

面の法線方向を考慮した回転ミラーヘッド 顕微鏡像群からの3次元形状復元の一手法

東海 彰吾^{†1} 小嶋 宏樹^{†1} 長谷 博行^{†1}

回転ミラーヘッド顕微鏡で得られる被写体の多視点画像群からの3次元形状復元の方法を提案する。形状再構成空間に平行平面群を仮定し、各平面に投影した撮影像群の微小領域での像の重なり評価によって形状を得る方法である。仮定する平行平面の法線を考慮することで、撮影視点の中からその面を観察可能な視点を選択し、さらに、注目点に対して評価値が最大となる法線方向を選択することで、より精度の高い3次元形状復元を行う。本発表では、汎用CGライブラリを用いた実装、および、実画像を用いた実験結果について述べる。

A Method of 3D Shape Reconstruction from Rotating Mirror Head Microscope Images with Considering Surface Normals

SHOGO TOKAI,^{†1} HIROKI OJIMA^{†1} and HIROYUKI HASE^{†1}

In this paper, we propose a method to reconstruct 3D shape of object from a set of microscopic images which are observed by a microscope with rotating mirror head. Using two mirrors on the mirror head, we can observe multidirectional images of object from a fixed depression angle of view. In our method, observed image from each view point is projected on a parallel planes in the 3D space and nexus of projected pixel information for each points is evaluated by pixel similarity. In addition, we consider the normal of the planes to decrease reconstruction errors of phantoms. We also show experimental results from CG and actual microscopic image sets respectively.

^{†1} 福井大学
University of Fukui

1. はじめに

近年、顕微鏡像からの3次元構造抽出や3次元映像化が求められている。これらに対応するため、通常のビデオカメラの場合と同様にコンピュータビジョンの考え方に基づく幾つかのアプローチが提案されている¹⁾⁻³⁾。

しかし、ステージに置かれた物体に対して、視点や視線方向を変えて対象を観察することはあまり容易ではなく、死角や隠蔽の発生などにより、3次元的な構造を詳細に観測することは従来困難であった。しかし、近年さまざまな顕微鏡装置が開発され、非常に微小な対象物であっても、複数の方向から観測することが可能になりつつある。例えば、ステージを操作したり物体の姿勢を直接操作することで多くの方向から観察する方法や、顕微鏡に鏡などの光学的な装置を追加することで、多くの方向からの観察を実現する方法があり、双方の研究が進んでいる。

ところで、顕微鏡像を扱う場合、被写体を非常に大きく拡大して観察することから、明確なエッジ情報の抽出などが難しいという問題点があげられる。文献3)では、特徴点、および、その追跡をなるべく用いない方法として、depth from focus法の適用とステージの回転によって多方向からの奥行き計測結果を統合した3次元形状獲得を実現している。しかし、depth from focus法は1つの観察方向からフォーカスを変えながら複数枚の画像を撮影する必要が生じ、撮影に時間がかかるという問題点がある。

そこで、本研究では特徴点抽出を明に行わず、撮影像の類似度を手がかりとして3次元形状を抽出する方法を提案する。具体的には、再構成空間に仮定した平行平面群に撮影像を投影し、その重なりを評価する方法をとる。以下、本文では、第2章で使用する回転ミラーヘッド顕微鏡の特徴とその幾何光学モデルについて説明し、第3章では平行平面への投影に基づく形状獲得アルゴリズムを、第4章で平行平面の向きを考慮することによる精度向上について述べる。さらに、第5章でCG画像および実撮影像群を利用した実験を紹介し、本手法の有効性を述べる。最後に第6章で本論文をまとめる。

2. 回転ミラーヘッド顕微鏡とその幾何モデル

本研究では、回転ミラーヘッド顕微鏡(Hirox社製KH7700、ロータリーヘッドアダプタ付)を使用する。この顕微鏡は、対物レンズ側に取り付けられたヘッドにある2枚の鏡を用いて物体を斜め上方から観察でき、さらに、ヘッド部が顕微鏡の鏡筒軸を中心に360度回転することで、周囲の任意の方位から物体を観察することができる。この像を接眼レンズ側

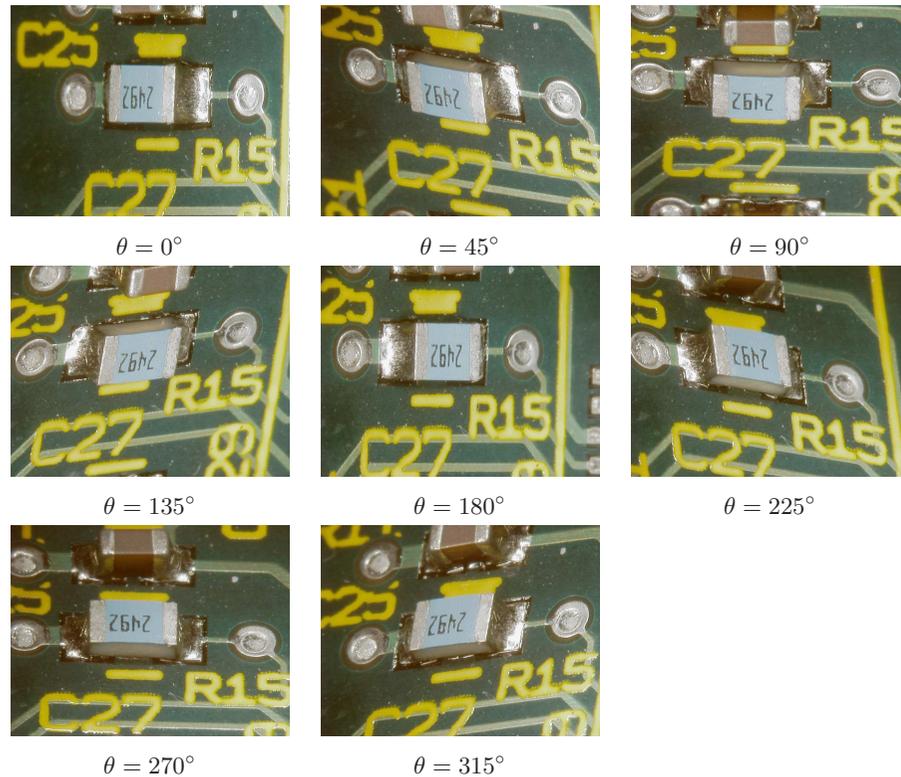


図 1 CCD カメラにおける撮影画像の例

Fig. 1 Example of microscope images with rotation of mirror head.

に取り付けられたデジタルビデオカメラで撮影するものである。実際に得られる観測画像群を図 1 に示す。ヘッドの回転角 θ で表される観察方位の変化により、対象物体表面で死角になる部分が減少している。さらに、物体表面上の点は、その 3 次元位置に応じた見え方の変化をしていることが分かる。

まず、この顕微鏡の幾何光学モデルを導く。ヘッド外縁側に取り付けられた物体側の鏡を鏡 1、回転ヘッド中心部に取り付けられた対物レンズ側の鏡を鏡 2 とすると、物体からの光は、鏡 1、鏡 2 の順に反射した後、従来の顕微鏡と同様に、対物レンズ、鏡筒を経て接眼レンズ側で観察される。さらに、この像を接眼レンズ側に取り付けられたビデオカメラで撮影

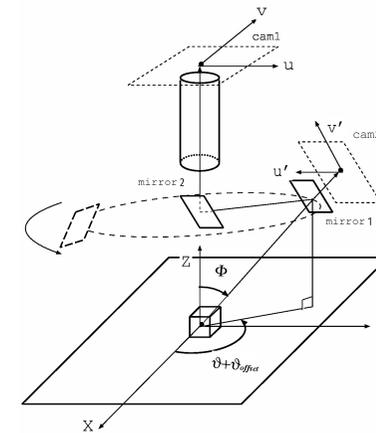


図 2 回転ヘッド顕微鏡の概念図

Fig. 2 Overview of the rotating mirror head micro scope.

する形態となる。模式的なモデルの概略を図 2 に示す。

ここで、レンズ系における歪みと、非合焦によるボケは無視できるほど小さいと仮定し、さらに、平行投影で近似できるとすると、この顕微鏡の幾何光学モデルは、回転変換の組み合わせによって記述できる。今、物体のおかれた 3 次元空間を、鏡筒軸を z 軸、および、ステージ上に直交する x, y 軸を持つ 3 次元空間とし、ヘッドの回転方位 θ 、鏡 1 からの観察方向が xy 平面となす角 φ とすると、鏡 1 の側から物体を観察した場合の仮想的な中間画像 I' 上の点 (u', v') は、

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = R_z(-90^\circ)R_y(-\phi)R_z(-\theta) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表される。ここで、 (u', v') は、 (θ, φ) の方向から xyz 空間の原点を観察する点を原点とし、 xy 平面に平行に u' 軸をとるような直交座標系とする。 w' は平行投影を前提とする場合は無視してよい。また、 θ は x 軸方向を基準とした角度とする。

次に、 I' の (u', v') とビデオカメラで撮影される画像 I 上の座標 (u, v) との関係を考える。ビデオカメラが鏡筒に固定されているため、 I は I' をヘッド回転角 θ に応じて 2 次元的に回転したものとなる。この時の回転の中心は鏡筒の中心を貫く軸であり、画像面との交

点を原点とする座標系を考えると、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = R_z(\theta) \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = R_z(\theta)R_z(-90^\circ)R_y(-\phi)R_z(-\theta) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2)$$

いう関係式が得られる。これによって、物体の置かれた3次元空間と画像上の座標とが関係付けられる。しかし実際には、

- 鏡筒へのカメラ取り付け位置の関係で、画像 I と画像 I' を関係づける回転の中心は、必ずしも画像中央と一致しない。
- 鏡1、および、鏡2が半径方向に対して微小な傾きがあることから、鏡筒軸を通る光線が、必ずしも xyz 空間の原点を通らない。
- 回転ヘッドの角度はあるオフセット値からの相対角度としてのみ得られる。

という状況を考慮する必要がある。このため、鏡筒軸が貫くカメラ画像位置 (u_0, v_0) 、および、この画像中心に対応する画素が z 軸に重なるように調整するための u' 軸方向の平行移動補正量 $\delta u'$ を導入する。結果として、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = T(u_0, v_0, 0)R_z(\theta)T(\delta u', 0, 0)R_z(-90^\circ)R_y(-\phi)R_z(-\theta) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

という変換式でモデル化する。ここで、 $R_y(\cdot), R_z(\cdot)$ は、それぞれ y, z 軸まわりの回転を、 $T(\cdot)$ は平行移動を表す。また、 θ は、ステッピングモータ制御によるが、基準方位が x 方向に重なるようなオフセット値 θ_0 を加えて座標系と整合させることにする。

このモデルを利用するためには、 $(u_0, v_0), \varphi, \delta u', \theta_0$ を事前に知っておく必要がある。ここでは、校正用物体として、複数の点を印刷した紙片をステージに置き、 θ を変えながら撮影して得られる追跡結果から、これらの値を推定する。理想的には I' 上では点の軌跡は、短軸が同一直線上にのり、かつ、長軸と短軸の長さの比が同一な楕円群になるはずである。 (u_0, v_0) を変数として条件を評価する関数を設計して評価値が最も良くなるように (u_0, v_0) を最適化する。

実際の追跡結果を図3(a)に示す。 I 上ではハート型の独特の曲線が得られることがわかる。これに対して、初期的な (u_0, v_0) を使って I' 上の軌跡を求めると、図3(b)に示すように楕円群は上記の条件を満たさない。しかし、最適化の結果得られる (u_0, v_0) を用いて算

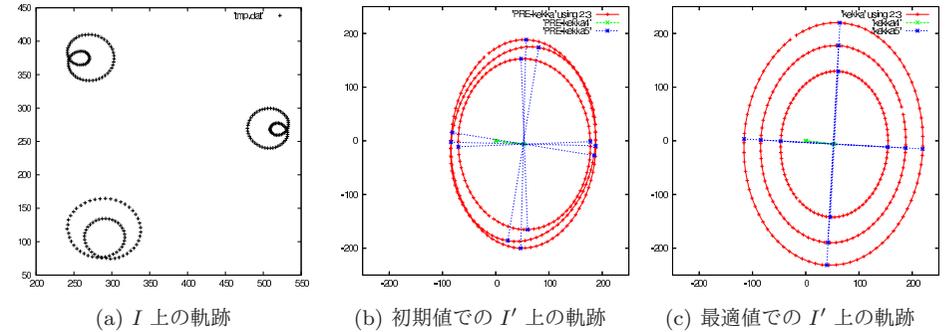


図3 校正用点群の I 上の軌跡と算出された I' 上の軌跡
Fig.3 Trajectories of calibration points on I and I' s.

出した図3(c)では、上記の条件をほぼ満足することがわかる。ここで、短軸が乗る直線の傾きから θ_0 が、直線と原点との距離から $\delta u'$ が、さらに、長軸と短軸の比から φ が求められる。

3. 平行平面群への投影を利用した3次元形状復元

本研究では、3次元点に対する多方向からの見え方の類似性に基づく形状復元を考える。これは、ある3次元の点を仮定したときの見え方、すなわち、3次元点をそれぞれの撮影画像上に投影した投影位置の画素情報が、視点の違いによらず類似すると考えられ、これに基づいて点の存在の妥当性を評価する方法をとる事とする。

もっとも単純なアルゴリズムとして、 xyz 空間内に格子点を考え、各点毎に撮影画像への投影関係に基づいて画素情報を獲得し、異なる視点の撮影像からそれぞれ取り出した画素情報の類似性を評価する方法が考えられる。この場合、3次元格子点位置と2次元画像上の画素位置とを関係付けるのための投影計算が大量に発生することとなり、処理コストの面で適切でない。

そこで、本研究では、平行平面間投影を利用することで高速化をはかる。撮影画像を3次元空間内の平面に投影する処理は射影変換で記述でき、ホモグラフィ行列 H によって表される。 H は、同一直線上にない4点について、画像上の点と、平面上の点の対応を与えれば計算でき、他の点は投影前の画素位置のベクトルに行列 H を施すことで計算される。さらに、この処理はCGにおけるテクスチャマッピング処理そのものであり、OpenGLなど

の汎用ライブラリが活用できるだけでなく、GPUに代表されるCG用ハードウェアを利用した処理による高速化が期待できる⁴⁾。

具体的な処理の流れを以下に示す。

Step 1. 撮影画像の4隅の画素位置に対応する4点の座標を平面に投影し、スライス平面 Π 上の座標を算出する。具体的には、スライス位置を定めることで、式3において、撮影画像の4隅の u, v 値から x, y 値を計算する。

Step 2. 4点の座標から撮影画像をスライス平面に投影する射影行列 H_i を算出する。

Step 3. H_i によって I_i を Π 上にマッピングする。

Step 4. Π 上で各画素毎に投影像の重なりを投影画素の類似性に基づいて評価する。

この処理をスライスの位置を変えながら繰り返すことで、3次元空間全体の格子点に対して評価を行い、最終的に評価値を閾値処理することによって、物体表面上に位置する格子点を選択する。

すべての撮影画像をスライスに投影し、それらの平均値画像を作成することを、スライスの z 値を変えながら繰り返すことで、図4に示すような画像群が得られる。スライスの z 値と被写体の z 値が適合する部分では、くっきりとした像が得られるような、疑似フォーカス調整画像群になっていることがわかる。

これは、ある程度細かな角度間隔で、円周軌道を移動しながら離散的な視点群で撮影された画像を重ね合わせることで、円環状の開口を持つレンズで撮影する状況を近似的し、円環状レンズの口径と、スライス位置で表される仮想的な対象距離の関係によって生じる非合焦ボケの発生を疑似的に表現していると考えられる。

ところで、スライス位置を変えて処理を進めるためには、4隅の点の投影箇所を再計算する必要があるが、平行投影を仮定する場合、法線方向へのスライス移動量を固定すれば、単純な平行移動によって投影像を算出できる。これより、**Step 1.** は、初期スライスのみで処理すればよくなり、計算量を抑制できる。

この映像群の各画素について「合焦」となるスライス位置を判定することで、その画素に対応する物体表面の奥行き情報、すなわち3次元形状を得る事ができる。ここでは、合焦判定として、色情報を利用する。合焦時には注目箇所の付近で、重なる色のばらつきが小さくなることを考え、注目する画素の周囲の微小領域の画素値をベクトル化した上で平均画像ベクトル M と差分ベクトルのノルムの分散値を評価値 E として算出する。

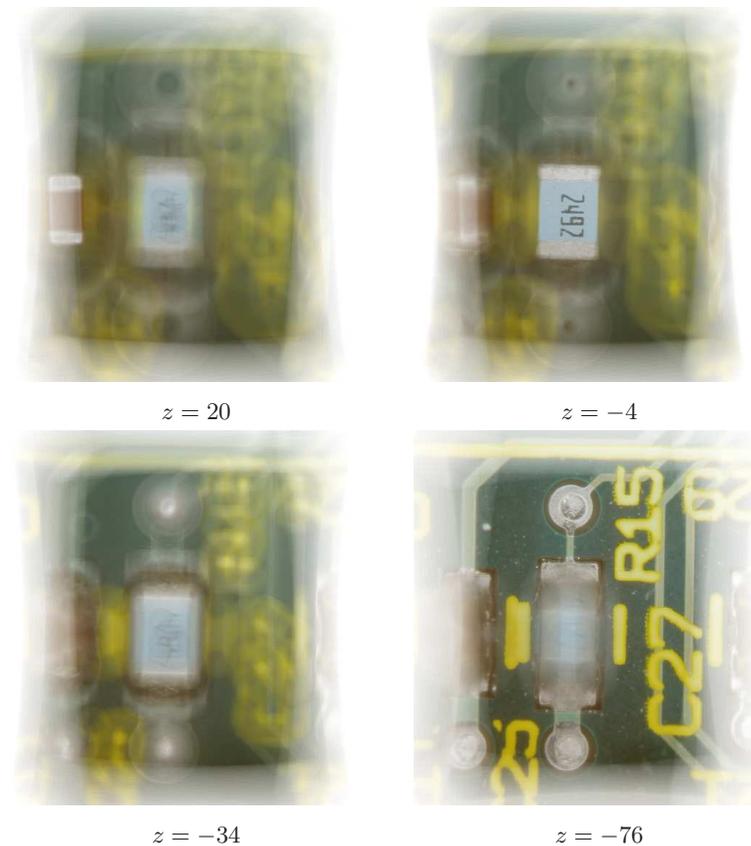


図4 スライス上に撮影画像を重ね合わせた結果
Fig.4 Results of overlapping of projected images on each slice.

$$M = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k \quad (4)$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|I_k - M\|^2} \quad (5)$$

評価値 E は、平均画像 M と各投影画像 I_k が類似しているほど小さい値となる。この E によって注目する空間中の点の「表面らしさ」を評価する。

4. 平行平面群の傾きを考慮した虚像発生抑制

前述の方法において、微小領域での合焦評価を行う際、水平スライス面上の微小領域において評価を行っていた。これは、微小面が xy 平面に平行であるという条件の元での評価に他ならない。しかし、実際の物体表面の法線方向が xy 平面に平行でない場合は、式5の評価は実際に面が存在する部分でも小さくならないことが起こりやすい。

また、物体の3次元な構造を考えると、面の向きによっては、観測できない方位が発生することが考えられ、そのような面に、撮影画像すべてを用いた評価は妥当とは言えない。そこで、微小面の法線方向を考慮することとし、

- 像の重なり判定をより厳密に行うこと、および、
- 視点方向からの面の可視判定を行なうこと、

によって、形状抽出精度の向上をはかる。

4.1 面の傾きを考慮した合焦判定

今、3次元空間中の注目点に対して、複数の法線方向を仮定し、同じ法線を持つスライスへの投影像を用いてテクスチャの重なりを判定する。法線ベクトルは、 z 軸正の向きのベクトルを基準と考え、これを x 軸、 z 軸まわりにそれぞれ α, β 回転することによって得られる法線ベクトル $n_{\alpha\beta}$ を、

$$n_{\alpha\beta} = R_z(\alpha)R_x(\beta)(0, 0, 1)^T \quad (6)$$

のように考える。 $R_x(\cdot), R_z(\cdot)$ はそれぞれ、 x, z 軸まわりの回転を表す。回転の様子を図5に示す。

この微小面に対して、まず、仮定する法線方向の面を観測できない視点を取り除く。具体的には、各視点の視線方向ベクトルと仮定する法線ベクトルのなす角が鋭角となる場合はそ

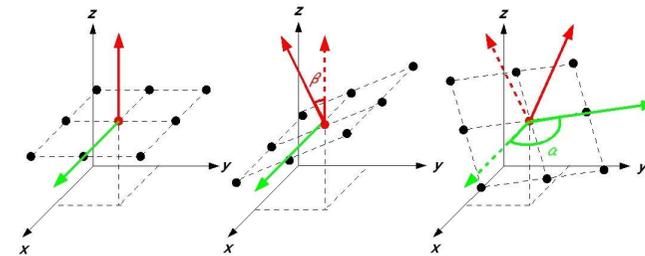


図5 回転角 α, β による微小面の傾き制御
Fig.5 Direction control by rotation α and β rotations.

の視点の情報を利用しないこととする。これによって、式5では、可視の可能性がある視点の画像 I_k のみを利用する。具体的には、非常に浅い角度で観測される場合を合わせて取り除くために、両者のなす角が 110° 以下の場合はその画像を利用しないこととした。

次に、3次元空間の格子点に対して、複数の法線方向の微小面を考慮して式5の評価を行い、最も小さい評価値とその時の法線方向をその点での評価値とするものである。最終的には、評価値の閾値処理によってその注目点が物体表面上の点であるかを判定する。

図6は垂直なスライス面となるような法線設定で作成した投影像の重ね合わせ画像の例である。図中の囲み部分で、「合焦」が発生している。水平スライスの場合と同様にスライス位置を法線方向で変化させながら画素毎の評価を行う

4.2 法線方向の変化に対する評価値の変化

図1の被写体において、提案する考え方の特徴について検証する。画面中央のチップコンデンサの上面と側面、および、基盤面に位置する点を設定し、その点で法線方向の回転角 α, β を変えながら評価値を調べると図7のようになる。

α, β に応じて評価値が変化していることがわかる。特に、図7(a)では、 $\beta = 0$ の部分で、同図(b)では、 $(\alpha, \beta) = (-90^\circ, -90^\circ), (90^\circ, 90^\circ)$ の部分で低い評価値を得ている。これらは、それぞれ単一の α, β の値ではないが、法線ベクトルの方向としては単一の方向を表している。さらに、実際のチップコンデンサの上面、側面の法線方向に応じて評価値が低くなることから、本手法で、より正確な重なり判定を行なえると考えられる。しかし、図7(c)を見ると、微小領域内の色変化が少ない部分では、実際の法線方向で低い評価値になっているものの、評価値の分布が明確でない部分もあり、このような場合には、評価値の大小のみから法線方向を推定することが難しいことが伺える。

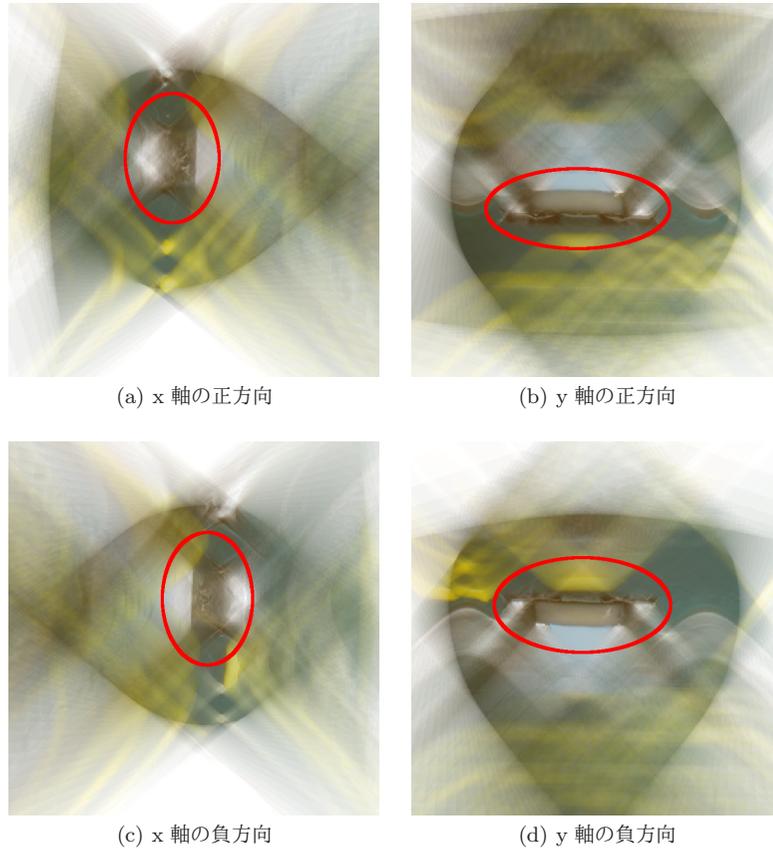


図 6 傾いたスライス上の重ね合わせ画像の例
 Fig.6 Examples of overlapping on lateral slices.

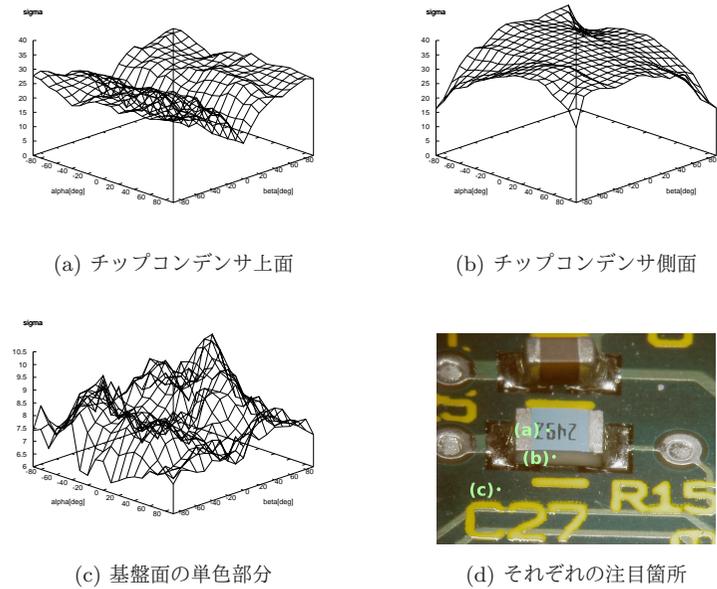


図 7 法線方向の違いによる評価値の変化の例
 Fig.7 Examples of distribution of evaluation for various normal directions.

4.3 法線方向を考慮した 3 次元再構成アルゴリズム

これらを踏まえて、前述した手法を方法を拡張する。ここでは、格子点毎に法線方向を変えて評価するかわりに、法線方向毎に平行スライス群の処理を行い、複数の法線方向毎に得られた格子点の評価値の中で最も評価値の小さなものをその格子点での評価値とすることとする。

ところで、スライスの法線方向を制御するために、平行平面スライス群を回転によって傾けると、もともと xyz 空間の格子点であったスライス上の画素は、必ずしも xyz 空間の格子点に一致しない状態となる。そこで、異なる法線方向の情報を統合する際には、 xyz 空間の格子点に重なるように結果のリサンプリングを行う。このとき、評価値は格子点周囲の標本点群から線形補間によって求めることとする。

5. 実験

提案手法をCGシミュレーション画像群、および実画像群に適用した。実撮影設定のパラメータをCGシミュレーションでも使用することとし、ここでは、一周360度のヘッ드의回転に対して80方向からの撮影を行う設定した。撮影方位の角度間隔は 4.5° である。さらに、事前の校正により、 $\varphi = 42.09^\circ$, $(u_0, v_0) = (-4.8, 33.3)$ [pixel], $\delta u' = 3.13$ [pixel]のパラメータをそれぞれ用いている。画像の解像度は 800×600 画素である。以下、CGシミュレーションと実撮影画像群に対して行なった実験結果についてまとめる。

5.1 CGシミュレーション

CGシミュレーションでは、格子状のテクスチャを張り付けられた球形状を作成し上記のパラメータでの撮影を仮定したCG画像を生成して実験を行った。図8に入力となるCG画像の例を示す。同様に作成した80視点の画像を入力としている。

処理の結果を図9に示す。 xy 平面に平行なスライスのみを用いた場合(図9(a))では、球体の上面のみの形状が獲得されていることがわかる。一方、水平スライスに加えて法線方向を4方向追加した場合の処理結果を同図(b), (c)に示す。(b)は xy 平面に対して 45° の角度のスライス法線を、(c)では、 90° となるスライス法線を利用している。これらの結果では、(a)に比べて物体全体の形状復元が行われていることがわかる。しかし、テクスチャが2色の格子状テクスチャであるため、物体表面と判断される格子点に厚みを生じている部分があり、虚像の抑制が完全でないことによる精度の低下が見られる。

5.2 実写画像への適用

次に、本手法を実撮影画像群に適用する。実撮影画像群としては図1に示したものをを用い

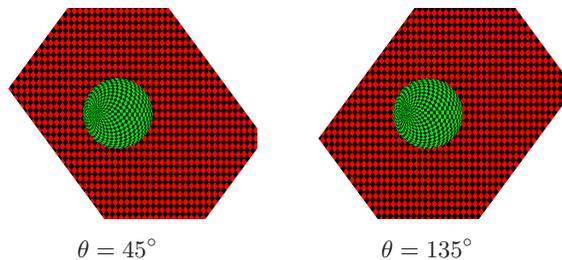


図8 CGシミュレーション用疑似撮影画像の例
Fig.8 Example images for the CG simulation.

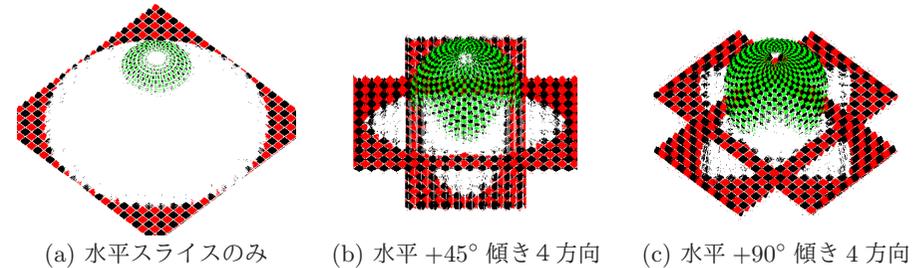


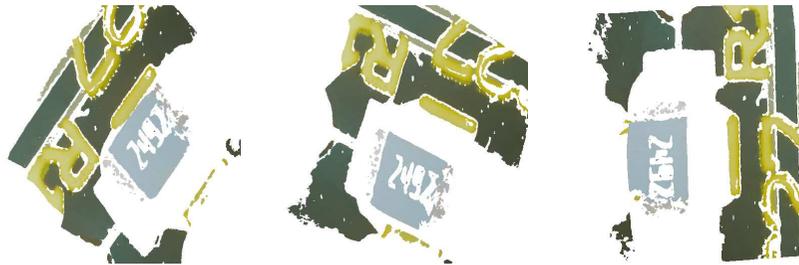
図9 CGシミュレーションの結果
Fig.9 Result of the CG simulations.

る。結果を図10に示す。水平スライスのみを使用した場合(図10(a))に対して、水平と垂直な4方向の合計5方向のスライスを用いた場合では、チップコンデンサの側面部分の再構築が実現しているなど、特定の法線方向に合致した面の抽出に成功している。しかし、全体としての形状復元精度としては、高い結果が得られているとは言い難い。この原因としては、単一色領域による誤抽出が十分取り除けていないことと、あくまで点毎の評価のみを用いているため、面の連続性など、境界面として持つべき整合性が考慮されていないことがあげられる。これらの解決は課題は今後の課題である。

6. まとめ

本論文では、回転ミラーヘッド顕微鏡像からの3次元形状再構成の手法として、平行平面への投影を利用した方法を提案した。さらに、その平面の向きをその法線方向によって制御した上で微小面上への投影像の重なりを考慮することで、3次元再構成結果における虚像の発生を抑制する方法について考察した。結果として、ある程度テクスチャに富む領域では、精度のよい再構成結果が得られたが、一方で、同色領域が広がる部分では、類似性の判定における空間的な曖昧さの影響が十分に取除けていない。

また、現状の大きな課題として、3次元の格子点群の配置については xyz 空間の軸に沿った直交座標系を前提としているが、法線方向を変えた処理結果の組み合わせの際に、再サンプリングが必要となり処理時間が増大するという問題がある。これには、3次元空間の格子点構成法や、平行平面の法線および平面間隔の設定、ならびに、それらの離散化を前提とした処理アルゴリズムの開発が必要と考えられる。さらに、今後GPUなどのハードウェアを積極的に利用した処理の高速化や、インクリメンタルな形状獲得、顕微鏡のステージ操作と



(a) 水平スライスのみを使用



(b) 5方向のスライスを使用

図 10 実撮影画像群からの再構成結果
Fig. 10 Results from the real microscope images.

の組み合わせにより複雑な構造の3次元形状の獲得などへの拡張が考えられる。

参 考 文 献

- 1) 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).
- 2) 河中治, 岩堀祐之, 福井真二, 岩田彰, “ホップフィールド型ニューラルネットワークによる走査型電子顕微鏡画像からの形状復元”, 画像電子学会誌, Vol.32, No.1, pp.71-78 (2003).
- 3) 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”,

映像情報メディア学会技術報告, Vol.32, No.58, pp.57-60 (ME2008 189-203) (2008).
4) OpenGL 策定委員会 (著), 松田 晃一 (訳), “OpenGL プログラミングガイド”, ピアソンエデュケーション (2006).

