

近赤外ワンショット形状計測による動体 3D 映像撮影

阪下和弘^{†1} 佐川立昌^{†2} 古川 亮^{†3}
川崎 洋^{†4} 八木 康史^{†1}

近年、動物体の 3 次元形状を高フレームレートで計測する多くの方法が提案されている。3 次元形状計測法の一つに、構造化光パターンを用いたプロジェクタ・カメラシステムがある。この手法には、プロジェクタからの照明によってテクスチャが干渉を受けるため、同時にテクスチャを取得できないという問題がある。そこで本論文で提案するシステムでは、形状計測に用いる波長とテクスチャ計測に用いる波長を分離することにより、この問題を解決する。パターン光は近赤外光を用いて投影し、テクスチャは可視光を用いて取得する。この際、近赤外光のカメラと可視光のカメラが異なる位置にあれば、テクスチャと形状の間にずれが生じ、テクスチャ付き 3D モデルの精度が低下する。そのため、同一視点から可視光と近赤外光を取得するマルチバンドカメラを試作した。さらに、複数の光の波長を用いた 3 次元形状計測を行うために、マルチバンドグリッドパターンを作り出す近赤外光パターンプロジェクタを試作した。また、固定されたグリッドパターンを用いてシステムを校正する手法を提案する。実験では、本システムから獲得したテクスチャ付き 3 次元形状を示す。

A System for Capturing Textured 3D Shapes based on One-shot Grid Pattern with Multi-band Camera and Infrared Projector

KAZUHIRO SAKASHITA,^{†1} RYUSUKE SAGAWA,^{†2}
RYO FURUKAWA,^{†3} HIROSHI KAWASAKI^{†4}
and YASUSHI YAGI^{†1}

Recently, several method have been proposed to capture 3D shapes of a moving object in high frame rate. One of promising approach to reconstruct a 3D shape is a projector-camera system that projects structured light pattern. One of the problem of this approach is that it has difficulty to obtain texture simultaneously because the texture is interfered by the illumination by the projector. The system proposed in this paper overcomes this issue by separating the light wavelength for texture and shape. The pattern is projected by using infrared light and the texture is captured by using visible light. If the cameras for infrared

and visible lights are placed at different position, it causes the misalignment between texture and shape, which degrades the quality of textured 3D model. Therefore, we developed a multi-band camera that acquires both visible and infrared lights from a single viewpoint. Moreover, to reconstruct a 3D shape using multiple wavelengths of light, namely multiple colors, an infrared pattern projector is developed to generate a multi-band grid pattern. Additionally, a simple method to calibrate the system is proposed by using the fixed grid pattern. Finally, we show the textured 3D shapes captured by the experimental system.

1. はじめに

近年、動物体の 3 次元形状を高フレームレートで計測する多くの方法が提案されている。動物体の形状計測は、バーチャルリアリティ (VR)、コンピュータビジョン、ジェスチャー認識、ロボットなど様々な分野での応用が期待できる。このような多くのアプリケーションにおいて、テクスチャと形状の同時計測が求められている。例えば、動いている人の形状とテクスチャが取得できれば、3DCG を用いる仮想空間に人のモデルを表示することが可能となる。

本論文では、プロジェクタ・カメラシステムに基づく形状とテクスチャを同時に計測するシステムを提案する。本旨はテクスチャと形状で異なる波長を用いることによりテクスチャと形状を獲得するシステムの提案である。具体的には、可視光を用いてテクスチャを取得し、近赤外光を用いて形状を復元する。本システムでは、波長を分離することにより、プロジェクタ・カメラシステムの共通の課題である構造化光の影響を受けていないテクスチャを取得することができる。

復元された形状と撮影した画像からテクスチャ付きの 3 次元モデルを作り出すために、形状とテクスチャの位置合わせが必要となる。形状に用いるカメラとテクスチャに用いるカメラが異なる位置にある場合、位置合わせが正確に校正されたとしても、復元した形状に誤差があると、形状とテクスチャのずれが必然的に発生する。そこで本研究では、同軸から可

^{†1} 大阪大学

Osaka University

^{†2} 産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{†3} 広島市立大学

Hiroshima City University

^{†4} 鹿児島大学

Kagoshima University

視光と近赤外光を取得できるマルチバンドカメラを試作した。このマルチバンドカメラは、単一の視点から可視光と近赤外光を撮影するため、立体情報を利用した画像変換を必要とせず、オクルージョンによるレンダリング誤差が生じないという利点がある。

本論文で用いる3次元復元手法は14)に基づいている。この手法では、周期的なコード化に基づいて色づけした縦線と横線からなる固定のグリッドパターンを用いる。この時、線の色はRGBから2色(例えば青と緑)を利用する。近赤外光でこの手法を実装するために、2波長の近赤外光グリッドパターンを投影するプロジェクタを試作した。さらに、提案するプロジェクタでは、固定のマスクパターンを用いるため、ビデオプロジェクタのようにパターンを容易に変更することができない。そこで、システムの校正手順を簡素化し、固定パターンのみで校正する手法を示す。

以下の章では、まず2章において、関連研究を説明する。次に、グリッドパターンによってテクスチャ付きの3次元形状を復元するシステムについて3章で簡単に述べる。そして、可視光でのテクスチャと近赤外構造化光を同時に獲得するシステムを4章で説明する。最後に5章でテクスチャ付き3次元モデルを計測する実験を行う。

2. 関連研究

形状を取得する手法として、アクティブ手法とパッシブ手法が考えられてきた。パッシブ手法には、ステレオ視¹⁰⁾や視体積交差法¹⁶⁾がある。これらは同期させた複数台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には適した手法である。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、パッシブな方法であるため、形状計測の精度はアクティブな方法に劣り、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、アクティブな形状計測法には、レーザレンジセンサ、構造化光投影法がある。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^{2),8)}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^{5),7),13),19)}。これらの手法は高速に形状を計測可能であり、特に^{5),19)}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^{11),12),17),18),20),22)}と、波長帯を分割する手法^{3),4),9)}の2つの方法が提案されている。

時分割法では形状を計測するためだけでなく、照明された物体のテクスチャを取得するためにも構造化光を用いる。撮影画像から構造化光パターンを取り除けば、テクスチャ画像として用いることが可能となる。構造化光パターンを取り除くためには、時分割多重化パターンのイメージの平均、または干渉縞の低域フィルタリングを計算することによって、得ることができる。この手法の利点は同じカメラを用いてテクスチャと形状を獲得することができる点である。しかし、構造化光を形状とテクスチャの両方に用いるため、周囲の照明によって利用できないことが考えられる。その結果、この方法が適切に利用できる照明環境は制限される。さらに、対象の動きが非常に速い場合、形状とテクスチャの取得時間が異なっているため、形状とテクスチャの間にずれが生じる可能性がある。

波長帯を分割する手法では、形状とテクスチャで別の波長を用いる。形状は近赤外光を用いて計測し、テクスチャは可視光を用いて撮影する。近赤外光による構造化光パターンは可視光のカメラには写らないため、形状とテクスチャの同時計測が可能となる。FruehとZakhor³⁾の手法では、近赤外光の縦縞と横線を用いる。縦縞は形状復元に用いられ、横線は縦縞の識別に利用する。日浦ら⁴⁾は、近赤外光の縞を高速に計測することにより、30Hzで距離画像を取得するレーザレンジファインダを提案した。このシステムでは同時にテクスチャを獲得する。Microsoft Kinect⁹⁾では、近赤外プロジェクタとカメラを用いて形状を、CCDカメラを用いてテクスチャを同時に獲得する。Kinect我々の手法には一枚の画像から形状復元を行うなどの類似性があるが、本論文のシステムでは、単一視点から形状とテクスチャを観測するため、Kinectより精度よくテクスチャマッピングできる。

3. ワンショット構造化光投影法による3次元形状計測

3.1 システム概要

本システムは、図1で示すように近赤外プロジェクタとマルチバンドカメラを用いてテク

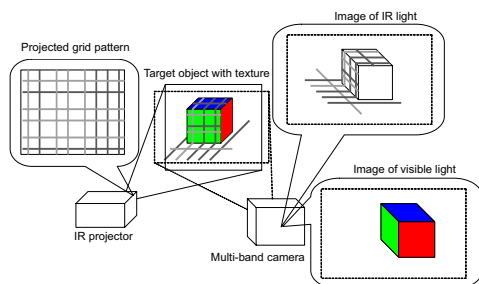


図 1 近赤外プロジェクタとマルチバンドカメラによるテクスチャ付き 3 次元形状計測の提案システム。

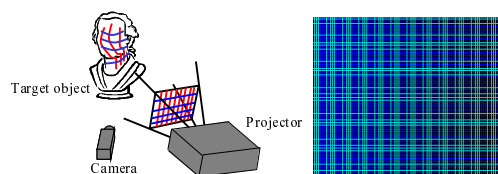


図 2 (左) 計測システム。複数の直線を投影し、その交点を用いて復元を行う。(Right) 投影パターン。

スチャ付きの 3 次元形状を計測するシステムである。近赤外プロジェクタは縦線と横線からなる固定のグリッドパターンを投影する。グリッドの縦線と横線はそれぞれ 765nm, 850nm の 2 波長のパターンを用いる。また、マルチバンドカメラは単一視点から可視光と近赤外光の両方の波長の光を取得する。テクスチャの計測には、外部光源を照明として利用する。外部光源が近赤外光成分を含む場合には赤外カットフィルタによって干渉を防ぐ。グリッドパターンからの 3 次元形状復元は次章で説明する。

3.2 ワンショットグリッドパターンによる 3 次元形状計測

提案する近赤外カメラとプロジェクタによる 3 次元形状計測システムを図 2 (左) に示す。この時、カメラとプロジェクタは予め校正されていることとする。すなわち、デバイスの内部パラメータと相対位置・姿勢は既知である。また、投影パターンは固定されているため、カメラと同期を行う必要はない。そして、縦線と横線のグリッドパターンはプロジェクタから投影され、カメラで撮影を行う。

復元アルゴリズムの流れを図 3 に示す。本論文では佐川¹⁴⁾ のアルゴリズムを用いた。第 1 ステップでは、近赤外画像からグリッドパターンによる曲線を検出する。第 2 ステップでは、検出された曲線の交点を抽出する。各曲線は 3 次元空間中で、プロジェクタの原点を通過する平面を作る。本論文ではこの平面をパターン平面と呼ぶことにする。第 3 ステップ

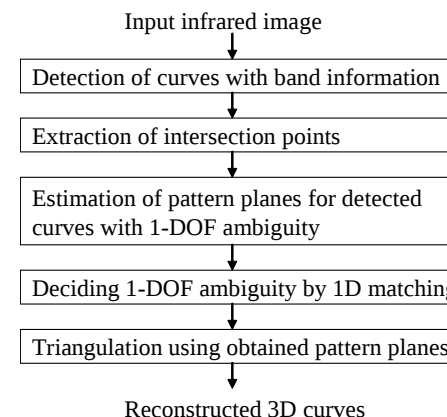


図 3 形状復元アルゴリズムの流れ。

では、検出された交点から交差するパターン平面に関する単純な線形拘束を得る。そして、交点から導かれる線形方程式を解くことで、パターン平面のパラメータが求めることができる。しかし、この方程式の解には、交点の情報からだけでは解決できない 1 自由度の曖昧さが残る⁶⁾。そこで、第 4 ステップでは、投影パターンと校正結果から得られたパターン平面をマッチングすることにより、1 自由度の曖昧性を解消する。マッチングでは、接続された交点全体で一致したエピポーラ拘束を満たす対応点の探索と本質的に同義である。最終ステップでは、検出された曲線の 3 次元情報を求められたパターン平面での三角測量により求める。

マッチングにおいて、複数の解候補が残る曖昧性を解消するために、ラインパターンに追加情報を用いることが有効である。本論文では、近赤外光の色、すなわち波長域を用いる。つまり、デプルーイン系列による周期的なコード (全ての線を一意に決定するわけではない) に従い、グリッドパターンの色を決定する。そして、検出された各線を ID をコードから決定し、投影パターンの ID と比較する。

投影パターンの線と画像中の曲線の対応から曲線の 3 次元位置が計算できる。そして、可視光の画像を用いてテクスチャマッピングするために、線と線の間を線形補間する。可視光の画像は次章で説明するように近赤外光のカメラと同一視点から撮影されるため、従来手法では発生していたテクスチャマッピングにおけるオクルージョンの問題が解決できる。

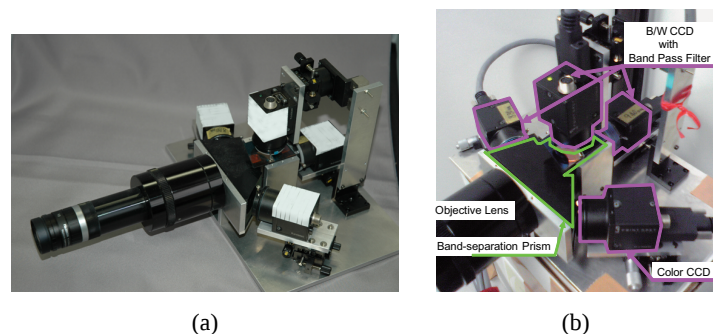


図 4 (a) 提案したマルチバンドカメラの試作システム。(b) 光学部品の拡大図。対物レンズは C マウントレンズとリレーレンズから構成される。C マウントレンズを交換することにより、画角を選択できる。

4. 形状とテクスチャの計測システム

4.1 単一視点から可視光と近赤外光の撮影用マルチバンドカメラ

形状とテクスチャを異なる視点から取得した場合、形状誤差が形状とテクスチャ間のずれが生じる。すなわち、テクスチャ付きの 3 次元形状を計測するためには、同一視点から形状とテクスチャを撮影することが望まれる。そのため、本研究では可視光と近赤外光を同一視点から撮影できるカメラシステムを試作した。

試作したマルチバンドカメラシステムを図 4 に示す。対物レンズは C マウントレンズとリレーレンズで構成される。そのため、C マウントレンズを変更することで、画角を選択することが可能となる。図 4 (b) に示すように、リレーレンズには長いバックフォーカスがあるため、入射光は後方にあるイメージセンサに焦点を合わせる。

マルチバンドカメラの内部構造を図 5 で示す。光学機器は、対物レンズ、波長分離プリズム、及びイメージセンサで構成される。対物レンズに入射した光は、波長分離プリズムによって、可視光と 765nm 及び 850nm の近赤外光に分離される。このフィリップスプリズムは、境界面を光の波長帯を分離する膜でコーティングした 4 つのガラスから構成される。プリズムは 935nm の光も分離できるが、本論文で用いるパターンのコード化には 2 波長の光で十分であるため、935nm の光は利用しない。935nm の波長の光はパターンのコード化において 3 波長を用いる場合には利用する。図 5 におけるプリズムの射出面 P_1, P_2, P_3, P_4 は、それぞれ可視光、850nm、765nm、935nm の近赤外光に対応する。

図 6 は、外部光源からの白色光と近赤外プロジェクタからの近赤外光が入射した時に、出

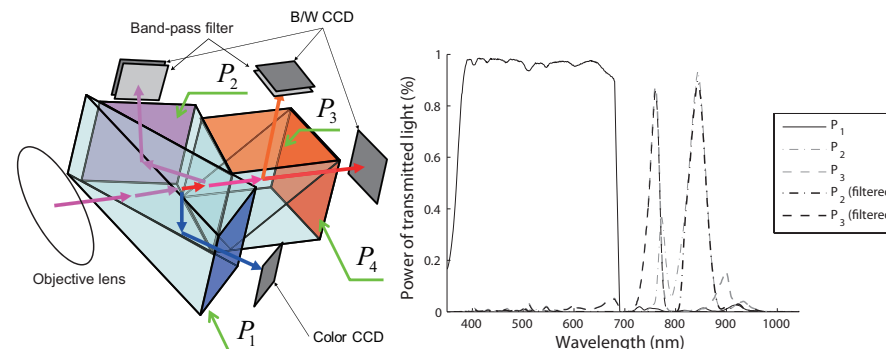


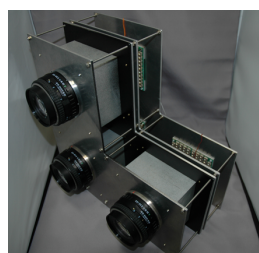
図 5 マルチバンドカメラの内部構造。カメラ 図 6 白色光と図 9 で示された近赤外光が入射した時の、射出面からは対物レンズ、波長分離プリズム、及びイメージセンサで構成される。出力の 80 % 以上の光が射出される。

射面で計測される光の強度を示す。図中の P_1, P_2, P_3 は、図 5 で説明したプリズムの射出面での光の強度を示す。 P_2 と P_3 の結果を見ると、異なる波長間でクロストークが発生しているため、バンドパスフィルタを用いて除去した。その結果、このシステムにおける光の効率率は 80 % 以上となる。また本システムでは、対物レンズから 4 台のイメージセンサへの光学距離が等しくなるように設計した。そして、2 台のモノクロカメラを近赤外画像を取得するためのイメージセンサとして用い、カラーカメラを可視光画像を取得するために用いた。

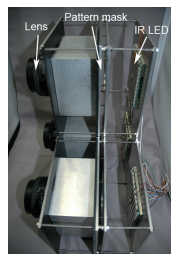
赤坂ら¹⁾は、単一視点から近赤外光と可視光を獲得する同様のシステムを提案したが、光エネルギーの効率の悪いという欠点があった。彼らのシステムでは波長に関わらず入射光をビームスプリッタで単純に分離するため、プロジェクタから投影された構造化光の強度が分離して合成した場合と比べて半分に減衰する。その結果、高フレームレートで画像を取得するために強い光源が必要となる。提案するシステムでは、カメラに別の光学機器を用いることにより、効率的に光を利用できるため、高フレームレートで動物体を撮影することが可能となる。

4.2 グリッドパターンを投影する近赤外プロジェクタ

3 次元形状計測のための近赤外プロジェクタは、以下のような 2 つの要件を満たすように設計した。1) 縦線と横線で構成される固定のグリッドパターンを投影できること。2) 2 波長の近赤外光によりコード化できること。これらの条件を満たす方法として、可視光の代わりに近赤外光を投影できるように 3LCD プロジェクタの光源を変更する方法が考えられる。



(a)



(b)

図7 3つの近赤外 LED アレイと、透明なフィルムに印刷されたマスクパターンと、対物レンズを持つ近赤外プロジェクタの試作機。

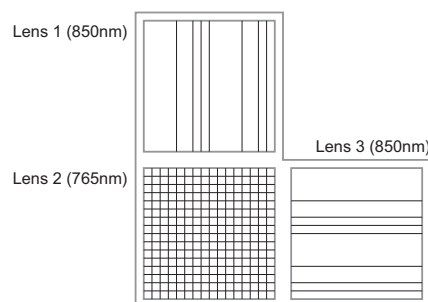


図8 投影するグリッドパターンの例。3個のレンズからのラインパターンが一致するように作成。

しかし、プロジェクタの光学機器は可視光に特化しており、近赤外光を遮断するフィルタが導入されているため、実際に近赤外光を出力させることは難しい。

一方、本システムでは固定パターンを用いるため、形状計測中にパターンを変える必要はない。そのため、ビデオプロジェクタで用いる LCD フィルタの代わりに、固定のマスクパターンを印刷した透明膜を使用することが可能である。

もう一つの問題は、2 波長の近赤外光を組み合わせることである。一般的な LCD プロジェクタでは、対物レンズを通して投影する前に合成プリズムにより異なる色の光を組み合わせる。しかし、提案手法で用いるパターンは単純な縦線と横線で構成されるため、プリズムを用いずに光を合成することが可能である。提案するシステムでは、図7に示すように、L 字形に配置された3個のレンズからラインパターンを投影する。

近赤外 LED アレイとマスクパターンは各レンズの後ろに配置する。用いるマスクパターンの例を図8に示す。765nm の光はレンズ2を通して投影され、850nm の光はレンズ1とレンズ3を通して投影される。もし、レンズ1とレンズ2から投影された直線がレンズ1からレンズ2へ方向に対して平行であれば、2個のレンズから同一のパターン平面が投影される。そのため、対物レンズを通る前に光を合成しなくても、近赤外光の2波長を用いてラインをコード化できる。すなわち、850nm のパターンは、デプルーイン系列に基づいて750nm のパターンに合わせて投影する。また、プリズムによる減衰が起こらないため、光の強度を効率化できる。

一方、各近赤外 LED アレイは、116 個の LED から構成され、0.96-1.20W の電力を必要

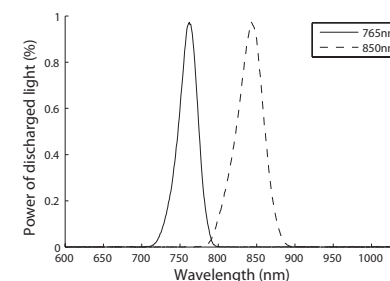


図9 各レンズから出射された光の強度。最大値が1となるように標準化。

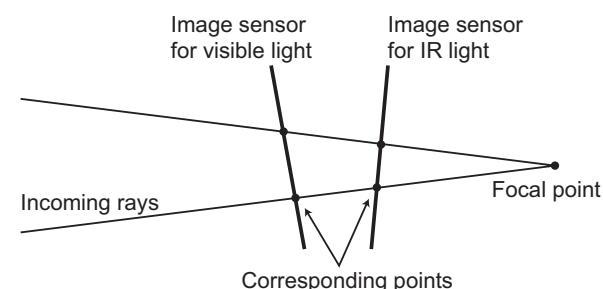


図10 全てのイメージセンサの光路を仮想的に共通化した様子。イメージセンサの位置にずれがあるため、入射光は各イメージセンサで異なる画素に投影される。

とする。これは、市販のプロジェクタに使用される光源と比べてはるかに小さい電力である。図9に各レンズから出射された光の強度を最大値が1となるように正規化した結果を示す。LEDの帯域幅は非常に狭いため、市販のビデオプロジェクタでは大きな問題である異なる波長間のクロストークがほとんど発生しない。

4.3 システムの校正

4.3.1 イメージセンサ間の校正

テクスチャマッピングでは、システムを校正して形状の画像とテクスチャの画像の位置を合わせる必要がある。しかし、形状を獲得するためのカメラとテクスチャを獲得するカメラが異なる視点であった場合、テクスチャと形状の対応点を予め決定することはできない。そのため、提案するシステムでは、形状とテクスチャを単一の視点から取得するため、イメージセンサ間の校正により、前もって対応点を決定できる。

提案するマルチバンドカメラでは、異なる波長の光をプリズムによって分離することによ

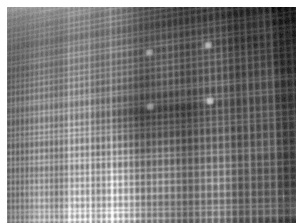


図 11 校正に利用するワンショット 3 次元形状計測用のパターン。マーカを用いて、手動でプロジェクタの絶対座標を与える。

り、全てのイメージセンサの光学構造は、他の光学部品に対してセンサの位置以外は仮想的に同一となる。しかし、他の光学部品に対して各イメージセンサ間には小さなずれがあるため、入射光は全てのイメージセンサにおいて同じ画素に投影されない。この状況を図 10 で示す。この時、全てのイメージセンサにおける光路は仮想的に共通であるため、イメージセンサ間のホモグラフィを計算することにより、対応点を求めることができる。

ホモグラフィの計算にはカメラ校正と同じ手法を用いる。まず、平面物体にチェッカーボードを貼り付けて、各イメージセンサで撮影する。そして、撮影した各画像から 4 点以上の対応点を検出することによりホモグラフィが計算できる²¹⁾。

4.3.2 プロジェクタ・カメラシステムの校正

プロジェクタ・カメラシステムの校正には、プロジェクタ座標とカメラ座標の対応が必要となる。そのために、プロジェクタから投影されたコード化パターンをカメラで撮影することにより、その対応関係を獲得する。市販のプロジェクタでは、グレイコードに基づくパターンのように時間的にエンコードされたパターンを用いることにより、複数枚の画像からプロジェクタの絶対座標を得ることができる。しかし、提案するシステムでは透明膜に印刷された固定パターンを用いるため、マスクパターンを変えることで時間的にエンコードするパターンを用いることはできない。そこで本論文では、システムの校正と 3 次元形状の計測ができるパターンを作成した。ここで利用するパターンは周期的にコード化されるため、プロジェクタの絶対座標は自動的に決定することはできない。この問題を解決するために、まず 1 点について手動で絶対座標を決定する。そして、残りの点に対しては曲線の接続情報を利用することにより、自動的に決定する。曲線は 14) のアルゴリズムを用いて自動的に検出する。最初に手動で絶対座標を与える点を容易に決定するため、図 11 に示すように、数個のマーカをパターンに付加する。このマーカは曲線の検出アルゴリズムに影響しないようになるべく小さくする。

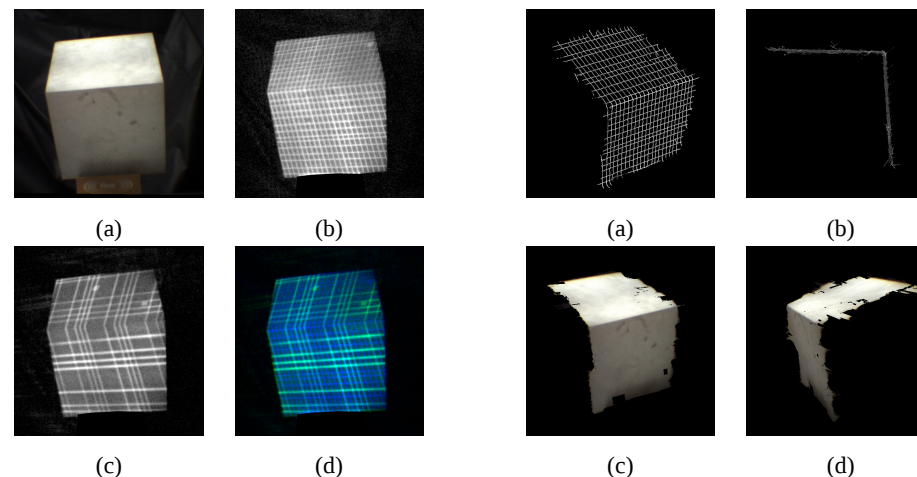


図 12 立方体の画像。(a) 可視光のカラー画像。(b), (c) は 765nm, 850nm のパターンが投影された画像。(d) 765nm と 850nm の画像を統合してグリッドパターンを作成した画像。

図 13 立方体の復元結果。(a) と (b) は入力画像から検出された各曲線の画素を点として復元した結果。(c) と (d) は線と線の間を補完したテクスチャ付き 3 次元形状。

一旦カメラ座標とプロジェクタ座標の対応を得ることができれば、ステレオシステムの校正により、カメラとプロジェクタの内部パラメータ及び、外部パラメータを計算できる。本論文では、Snaveley¹⁵⁾ によって実装されたバンドル調整に基づいて校正する。LCD や DMD のようにパターンを作成するために光学機器を必要とする市販のプロジェクタと比べて、本プロジェクタは校正を大幅に簡素化できる。

5. 実験

実験では、まず形状既知の物体を計測することにより、試作システムの精度を測定する。本論文では既知物体として図 12 に示す立方体の形状を計測した。図 12 (a), (b), (c) は、それぞれ可視光、765nm, 850nm の近赤外光のカメラで撮影した画像である。図 12 (d) は、2 波長の近赤外光の画像を統合することにより作成したグリッドパターンである。このグリッドパターンにおける青と緑のラインは、それぞれ 765nm と 850nm の光に相当する。また、グリッドパターンは、4.3.1 章で説明した手法により計算されたホモグラフィを用いて、各画像間の位置合わせされた画像である。立方体は、一辺 0.3m で、カメラと立方体の距離は約

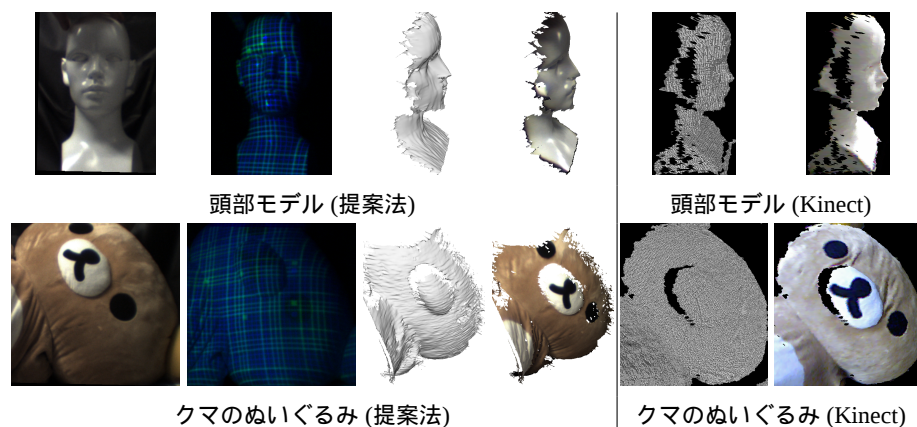


図 14 頭部モデル (1 行目) とクマのぬいぐるみ (2 行目) の Kinect との比較結果. 1 列目からそれぞれ, 可視光, 近赤外光, 提案法のテクスチャ無しの形状, 提案法のテクスチャ付きの形状, Kinect のテクスチャ無しの形状, Kinect のテクスチャ付きの形状を示す.

0.8m である. 図から, 波長分離プリズムによって, 可視光と 765nm 及び 850nm の帯域間のクロストークが解消されたことが分かる.

立方体の形状計測結果を図 13 に示す. (a) と (b) は入力画像から検出された曲線の画素を点として復元した結果である. 交点を補間してからメッシュモデルを作成し, テクスチャを貼り付けた結果が (c) である. 立方体の 2 面を平面フィッティングすることで, 形状の精度を評価する. 平面フィッティングによる二乗平均平方根誤差は 0.48mm である. また, 2 面間の角度は 84.8 度であった (真値は 90.0 度である). 本論文では, バンドル調整のみでシステムを校正するため, 内部パラメータと外部パラメータが同時に計算される. そのために, 校正に誤差が生じたことが, 角度誤差の主な原因と考えられる. 今後の研究では, 内部パラメータを個別に校正することにより, 角度誤差を軽減する必要がある.

次に, 提案法と Kinect を用いた手法との物体のテクスチャ付きの 3 次元形状を比較した結果を示す. 図 14 は頭部モデルとクマのぬいぐるみの復元結果である. 図はそれぞれ可視光の画像, 近赤外光の画像, 提案法のテクスチャ無しの形状, 提案法のテクスチャ付きの形状, Kinect のテクスチャ無しの形状, Kinect のテクスチャ付きの形状を表す. 2 つの手法を比べると, 提案法の方が表面が滑らかであることが分かる. これは, 提案手法がグリッドパターンによる光切断法に基づいているため, ワンショットスキャンを用いて滑らかな表面を復元できるためであると考えられる. 提案法で見られる表面の起伏は, パターンの線形補間

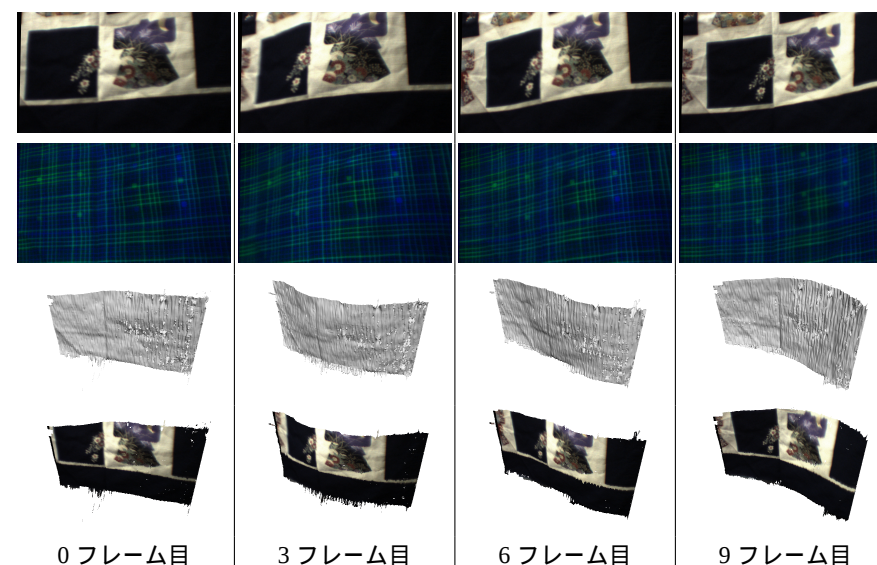


図 15 波打つ布のテクスチャ付き 3 次元形状復元結果. 一行目は各フレームでの可視光によるテクスチャ画像, 二行目は近赤外光の画像, 三行目はテクスチャ無しの形状復元結果, 四行目はテクスチャ付きの形状復元結果を示す.

により副次的に引き起こされたアーチファクトであるため, 今後の研究で解決すべき問題である.

最後に, 動物体のテクスチャ付き 3 次元形状を計測した. 波打つ布の入力画像と計測結果を図 15 に示す. 画像は 30fps で撮影した. 一行目は, 各フレームにおける可視光の画像である. 二行目は, 近赤外光の画像を示す. 三行目は, テクスチャ無しの形状復元結果を表わし, 四行目は, テクスチャ付きの形状復元結果である. このように, 提案するシステムでは動物体テクスチャ付きの形状を計測することに成功した. また, 近赤外光を反射するような物体であれば, 結果に示すように対象が黒い物体であっても形状を計測することが可能である.

6. おわりに

本論文では, ワンショット形状計測に基づいた, テクスチャ付きの 3 次元形状を計測するためのプロジェクト・カメラシステムを提案した. 提案手法では, 形状とテクスチャを同時

に取得するため、動物体のテクスチャ付きの形状を計測できる。同時に形状とテクスチャを計測するために、近赤外構造化光プロジェクタとマルチバンドカメラを試作した。マルチバンドカメラは同じ視点から可視光と近赤外光を撮影できるので、3次元形状復元の形状誤差に影響を受けることなく、テクスチャマッピングが可能となる。提案したプロジェクタは、2波長の近赤外光を用いてコード化された構造化光を投影できる。パターンはお互いに垂直である単純なラインのみで構成されることから、パターンは複数のレンズを持つプロジェクタのシステムで実現できる。そのため、プリズムを必要とせず、観測する光の強度の効率化が可能となった。さらに、ワンショット3次元形状復元の固定パターンを用いることで、プロジェクタ・カメラシステムの効率的な校正方法を提案した。提案した校正方法では、若干手作業が必要となるが、これによりシステムを簡素化が可能である。実験では、提案したシステムの精度を評価し、動物体のテクスチャ付き3次元形状が計測できることを示した。今後の課題として、光学設計を改良し、計測結果の質の向上させる予定である。

謝辞 本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度(SCOPE)ICTイノベーション創出型研究開発(101710002)および文部科学省科研費(21700183)の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) K. Akasaka, R. Sagawa, and Y. Yagi. A sensor for simultaneously capturing texture and shape by projecting structured infrared light. In *Proc. The 6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 375–381, Montreal, Canada, August 21–23 2007.
- 2) Canesta, Inc. CanestaVision EP Development Kit. <http://www.canesta.com/devkit.htm>.
- 3) C. Frueh and A. Zakhor. Capturing 21/2d depth and texture of time-varying scenes using structured infrared light. In *Proc. the 5th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 318–325, 2005.
- 4) S. Hiura, A. Yamaguchi, K. Sato, and S. Inokuchi. Real-time object tracking by rotating range sensor. In *Proc. 13th International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 825–829, 1996.
- 5) 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.
- 6) H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, and Y. Yagi. Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern. In *CVPR*, pages 1–8, June 23–28 2008.
- 7) T. Koninckx and L. V. Gool. Real-time range acquisition by adaptive structured light. *IEEE Transaction Pattern Analysis Machine Intelligence*, 28(3):432–445, 2006.
- 8) Mesa Imaging AG. SwissRanger SR-4000. <http://www.swissranger.ch/index.php>.
- 9) Microsoft. Xbox 360 Kinect. <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- 10) P. Narayanan, P. Rander, and T. Kanade. Constructing virtual worlds using dense stereo. In *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'98)*, pages 3–10, January 1998.
- 11) J. Pan, P. S. Huang, and F.-P. Chiang. Color-coded binary fringe projection technique for 3-D shape measurement. *Optical Engineering*, 44:3606–+, Feb. 2005.
- 12) R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, and H. Fuchs. The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. In *Proc. ACM SIGGRAPH*, 1998.
- 13) S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, and M. Levoy. Real-time 3d model acquisition. In *Proc. SIGGRAPH*, pages 438–446, 2002.
- 14) R. Sagawa, Y. Ota, Y. Yagi, R. Furukawa, N. Asada, and H. Kawasaki. Dense 3d reconstruction method using a single pattern for fast moving object. In *ICCV*, 2009.
- 15) N. Snavely, S. M. Seitz, and R. Szeliski. Photo tourism: Exploring image collections in 3d. In *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006)*, 2006.
- 16) T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and T. Wada. Real-time dynamic 3d object shape reconstruction and high-fidelity texture mapping for 3d video. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, CSVT-14(3):357–369, 3 2004.
- 17) 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.
- 18) T. Weise, B. Leibe, and L. V. Gool. Fast 3d scanning with automatic motion compensation. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1–8, 2007.
- 19) 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.
- 20) S. Zhang and P. Huang. High-resolution, real-time 3d shape acquisition. In *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, page 28, 2004.
- 21) Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 22, pages 1330–1334, 2000.
- 22) Z. Zhang, D. Zhang, X. Peng, and X. Hu. Color texture extraction from fringe image based on full-field projection. *Optical Engineering*, 42:1935–1939, July 2003.