

近赤外構造化光投影によるテクスチャと形状の同時計測センサ

赤坂 清隆[†] 佐川 立昌[†] 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

E-mail: †{akasaka,sagawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 動物体の形状とテクスチャを同時実時間計測する事は実世界志向ロボットの制御や認識の分野での応用が期待できる。これを実現するセンサの開発において、高速な形状計測、およびテクスチャの同時計測という2点が問題であった。これまで高速な形状計測法として、カラー構造化光を用いた一回の撮影での形状計測手法が提案されている。この手法は高速な形状計測が可能であるが、可視光を用いた構造化光であるため、テクスチャの同時計測は実現できなかった。そこで本論文では赤外光の構造化光を投影し、形状とテクスチャを同時に計測するセンサを提案する。可視光をテクスチャ計測、赤外光を形状計測と用途別に波長を分離することにより、同時計測を可能にした。また、テクスチャ計測用のカメラと形状計測用のカメラを同軸上に配置することにより、テクスチャマッピングにおいてオクルージョンが発生しないシステムを構築した。

キーワード 形状テクスチャ同時計測, 近赤外構造化光, 単一撮像計測

A Sensor for Simultaneous Capturing of Texture and Shape by Projecting Structured Infra-red Light

Kiyotaka AKASAKA[†], Ryusuke SAGAWA[†], and Yasushi YAGI[†]

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

E-mail: †{akasaka,sagawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract Simultaneous capturing of texture and shape of a moving object in real time is expected to be applied to various fields including mobile robots and object recognition. To develop a sensor to achieve the feature, there are two difficult points: fast capturing of shape and simultaneous capturing of texture and shape. One-shot capturing methods by projecting colored structured lights were already proposed to capture shape at high frame rate. However, since the methods used visible lights, it was impossible to capture texture and shape simultaneously. In this paper, we propose a method to capture texture and shape simultaneously by projecting infra-red structured light. Since our method uses visible light for texture and infra-red light for shape respectively, simultaneous capturing can be achieved. Moreover, we develop a system that maps texture on the captured shape without any occlusion by placing the both cameras for visible and infra-red lights coaxially.

Key words Simultaneous capturing of texture and shape, Infra-red structured light, one-shot capturing

1. はじめに

動物体の形状とテクスチャを同時実時間計測する事は、バーチャルリアリティ(VR)、コンピュータビジョン、ロボットなど様々な分野での応用が期待できる。例えば、動作する人物の形状とテクスチャを取得すると、3次元CGを用いて仮想空間にその人物を合成し、容易に複合現実感を実現することができる。ここで、形状とテクスチャの同時実時間計測という目的を実現するためには、高速な形状計測、および形状計測に同期したテ

クスチャ計測を実現するセンサが必要となる。

形状を取得するための手法として、大きく分けて受動的な方法と能動的な方法の2つが考えられる。受動的な方法には、ステレオ視や視体積交差法が挙げられる。これらの手法は同期した複数のカメラを用いて形状を計測するため、テクスチャの同時計測の面では適した方法である。また、カメラのフレームレートで映像を記録できるため、高速なデータ取得が可能である。しかし、受動的な方法であるため、形状計測の精度は能動的な手法に劣り、CGに用いる形状モデルとしては不十分な場

合が多い。また、視体積交差法は多数のカメラを用いて観測対象の周囲から計測することが必要であり、大きなシステムが必要となる。

一方、能動的な形状計測法には、レーザレンジセンサ、構造化光投影法が挙げられる。レーザレンジセンサは、高精度で形状が取得できるため形状計測法としてしばしば用いられる。三角測量型、時間差計測型などの方法があるが、発射したレーザ光が観測物体で反射して戻ってくるまでの時間から距離を計測するタイプのセンサは、鏡を用いてレーザ光の方向を変化させるため、計測に数秒から数分かかり、高速な形状計測には不向きである。また近年、高フレームレートのレンジセンサ [1], [2], [9] が開発されているが、高速化によるトレードオフのため解像度、距離精度が十分ではない。

構造化光投影型のセンサは、プロジェクタなどを用いてパターン光を観測対象に投影し、カメラでその光を観測する方法である。パターン光の工夫によって、カメラとプロジェクタ間で対応付けを行い、三角測量によって形状が計測できる。このうち、構造化光投影型センサには高速に形状計測できる手法が提案されている [3], [4], [6], [8]。これらの手法は高速に形状を計測可能であり、特に [3], [8] ではカラーパターンを用いることにより、一回の撮影によって形状計測が可能であり、実時間形状計測に適している。しかし、形状計測に可視光のパターンを投影するため、同時にテクスチャを取得できないという問題がある。この問題を解決するため、構造化光による計測とテクスチャの取得を高速な時分割処理で行う手法が提案されている [5], [7]、形状とテクスチャの同時実時間計測ではないため、形状とテクスチャにずれが生じる可能性がある。

構造化光投影法が持つテクスチャ取得における問題は、構造化光がテクスチャを構成するのと同じ可視光を用いている事が原因である。そこで本論文では、これまで可視光波長で行われてきた構造化光投影法を赤外波長で行うシステムを提案する。赤外光を用いて形状計測することにより、形状計測中もテクスチャ計測を妨げないため、形状とテクスチャの同時取得を実現できる。さらに、形状計測用カメラとテクスチャ取得用カメラを同軸上に配置する事でテクスチャマッピングを行う際のオクルージョンをなくすことが可能となる。

以下の章では、まず 2. において、赤外光を用いた形状とテクスチャの同時計測システムを提案する。次に、3. で形状とテクスチャを同時に計測する実験を行い、最後に 4. で本論文をまとめる。

2. テクスチャ・形状実時間同時計測センサ

本論文で提案するセンサの着想の中心は、テクスチャ計測に用いる波長と形状計測に用いる波長を分離することにより、テクスチャと形状の同時計測を可能にする点である。テクスチャ計測には可視光波長を用いるため、形状計測には近赤外光を用いることにより、能動的に投影したパターン光に影響を受けないテクスチャを取得することができる。すなわち、図 1 に示すように可視光域の RGB 3 波長を用いてテクスチャを計測し、赤外域で 2 波長を用いて形状計測を行う。試作したセンサに用

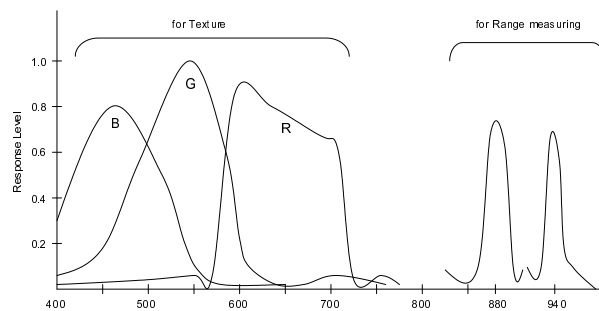


図 1 テクスチャと形状計測に用いる波長の分布。

Fig. 1 Distribution of the wavelengths for capturing texture and shape.

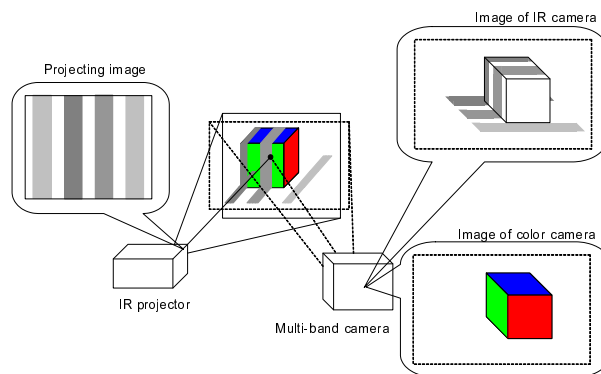


図 2 テクスチャ・形状同時計測センサの概要。

Fig. 2 Overview of the sensor for simultaneous capturing of texture and shape.

いたカメラは 1000nm まで感度があるため、赤外光の中心波長には 880nm と 940nm を用いた。

以下では、まず赤外光プロジェクタとマルチバンドカメラから構成されるセンサの概要を述べる。次にプロジェクタとカメラについて、それぞれ説明する。最後にプロジェクタによって投影される赤外光パターンについて説明し、単一撮影によって形状計測が可能であることを示す。

2.1 センサの概要

提案するテクスチャ・形状同時計測センサは、図 2 に示すように赤外光プロジェクタとマルチバンドカメラから構成される。赤外線プロジェクタは 880nm と 940nm の近赤外光を用いてそれぞれ異なるパターンをを投影する。一方、観測対象を撮影するマルチバンドカメラには、RGB 3 波長の可視光を取得する単板式 CCD 1 個と、赤外域を取得するモノクロ CCD 2 個を用いる。それぞれのモノクロ CCD に 880nm と 940nm のバンドパスフィルタを取り付けることで、合計 5 波長を計測するカメラとなる。テクスチャ計測においては、外部の可視光光源を用いて照明する。形状計測を阻害しないために外部光源には IR カットフィルタなどを用いて赤外光を取り除いておくことが必要である。

2.2 赤外光プロジェクタ

提案する赤外光プロジェクタの内部構造は図 3 示すようなものとなる。光源から出力される 880nm と 940nm の光をマスクを通してパターン光を作り、2 つの光をプリズムで合成して投

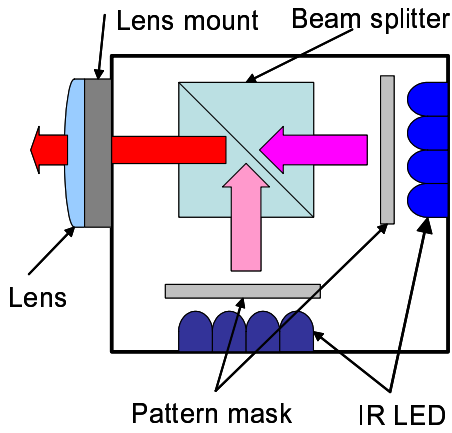


図 3 赤外光プロジェクタの内部構造 .

Fig.3 The internal structure of infra-red projector.

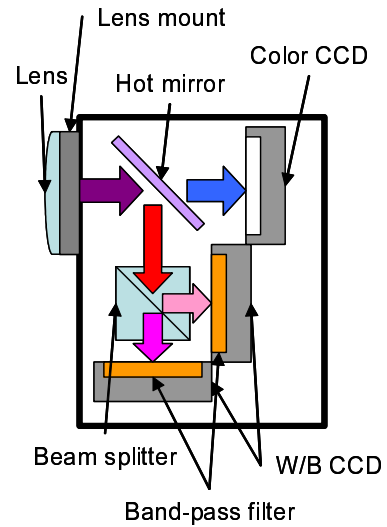


図 5 マルチバンドカメラの内部構造 .

Fig.5 The internal structure of multi-spectrum camera.

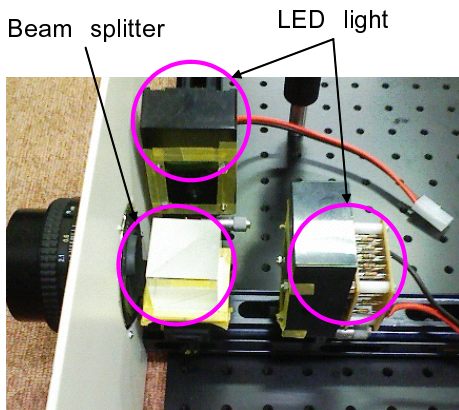


図 4 試作した赤外光プロジェクタ

Fig.4 An experimental system of infra-red projector.

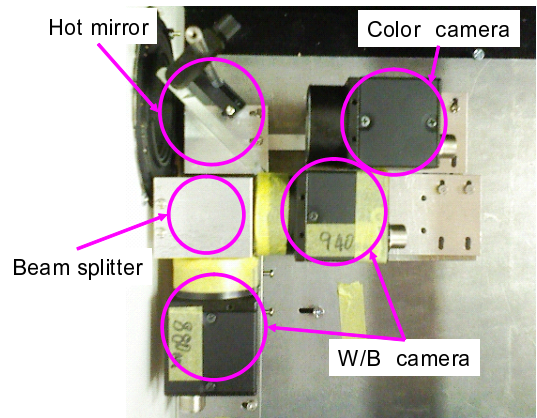


図 6 試作したマルチバンドカメラ

Fig.6 An experimental system of multi-spectrum camera.

影する。この投影の仕組みは、市販の3板式液晶プロジェクタに用いられる投影方法とほぼ同じ方法である。まず、光源には赤外 LED を用いた。LED は出力する波長の幅が狭いため、バンドパスフィルタを用いなくても互いに影響しない光を作ることが可能である。光源の前には投影するパターンを印刷したマスクを設置する。提案するセンサでは、単一撮影で形状計測を行い、パターン光を変化させる必要がないため、プリンタを用いてパターンを印刷した透明フィルムを用いている。

次に、それぞれのマスクを通過した光はプリズムを通過して合成され、結像のための対物レンズによって外部に投影される。パターン光を観測対象上で結像させるためには、マスクに結像する必要があるが、試作したシステムでは、結像系の簡単化のため対物レンズのみを用いて集光する。レンズとマスクの間にはプリズムが入るため、バックフォーカスが長いレンズが都合がよい。そこで、試作システムでは中判カメラ用レンズを対物レンズとして用いた。図 4 は試作した赤外光プロジェクタである。

2.3 マルチバンドカメラ

次に赤外パターン光と可視光テクスチャを同時に取得するマルチバンドカメラについて説明する。形状計測に用いるカメラと、テクスチャ計測に用いるカメラが別の位置にあった場合、

両方のカメラから同時に計測できない部分が発生し、テクスチャマッピングできない問題が起こる。そこで、提案するマルチバンドカメラでは、形状計測に用いられる赤外光とテクスチャに用いる可視光を同軸で取得することにより、この問題を解決する。

図 5 はマルチバンドカメラの内部構造を示している。対物レンズから入ってきた光は、まず赤外光を反射し可視光を透過するホットミラーによって、赤外光と可視光を分離する。透過した可視光は単板式カラー CCD 上で結像することにより、テクスチャ画像を取得する。一方、赤外光はプリズムを用いたビームスプリッタによって2つに分割される。その後、それぞれ 880nm と 940nm のバンドパスフィルタを通過してモノクロ CCD 上で結像することにより、赤外光プロジェクタによって投影されたパターンを取得する。対物レンズから3つの CCD までの光路長を揃えることにより、同時に多波長の撮像を可能にする。また、プロジェクタと同様に対物レンズから CCD までの距離を長く取る必要があるため、中判カメラ用レンズを用いた。図 6 は試作したマルチバンドカメラである。

2.4 赤外光パターンを用いた単一撮影による形状計測

射影パラメータが既知であるプロジェクタとカメラを用いる形状計測では、撮影した画像中の1点と投影された画像中の1点との対応を求める事で対象の点の空間中の座標を推定する。その対応を単一撮影画像中から発見するための手法として、de Bruijn 系列に基づくカラーパターンが提案されている [3], [8]。de Bruijn 系列とはウィンドウサイズ n 、記号数 q を決めるとき、1 周期長が q^n である系列の中で、連続する長さ n の部分系列は 1 周期中で 1 回のみ出現するような系列である。この系列をカメラ画像中で区別可能な 2 つ以上の記号で符号化する。長さ n の部分系列の場所が 1 周期中で一意に決まるので、前後の系列を慮した探索を行うことで単一撮影された画像中の記号が投影画像のどの点に対応するかを一意に決定可能である。

[3], [8] では RGB カラーストライプを投影し、色が変化するエッジにおいてどのように色が変化したか、ということに記号を割り当てた。しかし、RGB 3 つの波長の信号が同時に変化するため、投影パターンの位置合わせ誤差により、偽のエッジが検出されてしまうというハザードが発生する可能性がある。本論文で試作するシステムでは手動で投影パターンの位置合わせを行うため、その誤差は市販プロジェクタと比べて大きくなり、ハザードが発生しやすい検出方法は適さない。

そこで本論文で提案するシステムでは、単一の波長を用いて記号の位置を検出し、他の波長は記号の種類決定にのみ用いることにする。これにより、複数の波長を利用することによるハザードを防ぐ。試作システムでは、880nm 光を用いて記号位置を検出し、940nm 光は記号種類の決定に用いることにした。この 2 波長を用いて、各ピクセルに割り当てられる記号 $s = \{s_0, s_1, s_2\}$ を次のように決定する。

$$\begin{aligned} s_0 &= \neg L_{880} \\ s_1 &= L_{880} \wedge L_{940} \\ s_2 &= L_{880} \wedge \neg L_{940} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 L_{880} 、 L_{940} はそれぞれの波長の光が当たっているかいないかを表す。880nm 光は幅を持ったストライプではなく、細い線を投影する。そして記号は線の輝度値のピークに割り当て、 L_{880} はピークを含むピクセルのみが真となる。一方、940nm 光では、線検出を行った後に膨張処理をおこない、880nm との位置合わせ誤差を吸収する。de Bruijn 系列の生成には s_1 、 s_2 を用いて符号化した。 s_0 に分類されたピクセルは、記号が割り当てられていないピクセルであると見なされる。試作した赤外光プロジェクタの投影パターンを図 7 に示す。生成したパターンはウィンドウサイズ $n = 8$ 、記号数 $q = 2$ であり、走査線に沿った記号数は 150 である。

記号位置を計算するために、提案手法ではフィルタ処理によって線検出を行う。まず、入力画像を Sobel フィルタを用いて x 軸方向に微分する。次に、微分した画像に対して Canny フィルタを用いてエッジ検出する。この際、もう一度 x 軸方向に微分した画像を計算し、2 次微分が負のエッジのみを検出する。これにより、入力画像の極大値のみを検出し、光が当たっていない極小値は無視する。さらに、サブピクセル精度で位置

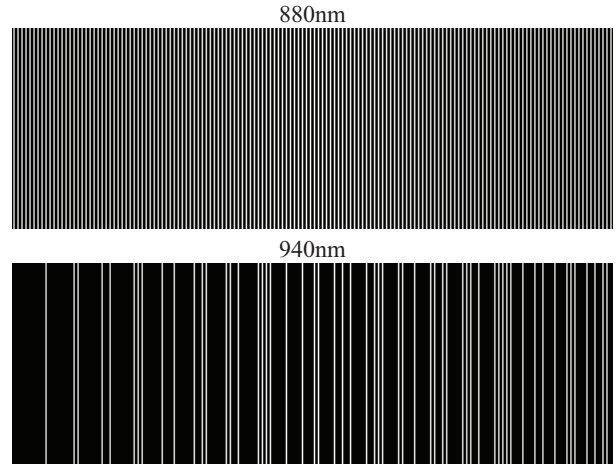


図 7 投影パターン

Fig. 7 A pattern mask

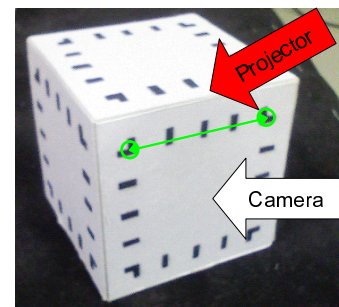


図 8 既知形状物体の計測

Fig. 8 An experiment of measuring a known object.

を検出するために、Canny フィルタによって検出したピクセル位置で、入力画像の輝度値に 2 次関数をフィッティングし、極大となる位置をサブピクセル精度で求める。

検出した記号に対して、プロジェクタから投影した de Bruijn 系列と、DP マッチングを用いて対応付けを行う [8]。投影光とカメラ画像が対応付けされると三角測量により、カメラから観測対象までの距離が計算でき、隣接する系列同士をメッシュで接続することにより、3 次元メッシュモデルが生成できる。

3. 実験

まず既知の物体を計測し、試作したシステムの計測精度を評価する。図 8 に示した既知形状の立方体を計測し、生成したモデルと実物体を比較する。評価基準として、2 点間の距離の誤差と立方体の 2 面の法線ベクトルの内積を用いた。図 8 に示した実物体の 2 点間の距離が 41.50mm であったのに対して、生成した 3 次元モデルにおける距離は 42.05mm であり、誤差は 0.55mm であった。一方、生成したモデルの立方体 2 面の法線ベクトルの内積は 0.0062 であった。これから互いに垂直な面の形状が計測できたことがわかる。また、画像から形状モデルを計算する時間は Pentium4(3GHz) を用いて約 60 ミリ秒であった。単一計測によって形状モデルが生成可能であるため、高フレームレートで形状モデルを取得することが可能である。

次に、未知形状の物体を計測する実験を行う。図 9 に示す

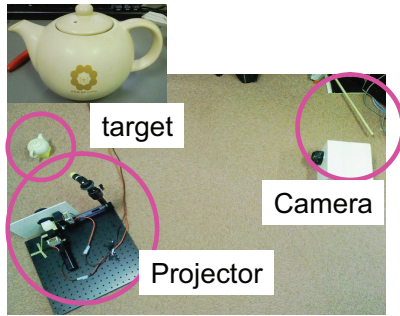


図 9 実験風景

Fig. 9 Overview of an experiment

ように、赤外光プロジェクタ、マルチバンドカメラ、観測対象を配置した。マルチバンドカメラによって撮像された画像を図 10 に示す。上段の画像は可視光 CCD によって得られた画像であり、赤外光プロジェクタによって投影されたパターンは撮像されていない。すなわち、テクスチャの同時計測ができていないことがわかる。一方、中段、下段の画像はそれぞれ 880nm、940nm のバンドパスフィルタをつけたモノクロ CCD によって撮像された画像である。赤外光プロジェクタに取り付けられたバンドパスフィルタによって、ほぼ完全に波長が分離されているため、各波長において計測された画像には、他の波長の影響を受けていない。880nm のパターンには、等間隔に線が並べられているのに対し、940nm のパターンには s_1 に対応する位置にのみ線が投影されている。この 2 つの赤外画像に対し、2.4 に述べた輝度値のピーク検出法を適用した結果が図 11 である。ここで青線、赤線はそれぞれ s_1 、 s_2 に対応している。

検出した記号に対して、投影した de Bruijn 系列と DP マッチングを行うことにより得られた 3 次元形状モデルを図 12 図 13 に示す。図 12 はテクスチャなしの形状モデルであり、図 13 は可視光 CCD によって得られた画像をテクスチャマッピングしたモデルである。形状モデル計測用のカメラとテクスチャ計測用のカメラを同一光軸上に配置したシステムであるため、テクスチャマッピング時にオクルージョンが発生せず、形状計測した全ての部分にテクスチャを貼り付けることが可能である。

4. おわりに

本論文では、近赤外構造化光の投影により、テクスチャと形状を同時計測するセンサを提案した。このセンサを用いて、観測対象の形状とテクスチャを同時実時間計測することにより、ロボティクス、VR、認識の分野での応用が期待できる。テクスチャと形状の同時計測を実現するセンサの開発においては、これまで、高速な形状計測、およびテクスチャの同時計測という 2 点が問題であった。提案したセンサでは、カラー構造化光を用いた単一撮像での形状計測手法を応用して高速な形状計測を実現した。さらにテクスチャの同時計測を可能にするために、カラー構造化光ではなく赤外光の構造化光を投影し、可視光をテクスチャ計測、赤外光を形状計測と用途別に波長を分離することにより、同時計測を可能にした。また、テクスチャ計測用のカメラと形状計測用のカメラを同一光軸上に配置することに

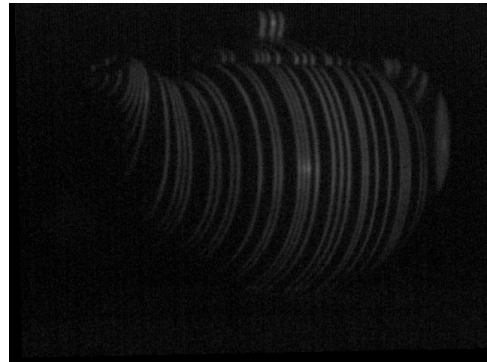
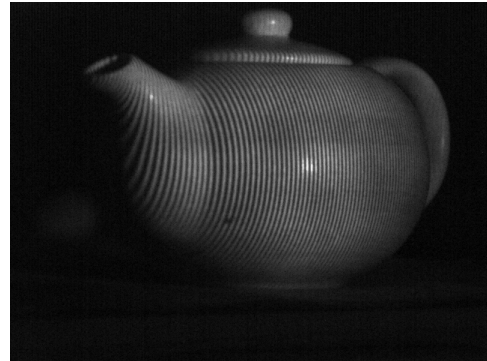


図 10 マルチバンドカメラによって撮像された画像：上からテクスチャ画像、880nm 光、940nm 光。

Fig. 10 Images captured by the multi-band camera: a texture image (top), an image of 880nm (middle), and an image of 940nm (bottom).

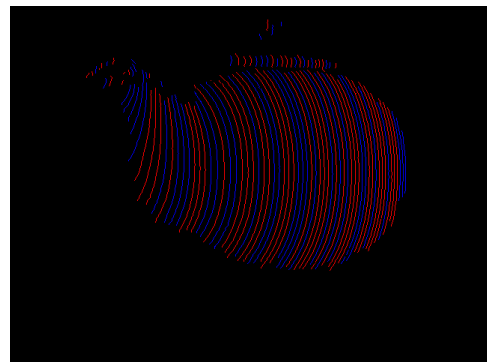


図 11 検出された線

Fig. 11 Detected lines

より、テクスチャマッピングにおいてオクルージョンが発生しないシステムを構築した。

今後の課題として、形状計測の安定化を図るため、形状計

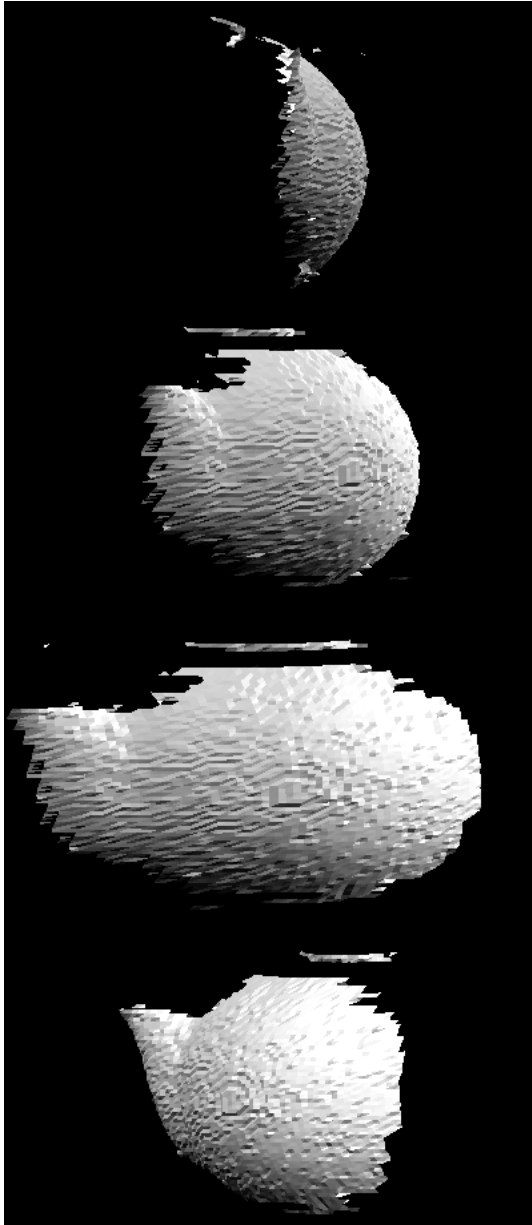


図 12 生成された 3 次元メッシュモデル：テクスチャなし。

Fig. 12 A sample of generated 3D mesh model without texture .

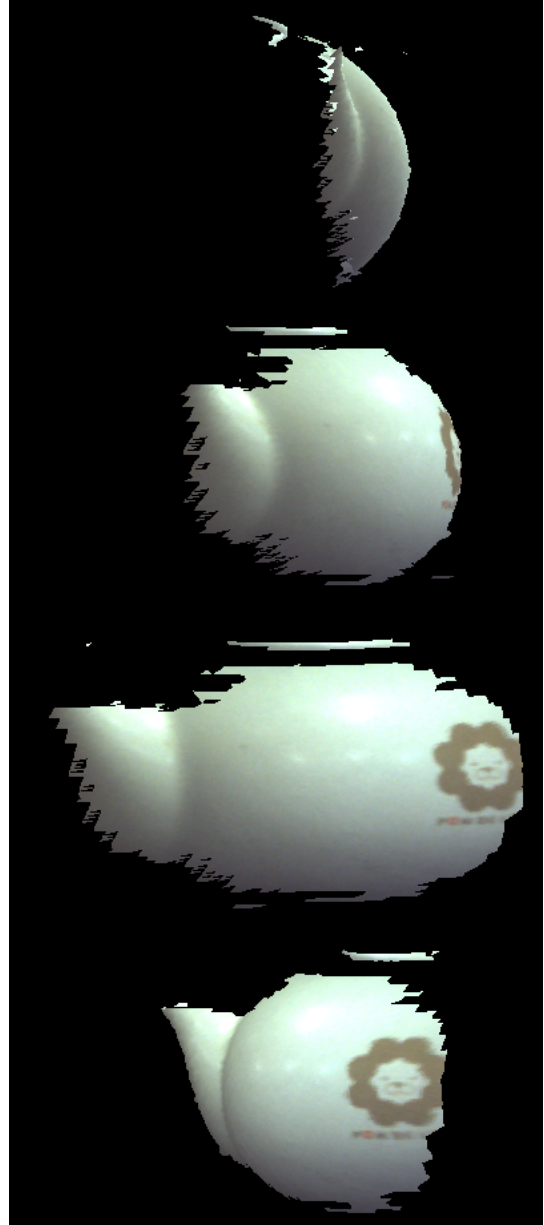


図 13 生成された 3 次元メッシュモデル：テクスチャ付き。

Fig. 13 A sample of generated 3D mesh model with texture .

測に用いる波長を増やすことが考えられる。これにより，de Bruijn 系列の記号数を増やし，ウィンドウサイズを小さくすることができるため，細かな形状を計測することが可能となる。また，冗長な記号を用いることによって，ノイズに強い計測方法を採用することも可能となると考えられる。

文 献

- [1] Canesta, Inc. CanestaVision EP Development Kit. <http://www.canesta.com/devkit.htm>.
- [2] CSEM, Inc. SwissRanger SR-3000. <http://www.swissranger.ch/index.php>.
- [3] C. Je, S. Lee, and R. Park. High-contrast color stripe pattern for rapid structured-light range imaging. In *Proc. Eighth European Conference Computer Vision*, pages 95–107, 2004.
- [4] T.P. Koninckx and L. Van Gool. Real-time range acquisition by adaptive structured light. *IEEE Transaction Pattern Analysis Machine Intelligence*, 28(3):432–445, 2006.
- [5] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, and Henry Fuchs. The office of the future : A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. In *Proc. ACM SIGGRAPH*, 1998.
- [6] S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, and M. Levoy. Real-time 3d model acquisition. In *Proc. SIGGRAPH*, pages 438–446, 2002.
- [7] M. Waschbusch, S. Wurmlin, D. Cotting, F. Sadlo, and M. Gross. Scalable 3d video of dynamic scenes. In *The Visual Computer (Proceedings of Pacific Graphics 2005)*. Springer, 2005.
- [8] L. Zhang, B. Curless, and S. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In *Proc. First International Symposium 3D Data Processing Visualization and Transmission*, pages 24–36, 2002.
- [9] 敦 横山, 宏介 佐藤, 隆之 芦ヶ原, and 征士 井口. 無調整型フォト vlsi センサを用いた実時間距離画像計測 : シリコンレンジファインダ. 電子情報通信学会論文誌. *D-II, 情報・システム, II-情報処理*, 79(9):1492–1500, 19960925.