

多視点 Depth From Focus/Defocus 法について

磯野 友洋[†]仲野 豊[†]吉田 俊之[†][†]福井大学大学院工学研究科 情報・メディア工学専攻 〒910-8507 福井市文京 3-9-1E-mail: isono@visix1.fuis.fukui-u.ac.jp

あらまし 対象物体の焦点情報から物体各点までの depth 値を推定する手法として, Shape From Focus/Defocus 法が知られている. これは, 焦点を変化させて撮影した多焦点画像群からブロック単位に合焦評価値を算出し, これより距離推定を行う手法である. 著者らは, 対象物体を斜め上方から多視点・多焦点撮影した画像群に対して視点ごとに SFF/SFD 法を適用し, 得られた形状を視点間で統合することで全周の 3 次元形状を復元する手法を検討してきた. この手法では, 各視点からの多焦点画像群に対して単独に SFF/SFD 法を適用しているが, 同法を複数の視点からの多焦点画像群に同時に適用することにより, さらに誤差低減が見込める. 過去の報告では, depth 推定の際に, 着目視点のブロックに対応する他の視点におけるブロックを求め, その合焦評価値を併用することで誤差の低減を検討してきたが, depth 値の最適性の判断基準に問題が残されていた. そこで本報告では, その判断基準として合焦評価値の近似曲線の微分値を利用する手法を提案し, 実験によりその有効性を示す.

キーワード 距離推定, SFF/SFD, 多視点画像, 3 次元モデル, 誤差低減

Multi-Viewpoint Depth From Focus/Defocus Technique

Tomohiro Isono[†]Yutaka Nakano[†]Toshiyuki Yoshida[†]Dept. of Information Science, Graduate School of Engineering, University of Fukui, Fukui 910-8507, Japan[†]E-mail: isono@visix1.fuis.fukui-u.ac.jp

Abstract Shape From Focus/Defocus (SFF/SFD) has been known as a depth estimation technique by using focus information. The technique estimates the depth for each point of a target object based on a focus measure extracted for each block on a set of multi-focus images. The authors have proposed a 3-D whole shape reconstruction technique, which first obtains a set of multi-view and multi-focus images for a target object and then integrates the shape models obtained from each viewpoint with the SFF/SFD. In this technique, the depth estimation error is expected to be reduced by using not only a single set of multi-focus images from a single viewpoint but also another set from another viewpoint together. Although we have realized such an idea in our previous report, the criteria for estimating depth values was not necessary optimal. This report thus introduces a new criteria which uses the derivative of an approximating function for the set of the focus measures, and gives some experimental results to show its effectiveness.

Key word depth estimation, SFF/SFD, multi-viewpoint images, 3-D model, error reduction

1. はじめに

対象物体の 3 次元形状を復元する非接触の手法の一つに, Shape From Focus (SFF) あるいは Shape From Defocus (SFD) 法が知られている [1]. これは, 通常のレンズ系で撮影された, 焦点の異なる画像系列から対象物体の 3 次元形状を復元する手法である. 著者らは, SFF/SFD 法を対象物体の複数方向に適用すると共に, 得られる 3 次元モデルを統合することで対象物体の全周にわたる 3 次元形状を復元する手法を提案し, その精度向上を図ってきた [2-4].

文献 [4] では, 図 1 に示すように, フォーカスを調節でき, かつ被写界深度の浅いカメラ, および回転角を制御できるステージを組み合わせた撮像系を用いて対象物体を多視点・多焦点撮影し, 図 2 に示すように, SFF/SFD 法で復元した各方向からの 3 次元モデルをグローバル座標系上で統合するこ

とで全周の 3 次元モデルを構築している. この手法では, 各単一方向に対して推定される depth 値は, その方向の多焦点画像群を一定サイズのブロックに分割し, そのブロックごとに SFF/SFD 法を適用して推定している. このとき, 推定の対象となるブロックは多数の視点方向から見えている可能性があり, 一方向のみではなく, 他の視点方向からの多焦点画像を併用して推定することで depth の推定誤差の低減が見込める.

このような考え方にに基づき, 著者らは文献 [5] において, 多方向からの多焦点画像を用いた SFF/SFD 法によって depth 推定を行う手法を提案したが, 後述するように, そのアルゴリズムには depth 推定における最適性の判断基準に問題点が残されていた.

そこで小文では, 文献 [5] の最適性判断基準を再検討し,

合焦評価値の近似曲線の微分値に基づく新しい手法を提案すると共に、その有効性について検討を行う。

以下、2章では、文献[4]の手法の概要とその過程で用いるSFF/SFD法の基本アルゴリズムを概説した後、文献[5]のdepth推定手法を概観し、問題点を明らかにする。3章では、提案手法について詳述する。4章で実験結果を示し、その有効性について述べる。最後に5章で得られた結果を総括する。

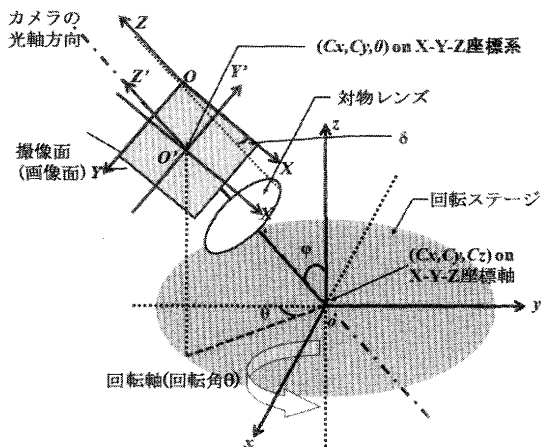


図1：文献[4]の撮像システム概要

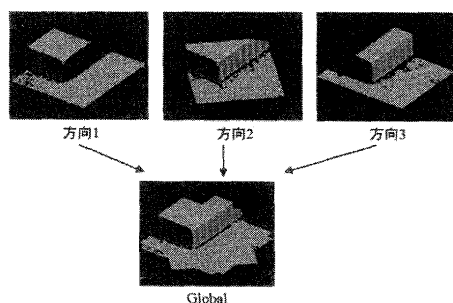


図2：各方向からの3次元モデル統合

2. 従来法

2.1 文献[4]の手法の概要

文献[4]で用いられている撮像システムの概要を図1に示す。ここで、レンズを含む光学系は被写界深度の浅いものを想定しており、従って本手法は顕微鏡のような高倍率の光学系に特に適している。

物体を配置するステージは回転軸を持ち、視点を変えながら観測対象を撮影することが可能である。レンズはテレセントリック性を備えると共にレンズとカメラ系はモータで高精度に移動可能で、これにより対象物体を多視点・多焦点撮影することができる。

文献[4]では、図1の撮像系により撮影した各視点からの多焦点画像群に対して文献[2]を基本とするSFF/SFD法を適用して3次元形状を復元し、これをグローバル座標系上で単一のポリゴンモデルに統合することにより、対象物体の全周にわたる3次元モデルを構築している。また、各多焦点画像から全焦点画像を生成し、これをマッピング用のテクスチャ画像として利用している。この手法で得られる3次元モデルは、レーザ計測等の特殊なハードウェアを用いた場合と比較

すると、精度および計測点の密度においては劣る一方、フォーカス制御が可能な顕微鏡に対して回転ステージを併用するだけで、観測装置としては十分な精度で対象物体の3次元モデルが構築できる利点を有する。

2.2 SFF/SFD法の基本アルゴリズム[2]

文献[2]の手法では、図3に示す様に、対象となる多焦点画像群を一定のブロックサイズに分割し、そのブロックごとにdepth推定を行っている。具体的には、各ブロックについて焦点画像（図3では1～5）ごとに高周波成分に基づいた合焦評価値（図3では $m(1) \sim m(5)$ ）を計算し、これを理論曲線で近似することで合焦点に対応するピーク位置を求める。対象物体までの相対的なdepthは、このピーク位置と予め計測した定数を用いて推定することができる。ここで、レンズの点広がり関数がガウス分布で近似できる場合、合焦評価値の理論曲線は

$$m(Z) = 2\text{erf}\left(k \frac{Z}{|Z - Z_0|}\right) \quad (1)$$

で表され（ erf はガウスの誤差関数）、さらに合焦点近傍では、より簡単な関数

$$m(Z) \approx f(Z) = \frac{a}{Z^2 + bZ + c} \quad (2)$$

で近似できる。実際には、合焦評価値の実測値 $m(k)$ (k は整数)から最少二乗法により $f(Z)$ のパラメータ a, b, c を求め、ピーク位置と上述の定数を用いることでdepthの相対値が求められる。そこで、ここでは簡単のため、図1のように相対depth値と近似曲線のピーク位置 Z を同一視する。

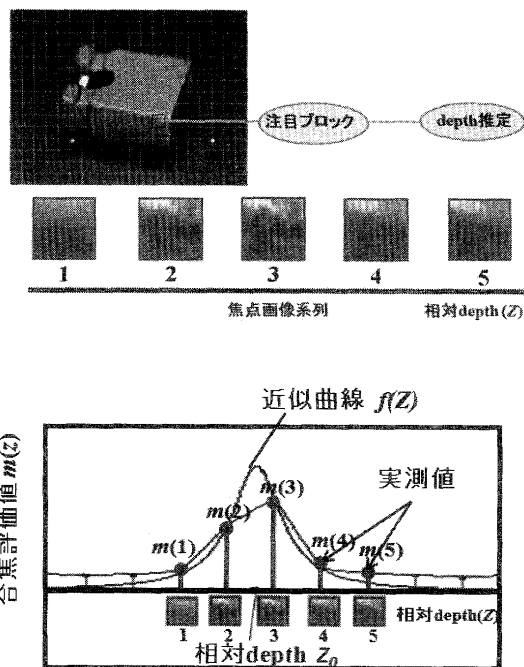


図3：文献[2]のSFF/SFD法

2.3 文献[5]の手法の概要

文献[4]の全周モデルを生成する手法では、複数視点からの多焦点画像を用いるため、SFF/SFDを適用する際に単一方向の多焦点画像のみではなく、複数視点のデータを同時に用いることで、さらに誤差が低減できると期待される。そこで文献[5]では、3章で提案する手法と同様に、着目視点のブロックに対応する、他視点からの多焦点画像上のブロックを求め、さらにその合焦評価値を用いることで誤差の低減を図る手法を検討した。

この手法では、“撮影の際の雑音の影響等により $m(Z)$ の近似曲線のピークが必ずしも合焦点(相対 depth)に一致しない”と仮定し、以下の手順で depth 推定を行っている。いま、着目する視点を視点1、視点1の着目ブロックが見えている他の視点を視点2とし、

- (1) 視点1の着目ブロックに対して $m(Z)$ の近似曲線を求め、ピークを挟む実測値 $m(Z)$ の間に真の depth 値が存在するとして、この間を分割することによって、いくつかの depth 候補点 Z を取る。
- (2) 視点1の着目ブロックの中心点 (X,Y) と候補点 Z を用いて視点1の撮像面(図1における $X-Y$ 平面)上の座標をグローバル座標に変換し、さらにこれを視点2の撮像面上に射影する。
- (3) (2)で射影した対応点を含むブロックを取り、視点1と同様に合焦評価値 $m(Z')$ とその近似曲線、さらに近似曲線のピーク位置を求め、グローバル座標に変換する。
- (4) (2)で求めた視点1および(3)で求めた視点2からのグローバル座標値の距離を求め、これが最小となる(1)の depth 候補点を最適な depth 推定値とする。

しかし、“ $m(Z)$ の近似曲線のピークは必ずしも合焦点を表さない”と仮定している一方で、上記の手法では視点2からの depth 推定値には近似曲線のピークを用いており、ここに論理的な矛盾があった。そこで本報告では、この問題を解決し、さらに推定精度が向上する新しい手法を検討する。

3. 提案手法

本手法ではまず、図4に示すように、着目する視点1における着目ブロック上で、合焦評価値が図5のように得られていると仮定する。ここでは文献[5]と同様に、近似曲線のピークを挟む合焦評価値 Z_2 および Z_3 の間に真の depth 値が存在すると仮定し、視点1と着目ブロックが見えている他の視点2を併用して以下のように depth 推定を行う。

図5の合焦評価値上で候補点 $Z_a \sim Z_c$ を取り、それを左右に移動させると、グローバル座標上で図4に示す視線方向の変化 $a \sim c$ となって現れる(ここでは簡単のため候補点として3点を用いて説明する)。すなわち、視線方向上で対象物体の表面が前後に移動して現れる。そこで、 $a \sim c$ 各点のグローバル座標を各々 $(x_a, y_a, z_a) \sim (x_c, y_c, z_c)$ とし、これらの点を視点2の撮像面(図1における $X-Y$ 平面)に射影して交点座標 $(X'_a, Y'_a) \sim (X'_c, Y'_c)$ を求めると、その点が視点2における $a \sim c$ 各点の対応点となる。この点を含むブロック上で合焦評価値を求め、文献[2]の手法を適用すると、図4に示す様に、視点2において $a \sim c$ に対応した3種類の合焦評価値群とその近似曲線 $f(Z')$ およびピーク位置 $Z'_a \sim Z'_c$ が得られる。ここでは、視点1と同様に、このピークを挟む実測した合焦評価値の間も分割して、いくつかの depth 候補点を取る。

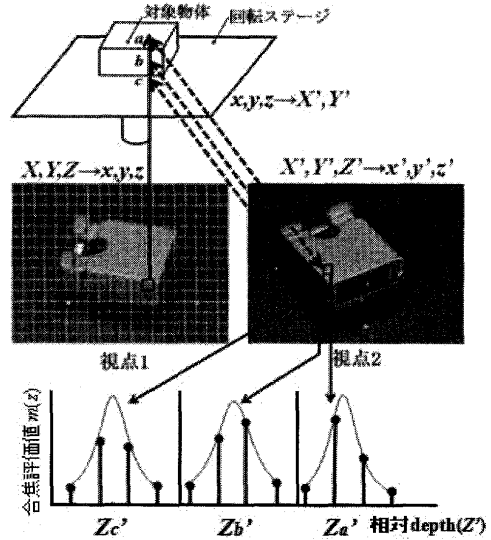


図4：提案手法概要

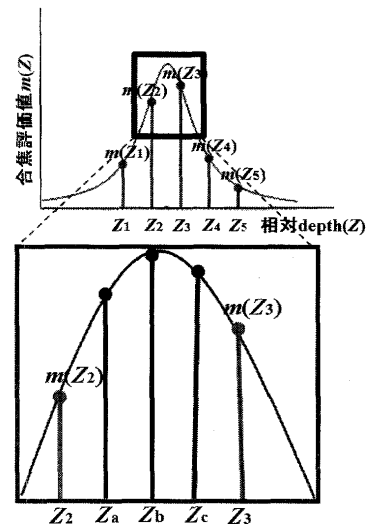


図5：視点1の着目ブロック上での合焦評価値

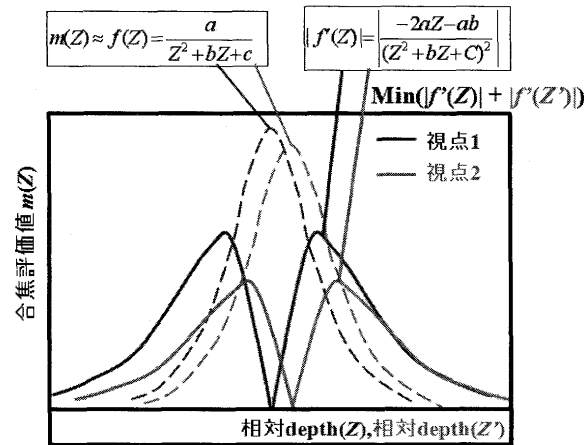


図6：近似曲線 $f(Z)$ と微分係数 $|f'(Z)|$

以上の処理により、図 6 の点線の様に、視点 1 と 2 の合焦評価値の近似曲線、それぞれ $f(Z)$, $f(Z')$ が得られる。ここで、近似曲線のピークにおいては $f(Z)$ の微分関数

$$|f'(Z)| = \left| \frac{-2aZ-ab}{(Z^2+bZ+c)^2} \right| \quad |f'(Z')| = \left| \frac{-2a'Z'-a'b'}{(Z'^2+b'Z'+c')^2} \right| \quad (3)$$

はゼロとなる、よって、 Z と Z' 各々の depth 候補点の組み合わせの中で式(3)の微分係数の絶対値(図 6 実線)の和が最小となる点を探索することで、2 視点の情報を用いた、最も合理的な depth 推定値が得られる。なお、ここでは、説明を簡単にするため、 Z_2 と Z_3 の間を 3 つに分割したが、実際には 50 程度に分割して提案法を適用している。また、ここでは 2 つの視点を用いた方法を説明したが、本方法はさらに複数視点へと拡張できる。

4. 実験結果

実験として、図 7 に示す、回転ステージの表面(平面)を 8 方向から撮影して提案法および従来法を適用し、depth の推定精度を比較する。ここでは、各方向からサイズ 640x480[pixel]の多焦点画像 50 枚を撮影し、従来法、提案手法によって得られる各測定結果(平面)を最小 2 乗近似して、誤差評価を行う。

表 1 は、平面の近似誤差(絶対値誤差、単位は[pixel])を 8 視点について求め、その平均値を比較した結果である。提案手法では、文献[2]の手法より 34%、文献[5]の手法より 12% 誤差が減少している。また、図 8 は、得られる平面を中心点から円状に切り取り、誤差を輝度で表現した結果である。図 8(a), (b), (c)から提案手法では他の 2 手法に比べて誤差が減少していることがわかる。

さらに、図 9(a)に示すような大きさ 5mm 程度のショートピンを 2 方向から撮影して、提案手法および従来法を適用し、復元形状の推定精度を比較する。ここでは、各方向からサイズ 640x480[pixel]で多焦点画像 50 枚を撮影し、depth 値を従来法および提案手法で推定した結果を、各々図 9 の(b), (c), (d)に示す。(b)では、大きく乱れているエッジ部分が、(d)では改善されていることがわかる。また、(c)と(d)を比較しても若干の精度の向上が見られた。

5. まとめ

本研究では、多方向の多焦点画像に対して SFF/SFD 法を同時に適用して depth を推定する新しい手法を提案し、その有効性について検討を行った。まず、同様の目的で提案した著者らの過去の手法における問題点を指摘し、その解決のため、本報告では複数の視点における合焦評価値の近似曲線の微分係数の絶対値和が最小となる depth 値を選択するというアイデアを用いた。これにより、従来手法の問題が解決され、また推定精度の向上に成功した。

今後は、より高精度な 3 次元形状を復元するために、提案手法によって生成した視点ごとの 3 次元形状を視点間で統合する際に、視点ごとの depth 値に対して与える重み係数について検討していく予定である。

参考文献

[1] S. Chaudhuri and A.N.Rajagopalan, "Depth From Defocus", Springer, 1998

[2] 林智晴, 吉田俊之, “顕微鏡画像からの 3 次元構造の高精度復元法”, IMPS2005, pp.73-74, 2005.
[3] 吉田孝太, 榎亮次, 吉田俊之, “多視点・多焦点顕微鏡画像群からの 3 次元形状の復元”, 映情学技法, ME2007-106, pp.53-56, 2007.
[4] 吉田孝太, 吉田俊之, “多視点・多焦点画像群から復元した 3 次元メッシュの統合法”, 映情学技法, ME2008-200, pp.57-60, 2008.
[5] 磯野友洋, 仲野豊, 吉田俊之, “多視点・多焦点画像からの depth 推定における誤差低減”, 映情学技法, ME2010-155, pp.61-64, 2010.

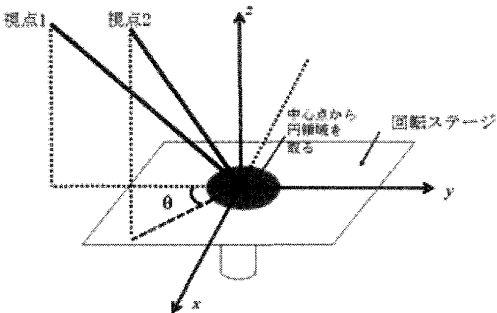


図 7: 実験概要

表 1: 8 視点における平面の誤差の平均[pixel]

	文献[2]の手法	文献[5]の手法	提案手法
平均誤差	1.23	0.93	0.81

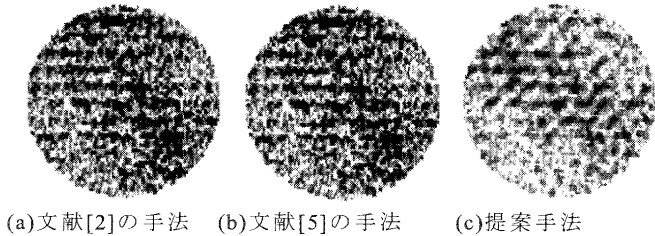
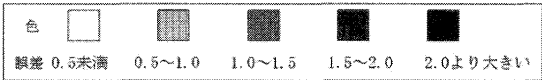


図 8: 誤差の分布

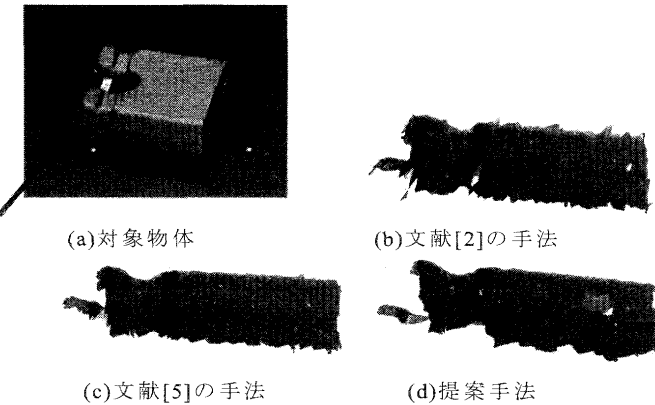


図 9: 形状復元の実験結果