

# 近赤外グリッドパターンを用いたテクスチャ付き形状 のワンショット計測手法

阪下 和弘<sup>†</sup> 佐川 立昌<sup>††</sup> 古川 亮<sup>†††</sup> 川崎 洋<sup>††††</sup> 八木 康史<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

<sup>†††</sup> 広島市立大学大学院 情報科学研究科 〒 731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

<sup>††††</sup> 鹿児島大学大学院 理工学研究科 〒 890-0065 鹿児島市郡元 1 丁目 21-40

E-mail: <sup>†</sup>{sakashita,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>ryusuke.sagawa@aist.go.jp,

<sup>†††</sup>ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp, <sup>††††</sup>kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

あらまし 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開発した。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開発した。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。

キーワード アクティブスキャン, 動体計測, プロジェクタ-カメラシステム, ワンショット復元, 共面性復元

## 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。動物体の形状を計測する事は、バーチャルリアリティ (VR)、コンピュータビジョン、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、これら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。たとえば、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。本旨は異なる波長を用いることによるテクスチャと形状を獲得するシステムの提案である。可視光を用いることでテクスチャを取得し、近赤外光を用いることで形状を復元する。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・カメラシステムにおける共通の課題である構造化光の影響を受け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、位置合わせが必要となる。形状用とテクスチャ用のカメラが異なる位置にあると、位置合わせが正確に校正されたとしても、形状に誤

りがある場合、形状とテクスチャのずれが必然的に発生する。同軸から可視光と近赤外光を取得できるマルチバンドカメラを開発した。単一の視点を用いることにより、立体情報を用いた画像変換を必要とせず、オクルージョンが原因となるレンダリング誤差が発生しないという利点が挙げられる。

本論文で用いる 3 次元復元手法は、佐川らの手法 [14] に基づいている。この手法では、周期的なコード化により色づけされた縦線と横線から成る固定化されたグリッドパターンを用いる。また、色は RGB から 2 色 (たとえば青と緑) を用いる。近赤外光を用いてこの手法を実装するために、2 種類の近赤外波長のグリッドパターンを投影するプロジェクタを開発した。さらに、提案するプロジェクタでは、固定マスクパターンが用いられるため、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。そのため、システムの校正手順を簡素化する、固定パターンのみでシステムを校正するための手法を示す。

## 2. 関連研究

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 [10] や視体積交差法 [16] 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 [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

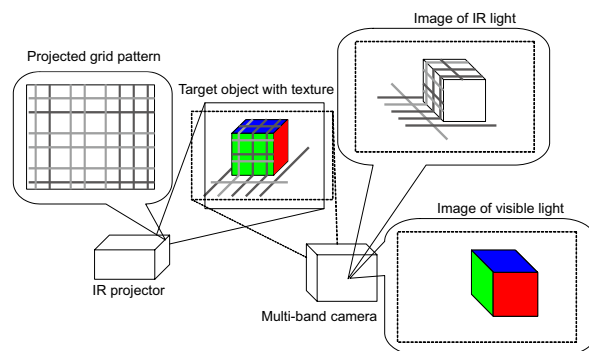


図 1 近赤外プロジェクタとマルチバンドカメラで構成されたテクスチャ付き 3 次元形状計測の提案システム。

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 Zakhor [3] の手法では、近赤外光の縦縞と横縞を用いる。縦縞は形状復元に用いられ、横縞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 Kinect [9] 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 と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で構成されたテクスチャ付きの 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で構成された固定グリッドパターンを投影する。縦線と横線はそれぞれ 765nm, 850nm の 2 つの異なる波長のパターンを用いる。マルチバンドカメラは同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おいて、外部光源は照明に利用する。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からなる 3 次元形状計測システムを図 2 (左) に示す。ここで、カメラとプロジェクタはあらかじめ校正されているとする。すなわち、デバイスの内部パラメータと相対位置は姿勢は既

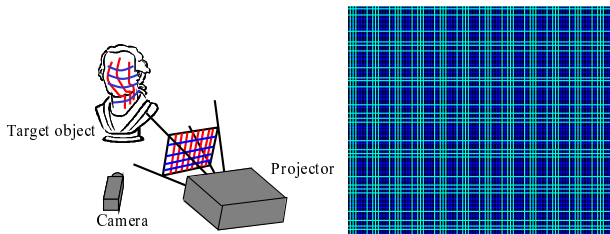


図 2 (左) 計測システム．複数の直線を投影し，その交点を  
用いて復元を行う．(Right) 投影パターン

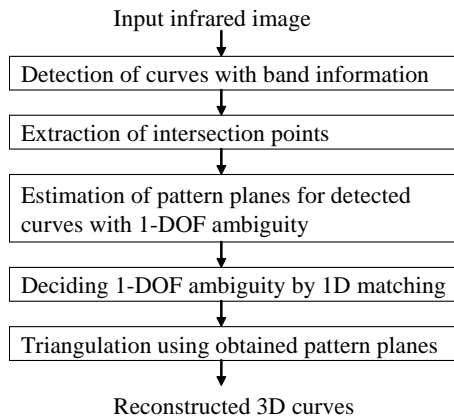


図 3 形状復元アルゴリズムの流れ．

知である．また，投影パターンは固定されて変化しない  
ため，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  
影される．

復元アルゴリズムの流れは図 3 に示す．これらは佐川  
ら [14] のアルゴリズムを用いる．第 1 ステップでは，グ  
リッドパターンで照明された曲線を近赤外画像から検出  
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．各線は 3 次元空間中で，プロジェクタを通過する  
平面を作り，本論文ではこの平面をパターン平面と呼ぶ  
ことにする．検出された格子点から，交差するパターン  
平面に関する単純な線形拘束を得ることができたため，第  
3 ステップでは，格子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られる．この  
解には，格子点の情報からだけでは解決できない 1 自由  
度の曖昧さが残るため [6]．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の実際の位  
置と，1 自由度を残す解とのマッチングにより曖昧性を  
解決する．このマッチングは，接続された格子点全体で  
一致するエピポーラ拘束による格子点の対応の探索と本  
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による三角測  
量による計算する．

このマッチングにおいて，複数の解候補が残る曖昧な  
マッチングを避けるために，ラインパターンによる追加  
情報を用いることが効果的である．本論文では，近赤外  
光の色すなわち波長域の用いる．そのために，グリッド  
線はデブルーイン系列による周期的なコード化 (全ての  
線を一意に決めるわけではない) に従い色を決定する．

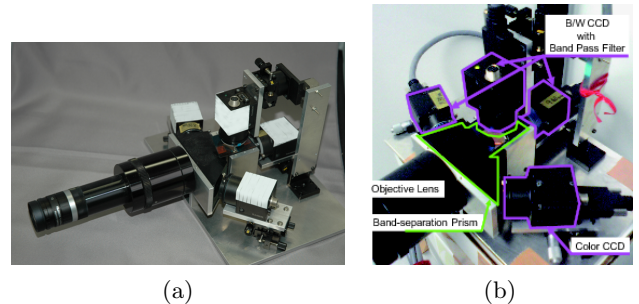


図 4 (a) 提案したマルチバンドカメラの試作システム．(b)  
光学部品の拡大図．対物レンズは C マウントレンズと  
リレーレンズを備える．C マウントレンズを交換するこ  
とにより，画角を変えることができる．

そして，復元の際にコードから検出された各線の ID を  
決定し，投影したパターンの ID との比較を行う．

投影したパターン線とカメラ画像中の曲線の対応が得  
られると，曲線の 3 次元位置が計算できる．可視光の画  
像をテクスチャマッピングするため，線と線の間は線形  
補間する．テクスチャ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，従来法  
では発生していたテクスチャマッピングの際のオクルー  
ジョンの問題が解決できる．

## 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を発生させることか  
ら，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し  
い．そのために，提案するカメラシステムは可視光と近  
赤外光を同軸から撮影できるデバイスを備えている．

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  
する．そのため，C マウントレンズを変更することで，  
画角を変更することが可能となる．図 4 (b) に示すよ  
うに，試作システムで用いたリレーレンズには長いバック  
フォーカスがあるため，入射光は光学部品の後方にある  
イメージセンサの表面に焦点を合わせる．

マルチバンドカメラの内部構造を図 5 で示す．光学  
部品は，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．対物レンズに入射する光は，最  
初に波長分離プリズムによって，可視光と 765nm 及び  
850nm の近赤外光に分離する．このフィリップスプリ  
ズムは，異なる光の波長帯を分離するための膜でコーテ  
ィングされた境界面での 4 つのガラス体から構成される．  
プリズムは 935nm の光も分離できるが，現在のパター  
ンのコード化には 2 種類の波長の光で十分であるため，  
本論文では 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 種類の波長を用いる

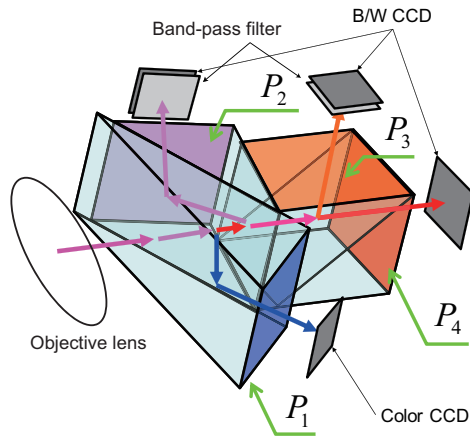


図5 提案したマルチバンドカメラの内部構造．カメラは対物レンズ，波長分離プリズム，及びイメージセンサで構成される．

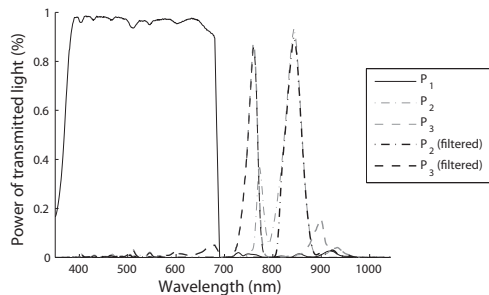


図6 対物レンズから白色光と図9で示された近赤外光が入射した時の，出射面からの光の分布．80%以上の光が出射される．

場合に利用する．図5におけるプリズムのからの出射面  $P_1, P_2, P_3, P_4$  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，対物レンズに入射した時に出射面に伝達される光の強度を示す． $P_1, P_2, P_3$  は，図5で説明したプリズムの出射面を指し示す． $P_2$  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．このシステムにおける光の強度の効率率は80%以上となる．対物レンズから4つ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．本システムでは，2つ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使い，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，同じ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，彼らのシステムの欠点は光エネルギーの効率の悪さであった．こ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は，分離して合成した場合と比べて半分以下に減衰される．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，カメラの光学部品を変更することにより，より効率的な光の強度を達成し，高フレームレートで動物体を撮影す

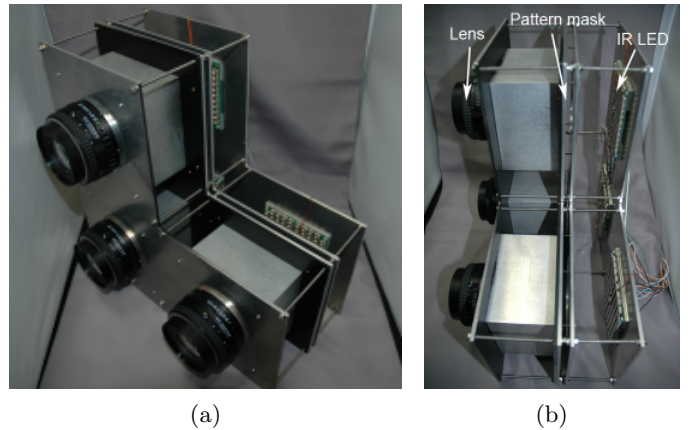


図7 3つの近赤外LEDアレイと，透明なフィルムに印刷されたマスクパターンと，対物レンズを持つ近赤外プロジェクタの試作機．

ることができる．

#### 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グリッドパターンを投影できること．2) 2種類の近赤外波長によりコード化できること．これらの条件を満たす方法の一つに，可視光の代わりに近赤外光を投影できるように3LCDプロジェクタを変更することが考えられる．しかし，プロジェクタの光学部品は可視光に対して特化しており，近赤外光を遮断するフィルタが導入されているため，実際にはプロジェクタを近赤外光を出力するように変更することは難しい．

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，本システムにおいては，ビデオプロジェクタで使用されるLCDフィルタの代わりに，固定マスクパターンを印刷した透明膜を用いることが可能である．

もうひとつの問題は，2種類の異なる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で異なる色の光を組み合わせる．しかし，提案法で用いるパターンは単純な縦線と横線で構成される．そのため，プリズムを用いずに光を合成することが可能となる．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つのレンズからラインを投影する．

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．3つのレンズに利用するマスクパターンの例を図8に示す．765nmの光はレンズ2を通して投影し，850nmの光はレンズ1とレンズ3を通して投影する．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への方向に対して平行であれば，2つのレンズからパターン平面同一のパターン平面が投影される．このことから，対物レンズを通る前に光を合成しな

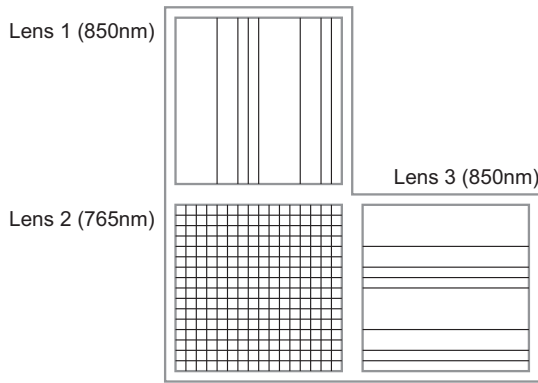


図 8 投影するグリッドパターンの例．3つのレンズからのラインパターンが一致するように形成される．

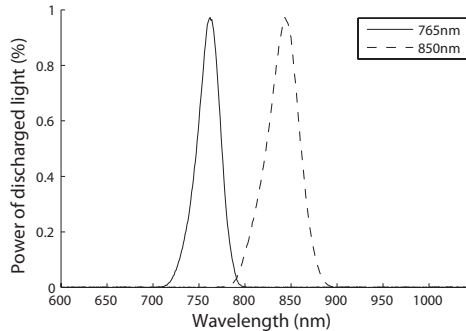


図 9 各レンズから出射された光の強度．最大値が 1 となるように標準化した．

くても，近赤外光の 2 種類の波長によりラインのコード化を実現できる．また，プリズムを通さないことにより，光の強度の効率化が可能となる．850nm のパターンは，デブルーイン系列に基づいて 750nm のパターンに合わせる．

各近赤外 LED アレイは，116 個の LED があり，0.96-1.20W の電力を必要とする．これは，商業用のプロジェクタの光源と比べてはるかに小さい電力である．最大値が 1 となるように正規化した，各レンズから出射された光の強さを，図 9 で示す．LED の帯域幅が非常に狭いため，商業用のビデオプロジェクタでは大きな問題となる異なる波長間で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において，システムを校正して形状とテクスチャ画像を合わせる必要がある．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，テクスチャ画像と形状の対応点を予め決定することはできない．しかし，提案するシステムでは，形状とテクスチャを同じ視点から取得するため，イメージセンサ間の校正を行うことにより，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されているが，センサの位置を除けば，全てのイメージセンサでの光学構造は，他の光学部品に対して仮想的に同一である．しかし，他の光学部

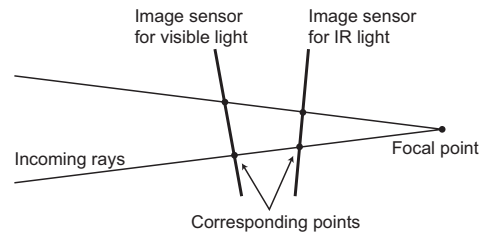


図 10 全てのイメージセンサで仮想的に光路を共通化した様子．ずれがあるため，入射光はイメージセンサで異なる画素に投影される．

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，入射光はイメージセンサ上の同じ画素に投影されない．この状況を図 10 で示す．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で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・カメラシステムを校正するためには，プロジェクタ座標とカメラ座標の対応が必要となる．コード化したパターンが投影された画像を撮影することにより，対応を獲得できる．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は，構造化光によりコード化された複数枚の画像を利用して，プロジェクタの絶対座標を得るために頻繁に用いられる．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によって時間的にエンコードされたパターンを用いることはできない．そのため，システムの校正もできる 3 次元形状計測用のパターンを利用する．利用するパターンは周期的であるため，プロジェクタの絶対座標は自動的に決定できない．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 佐川ら [14] のアルゴリズムを用いて自動的に検出する．最初に絶対座標を与える点を用意に決定するため，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．

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として，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，Snively [15] によって実装されたバンドル調整に基づいて校正に利用する．LCD や DMD のようにパターンをつくるために光学装置を必要とする商業用プロジェクタと比べて，本プロジェクタは大幅に簡素化できる．

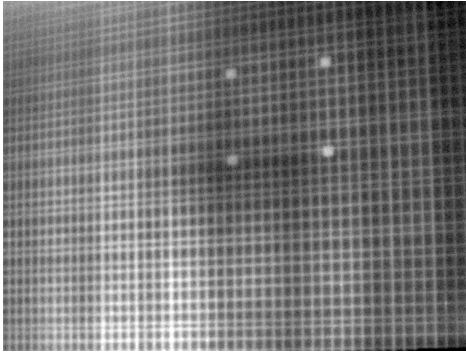


図 11 校正に利用するワンショット 3 次元形状計測用のパターン．マーカを用いて、手でプロジェクトの絶対座標を与える．

## 5. 実 験

実験では、まず既知の物体を計測することにより、試作システムによる計測の精度を測定する．既知物体として図 12 に示す立方体の形状を計測する．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．ここで、青と緑のラインは、765nm と 850nm の光に相当する．4.3.1 項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を行う．立方体は、一辺 0.3m で、カメラと立方体の距離は約 0.8m である．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全くないことが分かる．

立方体の形状計測結果を図 13 で示す．(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校正するため、内部パラメータと外部パラメータを同時に計算する．その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、角度誤差を軽減するために内部パラメータを個別に校正することを考える．

次に、提案手法と Kinect を用いた手法でテクスチャ付き 3 次元モデルを計測した結果を示す．図 14 は頭部モデルによる提案手法と Kinect とのテクスチャ付き 3 次元形状の比較結果である．上段はそれぞれ、入力画像の可視光画像、入力画像の近赤外光画像、提案手法のテクスチャ無しの形状、提案手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し、下段は提案手法のテクスチャ無しの形状、Kinect のテクスチャ無しの形状を拡大した図を示す．下段の図を比較すると、Kinect による復元結果は表

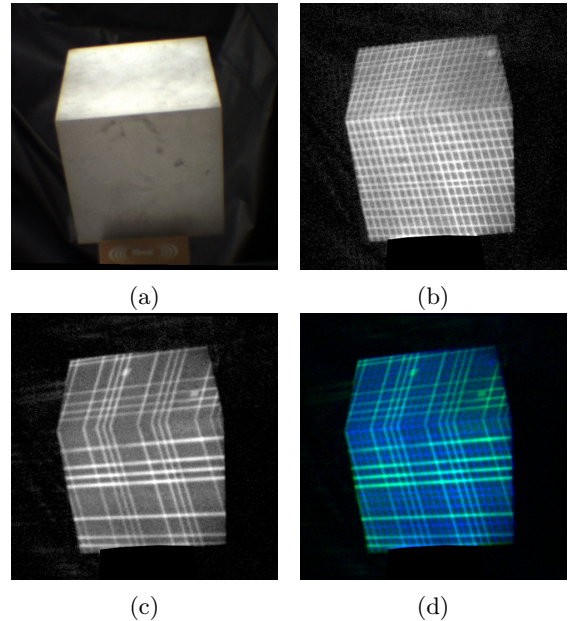


図 12 立方体の画像．(a) 可視光のカラー画像．(b) 765nm 波長のパターンが投影された画像．(c) 850nm 波長のパターンが投影された画像．(d) 765nm と 850nm の画像を統合して作成したグリッドパターンが投影された画像．

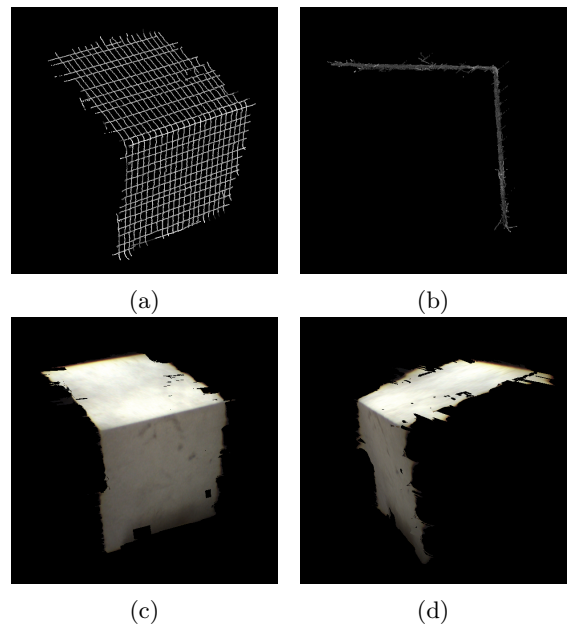


図 13 立方体の復元結果．(a) と (b) は入力画像の曲線の画素を点として復元した結果．(c) と (d) はテクスチャ付き 3 次元形状．

面の形状が階段状となり強く凹凸現れて形状が復元されているのに対して、提案手法による復元結果では表面の形状がより滑らかに復元されていることが分かる．これは、Kinect の場合ドットベースで形状を復元しているためピクセル精度でしか形状が復元できないのに対して、提案手法ではラインベースで形状を復元していることからサブピクセル精度で形状を計測することが可能であり、より細かく形状を計測できたためである．

最後に、動物体のテクスチャ付き形状を計測した．波打

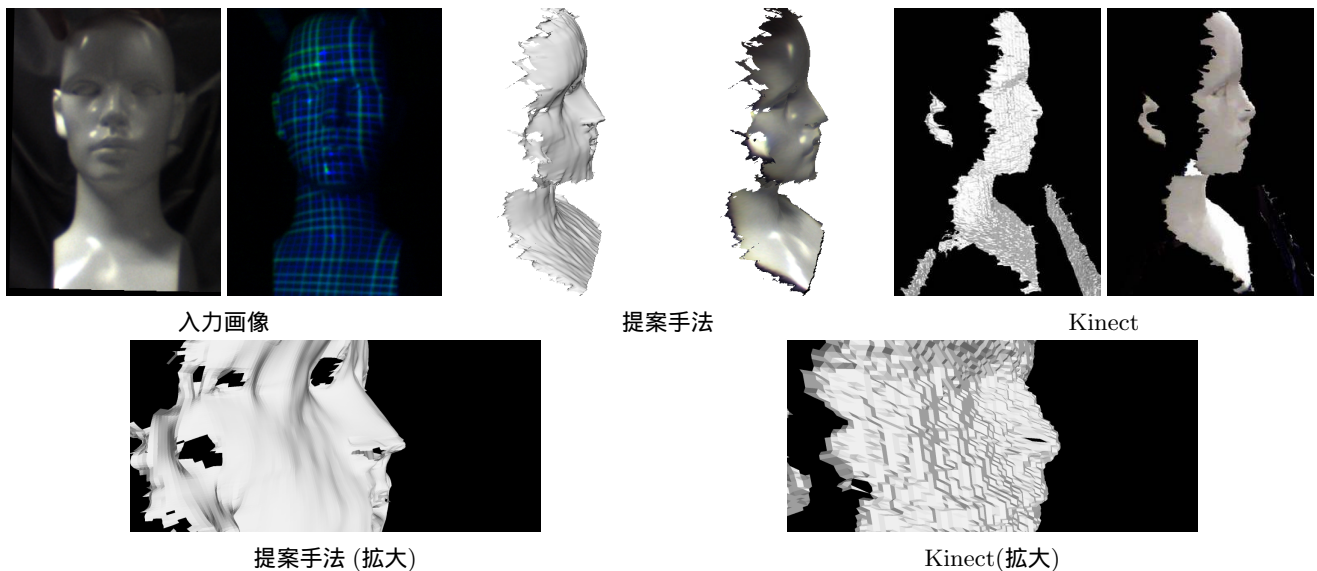


図 14 頭部モデルの提案手法と Kinect とのテクスチャ付き 3 次元形状の比較結果．  
 上段はそれぞれ，入力画像の可視光画像，入力画像の近赤外光画像，提案手法  
 のテクスチャ無しの形状，提案手法のテクスチャ付きの形状．Kinect のテク  
 スチャ無しの形状，Kinect のテクスチャ付きの形状を示し，下段は提案手法の  
 テクスチャ無しの形状，Kinect のテクスチャ無しの形状を拡大した図を示す．

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，各フレームでの可視光によるテ  
 クスチャ画像である．二行目では，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．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タ・  
 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  
 カメラを開発した．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 種類の近  
 赤外の波長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な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ため，プリズムを必要  
 とせず，観測する光の強度の効率化をもたらした．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)，文部科学省科学研究費補助金 (21200002)  
 および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム  
 (LR030) 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．

## 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.

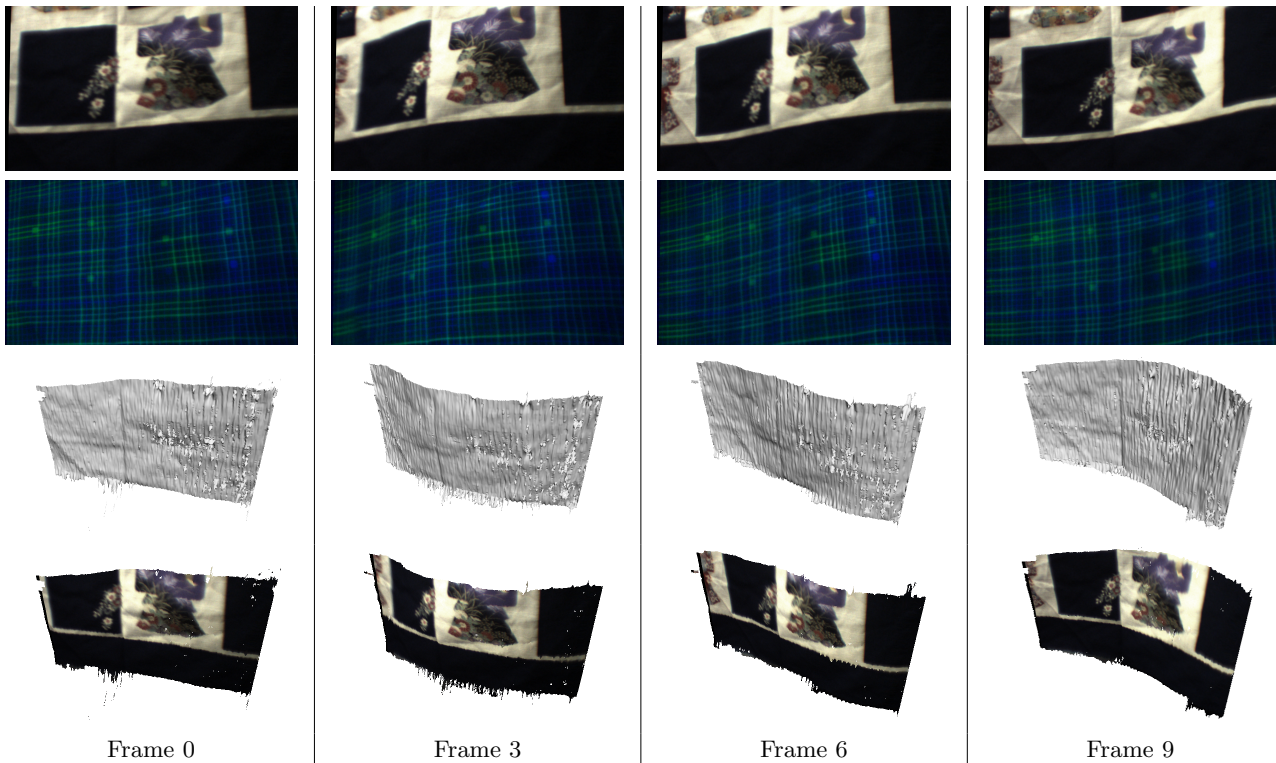


図 15 波打つ布のテクスチャ付き 3 次元形状結果 . 一行目は各フレームでの可視光によるテクスチャ画像 , 二行目は近赤外光の画像 , 三行目はテクスチャ無しの形状復元結果 , 四行目はテクスチャ付きの形状復元結果を示す .

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.