

詳細形状の保存を考慮した距離画像からの雑音除去

原田 真治[†] 古川 亮[†] 川崎 洋^{††}

†† 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

† 広島市立大学 情報科学部 〒731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: †masa-haru@toc.cs.hiroshima-cu.ac.jp, ††ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp,

†††kawasaki@cgv.ics.saitama-u.ac.jp

あらまし アクティブステレオ方式による形状計測の結果は、通常距離画像として表される。距離画像から雑音を除去するための手段としては、線形フィルタや中間値フィルタなどが考えられるが、物体表面の傷のような小さなスケールの形状（以下詳細形状）をフィルタで処理すると、詳細形状が失われやすい。本論文では詳細形状の保存を考慮した雑音除去の手法を提案する。提案手法では、まず距離画像に対し区分的平面近似を適用する事で雑音を除去する。次に近似された距離画像と元の距離画像の差分を求め、その差分から詳細形状をテンプレートマッチングによって抽出する。最後に、抽出した詳細形状を平面近似した距離画像に合成することによって詳細な形状を復元する。実験によって、詳細形状を保存しながら、量子化誤差等の原因から発生した雑音を除去できていることを確かめた。

キーワード 距離画像, 雑音除去, 詳細形状の保存, テンプレートマッチング

Noise removal from range images that considers preservation of small-scaled geometries

Masaharu HARADA[†], Ryo FURUKAWA[†], and Hiroshi KAWASAKI^{††}

†† Faculty of Engineering, Saitama University, Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama, Japan

† Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University, Ozuka-higasi, Asaminami-ku, Hiroshima, Japan

E-mail: †masa-haru@toc.cs.hiroshima-cu.ac.jp, ††ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp,

†††kawasaki@cgv.ics.saitama-u.ac.jp

Abstract The results of the shape measurement by active systems is usually represented as range images. To reduce noise from range images, linear filters or median filters can be used. However, small-scaled geometries like scars on surfaces of objects are easily lost by using those filters. In this paper, noise reduction from range images considering preservation of small-scaled geometries is proposed. By the proposal technique, noises are reduced by applying piecewise plane fitting to a range image. Next, small-scaled geometries are extracted using template matching from the difference image of the approximated range image and the original image. Lastly, the extracted small-scaled geometries are composed into the approximated range image. By experiments, it is confirmed that the noise which includes quantization errors was removed preserving small-scaled ridges.

Key words range image, noise reduction, preservation of small-scaled geometries, template matching

1. 序 論

1.1 背景と目的

物体の形状とテクスチャを精度よく計測することは、CGによって実在物体をリアルにレンダリングすることや、文化財のアーカイブ作成などを行う為に重要である。ビジョン的手法によって物体の形状を得る手法には、パッシブな手法とアクティブな手法があるが、アクティブな光源を利用した計測は、密な

3次元形状を得ることができるため、実際にレンダリング可能な3次元モデルを得るために重要である。

アクティブステレオ方式により獲得された密な距離画像は、通常多くの雑音を含む。雑音を除去する手法としては、線形フィルタや中間値フィルタなどが考えられるが、距離画像に直接これらのフィルタを適用すると、距離画像中の小さなスケールの形状、例えば表面上の溝などの形状が、フィルタによって除去されてしまう可能性がある。そこで、本論文では、雑音と

混同されやすい小さなスケールの形状情報を保存しながら、形状に含まれている雑音を除去する手法を提案する。

以下、小さなスケールの形状を、詳細形状と記述する。詳細形状を、その広がり次元によって分類すると、以下の場合が考えられる。

- 点状の形状…孤立した突起等
- 線状の形状…細いコードや浅い溝等
- 面状の形状…テクスチャ

本論文では、上記の形状の中から線状の形状に注目する。これは、点状の形状は雑音との区別が非常に困難であるのに対し、線状の形状はテンプレートマッチングなどの積分的手法によって雑音と特別することが可能であること、また、面状の形状は、点状の形状と線状の形状の組み合わせであり、線状形状の方がより基本的であると考えたからである。これらのことから、本論文では詳細形状の中でも、線状の形状の保存を考慮した雑音の除去の手法を提案する。

1.2 関連研究

線状の形状を抽出する研究として、指先の写真から指紋を検出する研究がある [1] [2]。これらの研究は白黒の指先の画像から、指紋である溝を抽出する手法を提案している。[1] は隣接した画素から指紋の分岐や終了を判定し、[2] はフィルタを用いることによる指紋の抽出を行っている。

また、様々な画像から物体の隆起 (Ridge) を抽出する研究がある [3]。この研究は微分幾何学に基づいて隆起部の抽出方法を研究しており、顔や手から隆起している部分の抽出や航空写真にある道路の道筋を抽出する等の実験を行っている。

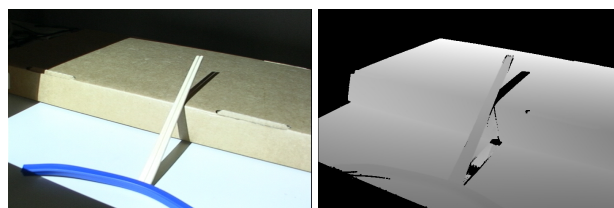
他にもステレオ法によって地形を点群情報として獲得し、得た三次元の点群情報から法線を求めることによって点群をいくつかのクラスに分類する研究がある [4]。任意の球の内部にある点群から法線を導出し、求めた法線から点群との誤差を計算しその誤差から適切な球の半径を導出する研究である。この研究において、一つの球内にある点群情報から固有値を求める事で点群を3つのクラスに分類する。そのクラスはバラバラな点群 (Clutter)、線状の点群 (Liner-structures)、平面 (Surface) の3つである。

形状データを保持しながら、形状データに含まれる雑音を除去する研究としては、variational implicit surfaces の手法を用いたもの [5] や、3次元レンジスキャナの誤差特性を利用して複数の距離画像間での誤差を減少させる方法 [6] などがある。

2. 詳細形状の保存を考慮した距離画像からの雑音除去

2.1 手法の概要

本研究の対象となる、アクティブステレオ方式により獲得された計測結果の例を図1に示す。図1(a)は対象物体を撮影したものであり、(b)はグレースケールで表された密な距離画像である。本論文では、形状のメッシュモデルではなく、距離画像を直接操作することで形状の雑音の除去を行う。距離画像を直接操作することの利点は、データの取り扱いが容易で、効率的な処理が可能であること、形状同士の差が、差分画像として



(a):観測する物体 (b) 距離画像

図1 観測によって得られた距離画像

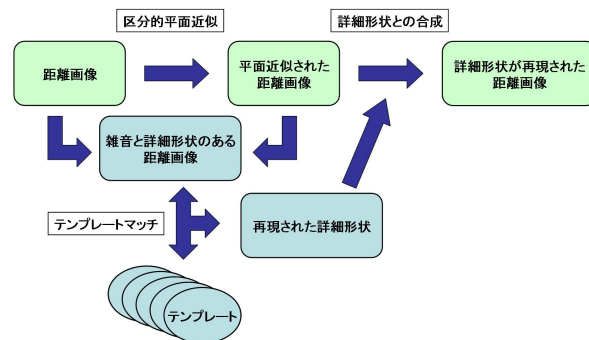


図2 本論文で提案する手法の手順

表現可能なこと、特徴抽出の手法として画像処理の手法を直接適用可能であることなどが挙げられる。

距離画像からの雑音除去には、一般的に線形フィルタによる平滑化やメディアンフィルタ等を用いることができる。しかし、これらの処理では微細な形状や角のある形状が平滑化され、特徴が失われてしまいやすい。本論文では、距離画像を正方領域に分割し、分割した領域に平面近似を用いることによる雑音の除去を行う。この方法では、分割した領域ごとに、元の形状と近似された形状の差を容易に評価することができる。これを利用して、形状の差が大きい部分については平滑化を行わないことで、近似によって大きな形状の差異が生じることを防ぐことができる。

上記の手法で近似を行った場合でも、元の形状と近似された形状の間には、微小な差が生じる。こうした微小な差には、雑音の他に、測定対象表面の小さな溝など、意味のある微細な形状も含まれる。本論文では、意味のある形状を保存しながら雑音除去を行う為に、元の形状と近似された形状の差分画像からこれらの形状を抽出し、再現する。微細な形状の抽出は、詳細形状をテンプレートとしてテンプレートマッチングを行うことで実現する。抽出された形状をテンプレートの重みつき和として再現し、近似された距離画像と合成することで、意味のある詳細形状を保存しながら雑音除去を行うことができる。

まとめると、提案手法の手順は以下のようになる。

- (1) 距離画像を正方領域に分割し、分割した領域に平面近似を用いることによる雑音の除去
- (2) テンプレートマッチングによる詳細形状の抽出と再現
- (3) 再現した詳細形状と距離画像との合成

また、この手順を図にしたものを図2に示す。

次節以降で、上記のそれぞれの手順について、詳細を述べる。

2.2 距離画像の区分的平面近似

多くの形状は、局所的には平面で近似する事ができる。提案

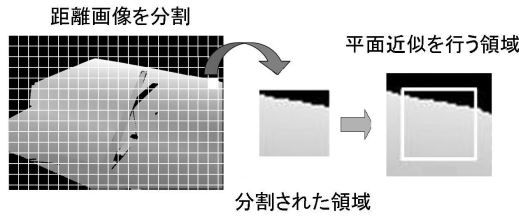


図 3 距離画像の区分的平面近似

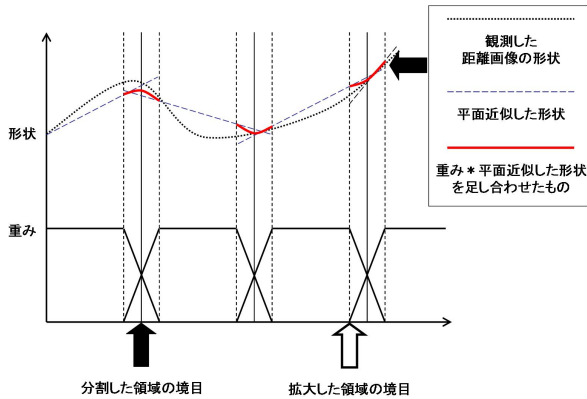


図 4 重複した領域における重みによる統合

手法では、観測によって取得した距離画像を一定の大きさの正方領域に分割し、分割した領域の距離画像を平面近似することで雑音の除去を行う。このような方法を用いたのは、平面近似の残差を調べることで容易に近似の妥当性を判断でき、近似が妥当でない部分については、元の形状をそのまま利用することで、物体の角や不連続領域部分などの特徴を残すことができると考えたからである。正方領域の半分以上に形状が入っていない場合は、平面近似を行わず距離画像をそのまま使用する。

平面近似は重回帰分析によって行う。平面は x,y 座標から $z = Ax + By + C$ の式で定義される。距離画像を正方領域に分割し、領域内における距離画像から x,y 座標とその座標の距離値 z が得られる。これらの値に重回帰分析を用いる事で、平面の係数 A,B,C を導出する。

全ての領域で平面近似を行うと、箱の角や深さの不連続領域等の非常に大きな形状の変化が存在する領域も平面近似されてしまい、大きな形状の変化を損失してしまう。この損失を回避するために、平面近似を行った後、元の距離画像との残差の総和を計算する。ある領域においては距離値のない画素が含まれている場合があるため、距離値が存在する画素数で残差の総和を割り、領域における残差の画素あたりの平均値を求める。この残差の平均値が設定した閾値よりも大きな場合は、大きな形状の変化のある領域として、平面近似を行わず元の距離画像をそのまま適用する。この手法によって、大きな形状の変化を損なわずに平面近似を行う事ができる。

距離画像に、平面近似を適用することで、雑音除去を施した距離画像が作成される。しかし領域間では異なる近似をしているために、領域の境界で距離画像の不連続性が生じる。そこで平面近似した各領域を合成する時に領域間での連続性を保つため、分割した領域を数画素分拡大しその領域で平面近似を行う。この領域の拡大を図示したものが図3である

分割した領域を拡大した事で、拡大した領域のまま距離画像を合成すると隣接する領域同士で重なる部分が発生する。この重なった部分に重みをかけることで領域間の連続性を維持する。重みは分割した各領域において中心に近いほど重みが大きくなり、かつ各画素における重みの総和が1となる様な重みである。この重みは、以下の式で導出する。

$$weight(x, y) = weight_x(x) * weight_y(y) \quad (1)$$

$$weight_x(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } |x| < (width - extend) \\ \frac{|width-x|}{width+extend} & \text{if } (width - extend) \leq |x| \leq (width + extend) \end{cases} \quad (2)$$

$$weight_y(y) = \begin{cases} 1 & \text{if } |y| < (height - extend) \\ \frac{|height-y|}{height+extend} & \text{if } (height - extend) \leq |y| \leq (height + extend) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 x,y は分割した領域の中心を $(0,0)$ とした x,y 座標であり、 $width$ は分割した領域の幅、 $height$ は分割した領域の高さであり、領域は正方なので $width = height$ である。 $extend$ は領域を拡大した増加分である。

$weight(x, y)$ で定義された重みを、領域の各画素に掛け、加算することで、連続性を維持しながら各領域を連結することができる。この様子を図4に示す。

2.3 詳細形状の抽出と再現

距離画像と平面近似した画像の差分画像を作成し、その画像にテンプレートマッチングを適用する事で、詳細形状を抽出する。抽出された詳細形状を、平面近似された画像に合成することで、詳細形状を保存した近似結果を得ることができる。

まず最初に、平面近似された距離画像と、元の距離画像との差分を計算した距離画像を取得する。以降この画像を差分画像と呼ぶ(図5)。差分画像には、観測時における量子化誤差等の原因による雑音の他に、平面近似において残差が閾値以下となるような微細な形状が含まれる。差分画像から、詳細形状を表現するテンプレートによるテンプレートマッチングを行う事で、詳細形状の抽出を行う。

本研究では、差分画像から、溝の様な構造を持った形状を抽出する。これは、このような形状は、雑音と区別可能な形状としては、最も単純なものであること、また、より複雑な形状の多くが、溝の様な構造を持った形状の組み合わせとして表現できると考えたことによる。

溝の様な構造を持った形状の抽出は、このような形状をテンプレートとして表現し、差分画像に対してテンプレートマッチングを適用することで実現できる。この時、各方向の溝に対応するテンプレートを多数用意し、それぞれに対するテンプレートマッチングを行うことで、全ての方向に対応する溝を抽出することができる。テンプレートとしては、直線状の溝に対応するもののみを利用する。これは、曲線状の溝であっても、テンプレートの大きさを調整することで、曲率が非常に小さい場合

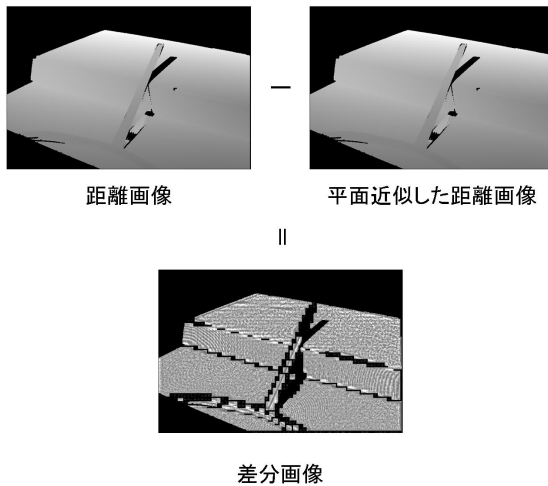


図5 差分画像の生成

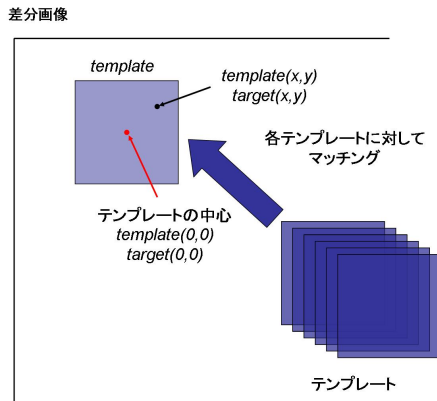


図6 $template(x,y)$ と $target(x,y)$ の位置関係とテンプレートマッチ

を除いて、直線の溝の連続として検出することによる。

本論文の実験では、溝の幅については、1種類のテンプレートのみを利用した。テンプレートサイズの決定方法としては、カメラの解像度以下になり距離画像に表れない極端に小さな溝よりも少し大きいものとした。ただし、より精度の高い検出を実現するためには溝の幅の段階的に異なる複数のテンプレートを利用すれことなどが考えられる。

各画素をテンプレートの中心として、用意した複数のテンプレートと差分画像をマッチングする。テンプレートマッチングは正規化相関によるものを用い、以下の式を用いる。

$$fitness = \frac{\sum_x \sum_y (template(x,y) * target(x,y))}{\sqrt{\sum_i \sum_j target(i,j)^2}}$$

$template(x,y)$ はテンプレート画像の x,y 座標での値、 $target(x,y)$ はテンプレート画像の x,y 座標と同じ場所にある差分画像の値である。図6にその位置関係を示す。ただし、 $target(x,y)$ の値が全て0だった場合 $fitness$ の値は0になる。

マッチングした結果、 $fitness$ の値が正でありかつ設定した閾値以上の値ならばマッチしたパターンと $fitness$ の値をその画素に保持する。全てのパターンにおいて同様にマッチングを

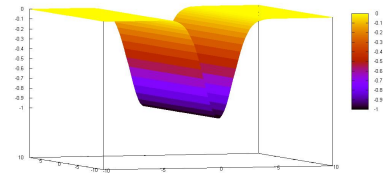


図7 一次ガウシアンによるテンプレートの形状

行い、各画素においてマッチングの値が一番大きいものをその場所で抽出したパターンとして登録する。これによって、各画素を中心にした最も近いテンプレートが導かれる。

後述する実験では、マッチングに使用するテンプレートとして、以下の一次ガウシアン関数を用いた(図7)。

$$g(x,y) = -e^{-\sigma_1(\cos(\theta)x + \sin(\theta)y)^2} \quad (4)$$

2.4 詳細形状の再現

テンプレートマッチングによって得た結果と差分画像から、抽出した形状を再構成した差分画像を作成する。さらに、作成した差分画像を平面近似した形状データと合成する。これによって詳細形状を平面近似した形状から復元する事ができる。

溝状の形状の再現には、溝の位置、方向、高さ、幅などの情報が必要である。位置として、テンプレートマッチングによってパターンが検出された画素の座標を利用する。方向は、マッチングによって各ピクセルには最もマッチしたパターンを利用することで再現する。幅については、本研究では1種類の幅の溝を仮定しているが、幅の段階的に異なるテンプレートを利用することでより精密に幅の変化に対応することができる。

全てのテンプレートは正規化されている為、テンプレートの各画素の要素を並べたベクトルを考えると、そのノルムは1である。本研究では、テンプレートそのものを利用して形状を再現する。このため、差分画像において、再現しようとする部分について、テンプレートと同様にノルムを評価し、その箇所の「大きさ」の評価値とする。再現しようとする部分がテンプレートと同様の形状を持つと仮定した場合、この大きさは、溝の高さを表す。この方法を用いる場合、再現される形状の式は以下の様になる。

$$OutPut(x,y) = template(x,y) * ||difference||$$

ここで、 $OutPut$ は出力画像、 $template$ はテンプレート画像、 $||difference||$ は差分画像のノルムを表す。

また、2.2節と同様に複数のパターンが重なり合う部分で差分画像に不連続性が発生する。これは、テンプレート自体が図7の様に2次元パターンを溝の方向に引き伸ばした形状となっている為、テンプレートの縁で形状が不連続となるためである。その不連続性を回避するために、大きさを補正したパターンに重みをかけることで不連続性を回避する。この重みは、中心が最大であり中心から離れる程減少しテンプレートの端において0となる重みである。テンプレートの外側の値は0の為、この重みをかけることでテンプレートの端での不連続性が無くなる。

この重みをかけた各テンプレートを全て加算しても、全体の連続性は保たれる。また、別途に各ピクセルにおいてかけられ

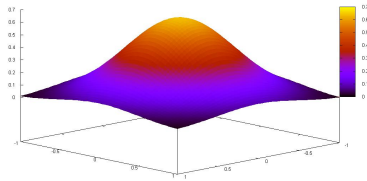


図 8 二次元ガウシアン関数の値



図 9 詳細形状を再現した差分画像

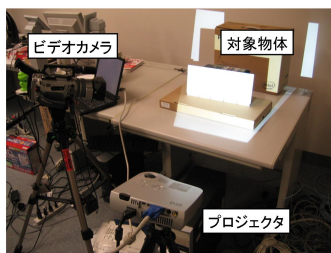


図 10 プロジェクタ・カメラ系によるアクティブ形状計測装置

た重みを加算しておく。全てのパターンについて計算し終えた後、各ピクセルにおいて重みで正規化する。これによって連続的な形状の差分画像を得ることができる。

本論文では、重みは等分的な二次元ガウシアン関数によって重みを計算する。二次元ガウシアン関数は以下の式で定義する。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{((x-u_x)^2 + (y-u_y)^2)}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

ただし σ は標準偏差であり、 (u_x, u_y) は画像の中心座標である。図 8 はこの関数の値をプロットした結果である。

全ての画素について加算を行った後、全画素について加算された重みで正規化し詳細形状を再構成した差分画像を作成する。作成された差分画像の例を図 9 に掲載する。

以上の手順によって、区分的な平面近似を適用した距離画像と、テンプレートマッチングによる詳細形状を再現した差分画像を作成することができる。これらの画像を加算することで、詳細形状が保存され、かつ雑音が除かれた距離画像を作成することができる。

3. 実験

3.1 実験環境と手法

提案手法を実際に観測した結果に適用し、提案手法の有効性を検証した。実験は、Pentium4(2.8GHz)のCPUと1GBの主記憶装置を搭載したPCで行った。入力となる距離画像として、箱の上に乗せたスピーカー、割り箸、波状の形状を持った板を計測した。計測は、プロジェクタ・カメラ系[7]によるアクティブ計測により行った(図 10)。

これらの距離画像に本論文の手法を適用する事で、詳細形

状を保存しながら雑音の除去を行った。距離画像の大きさは全て 720×480 画素である。平面近似を適用する正方領域は一辺の長さが 10 画素であり、また正方領域を拡大する増分は 3 画素分とした。テンプレートは一辺の大きさが 10 画素の正方形であり、式 (4) を用いて作成した。このテンプレートを $[0^\circ, 180^\circ)$ の範囲で 10° ずつ回転させた 18 個のテンプレートを作成した。このテンプレートを用いてマッチングすることで、線状の凹んだ形状(例えば溝)を抽出することができる。テンプレートのパラメータはどの形状においても $\sigma_1 = 0.3$ で統一した。また、式 (5) の二次ガウシアン関数のパラメータは $u_x = 0, u_y = 0, \sigma_2 = 0.5$ とした。

本実験で設定した閾値は、平面近似の妥当性を判断するための閾値は各形状一律に 0.0009 とし、テンプレートマッチングによる詳細形状の抽出における正規化相関の閾値は、スピーカで 0.575、割り箸で 0.65、板で 0.5 とした。

3.2 実験結果

実験の結果をメッシュモデルに変換し、シェーディングを施して描画したものを図 11, 12, 13 に示す。

スピーカの形状(図 11)について、(a) は対象シーンを、(b) は観測した形状を、(c) は (b) に平面近似を適用したものを、(d) は詳細形状の抽出と再現を行った結果、(e), (f), (g) はそれぞれ (b), (c), (d) においてスピーカ側面にある溝の部分拡大したものである。

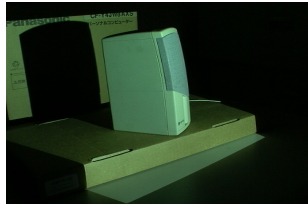
また、割り箸の形状(図 12)は、図 1 の距離画像を処理したものである。図 12(a) は計測結果、(b) は平面近似結果、(c) は詳細形状の合成結果、(d), (e), (f) は (a), (b), (c) の拡大画像である。

板の形状(図 13)について、(a) は対象シーンを、(b) は観測した形状を、(c) は (b) に平面近似を適用したものを、(d) は詳細形状の抽出と再現を行った結果、(e), (f) はそれぞれ (b), (d) の拡大画像である。

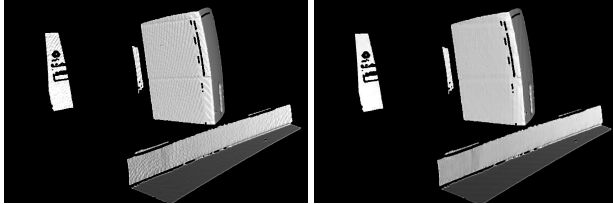
これらの距離画像の処理に要した時間は、それぞれ 41 秒、44 秒、42 秒であった。

それぞれの実験結果において、観測した形状には、アクティブ計測システムの量子化誤差により、モアレ状のノイズが生じている(図 11(e), 図 12(d) など)。こうしたモアレ状の雑音は、区分的な平面近似を用いることで、ほとんど取り除かれた(図 11(c), 図 12(e) など)。この時、実際の形状に存在する詳細形状(スピーカ横面の溝、割り箸の溝、板の波状形状など)も取り除かれているが、これらの詳細形状は、詳細形状の抽出と合成を行うことで、復元されている(図 11(g), 図 12(f))。ただし、合成結果には、溝の深さが一定しないなど、問題点もあった。図 13(f) から、本手法は溝から成るテクスチャ状の形状にも対応できていることが伺えるが、溝の深さが一定しないという問題点は、ここでも現れた。

図 12(f) において、本来平面である部分に、溝状の形状が合成されている。これは、これらの部分において波の谷間部分がテンプレートとマッチした結果、本来平坦な部分に溝が発生してしまったためである。このような誤った形状は、テンプレートマッチングの閾値を調整することで、かなり抑制することが出来るものの完全な除去は今後の課題である。

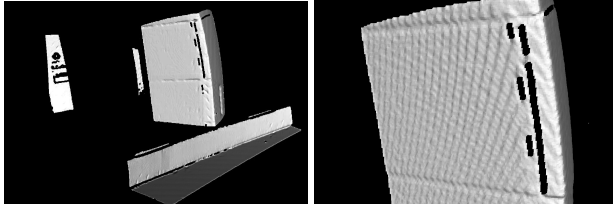


(a):対象シーン



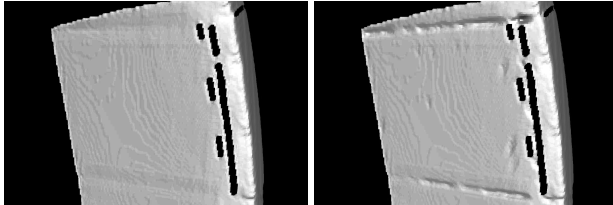
(b):観測した形状

(c):平面近似した形状



(d):詳細形状の合成結果

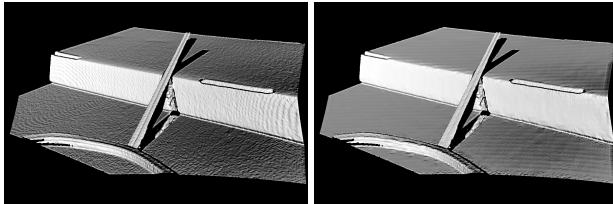
(e):(b)の拡大画像



(f):(c)の拡大画像

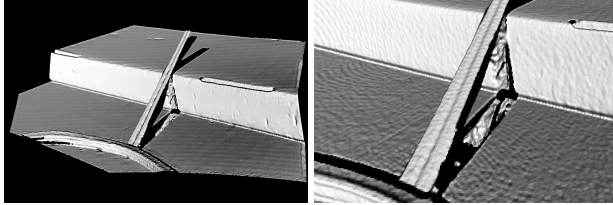
(g):(d)の拡大画像

図 11 実験結果 (スピーカ)



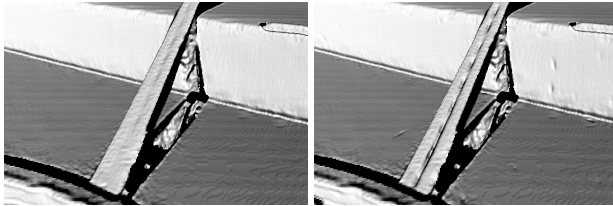
(a):計測結果

(b):平面近似結果



(c):詳細形状の合成結果

(d):(a)の拡大画像

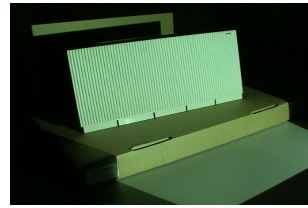


(e):(b)の拡大画像

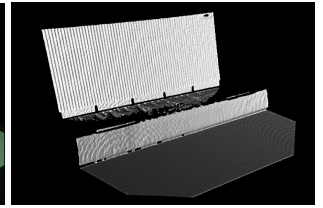
(f):(c)の拡大画像

図 12 実験結果 (折り箸)

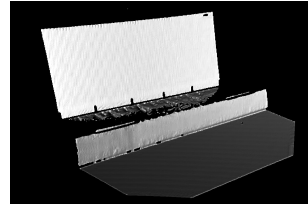
処理時間は実用的な範囲に収まっていた。



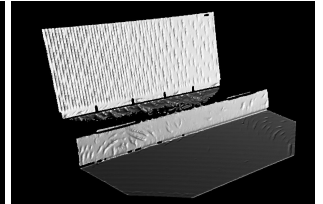
(a):対象シーン



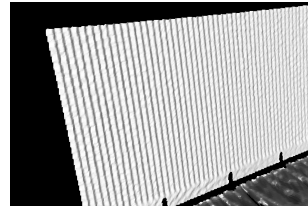
(b):計測結果



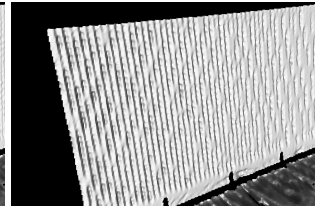
(c):平面近似結果



(d):詳細形状の合成結果



(e):(b)の拡大画像



(f):(d)の拡大画像

図 13 実験結果 (板)

4. 結 論

本論文は、距離画像から詳細形状の保存を考慮した雑音除去の手法を提案し、その手法を実験に適用しその効果を確認した。実験結果では、アクティブ計測システムの観測結果に生じた量子化誤差による雑音を、詳細形状を保存しながら除去することができた。今後の課題として、テンプレートの種類を増やすことで、より多様な詳細形状を保存することや、詳細形状の合成手法を検討することで、距離画像の忠実度を高めること、また、テンプレートマッチングの感度を、領域に応じて調整する方法により、より正確に詳細形状と雑音を分離できるようにすることなどが考えられる。

文 献

- [1] J. B. M. C. A. Bishnu, P. Bhowmick: "Combinatorial classification of pixels for ridge extraction in a gray-scale fingerprint image", ICVGIP, pp. 451-456 ((2002)).
- [2] A. K. Jain, S. Prabhakar and L. Hong: "A multichannel approach to fingerprint classification", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 348-359 ((1999)).
- [3] T. T. H. Tran and A. Lux: "A method for ridge extraction", Asian Conference on Computer Vision, pp. 57-60 ((2004)).
- [4] R. Unnikrishnan, J.-F. Lalonde, N. Vandapel and M. Hebert: "Scale selection for the analysis of point sampled curves: Extended report" ((2006)).
- [5] H. Q. Dinh, G. Turk and G. G. Slabaugh: "Reconstructing surfaces using anisotropic basis functions.", ICCV, pp. 606-613 (2001).
- [6] 大石, 佐川, 中澤, 倉爪, 池内: "距離画像の誤差分布方向を考慮した反復計算による精度向上手法", MIRU2002, pp. 255-262 (2002).
- [7] 川崎, 大澤, 古川, 中村: "空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な 3 次元形状復元", 情報処理学会論文誌, 47, SIG 10(CVIM 15), pp. 59-71 ((2006)).