

## Shape-from-Focus 法による実生の3次元顕微計測<sup>†</sup>

大政謙次\*・国府田正樹\*\*・大谷義彦\*\*

### 3D Microscopic Measurement of Seedlings Using a Shape-from-Focus Method

Kenji OMASA\*, Masaki KOUDA\*\*  
and Yoshihiko OHTANI\*\*

The shape-from-focus algorithm, a passive method, was modified for microscopic measurement of 3D shape and texture mapping of intact petunia seedlings with coarse surface. First, both max-min and least-squares (linear regression) operators newly developed to estimate the focus measure index were compared with the sum-modified-Laplacian operator proposed by Nayar and Nakagawa. In the new operators a deformed mask was used for shortening of calculation time. Also, RGB full color images as well as gray image were used as a series of original 2-D images measured at consecutive focused planes by a computerized light microscope. As a result, the focused range image, i. e. 3-D shape estimated using the least-squares operator and RGB images was the best of all. This combination was effective for estimating the focused range in the case of not only the coarse texture but also the texture with large gradient in gray level such as the edge. Secondly, a focused color image was interpolated from a series of original images using the range image. Also, wire frame and texture mapping images were made using the range and focused color images. As a result, it was possible to make a clear color image of the seedling. Furthermore, it made easy to observe 3D color images of the seedling from any direction by operating a mouse.

**Key Words:** 3D, microscopic measurement, seedling, shape-from-focus, texture mapping

#### 1. はじめに

3次元形状計測は、ステレオ画像における両眼視差や Shape-from-X と呼ばれる単眼画像での奥行きの情報を利用する受動的な方法と、レーザー光などのような電磁波を被写体に照射し、距離画像を得る能動的な方法に分けられる<sup>1-5)</sup>。細胞や組織などの比較的高倍率の顕微画像の計測のためには、共焦点レーザーキャノン顕微鏡が実用化されており、主に、蛍光色素と併用して生理機能や構造の計測に利用されている<sup>6-8)</sup>。また、計測時間に問題があるが、レーザー変位計と x, y 軸駆動装置を組み合わせて、植物器官の高精度計測を行ったという報告もある<sup>9)</sup>。しかし、植物の光合成や発芽、形態形成などの生理反応は、環境の変化、特に光に対して非常に敏感で、生命維持に深くかかわっていることが知られている<sup>10-12)</sup>。それゆえ、植物生体を対象とした計測では、能動的

な方法だけでなく、植物の生育環境下で、可能な限り環境に影響を与えない受動的計測法の開発が望まれている<sup>13-16)</sup>。また、器官の診断のために色調の計測も必要とされる。そこで、ここでは、受動的な方法で、比較的、光学顕微鏡での3次元形状計測に適した Shape-from-Focus 法<sup>17)</sup>を改良し、実生のようなテクスチャのキメが粗い被写体の計測にも適用でき、エッジでの急激な濃度変化にも対応できる手法を新たに検討した。そして、生育環境を変化させないで、実生器官の形状の3次元顕微計測とテクスチャマッピングによるカラー合成画像表示を可能とした光学顕微鏡システムを開発したので報告する。

#### 2. 形状計測とテクスチャマッピングの方法

焦点解析の方法は、当初、自動的に焦点のあった画像を得るために用いられていたが<sup>18,19)</sup>、1980年代の中頃から深さ方向の情報を得るために利用され始めた<sup>20-22)</sup>。最近、Nayar and Nakagawa は、この焦点解析の方法をさらに発展させ、3次元形状の計測のための Shape-from-Focus 法を提案し、ワイヤフレーム画像を得た<sup>17)</sup>。この方法は、ランダムな金属微粒子で形成されたセラミック基板ピアホールの計測を目的として開発されたもので、キメの細かい、ざらざらしたテクスチャを有する被写体の計測に適している。しかし、実生を対

<sup>†</sup> 第35回計測自動制御学会学術講演会で発表(1996・7)

\* 国立環境研究所 つくば市小野川16-2

\*\* 日本大学生産工学部 習志野市泉町1-2-1

\* National Institute for Environmental Studies, Tsukuba

\*\* Nihon University, College of Industrial Technology, Narashino

(Received May 7, 1996)

(Revised April 28, 1997)

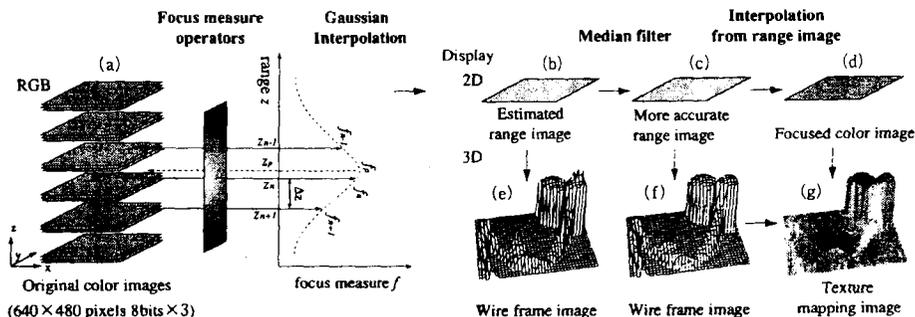


Fig. 1 Process of reconstruction of 3D shape and texture mapping

象とした計測では、テクスチャのキメが粗く、Nayar and Nakagawaの方法では、合焦距離(焦点があった距離)が正確に決定できない場合がある。そこで、彼らの方法を改良し、テクスチャのキメが粗い場合にも適用でき、エッジでの急激な濃度変化にも対応できる方法を新たに検討した。また、得られた合焦距離画像をもとに、合焦カラー画像を合成し、テクスチャマッピングを行う方法についても検討した。

Fig. 1は、筆者らが行った3次元形状の再構成法とテクスチャマッピングの流れ図である。Nayar and Nakagawaの方法では、焦点測度の計算のために、焦点面の異なる複数の単色濃淡画像を用いて、加算変形ラプラシアン(SML)演算を行うが、ここでは、単色濃淡画像だけでなく、RGB濃淡画像を用い、また、演算時間を短縮するために変形マスクを用いたMax-Min演算法や最小2乗演算法を新たに開発し、性能比較を行った。一般に、均一で、キメの細かいテクスチャの場合には、どの方法でも、焦点測度が最大の時に、合焦距離を示し、比較的容易に、正確な合焦距離を求めることができた。しかし、テクスチャが粗くなると、また、テクスチャの不均一さに伴うエッジ効果がある場合には、従来の加算変形ラプラシアンによる方法では、正確な合焦距離を求めることができなかった。ここで述べる2つの方法は、従来のShape-from-Focus法では用いられていなかった演算法で、上記の問題を解決するために新たに導入した。

## 2.1 焦点測度の計算

### (1) 加算変形ラプラシアン(SML)演算法<sup>1)</sup>

この演算法では、焦点面をz軸方向に少しずつずらして計測された複数枚の単色濃淡画像の各画像  $I(x, y)$  に対して、同一座標点  $(x, y)$  で、変形ラプラシアン  $L_M(x, y)$  を次式によって求め、

$$L_M(x, y) = |2I(x, y) - I(x - \text{step}, y) - I(x + \text{step}, y)| \\ + |2I(x, y) - I(x, y - \text{step}) - I(x, y + \text{step})| \quad (1)$$

さらに、焦点測度  $f(i, j)$  を、座標点  $(i, j)$  を中心とした  $N \times N$  マスク ( $M_N(i, j)$ , Fig. 2(a)) において、 $L_M(x, y)$  の局所加算演算により計算する。

$$f(i, j) = \sum_{x, y \in M_N(i, j)} L_M(x, y), \text{ if } L_M(x, y) \geq T_1 \quad (2)$$

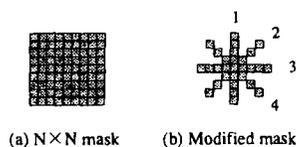


Fig. 2 Two masks used for operation of focus measure

ここで、 $x, y \in M_N(i, j)$  は、 $x, y$  が、 $M_N(i, j)$  内の座標点であることを意味し、 $x = i - (N-1)/2, \dots, i + (N-1)/2$ ,  $y = j - (N-1)/2, \dots, j + (N-1)/2$  で与えられる。また、 $\text{step}$  や  $T_1$  などのパラメータは、目的に応じて設定されるが、通常、 $N = 3$  または  $5$ ,  $\text{step} = 1$  または  $2$ ,  $T_1 = 7$  程度の値が使用される。

### (2) Max-Min 演算法

変形ラプラシアンの演算では、 $N \times N$  のマスク (Fig. 2(a)) を用いているが、テクスチャのキメが粗い場合には、 $N$  を大きくとる必要がある。しかし、 $N$  が大きくなると、計算時間が極端に長くなる。そこで、計算時間の短縮のために、Max-Min 演算と最小2乗演算では、Fig. 2(b) のような変形マスクを使用した。この変形マスクは、理想的な円形のマスクに近く、縦、横、斜めの4つのラインに分割でき、実際のプログラム作成も容易である。 $N \times N$  マスクと比較すると、合成過程でメディアンフィルタをかけるため差はほとんど現れない。

Max-Min 演算法は、RGBの濃淡画像  $\{I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)\}$  において、濃度の最大値  $I_{\max}(x, y)$  と最小値  $I_{\min}(x, y)$  を、それぞれ、

$$I_{\max}(x, y) = \max\{I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)\} \quad (3)$$

$$I_{\min}(x, y) = \min\{I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)\} \quad (4)$$

により求め、さらに、座標点  $(i, j)$  を中心とした変形マスク ( $M_M(i, j)$ ) 内の座標点  $x, y$  ( $x, y \in M_M(i, j)$ ) の中で、次式のように、 $I_{\max}(x, y)$  の最大値と  $I_{\min}(x, y)$  の最小値の差を計算し、焦点測度  $f(i, j)$  を求める。

$$f(i, j) = \max_{x, y \in M_M(i, j)} \{I_{\max}(x, y)\} - \min_{x, y \in M_M(i, j)} \{I_{\min}(x, y)\} \quad (5)$$

この方法は、計算時間は短い、エッジのような急激な濃度変化が生じる場合には対応できない欠点がある。

### (3) 最小2乗(線形回帰)演算法

最小2乗演算法は、変形マスク内の座標点  $(i, j)$  を中心とした縦、横、斜めの4つのラインマスク ( $M_{k,a}(i, j)$ ,  $k=1, 2, 3, 4$ , Fig. 2(b))において、それぞれのラインマスクを座標軸とした場合の座標軸上の位置を示す変数  $\rho_k(x, y)$  に対して、最小2乗法によって(3)式で得られた最大濃度値  $I_{\max}(x, y)$  の回帰直線を近似し、この直線と  $I_{\max}(x, y)$  との絶対誤差の和から焦点測度  $f(i, j)$  を求める方法である。具体的には、変形マスク内のライン  $k$  での回帰直線の係数を  $a_k(i, j)$ ,  $b_k(i, j)$  とすると、焦点測度  $f(i, j)$  は次式で与えられる。

$$f(i, j) = \sum_{k=1,2,3,4} \sum_{x \in M_k} \sum_{y \in M_k} |I_{\max}(x, y) - (a_k(i, j) + b_k(i, j)\rho_k(x, y))| \quad (6)$$

この方法は、計算時間はMax-Min演算法に比べて長い、急激な濃度変化にも対応できる。

### 2.2 ガウス分布近似による合焦距離の推定

原画像は、焦点面を  $z$  軸方向に少しずつずらして計測された複数の画像により構成される。このため、2.1で計算された焦点測度の画像  $f_h(i, j)$  ( $h=1, \dots, n-1, n, n+1, \dots, N_z$ ) は、ずらした焦点面の数 ( $N_z$ ) だけ得られる。今、座標点  $(i, j)$  において、焦点測度が最も大きくなるときの基準点からの距離(深さ)を  $z_n(i, j)$ 、ずらした距離の間隔を  $\Delta z$  とすると、 $\Delta z \approx 0$ 、すなわち、 $z$  軸方向に連続な一連の画像の場合には、焦点があった合焦距離  $z_p(i, j)$  は、 $z_n(i, j)$  と等しくなる。しかし、実際には、計測および計算の時間を短くするために、画像枚数を極力減らしたいので、 $z_p(i, j)$  と  $z_n(i, j)$  とが一致しない。このため、合焦距離  $z_p(i, j)$  を焦点測度のガウス分布近似により推定する<sup>17)</sup>。

$$z_p = \frac{(\ln f_n - \ln f_{n+1})(z_n^2 - z_{n-1}^2) - (\ln f_n - \ln f_{n-1})(z_n^2 - z_{n+1}^2)}{2\Delta z \{(\ln f_n - \ln f_{n-1}) + (\ln f_n - \ln f_{n+1})\}} \quad (7)$$

ここで、座標点  $(i, j)$  は省略されているが、 $f_n$  は、(2)式、(5)式、あるいは(6)式により計算された焦点測度の最大値で、 $z_n$  は、そのときの距離(深さ)である。また、その両隣りの焦点測度をそれぞれ、 $f_{n-1}$ ,  $f_{n+1}$ 、距離を  $z_{n-1}$ ,  $z_{n+1}$  とし、計算に用いた。この処理をすべての座標点  $(i, j)$  について行えば、少ない計測焦点面(原画像)で得た焦点測度の画像から、連続的に変化する合焦距離画像を推定することができる。さらに、エッジなどの情報を損なうことなく、スパイク状のノイズを除去するために、メディアンフィルタの処理を行った。

### 2.3 合焦カラー画像の合成とテクスチャマッピング

すべての座標点  $(i, j)$  に焦点が合った合焦カラー画像は、RGBカラーの原画像 ( $N_z \times 3$  枚) を、2.2で得た合焦距離画像  $z_p(i, j)$  の結果を用いて、距離(深さ)方向に内挿することにより求める。具体的には、 $z_p(i, j)$  の前後の計測焦点面(原画像)の距離を  $z_n(i, j)$ ,  $z_{n-1}(i, j)$  とし、そのときの原画像の濃度値をそれぞれ、 $I_n(i, j)$ ,  $I_{n-1}(i, j)$  とすれば、合焦濃度値  $I_p(i, j)$  は、

$$I_p(i, j) = I_{n-1}(i, j) \left[ \frac{z_n(i, j) - z_p(i, j)}{\Delta z} \right] + I_n(i, j) \left[ \frac{z_p(i, j) - z_{n-1}(i, j)}{\Delta z} \right] \quad (8)$$

で与えられる。合焦カラー画像を得るには、RGB各々の濃淡画像のすべての座標点  $(i, j)$  についてこの計算を行い、一枚のカラー画像として合成する。

被写体の形状や色調、明るさなどについての3次元的な認識を容易にするために、上記で得られた距離画像のワイヤフレーム表示と合焦カラー画像のテクスチャマッピングを行うソフトウェアを新たに作成した。このソフトウェアでは、マウス操作により、様々な方向から観察を可能にした。また、見る方向の位置決めなどに対する操作性をよくするために、点表示による高速のプレビューの機能を付加した。

## 3. 実験的検討

### 3.1 光学顕微鏡システム

植物の生育環境を変化させないで、3次元顕微計測を行うために開発した光学顕微鏡システムの構成を Fig. 3 に示す。光学顕微鏡には、実生の生育のための光照射と Shape-from-Focus 法による形状計測を容易にするために、作動距離が長く (34.0 mm, 2x)、焦点深度が浅い (550 nm で、91  $\mu$ m) 対物レンズが装着できるものを使用し、倍率の調節は、リレーレンズ+ズームレンズ (0.5x~1.4x) で行った。この顕微鏡のRGBの中心波長での色収差は焦点深度の範囲内では、ほぼ回折限界(無収差)とみなせた。また、このシステムでは、光学顕微鏡のステージの  $x, y, z$  軸(微調)および鏡筒( $z$  軸粗調)を、ステップモータ制御システムにより、0.02  $\mu$ m/1パルスの分解能で制御することができた。

光学顕微鏡に取り付けたカラーCCDカメラからの信号は、ワークステーションのビデオA/D変換器でRGB各8bitsのデジタル画像(原画像) (640 x 480 pixels) に変換された後、処理された。原画像や処理画像は、パソコンを介して、昇華型熱転写カラープリンタやページプリンタなどに出力した。また、得られた膨大な量の画像データは、パソコンに接続された相変化型光ディスク(PD)に保存した。なお、画像データの転送は、イーサネットを介して行った。

### 3.2 実生の焦点面の異なるカラー原画像の計測

実験材料としては、25°C, 60  $\mu$ mol photons  $m^{-2}s^{-1}$  (昼間 12

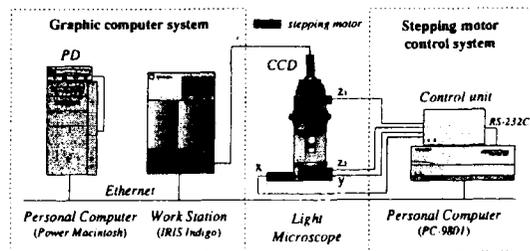


Fig. 3 Diagram of 3D light microscope system

時間)の環境下で、湿った濾紙を敷いたシャーレ内で発芽させ、5日間育苗したペチュニア(*Petunia hybrida* Vilm cv. Mitchell)の実生を用いた。光源としては、2台のファイバ照明装置(反射ミラー、熱線カットフィルタ付きハロゲンランプ)を用い、照射光が均一になるように調節した。計測は、光学顕微鏡のステージの上にシャーレを置き、同じ環境を維持しながら行った。Fig. 4は、連続的に焦点面を変えて得られた実生の9枚のカラー画像(原画像)である。デジタル画像としては、RGB各々について、640 x 480 pixels, 8 bitsの濃淡画像が得られた。計測に際して、最初の画像の焦点面は、濾紙に合わせ、その後、等間隔(0.3 mm)で上面にずらせ、最後の画像の焦点面は、子葉の上面よりも少し上方に合わせた。これは、上端における距離(深さ)方向の情報、例えば子葉表面の凹凸の情報などの欠落を防ぐためである。

### 3.3 焦点測定の計算法の違いによる比較

3.2で得られた実生の原画像を用いて、2.1で述べた焦点測定計算法の違いによる比較を行った。最初、Nayar and Nakagawaの加算変形ラプラスian(SML)演算法について検討するために、彼らがセラミック基板ビアホールで与えた条件と同程度の条件で合焦距離を計算し、結果をワイヤフレーム画像として表示した(Fig. 5(a))。ここでは、原画像として、G画像を単色濃淡画像として使用し、パラメータとして、

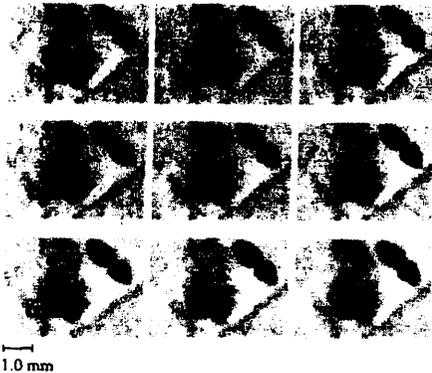


Fig. 4 A series of color images of an intact petunia seedling measured with changing focus

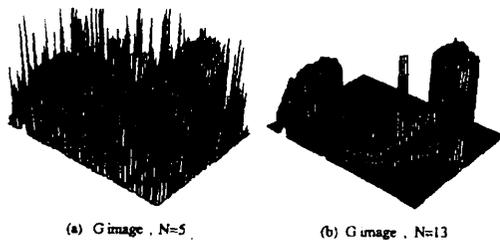


Fig. 5 Range images estimated by the sum-modified-Laplacian operator

$N=5$ ,  $step=1$ を与えた。実生の画像は、セラミック基板ビアホールの画像に比べてテクスチャのキメが粗く、このパラメータでは合焦距離がうまく推定できないことがわかる。そこで、 $N=13$ とマスクを大きくとり、合焦距離を推定した(Fig. 5(b))。この結果から、 $N$ を大きくとることにより合焦距離の推定精度が飛躍的に改善されることがわかる。しかし、テクスチャの状態によってはうまく推定できない個所が存在した。

次に、マスクの大きさを $N=13$ として、Max-Min演算法と最小2乗演算法について検討した。Fig. 6はMax-Min演算法、Fig. 7は最小2乗演算法の結果で、(a)がG画像のみ、(b)がRGBカラー画像を使用したときの結果である。2つの方法とも、加算変形ラプラスian(SML)演算法に比べて、合焦距離の推定精度が向上した。また、G画像の場合に比べて、RGBカラー画像を使用の方がスパイク状のノイズが少なく推定精度が高かった。特に、RGBカラー画像を使用した最小2乗演算法では、スパイク状のノイズがみられず、推定された合焦距離画像も滑らかで、実際の実生の形状に合っていた。これらの2つの方法に用いた変形マスクは、実質的には加算変形ラプラスian(SML)演算法に用いたマスクに比べて、大きさを2小さく、 $N=11$ に相当すると考えてよい。また、マスク内の要素の数が少ないので、計算時間を大幅に短縮することができた。

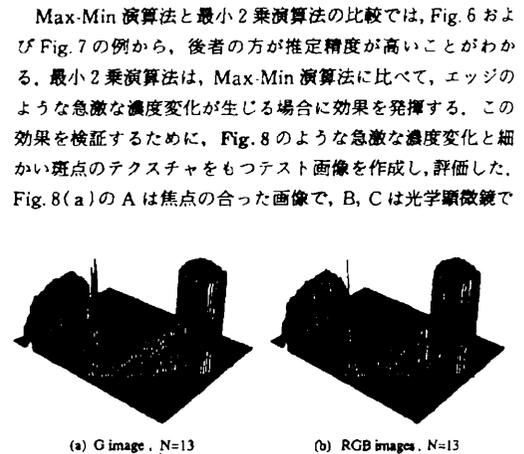


Fig. 6 Range images estimated by the max-min operator

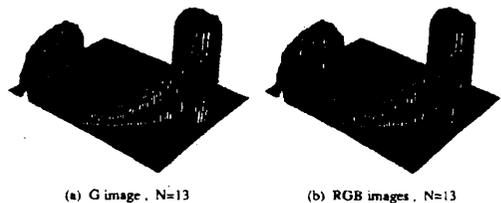


Fig. 7 Range images estimated by the least-squares operator

の焦点面の变化を模擬し、順に焦点をばかした画像である。また、これらのテスト画像の横方向(x軸)の濃度値を示したのが Fig.8(b)である。Fig.9には、このテスト画像を用いて、Max-Min 演算法(a)と最小2乗演算法(b)により焦点測度を計算した結果を示す。焦点測度が最大の点が焦点の合った点と判断されるが、Max-Min 演算法では、白黒のエッジのところ、焦点が合った A 画像ではなく、焦点が合っていない B 画像を選択してしまう。しかし、最小2乗演算法では、全ての点で正確に A 画像を選択できた。なお、最小2乗演算法では、細かなテクスチャの変化や画像ノイズの影響により、計算された焦点測度が他の方法に比べて多少変動するが、この問題は、メディアンフィルタの大きさを適切に選ぶ

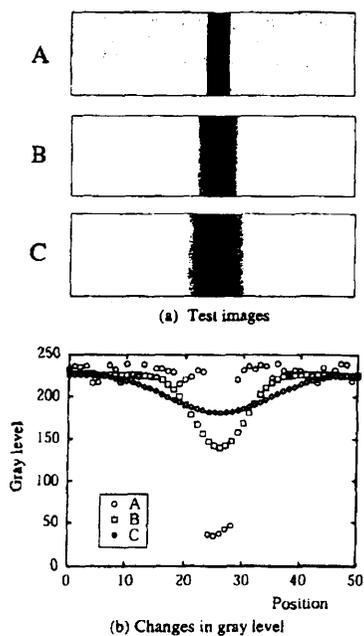


Fig. 8 A series of test images and changes in gray level on horizontal axis of the images

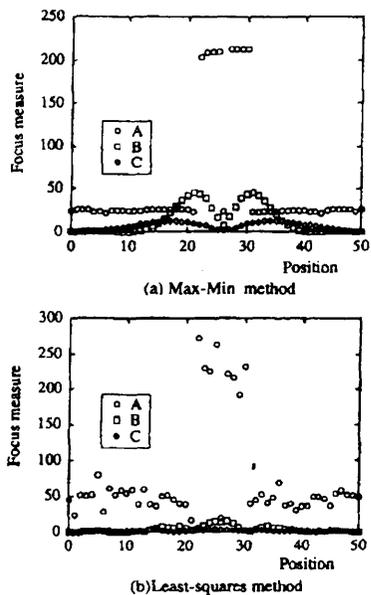


Fig. 9 Comparison between focus measure indexes estimated by the max-min operator and the least-squares operator from the test images shown in Fig. 8

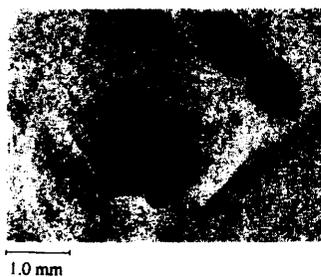


Fig. 10 Focused color image estimated by the least-squares operator

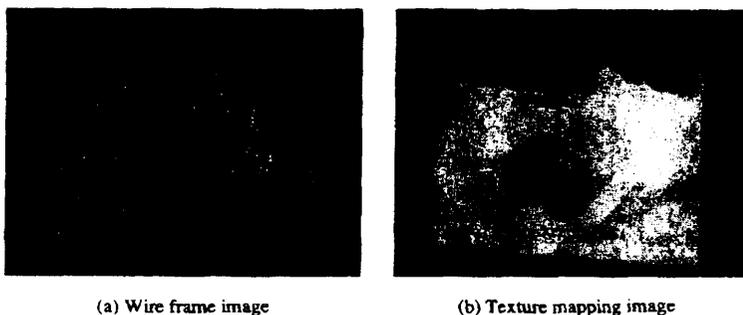


Fig. 11 Wire frame image with color information and texture mapping image

ことによって容易に解決できた。

### 3.4 合成カラー画像とテクスチャマッピング

最小2乗演算法で得られた合焦距離画像(Fig. 7(b))の結果を用いて、原画像(RGB各々の濃淡画像, Fig. 4)のすべての座標点について、式(8)の内挿計算を行い、合焦カラー画像(Fig. 10)を合成した。この合焦カラー画像の良否は、合焦距離画像の結果に依存するので、スパイク状のノイズなどがあると、ボケた画素を選択してしまい、画質が悪くなる。また、マスクが大きいと画像が不鮮明になる。特に、エッジの部分ではその影響が顕著に現れるが、最小2乗演算法は、実生のようなテクスチャのキメが粗い場合にも、比較的小さいマスクでスパイク状のノイズを除去でき、エッジの急激な濃度変化に対しても適応できるので、他の方法に比べて鮮明な合焦カラー画像を得ることができた。

次に、被写体の形状や色調、明るさなどについての3次元的な認識を容易にするために、Fig. 7(b)のワイヤフレーム画像への色情報の合成(Fig. 11(a))と合焦カラー画像のテクスチャマッピングを行った(Fig. 11(b))。これらの3次元画像は、Fig. 7(b)とは異なった視点からの表示になっており、色情報の付加によって、実生器官の認識が容易になった。このシステムでは、マウスの操作により、自由に視点を変えることができるが、ここで述べた方法では、真上からみた複数枚の画像から3次元形状画像を作成するので、上方から観察できない部分は復元できない。

## 4. おわりに

本論文では、テクスチャのキメが粗い発芽直後の実生を対象として、受動的な方法であるShape-from-Focus法による形状の3次元顕微計測とテクスチャマッピングによるカラー合成画像表示の方法について検討した。その結果、筆者らが開発した変形マスクによる最小2乗演算法による方法が合焦距離画像の推定に有効であることがわかった。また、この方法を用いて、合焦カラー画像の合成とテクスチャマッピングを行い、形状に加えて、色調や明るさの情報を加えた実生の3次元表示を可能にした。ここで述べた方法は、環境を破壊することなく3次元計測が可能な受動的な方法であり、また、色調や明るさに関する情報を提供できるので、今後、植物分野の計測だけでなく、このような情報を必要とする他の分野の計測にも有効であろう。

なお、本研究を遂行するにあたり、(財)新技術開発財団の助成を得た。関係各位に謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 尾上(編): 画像処理ハンドブック, 392/407, 昭晃堂(1987)
- 2) 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭晃堂(1990)
- 3) 横矢: コンピュータビジョンにおける逆問題とその解法. システム制御情報学会誌 35-10, 601/609(1991)
- 4) M. Suk and S. M. Bhandarkar: Three-dimensional Object Recognition from Range Images. Springer-Verlag(1992)
- 5) 井口: 3次元形状計測の最近の動向. 計測と制御 34-6, 429/434(1995)

- 6) T. Wilson (ed): Confocal Microscopy. Academic Press (1990)
- 7) J. B. Pawley (ed): Handbook of Biological Confocal Microscopy. Plenum Press(1990)
- 8) W. Knebel and E. Schnepf: Confocal Laser Scanning Microscopy of Fluorescently Stained Wood Cells: A New Method for Three-dimensional Imaging of Xylem Elements. Trees, 5, 1/4(1991)
- 9) 羽藤, 杉山, 青柳, 橋本: 三次元データベースに基づく植物工場のシステム設計(第1報)データベースを構築するためのレーザ計測. 植物工場学会誌 7-2, 103/109(1995)
- 10) E. D. Bickford and S. Dun (ed): Lighting for Plant Growth. The Kent State University Press. (1972)
- 11) R. E. Kendrick and G. H. M. Kronenberg (ed): Photomorphogenesis in Plants. Martinus Nijhoff Publishers. (1986)
- 12) J. Kigel and G. Galili (ed.): Seed Development and Germination. Marcel Dekker. (1995)
- 13) 大政, 近藤, 井上(編): 植物の計測と診断. 朝倉書店(1988)
- 14) K. Omasa: Image Instrumentation Methods of Plant Analysis. In: Modern Methods of Plant Analysis. New Ser. Vol. 11 (H. F. Linskens and J. F. Jackson, eds), 203/243, Springer-Verlag(1990)
- 15) Y. Hashimoto, P. J. Kramer, H. Nonami and B. R. Strain: Measurement Techniques in Plant Science. Academic Press. (1990)
- 16) 大政: 細胞・組織機能の計測と診断—可視~熱赤外域のスペクトル画像を対象として—. 計測と制御 3-10, 855/862(1994)
- 17) S. K. Nayar and Y. Nakagawa: Shape from Focus: An Effective Approach for Rough Surfaces. Proc. 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automaton. 218/225(1990)
- 18) R. A. Jarvis: Focus Optimization Criteria for Computer Image Processing. Microscope 24-2, 163/180(1976)
- 19) 太田, 杉原, 杉江: 分散値を利用した画像合成法. 電子通信学会論文誌 J66-D-10, 1245/1246(1983)
- 20) E. Krotkov: Focusing. Int. J. Computer Vision. 1, 223/237(1987)
- 21) P. Grossmann: Depth from Focus. Pattern Recognition Letters. 5, 63/69(1987)
- 22) T. Darrell and K. Wahn: Pyramid Based Depth from Focus. Proc. CVPR, 504/509(1988)

### [著者紹介]

#### 大政 謙次 (正会員)



1973年愛媛大学農学部農業工学科卒業, 1975年同大学大学院農学研究科修士課程修了, 1976年環境庁国立公害研究所(現在, 国立環境研究所)に入所, 現在, 生物圏環境部環境植物研究室長。1985年工学博士(東京大学)。植物の生体画像計測や生物施設の研究に従事。また、最近では、リモートセンシングや大気汚染, 砂漠化, 地球温暖化などの植物分野の研究も行っている。科学技術庁長官賞(研究功績者表彰), 日本生物環境調節学会奨励賞, 日本農業気象学会賞(学術賞)などを受賞。環境科学会, 米國植物生理学会などの会員。

## 國府田 正 樹



1995年日本大学生産工学部電気工学科卒業, 1997年同大学大学院生産工学科修了, 1997年小糸工業(株)に入社, 現在に至る. 画像情報処理の研究に従事.

## 大 谷 義 彦



1962年日本大学理工学部経営工学科(電気工学専攻)卒業, 1962年同勤務. 現在教授. 1984年工学博士(日本大学). 影の中の照度計算, 画像処理による照明状態の評価などの研究に従事. 電気学会, 日本建築学会, 電気設備学会などの会員. 日本照明委員会副会長.

---