図3を考える。レンズ手前側の平面 (a) が合焦している場合、平面 (a) の各画素は結像して境界をはっきり観測できる。この際、平面 (b) 側の境界は各画素のボケ円領域が広がるが、平面 (a) には進入してこない。(光の回折を無視すれば) 当然のことながら手前の平面 (a) にボケ円領域は遮断されるからである。逆に平面 (b) が合焦している場合は平面 (a) の各点のボケ円領域が平面 (b) の各結像座標に進入して、平面 (b) 本来の濃淡値に、平面 (a) のボケ円領域の一部の濃淡値が重複されて観測される。奥行き異なる領域で構成された境界部分は、結局手前側の境界に支配されている。

以上のことをふまえ、局所領域の合焦フレームを決定するために今回は以下の2種類の方法を用いた。

- 局所領域における濃淡値の差を利用

まず第一の手法では、合焦の評価を、局所領域において中心画素とその近傍の画素との濃淡値の差を積算することで行なった。ここで n フレーム目の座標 (x, y) における濃淡値を $I(x, y, n)$ とおき、合焦の度合い $S_1(x, y, n)$ を次式で評価する。

$$S_1(x, y, n) = \sum_{i=-l}^l \sum_{j=-l}^l |I(x, y, n) - I(x+i, y+j, n)| \quad (3)$$

つまり座標 (x, y) を中心とした局所領域内の各点はこの $S(x, y, t)$ が最も大きくなる時刻(フレーム)に合焦し、画面分の走査を行なうことで合焦フレームの分布が得られるものと考えられる。得られた合焦フレームを用いて距離情報へ変換するには(1)式を用いるが、そのためには合焦フレームが存在した位置 d が機械的に得られるか、又は次式に示すように移動した距離を全フ

フレーム数 n で分割して考える.

$$d = \frac{d_2 - d_1}{n} h \quad (4)$$

(d_1, d_2 : 撮影開始と終了時の画像平面の位置, n : 全フレーム数, h : 合焦フレーム番号)

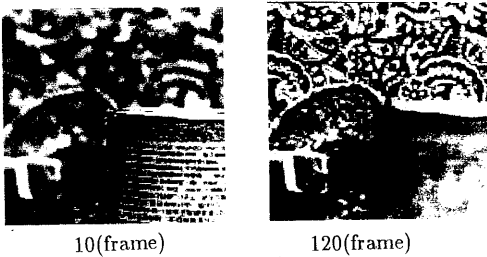
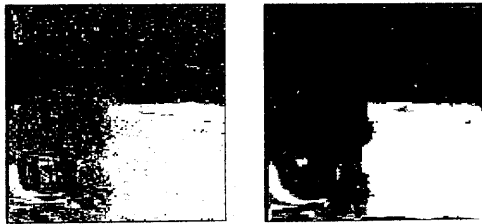


図4 : 使用した連続フォーカス画像 (全 128frame)



(a) : 式 (3) の適用結果 (b) : 式 (5) の適用結果

図5 : 合焦フレームの濃淡値分布

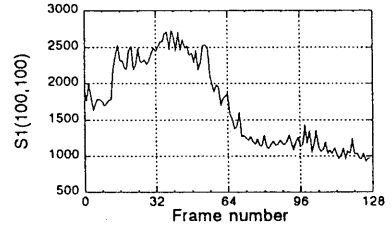


図8 : 全域結像画像の合成結果 ((5) 式を適用)

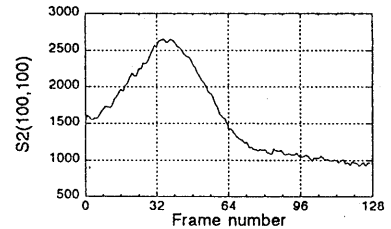
- 局所領域における濃淡値の分散を利用

しかし映像の雑音や撮影時のカメラの微妙なぶれを考慮すると, 一点を基準とした式 (3) では誤差が大きくなるおそれがある. そこで第二の手法として, 考え方は式 (3) と同じであるが, 局所領域内における各点の濃淡値の平均 $\bar{A}(x, y, n)$ を基準として, 平均値からの差を積算して $S_2(x, y, n)$ の時間変化を次式で評価する.

$$S_2(x, y, n) = \sum_{i=-l}^l \sum_{j=-l}^l |\bar{A}(x, y, n) - I(x+i, y+j, n)| \quad (5)$$



(a) : (3) 式を適用した $s_1(100,100)$ のフレーム変化



(b) : (5) 式を適用した $s_2(100,100)$ のフレーム変化

図6 : 評価関数 S のフレーム変化

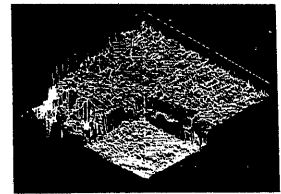


図7 : 図5 (b) の3D表示

3.2 実験と検証

3.2.1 実験画像

今回実験に使用したフォーカス画像を図4に示す. 各画像はCCDビデオカメラ Panasonic WV-CD60を用い, ビデオ信号をデジタル化して256段階のモノクロ画像を 128×128 (pixel) でパソコンに取り込んだ. この際カメラは固定されており, フォーカス調整部を ∞ から 0.4 (m) まで等速に回し, 約4秒間に128フレームの連続フォーカス画像を得た. 尚, 距離によるボケの変化を大きくする (奥行き分布の解析精度を上げる) ため, カメラの絞りをできるだけ開けられるように GAIN 及びシャッター速度を調節してある. 対象物体はいずれも表面に適当な模様のあるものを選んだ. 図4は筒状の缶とサンダルをカメラレンズの前面から約 40 cm と 70 cm の位置に置き, 壁までを 120 cm に設定して撮影した.

3.2.2 合焦フレームの検出結果

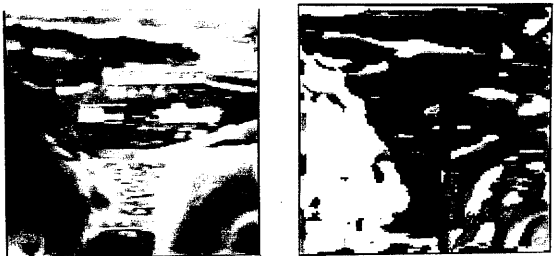
式(3),(5)の適用結果を図5-(a), 図5-(b)に示す。図は画像各点の合焦フレーム番号をそのまま濃淡値128段階に置き換えた結果である。

ここで図5-(a), 図5-(b)について同じ座標の時間(フレーム)変化 $S(100,100,n)$ をグラフにした結果を図6-(a), 図6-(b)に示す。(3)式は(5)式の結果に比べ S の変動が激しく, 多数のピークが現れている。他の座標においても同様な S の変動が観測され信頼できない。以下では(5)式の評価式を用いて話を進める。



(a) : 10(frame)

200(frame)



(b) : 全域結像画像

(c) : 合焦フレームの奥行き情報

図9 : 風景を含む画像の解析例 (全256frame)

3.2.3 全域結像画像の抽出

画像平面各点の合焦フレームが正確に決定されれば, 各点の合焦フレームの濃淡値を抽出して表示することでボケのないクリアなテクスチャー(全域結像画像) $g_p(x,y)$ が得られるものと考えられる。そこで図4に示す128枚の画像に(5)式を適用して解析し, クリアな全域結像画像を合成した結果を図8に示す。又, 他の画像例として, 風景と人形を撮影した256枚の連続フォーカス画像((図9(a))に適用した結果を図9(b)に示す。これは画像の下半分はカメラの近距離に人形を置き, 上半分は風景が写るように設定したものである。結果として, 図8及び図9(b)の両画像とも各奥行きでボケが除かれ, 結像時の濃淡値にかなり近い画像が得られた。また図9(c)はこの例での奥行き分布 $D(x,y)$ の解析結果を示している。テクスチャーのほとんどない湖部分や空の部分を除いて適切な奥行き分布が得られている。

4 まとめ

本論文では, カメラのフォーカスを時間的に連続変化させて撮影した動画画像を用いて, 画像の3次元情報検出を試みた。画像各点について局所領域を設定し, 各領域内における濃淡値の分散の和を合焦評価値としてフレーム方向に調べることで合焦フレームを決定した。さらに画面各点の合焦フレームに存在する濃淡値を合成表示することで, 静止物体を対象としたボケのない全域結像画像の抽出が可能であることを示した。

奥行き解析について, 今回は合焦フレームを決定しただけで距離に変換した結果を議論していない。対象物が比較的カメラに近い条件(例えば室内等)であればフォーカス調整部を近距離レベルで操作し, かつフレーム枚数を増やして精度を向上させることができる。現在は計算時間の短縮と精度の向上を実現するため, 全フレームから複数枚をサンプリングして二次曲線にあてはめた合焦評価などを検討している。又, 本法を用いるには対象物の表面にテクスチャーを必要としており, 空間的な濃淡変化の少ない部分でのボケ具合は評価できていない。一般的にも濃淡変化の無い部分では解析が不可能であるが, 場合によっては照明によるテクスチャーの照射を利用したりエッジ部分の解析から面の再構成をおこない奥行きを決定する方法が本法にも利用できると思われる。

今回提案した手法は, 得られた奥行き分布 $D(x,y)$ に明瞭な結像画像 $g_p(x,y)$ をテクスチャーマッピングする

展開が考えられ、種々のシーンにおける3次元物体の形状が正確に復元できる可能性が期待される。

参考文献

- [1] Jarvis R. A, "A perspective on range finding techniques for computer vision", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach.Intell., 5, 2, pp.122-139(Feb.1983).
- [2] Krotkov E, "Focusing", Int. J. Comput. Vision, 1, 3, pp.223-237(Oct.1987).
- [3] Darrell T. and Wohn K, "Pyramid based depth from focus", Comput. Vision Pattern Recognition, pp.504-509(1988).
- [4] Nair H. N. and Stewart C. V, "Robust focus ranging", Comput. Vision Pattern Recognition, pp.309-314(1992).
- [5] Nayar S. K, "Shape from focus system", Comput. Vision Pattern Recognition, pp.302-308(1992).
- [6] Grossmann P, "Depth from focus", Pattern Recognition Lett. 5, pp.63-69(Jan. 1987).
- [7] Pentland A. P, "A new sense for depth of field", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach.Intell., 9, 4, pp.523-531(July 1987).
- [8] Subbarao M, "Parallel depth recovery by changing camera parameters", Int. Conf. Comput. Vision, pp.149-155(1988).
- [9] Lai S. H., Fu C. W. and Chang S., "A generalized depth estimation algorithm with a single image", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach.Intell., 14, 4, pp.405-411(April 1992).
- [10] Ens J. and Lawrence P., "An investigation of methods for determining depth from focus", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 15, 2, pp.97-108(Feb.1993).
- [11] 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), J77-D-II, No.6 pp. 1048-1058, (Jun 1994).
- [12] Shree K. Nayar, Masahiro Watanabe, Minoru Noguchi, "Real-Time Focus Range Sensor", IEEE Fifth Int. Conf. Comput. Vision, pp.995-1001(1995).
- [13] Steurer, J., H. Giebel, and W. Altner, "Ein lichtmikroskopisches Verfahren zur zweieinhalbdimensionalen Auswertung von Oberflächen", In Proc. 8. DAGM-Symp. Mustererkennung 1986, Informatik-Fachberichte 125, edited by G. Hartmann, pp. 66-70, Spring, Berlin, 1986.