方向符号照合に基づくロバスト合焦法*

李 媛** 高氏秀則*** 大村 功† 金子俊一*** 田中孝之††

Robust Focusing using Orientation Code Matching

Yuan LI, Hidenori TAKAUJI, Isao OHMURA, Shun'ichi KANEKO and Takayuki TANAKA

This paper proposes a novel scheme for image focusing by introducing a new focus measure based on self-matching methods. A unique pencil-shaped profile is identified by comparing the similarity between all patterns extracted around the same position in each scene. Based on this profile, a new criterion function called Complementary Pencil Volume (CPV) is defined to evaluate focus or defocus scenes based on similarity rate of self-matching, which visually represents the volume of a pencil-shape profile. Among matching methods, Orientation Code Matching (OCM) is recommended due to its invariant with regards to illuminations and contrasts. Several experiments using a Telecentric lens are implemented to demonstrate the efficiency of proposed measures. Outstandingly, comparing conventional focus measures, shows that the proposed method, focus measure based on OCM is robust against changes of brightness or illumination. Using this method, pan-focused images are composed and depth informations are represented by comparing the focus and defocus region in the scenes both under low and high illumination conditions.

Key words: focusing, focus measure, robustness, self-matching, orientation code matching, ill-conditioning, pan-focused image, depth measurement

1. 序 論

本論文では、ロバスト画像照合による自己類似度を合焦判定に応用し、従来では扱いが困難であった明度の低い画像や低コントラスト画像、更には、合焦処理中の明度変動に対しても合焦位置を検出可能な新たな合焦法を提案する。

合焦技術は、デジタルカメラや走査型電子顕微鏡の焦点制御、奥行情報取得や3次元形状計測への応用など、実用性の高い基礎的な技術であり、今後、更なる適応範囲の拡大に伴い、利用環境に制限の少ないロバストな合焦技術が期待されている。合焦法には対象物に対して赤外線や超音波を照射するアクティブ方式と取得した画像を利用して合焦位置を求めるパッシブ方式がある。本論文では特別な装置を必要としないパッシブ方式、特にその中でも、焦点合わせの異なる画像を複数枚撮影し、この画像列の中から合焦度合いにより合焦位置を求める方法について述べる。このようなアプローチは、携帯電話に内蔵されたカメラに採用されるなど、ソフトウェアによる実装が可能であり適応範囲が広い手法である。焦点合わせの異なる画像列から合焦位置を検出する手法は数多く提案されている^{1)~3)}。これらの文献中で合焦位置を検出する際に利用する合焦度合いを表わす量「Focus Measure」の和訳として、本論文では「合焦測度」を用いることにする。ぼけ画像と比較し、合焦画像はより多くの高周波成分を含む性質を利用し、フーリエ変換の結果に基づき合焦測度を設定する方法¹⁾、ある注目画素の合焦測度の演算に、その近傍画素との関

係、例えば、明度差（コントラスト）や明度勾配の大きさ（グラディエント）を利用する方法⁴⁾⁵⁾、ぼけ画像における明度値のヒストグラムが一様分布に近づくことを利用し、これをエントロピーにより求める方法⁶⁾などがある。しかし、これらの従来手法は明度の低い画像や画像の陰影部などの低コントラスト領域の合焦判定を不得意とし、撮影環境としてある程度の照度を必要とするなど、利用環境が制限される問題を抱えている。また、合焦処理中の環境光による明度変動について対応した簡易な手法は現在のところ見当たらない。

本論文では、合焦測度に画像中の局所領域の自己類似度を利用する。ぼけ画像では、像が1点で結像せず重なり合うため、近傍領域は類似した明度値となる。したがって、画像中の局所領域とその近傍領域との自己類似度がぼけ画像では高い値を示し、合焦画像で最小となる性質を合焦判定に利用する。更に、明度変動に対するロバスト性を確保するため、自己類似度演算にロバスト画像照合法のひとつである方向符号照合法（Orientation code matching 以下、OCM⁷⁾⁸⁾）を適用する⁹⁾¹⁰⁾。OCMで用いる方向符号は、従来の合焦判定に用いられてきた画像のコントラストや明度自体とは異なり、明度の勾配方向に基づく符号である。これにより、明度変動に対するロバスト性を確保している。

本論文の構成を述べる。2.では、近傍領域との自己類似度演算に利用する方向符号照合法について述べ、合焦判定に利用する近傍自己類似度に基づく合焦測度を新たに提案する。3.では、この合焦測度を用いた合焦実験を行い、従来研究との比較を通して提案手法の特徴を明確にする。4.では、提案手法の応用として全焦点画像合成と奥行推定についての実験結果を示す。最後に5.で本論文をまとめる。

* 原稿受付 平成20年6月25日

** 学生会員 北海道大学大学院（札幌市北区北14条西9丁目）

*** 正会員 北海道大学大学院

† 北海道立工業試験場

†† 北海道大学大学院

2. 方向符号照合法に基づく合焦法

2.1 方向符号照合法による近傍自己類似度

方向符号とは画素の明度自体ではなく画素近傍における明度変化が最大となる勾配方向を量子化した値であり、照明不良などに起因する明度変動に影響されにくい特長を持つ⁷⁾。画素 (x, y) における明度を $I(x, y)$ とし、水平及び垂直勾配をそれぞれ $\nabla I_x = \partial I / \partial x$, $\nabla I_y = \partial I / \partial y$ と定義すると、その画素における勾配角度 $\theta_{x,y} = \tan^{-1}(\nabla I_y / \nabla I_x) \in [0, 2\pi]$ は、例えば Sobel 演算などを用いて算出することができる。方向符号 $c_{x,y}$ はこの勾配角度を量子化幅 Δ_θ で量子化した値で次式により求める。

$$c_{x,y} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\theta_{x,y}}{\Delta_\theta} \right\rfloor & \text{if } |\nabla I_x + \nabla I_y| > \Gamma \\ N = \frac{2\pi}{\Delta_\theta} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 Γ は画素近傍のコントラストが低い画素を除外し、安定した符号化を実現するために導入したしきい値である。この値を高くし過ぎると、符号化の際に画像が持つ多くの情報を失う結果となるため、 Γ はノイズの影響が表れない範囲で可能な限り小さい値に設定する必要がある。本論文では文献⁷⁾と同様の値である $\Gamma = 10$, $\Delta_\theta = \pi/8$ を採用し、勾配角度の分割数 ($:N$) を $N = 16$ とし、方向符号 ($:c_{x,y}$) を $0 \sim 16$ とした。画素 (x, y) を中心とする画像サイズ $M \times M$ の局所領域 $I_M(x, y)$ と x 方向に m , y 方向に n 移動した近傍領域 $I_M(x+m, y+n)$ との相違度は次式で表わされる。

$$D_{m,n} = \frac{1}{M^2} \sum_{(x,y) \in M \times M} d(c_{x,y}, c_{x+m,y+n}) \quad (2)$$

$$d(a,b) = \begin{cases} \min\{a-b, N-|a-b|\} & \text{if } a \neq N \text{ and } b \neq N \\ \frac{N}{4} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、方向符号は時計が一回りすると 12 時から 0 時に戻るのと同様に、巡回的に定義される。したがって、勾配角度の分割数が $N = 16$ の場合、方向符号の差の最大値は $\frac{N}{2} = 8$ となり、例えば、 $d(14, 4)$ は 10 ではなく 6 となる。また、どちらかの画素のコントラストが低く、方向符号が N の時に $d(a, b) = \frac{N}{4}$ としているのは、方向符号の差を統計的にモデル化して考察した結果である。すなわち、2 枚の画像間に相関がない場合を考えると、方向符号の差は $0 \sim \frac{N}{2}$ の一様分布となり、その期待値は $\frac{N}{4}$ となることに起因している。詳細については文献⁷⁾に譲る。近傍領域との自己類似度として、 $S_{m,n}$ を次式で定義する。

$$S_{m,n} = 1 - D_{m,n} \quad (4)$$

合焦判定に用いる局所領域サイズについて、以下では $M = 21$ pixel を採用した。この理由については、3.1 において後述する。

2.2 近傍自己類似度に基づく合焦測度

提案手法では、画像のぼけに伴い、近傍との自己類似度 $S_{m,n}$ が高くなる性質を利用する。まずはじめに、この性質を確認するためのシミュレーションを行った。図 1(a) は画像サイズが 512×512 pixel の Lenna 画像を対象とし、ガウスフィルタの適用半径を変化させて作成したぼけの度合いが異なる画像

(a) Results of Gaussian filtering the Lenna image

Fig. 1 Relationship between self-matching similarity and defocus

列である。図 1(b) はそれぞれの画像中の 490×490 点において 8 近傍の自己類似度を求めた平均値であり、図 1(c) はその標準偏差である。自己類似度を求める演算方法として、前節で述べた OCM の他に、画像照合分野で一般的に用いられる正規化相関 (Normalized Cross Correlation 以下、NCC)¹¹⁾ を用いた場合の結果についても同様に示す。これらの結果から、画像のぼけに伴い自己類似度が高くなり、その標準偏差が小さくなる性質が見てとれる。また、OCM と NCC の 2 通りの演算方法のみではあるが、この性質が自己類似度演算法に依存しない事を確認した。

図 2(a1) に、実際にランダムドットパターン平面を撮影した 640×480 pixel の合焦画像を、図 2(a2) にぼけ画像を示す。図 2(b1)(b2) は画像中心に位置する局所領域 $I_M(320, 240)$ の $S_{0,0} = 1$ を中心とした、それぞれの自己類似度分布である。合焦画像において自己類似度分布は急峻に変化し、ぼけ画像では緩やかに変化する。これらの変化を評価し合焦測度演算に利用するため、提案手法では図 3 に示す 8 近傍の自己類似度 $S_{m,n} (m, n = -1, 0, 1)$ を利用する。8 近傍の自己類似度により形成される直線束形状の急峻さを測定する方法として、これと凹凸の相補関係にある凹型部分の体積 (Complementary Pencil Volume 以下、CPV) によりこれを評価する。線束形状の体積自体ではなく CPV により評価した理由は、合焦測度と正の相関、つまり、合焦位置において大きな値、ぼけ画像において小さな値をとるようにすることで、従来手法⁴⁾⁵⁾と定義をあわせ比較を容易にするためである。まず、自己類似度が 1 となる中心部分と自己類似度が $h_1 = S_{1,0}$, $h_2 = S_{1,-1}$, $h_3 = S_{0,-1}$ からなる $\frac{1}{4}$ の体積 V_1 に着目すると、これは $V_{11} = \frac{1}{6} \times (1 + h_1 - 2h_2)$ と $V_{12} = \frac{1}{6} \times (1 + h_3 - 2h_2)$ の和からなり次式で表わされる。

$$V_1 = V_{11} + V_{12} = \frac{1}{6} \times (2 + h_1 + h_3 - 4h_2) \quad (5)$$

(a1) Focus scene

(a2) Defocus scene

(b1) OCM Similarity Profile of (a1)

(b2) OCM Similarity Profile of (a2)

Fig. 2 OCM similarity profiles of focus and defocus scenes

Fig. 3 Pencil-shaped profile at the top of OCM similarity rate

したがって、 V_1 と相補関係にある $\bar{V}_1$ の体積は次式となる。

$$\begin{aligned}\bar{V}_1 &= \bar{V}_{11} + \bar{V}_{12} = (1 - h_2) - V_1 \\ &= (1 - h_2) - \frac{1}{6} \times (2 + h_1 + h_3 - 4h_2)\end{aligned}\quad (6)$$

以下、同様に残りの部分について $\bar{V}_i$ ($i = 2, 3, 4$) を求めると

$$\bar{V}_i = (1 - h_{2i}) - \frac{1}{6} \times (2 + h_{2i-1} + h_{2i+1} - 4h_{2i}) \quad (7)$$

となり、以上をまとめると CPV の値 $\bar{V}$ は次式により求められる。

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^4 \bar{V}_i \quad (8)$$

提案手法ではこの CPV を合焦判定を行う合焦測度として利用する。CPV 導出時の自己類似度演算には、様々に提案されている画像照合手法が適用できる。本論文では、明度変動にロバストであり、計算コストも小さく、ハードウェア化が容易で FPGA による実装実績¹²⁾もある OCM を用いたが、例えば、これを NCC に置き換えることも考えられる。図 4 に NCC の自己類似度の分布を示す。

$S_{0,0} = 1$ となるのは OCM の自己類似度分布と同様であり、合焦画像における急峻さは OCM に劣るものの、ぼけ画像においては OCM よりも緩やかな変化をしていることから、NCC を利用した CPV も合焦測度として利用が可能である。

(c1) NCC similarity profile of Fig. 2 (a1)

(c2) NCC similarity profile of Fig. 2 (a2)

Fig. 4 NCC similarity profiles of focus and defocus scenes

Fig. 5 Experiments setup

3. 実 験

提案手法の有効性を確認するため実験を行い、他手法との特性比較を行った。実験条件として、焦点位置によるスケール変化の影響を除去するためテレセントリック光学系を用い、合焦判定に適した領域選択の問題について特段の考慮を不要とするため、対象物にはランダムドットパターン平面を利用した。これにより、画像中の任意の位置の局所領域を合焦判定に利用できる。図 5 に実験環境を示す。使用機器として、メガピクセル USB カメラ CMOS130-USB2 (フォルデシモ社製)、テレセントリックレンズ ECHSPECR™ Silver Series HP (エドモンド社製)、対象物とカメラの距離を 0.1mm 間隔で移動させながら画像列を撮影するための移動ステージとして、超精密 X 軸ステージ LS-241-C1 (中央精機社製) を用いた。

3.1 CPV に基づく合焦実験

ランダムドットパターン平面をカメラ画像面と平行となるように設置し合焦実験を行った。図 6(a1) に強い照明条件で撮影した高コントラスト画像列の一部を、図 6(a2) に低コントラスト画像列を示す。各画像の下に示した距離値は、合焦位置からの変位 (合焦位置を原点とした場合の移動ステージの値) である。図 6(b) は合焦画像の明度分布であり、破線で示した弱い照明条件で撮影した画像において低明度部に分布の偏りがあるのがわかる。図 6(c1)(c2) はそれぞれの合焦画像であり、画像内に示す 21×21 pixel の 9 個の局所領域を用いて評価を行った。図 7(a) は、局所領域のサイズを変えた場合の合焦位置の推定誤差であり、図 7(b) は、その時の計算時間である。OCM の性質として、局所領域サイズを大きくとるほど照合が安定し、局所領域サイズを小さくし過ぎた場合に、照合が安定しないことが既に報告されている⁷⁾。この OCM の性質により局所領域サイズを小さくした場合に合焦位置の推定精度が悪化する。一方、局所領域サイズを大きくし過ぎると、計算コストが高くなることに加え、領域内に奥行の異なる複数の対象物が含まれる問題が発生する。局所領域サイズは、これらの要因を考慮して決定する必要がある。本論文では、上記の実験により良好な結果が得られた $M = 21$ pixel を局所領域

(a1) High contrast condition

(a2) Low contrast condition

(b) Histogram of focus scenes in (a1) and (a2)

(c1) Focus scene under high contrast condition

(c2) Focus scene under low contrast condition

(d1) OCM-based CPV profiles under high contrast condition

(d2) OCM-based CPV profiles under low contrast condition

Fig. 6 OCM-based CPV profiles under high and low contrast conditions

(a) Relationship between template size and depth error (b) Relationship between template size and computation time

Fig. 7 Template size experiment results

Table 1 OCM-CPV results under different illumination conditions

Illumination lux	Average brightness	Average gradient magnitude	Average absolute error mm
500	11.46	22	0.02
1000	23.17	57	0.01
1500	34.40	89	0.02
2000	47.05	130	0.01
2500	59.99	166	0.02
3000	67.55	185	0.02

サイズとして採用した。図 6(d1)(d2) は目視で指定した合焦位置を中心として、各画像列において CPV を演算した結果である。合焦測度的変化は合焦位置に近づくにつれて単調に変化し、合焦位置で一つの頂点を持つ概形になることが望ましい。CPV は 9 個の局所領域すべてにおいてこの条件を満たし、合焦位置で最大値を取ることから、合焦測度の演算に利用できることがわかる。また、CPV 導出時に利用した方向符号の明度変動に対するロバスト性により、図 6(d1) と (d2) は照明条件の違いにかかわらず、ほぼ等しい値となっている。表 1 は、照度計により照明強度を 6 通りに設定し、その際に撮影された画像の平均明度と明度勾配の大きさの平均値、及び合焦法により求めた合焦位置の推定誤差の大きさの平均値である。ここで、明度勾配の大きさは、Sobel 演算子により算出した水平及び垂直方向勾配の 2 乗和の平方根である。

照明が暗く、撮影される画像の明度とコントラストが共に低い状況下でも、精度良く合焦位置が推定出来ていることがわかる。この特徴は明度自体を直接合焦測度演算に利用する手法にはない特性であり、合焦位置を求める際の有用性が高い。特に 3.2 で述べるように、明度変動が存在する状況においては重要な性質となる。

3.2 他手法との比較実験（明度変動に対するロバスト性）

従来手法との比較実験により提案手法の特性を検証する。比較として、SMD (Sum-modulus-Difference⁴⁾、Tenenbaum⁵⁾、CPV の導出時に用いた OCM を NCC により置き換えた手法を対象とした。表 2 は 640×480 pixel の画像全体に対して、それぞれの合焦測度の計算に要した時間である。これから、OCM は NCC や Tenenbaum と比較して計算コストが小さいことがわかる。

ここでは、図 6(c1)(c2) の中心に位置する局所領域（図中の 5 番）を用いて評価実験を行った。まず、合焦処理中に照明変動がなく照明条件が一定の場合の実験結果を示す。図 8(a) は照明が強い場合、図 8(b) は照明が弱い場合にそれぞれの合焦

Table 2 Computation time of different methods

Method	Computation Time sec.
OCM	137.86
NCC	251.78
SMD	17.96
Tenenbaum	175.64

Fig. 8 Comparisons between normalized focusing criteria at the center points in Fig. 6(c)

Fig. 9 Comparisons between OCM-based CPV and SMD under high and low contrast conditions

測度を演算し、合焦処理全体で最大となる値が 1 となるように正規化した結果である。

OCM による CPV と同様に、合焦位置付近で一つの頂点を持つ概形となり、低コントラスト画像の Tenenbaum の場合を除き、合焦位置で最大値をとる結果となっている。図 9 は正規化前の合焦測度に関して、(a) OCM による CPV と (b) SMD の比較を示している。

合焦測度を正規化した図 8 からは、提案手法と従来手法である SMD や Tenenbaum の違いを見出すことはできないが、図 9 から、その特性の違いが明確にわかる。OCM による CPV は照明条件の影響が小さく、一方、SMD は照明条件の影響を大きく受け、照明が強い場合には大きな値となり、弱い場合に小さな値となっている。この特性の違いは、合焦処理中の照明条件が一定の場合には、正規化処理を経ることで合焦結果に与える影響は小さくなるが、照合処理中に照明条件が変化する状況下では大きな違いとなる。

照明条件の変化は、我々が日常生活の中で頻繁に遭遇する。例えば、屋内では、照明の光を他人に遮られたり、廊下を歩いて途中で急に蛍光灯が消された経験があるだろう。屋外においては、太陽が雲に遮られ明るさが急に変化したり、夜中に車のヘッドライトの眩しい光で目がくらんだ経験をした人も多いと思う。明度変動は日常生活で頻繁に起こる現象のひとつであり、対処すべき対象のひとつである。以下では、明度変動下における合焦特性について、OCM による CPV と SMD を比較する。図 10 は照合処理中に照明が点灯された場合の画像列である。図 11(a) に OCM による CPV、図 11(b) に SMD

Fig. 10 Image scenes of switch contrast from OFF to ON experiment

Fig. 11 Switch contrast experiment results

の結果を示す。

OCM は明度変動に対するロバスト性が高く、CPV の変化の概形は照明が一定の場合と同等となる。この特性により、明度変動下においても CPV の最大値から正しい合焦位置を求めることができる。一方、SMD の値は照明の影響が大きく、照明が点灯されたことにより合焦位置で SMD の値が最大とならず、正しい合焦位置を求めることが困難になる。本論文では明度変動下における NCC による CPV と Tenenbaum の特性を明示していないものの、NCC は OCM と、Tenenbaum は SMD と類似した特性となることを確認している。

4. 全焦点画像合成と奥行推定への応用

一般的な撮影システムにより撮影された画像において、被写界深度外の対象物から出た光は 1 点で結像せず、その部分はぼけ画像となる。全焦点画像とは、対象物までの距離に依存せず、画像内のすべての位置において焦点が合った鮮明な画像を意味する。ここでは、OCM を用いた合焦法を応用し、焦点合わせの異なる画像列から全焦点画像を合成する。図 12 にその手順を示す。

まず、焦点合わせの異なる画像列を取得する。画像内のある注目画素の合焦画像を画像列から探索するためには、その画素における CPV を画像列において演算し、それが最大となる画像から 1 画素分の明度値を注目画素の合焦画像として選択する。この処理をすべての画素において行うことで全焦点画像を合成する¹⁰⁾。図 13 に実験環境と構成図を示す。θ 軸透過用薄型粗微動ステージ KSPB-906M (シグマ光機社製) を使用して、ランダムドットパターン平面を傾斜角 $\alpha = 15$ 度となるように固定し、移動ステージを 0.2mm 間隔で移動させながら撮影した 36 枚の画像列から全焦点画像を合成した。実験

Fig. 12 Pan-focused image synthesis simulation

Fig. 13 Experiments setup and simulation

は2通りの照明条件下で行い、図14(a1)(a2)に画像列の一部と図14(b1)(b2)にそれぞれの合成結果を示す。CPVの明度変動に対する高いロバスト性により、暗い照明下においても全焦点画像の合成を実現している。

画像列の順序は対象物までの距離に対応しているため、合焦位置から画像の奥行情報、いわゆる Depth from focus^{13, 14)}を得ることができる。図14(b1)(b2)に奥行推定結果をあわせて表示した。また、図15に傾斜角 α を10度、20度、30度、40度の4通りについて変化させた場合の奥行推定結果を示す。奥行き推定評価は、画像中心を通る縦断面で行った。図15の横軸は縦断面の y 座標を意味し、縦軸は奥行推定値である。図中の破線は奥行の真値であり、実線は分解能の制約により階段状に得られる奥行推定値に対して、最小2乗法により直線を当てはめた結果である。これを見ると、傾斜角 α の値が小さい間は真値との誤差も小さいが、傾斜角の増大に伴い、誤差が大きくなる傾向が見てとれる。提案手法においては、対象物の形状に寄らず、画像上から切り出した一定サイズの領域を局所領域としている。このため、傾斜角が増大すると局所領域内での奥行の差が大きくなり、これが被写界深度に収まらなくなることが、誤差増大の原因のひとつであると考えている。

以上の応用実験結果からも、OCMを用いた合焦法の明度変動に対するロバスト性を確認できる。

5. 結 論

本論文では、近傍領域との自己類似度に基づくロバストな合焦法を提案した。自己類似度演算には方向符号照合法を適用することで、明度変動に対するロバスト性を確保し、自己類似度分布をその相補体積(CPV)を用いて評価し、これを合焦測度を利用した。テレセントリック光学系を用いた合焦実

Fig. 14 Pan-focused image synthesis and Depth images results

Fig. 15 Depth measure results using OCM-based CPV

験を行った結果、明度変動に対して従来手法とは明らかに異なるロバスト性を確認した。また、応用として全焦点画像合成と奥行き推定実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

今後の課題は、提案手法の遮へいに対するロバスト性を検証することである。自己類似度演算に適用したOCMは遮へいに対するロバスト性が高いことから、提案手法においても、この特性を期待できる。また、本論文では、対象をランダムドットパターン平面に限定することで、合焦判定に適した領域選択の問題を扱わなかったが、今後は、その他のパターンについても実験を進め、提案手法の特性を検証することにより、この問題を検討していく予定である。

参 考 文 献

- 1) B. K. P. Horn: Focusing, MIT Artificial Intelligence Laboratory MEMO 160, (1968).
- 2) E. Krotkov: Focusing, International Journal of Computer Vision, 1, 3, (1987) 223.
- 3) M. Subbarao, T. Chio, and A. Nikzad: Focusing techniques, Optical Engineering 32(11), (1993) 2824.
- 4) R. A. Jarvis: Focus optimization criteria for computer image processing, Microscope, 24, 2, (1976) 163.
- 5) J. F. Schlag, A.C. Sanderson, C.P. Neuman, and F.C. Wimberly: Implementation of automatic focusing algorithms for a computer vi-

- sion system with camera control, Tech. report CMU-RI-TR-83-14, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, (1983).
- 6) R. A. Jarvis: A perspective on range finding techniques for computer vision, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **PAMI-5**, 2, (1983) 122.
- 7) F. Ullah, S. Kaneko and S. Igarashi: Orientation code matching for robust object search, IEICE Trans. On Inf.& Syst., **84**, 8, (2001) 999.
- 8) F. Ullah and S. Kaneko: Using Orientation Codes for Rotation Invariant Template Matching, Pattern Recognition, **37**, 2, (2004) 201.
- 9) Y. Li, H. Takauji, S. Kaneko, T. Tanaka and I. Ohmura: Robust Focusing by Orientation Code Matching, International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, Proc.SICE, (2007) 752.
- 10) Y. Li, I. Ohmura, H. Takauji, S. Kaneko and T. Tanaka: Robust Focusing by Orientation Code Matching and its Application to Depth Reconstruction, The 8th International Conference on Quality Control by Artificial Vision, Proc.SPIE, **6356**, (2007) 635610-1-10-8.
- 11) R. C. Gonzalez and R. E. Woods: Digital Image Processing (third edition) Reading Massachusetts, Addison-Wesley, (1992).
- 12) 大村功, 三田村智行, 中原和哉, 高氏秀則, 金子俊一, 清水将志, 宮下行雄: 方向符号照合法の FPGA 実現に基づく農作業機のための実時間速度計測センサ. 電子情報通信学会, **91-D**, 5, (2008) 1325.
- 13) S. K. Nayar and Y. Nakagawa: Shape from focus:an effective approach for rough surfaces, Robotics and Automation IEEE International Conference, **2**, (1990) 218.
- 14) T. Barrell and K. Wohn: Pyramid based depth from focus, Proc.CVPR, (1988) 504.