

赤外光源を用いた 2 プロジェクタワンショットスキャンによる 形状計測システム

清田 祥太[†] 坂口 裕一[†] 小野 智司[†] 中山 茂[†] 川崎 洋[†]
古川 亮^{††} 佐川 立昌^{†††}

[†] 鹿児島大学工学部 〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

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

^{†††} 産業技術総合研究所 〒 305-8569 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: †{sc107016,sc108024,ono,shignaka,kawasaki}@ibe.kagoshima-u.ac.jp, ††ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp,

†††ryusuke.sagawa@aist.go.jp

あらまし 3次元計測の形状を高密度で取得出来れば多くの物体解析に貢献できる。これを実現するため、これまで多くの手法が提案されてきたが、特にパターンコード化法による手法が実用の面などから近年盛んに研究されている。特に単一の投影パターンを用いて復元する手法は動物体にも対応でき、応用範囲が広い。この手法はワンショットスキャンと呼ばれる。本論文では、赤外線を用いた3次元計測復元を提案する。さらに、提案手法は1つの赤外カメラと2つの赤外投影装置からなり、それぞれの赤外投影装置からは、平行線パターンを投影することで交点を生じさせ、その交点から形状を復元する。このようなシステムでは、交点のみから線形解法によって一意に解を決定することができるため、線間隔に粗密をつけることなくパターン密度を上げることが可能となる。また、特定の波長の赤外線を用いることで、環境光の影響を受けにくくなり、通常のカメラを併用すれば対象物体のテクスチャも同時に獲得出来る。本論文では、2台の赤外プロジェクタによるワンショットスキャンを用いた形状計測システムを構築し評価する。キーワード アクティブ3次元復元, 赤外線, ワンショットスキャン, 共面性からの形状復元

1. はじめに

3次元形状の計測において、動きのあるシーンや物体、例えば顔や人体を計測するためには、計測の高速性、精度などが重要である。パッシブステレオにおいては、テクスチャの無い形状表面を、密かつ正確に再構成することは難しいため、アクティブ3次元計測手法が実用上近年盛んに研究されている。

アクティブ計測の中でもパターンコード化法では、プロジェクタで単一または複数のパターンをシーンに投影し、撮影することで3次元形状を復元する。このため、投影パターンの特徴点と撮影されたシーンとの対応関係が必要である。多くのパターンコード化方式ではプロジェクタの画素の位置情報を複数のパターンに時間的にコード化することで対応関係を得る。しかしこの方法では、必要なパターンを投影する間、シーンが静止していることを前提としているため、物体が動く場合には正確な形状が得られず、システムの利便性が低い。また高速に同期して動作する機器の構築のためにシステムが複雑化する問題点がある。

一方で、プロジェクタから投影される画像に、各々の画素位置を同定するために情報を空間的なパターンとしてコード化して埋め込み、一枚の撮影画像のみからシーンを復元する手法がある。これはワンショットスキャン

手法と呼ばれ盛んに研究されているが、局所的な領域に、位置情報を一意にコード化する必要性から、パターンが複雑になりやすく、また、複数の画像に単一の位置情報をコード化することから、解像度が低くなるという問題がある。さらに、コードのパターンが複雑になると、対象物の反射率により色情報が乱されたり、対象物体の形状によりパターンの歪みや不連続性が発生しやすく、コード化された情報の抽出が不安定となる問題もある。

近年、縦と横のみが識別可能な多数の直線で構成された単純なグリッドパターンを用いて、その交点を特徴点とすることで3次元復元を実現する手法が提案されている。これは、縦と横の接続関係という特徴点同士の情報を用いて、縦線と横線の交点として矛盾の無い3次元形状を、1パラメータの解集合として作成し、この1自由度を、既知のグリッドパターンを用いて、1次元探索により高速に決定する手法である。[8], [12], [16]

この方法では次元探索を安定化させるためにパターンの線の間隔の粗密情報を利用する。このため、縦横両方のパターンを十分密にすることが出来ないという制約があった。これは、計測の密度低下の原因になるばかりでなく、細い、あるいは小さな形状において、交点が不足しやすくなり、形状復元が行えなくなるという問題を生じさせる。この解決方法として、縦と横のパターンをそれぞれ別のプロジェクタで投影し、観測対象表面上で

のそれらの交点から形状復元する手法が提案されている [5] . 本論文ではこれを赤外プロジェクタを用いて実現する手法を提案する . 赤外線を用いることで , 計測環境の可視光の影響を受けにくくなり , また , 人の顔を計測する場合の光の眩しさといった問題が解消される . さらに , 可視光に影響を与えないため , 物体のテクスチャも獲得することが可能となる .

2. 関連研究

実用的な 3 次元計測ではセンサから光を投影するアクティブ手法が多く利用されてきた . 特に , 効率化のためにビデオプロジェクタを用いた手法が多く提案されている [2], [19] . プロジェクタをもちいたアクティブ手法に関して , これまでに大きく分けて , 時間エンコード法と空間エンコード法の 2 種類の手法が提案されてきた . 時間エンコード法の場合 , 安定した高精度の復元が可能であるが , 複数の異なるパターンを投影することが必要のため , ダイナミックなシーンに利用することが本質的に難しい .

近年 , ハイスピードカメラと DLP プロジェクタを用いて , ダイナミックシーンを形状復元する研究が行われている . Weise ら [18] は位相シフト法に基づいたパターン投影とステレオ視を組み合わせたシステムを提案した . Narasimhan ら [10] は DLP プロジェクタが生成する高速な時系列パターンを識別して形状復元を行う方法を提案した . また , 形状の復元に必要なパターン数を削減する研究も行われている [6], [19] . これらの手法は高フレームレートで奥行き情報を取得することができるが , 時系列コードを認識する必要があるため , 画像中の観測対象の動きは一定速度以下である必要がある . さらに , 使用する機器の高精度な同期が必要となる .

一方で , 空間エンコード法では , パターンが固定されているため , 映像中の 1 フレームのみから形状復元が可能であり [15], [4], [7], [9], [11], [14], [17], [20] , ダイナミックシーンの計測に適している . しかし , これらの手法は多くの場合 , 複雑なパターンを用いるため , 観測対象のテクスチャに影響されたり , 奥行きエッジの部分で空間的なパターン情報を識別できず , 誤差が大きくなる , という問題が発生する . さらに , 広い範囲を計測するために , 複数のプロジェクタからパターンが同じ観測対象に投影された場合 , パターンが干渉し合うため , その分離は容易ではなくなる .

パターンが複雑になるという問題に対して , 単純なグリッドパターンから得られる接続情報を用いて形状復元を行う手法 [8], [12], [16] がこれまで提案されている . しかし , それらの手法では縦・横の線から構成されるグリッドパターンを投影するため , 複数のプロジェクタから同じ対象上にパターンが投影された場合 , その分離が困難である . さらに , これまでの手法による線形解法では理論的に復元の解に 1 自由度が残るため , 線の粗密や

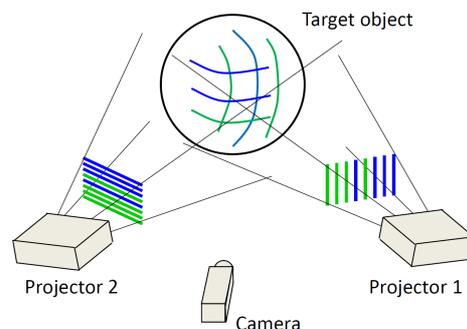


図 1 提案手法の最小構成は 2 台のプロジェクタと 1 台のカメラとなる . それぞれのプロジェクタから縦線と横線を投影し , カメラはそれらの線の交点を観測する .

カラーコードといった情報を用いて一意の解を決定する必要があった . 提案手法のように (2 方向ではなく 1 方向の) 平行線から構成されるパターンを複数のプロジェクタから投影した場合 , どのプロジェクタから投影されたか分離・検出にかかる画像処理が安定化し , さらに線形解法のみによって解を一意に決定できる .

赤外を用いるワンショット計測手法も提案されている . 赤坂らは可視光カメラと赤外カメラを用いてテクスチャと形状を同時に計測できるセンサを提案した [1] . 川崎らはグリッドパターンを用いたワンショットスキャンによるリアルタイムな人体計測を行った [21] . 阪下らは近赤外カメラと可視光カメラを用いてテクスチャ付き 3 次元形状の取得に成功している [13] . これに対して我々は 2 台の赤外プロジェクタと 1 台の赤外カメラを用いた方式のため , オクルージョンが少なく , 復元密度が高いという利点がある .

3. 提案手法の概要

3.1 システム構成

提案手法は 2 台の赤外プロジェクタと 1 台の赤外カメラとなる . それぞれのプロジェクタから縦線と横線を投影し , カメラはそれらの線の交点を観測する . 縦と横のパターンは赤外線の異なる波長により識別される . 提案する 3 次元計測システムでは , 複数の赤外プロジェクタから投影されたラインパターンを赤外カメラで観測する . 赤外プロジェクタからは固定したパターンが投影されるため , カメラ - プロジェクタ間で同期の必要が無い . 最小構成は , 図 1 に示すように 2 台の赤外プロジェクタと 1 台の赤外カメラから構成される . 2 台のプロジェクタからそれぞれ , 縦パターンと横パターンを投影し , 観測対象上の交点を観測することによって形状復元を行う . 赤外カメラと赤外プロジェクタは校正済みと仮定する , すなわち , それぞれの内部パラメータおよび , 機器間の剛体変換パラメータは既知である .

赤外線のため , オブジェクトのテクスチャ等から影響を受けにくくなり安定した識別を実現できる . また , テクスチャもキャプチャすることが出来る .

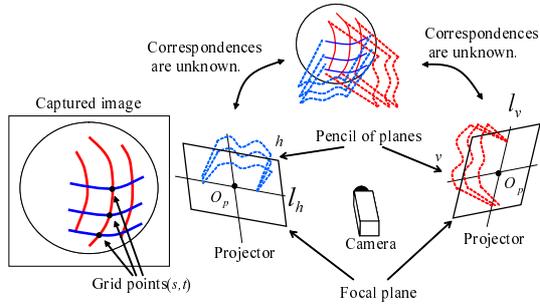


図2 縦パターン平面が通過する軸と、横パターン平面が通過する軸がねじれの位置になるように2つのプロジェクタを配置する。

3.2 3次元構成アルゴリズム

最初に、最小構成である2プロジェクタと1カメラを用いた復元方法について述べる。あるプロジェクタから一組の平行線を投影すると、各線の3次元空間中での軌跡は平面であり、その全ての平面はある一つの直線を共有する。すなわち、この直線を軸とする pencil of planes (同一の直線を共有する面の集合を表し、以下ペンシルと表記する)の要素である。平面を3個のパラメータで表し、その3次元ベクトルを3次元空間の点と見なした時、この点を平面の双対と呼び、その空間を双対空間と呼ぶ。平面の双対は点であり、ペンシルの双対は直線となる。このことから、直線中の点を1パラメータで表現するのと同じように、特定のペンシル中の平面を1パラメータで表現できる。この時、グリッドの交点位置から、パターン平面のパラメータに関する線形方程式を作成することが可能である。

これまで文献[5],[12]において、単一のプロジェクタによって縦・横の線を投影し、3次元復元する手法が提案されている。以下では、縦・横の線の交点をグリッドポイントと呼ぶことにする。この時、縦パターン平面が通過する軸と、横パターン平面が通過する軸は、プロジェクタの光学中心で交わる。これにより、グリッドポイントの情報から得られる線形方程式の定数項が消去されるため、構成される連立方程式は、必ず不定性を持つ方程式となる[5]。文献[5],[12]においては、線の粗密情報をパターンに付与し、残っている1次元の不定性を、投影したパターンと得られた解とのマッチングを行うことで解消する手法としていた。また、文献[16]は、デプルーインIDにより、この不定性を解消している。

これに対して、本論文では、複数のプロジェクタを利用し、縦平面と横平面を異なるプロジェクタで投影することで一意な解を得る。図2に示すように、縦パターン平面は、プロジェクタの光学中心を通る直線 l_v を共有する(つまり、 l_v を軸とするペンシルである)。同様に横パターン平面は l_h を共有する。 l_v と l_h がねじれの位置になるようにプロジェクタを配置すると、得られる方程式は、定数項を持つ線形方程式となり、一般に解は不定

性を持たない。このため、線形方程式のみから一意に解を定めることが出来る。

パターン平面 p を

$$p_1x + p_2y + p_3z + 1 = \mathbf{p}^\top \mathbf{x} + 1 = 0, \quad (1)$$

で表す。このとき、3次元ベクトル $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)^\top$ は、平面のパラメータベクトルである。

ある縦パターン平面を \mathbf{v}_a とし、 \mathbf{v}_a と異なる縦パターン平面を \mathbf{v}_b とする。このとき、 $\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_b$ の交線である l_v を含む平面の集合は、以下の式で表現される。

$$\mathbf{v} = (1 - \lambda)\mathbf{v}_a + \lambda\mathbf{v}_b \quad (2)$$

この式は、3次元空間中における直線の式と同じ形をしており、縦パターン平面の集合が、双対空間中で $\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_b$ を通る直線に含まれることを表す。この直線を表現するために、直線上の任意の点 \mathbf{v}_0 と、直線方向ベクトル(あるいは無限遠点を正規化したもの) \mathbf{v}_{inf} を用いて、

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mu\mathbf{v}_{\text{inf}}. \quad (3)$$

と表現することが出来る。ここで、 μ は、プロジェクタで投影する画像上の各ラインに対して定義できるパラメータである。

\mathbf{v}_0 は l_v を含む平面の集合から任意に選ぶことが出来る。また、 l_v を含む平面には、カメラの光学中心を通過する唯一の平面が存在するが、 \mathbf{v}_{inf} は、その平面の法線ベクトルに一致する(式(1)は、平面がカメラの光学中心を通らないことを仮定しているが、カメラの光学中心に平面が近づくと、パラメータ \mathbf{p} は双対空間中で \mathbf{v}_{inf} の方向の無限遠点に近づく)。

横パターンの集合も、同様に、

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0 + \rho\mathbf{h}_{\text{inf}} \quad (4)$$

と表されるとする。

ある縦パターン v と横パターン h の交点が、正規化カメラ座標において (s, t) で観測されたとする。この時、 v, h の双対ベクトルを \mathbf{v}, \mathbf{h} とし、 $\mathbf{u} = (s, t, -1)^\top$ とすると、文献[5]より、

$$\mathbf{u}^\top (\mathbf{v} - \mathbf{h}) = 0 \quad (5)$$

である。式(4)、(2)を代入して、

$$\begin{aligned} & \mathbf{u}^\top (\mathbf{v}_0 + \mu\mathbf{v}_{\text{inf}} - \mathbf{h}_0 - \rho\mathbf{h}_{\text{inf}}) \\ &= (\mathbf{u}^\top \mathbf{v}_{\text{inf}})\mu - (\mathbf{u}^\top \mathbf{h}_{\text{inf}})\rho + \mathbf{u}^\top (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

を得る。

上記の式はグリッドポイントごとに得られるので、これから線形連立1次方程式を作ることが出来る。 i 番目の縦平面について、式(2)のパラメータ μ を μ_i 、同様に j 番目の横平面について、式(4)のパラメータ ρ を ρ_j とする。また、 K 個のグリッドポイントが検出されたとして、

そのうち k 番目のグリッドポイント $\mathbf{u}_k = (s_k, t_k, -1)$ が、 $\alpha(k)$ 番目の縦平面と $\beta(k)$ 番目の横平面との交点であるとする。この時、

$$\begin{aligned} A_k &\equiv \mathbf{u}_k^\top \mathbf{v}_{\text{inf}}, B_k \equiv \mathbf{u}_k^\top \mathbf{h}_{\text{inf}}, C_k \equiv \mathbf{u}_k^\top (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0), \\ A_k \mu_{\alpha(k)} - B_k \rho_{\beta(k)} &= -C_k, \end{aligned} \quad (7)$$

が $k = 1, \dots, K$ について成立する。

さらに、パターン同士の隣接情報が与えられている場合、それを利用した拘束式を作ることが出来る。特に、パターン上の隣接するラインどうしの μ の差が一定値の場合 (パターン平面の集合が、双対空間中で等間隔に並ぶ場合に相当する) は、拘束式が以下に述べるように線形となり都合が良い。そこで、本論文では、このように、 μ は隣接するパターンにおいて一定間隔で変化するという線形関係があると仮定し、以下議論を進める。第 3.3 節で述べるように、これは投影するパターンの間隔を調整するか、プロジェクタの配置を工夫することで常に成立させることが出来るため、この仮定により手法の一般性が失われることはない。 L 個のパターンのペアが隣接する場合を考える。 l 番目のペアが $\gamma(l)$ 番目の縦平面と $\delta(l)$ 番目の縦平面である場合、

$$\mu_{\gamma(l)} - \mu_{\delta(l)} = D, \quad (8)$$

となる。 D は定数であり、 $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_{\text{inf}}$ の取り方と、 $\mu_{\gamma(l)}, \mu_{\delta(l)}$ の順序関係からあらかじめ決定できる。

式 (7), (8) から得られる μ_i と ρ_j に関する線形連立方程式を解くことで、検出された各曲線のパターン平面を決定できる。これらの平面と視線ベクトルを用いた三角測量により、検出した曲線の形状を復元できる。実際の計算においては、行列方程式 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ を生成する。ただし \mathbf{x} は、検出された縦パターン及び横パターンのパラメータ μ_i, ρ_j を並べてベクトルにしたものである。十分な交点と隣接情報があれば、 \mathbf{A} の行数は列数より大きいので、擬似逆行列を用いて $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^\top \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{c}$ によって解を求める。 $(\mathbf{A}^\top \mathbf{A})^{-1}$ の計算には LU 分解による方程式解法を利用すればよい。

3.3 プロジェクタとカメラの配置について

一般に、プロジェクタの画像上のラインパターンが一定間隔であっても、式 (3) における μ はパターン座標に比例した値とはならない (つまり、パターン平面の双対が一定間隔にならない)。このため、 μ がパターンに応じて線形となるためには、プロジェクタ・カメラ間の剛体変換に従って、投影するパターンを毎回計算する必要がある。この場合、プロジェクタとカメラの位置関係を変更する度にパターンを変更することになり利便性が損なわれる。もう一つの方法として、一定間隔のパターンを投影した場合であっても、 μ と、プロジェクタの画像面上での位置関係が線形となるような配置が考えられる。プロジェクタの光学中心を通り、プロジェクタの画像

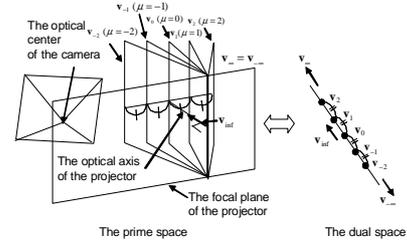


図 3 プロジェクタの画像面上でのパターン位置と μ が線形になる条件。

面に平行な平面を、Faugeras [3] に倣ってプロジェクタの焦点面 (focal plane) と呼ぶことにする。図 3 に示すように、プロジェクタの焦点面にカメラの光学中心が含まれるようにし、さらにプロジェクタの光軸を含むパターン平面の双対を、 \mathbf{v}_0 とする。この時、等間隔のグリッドから生成される縦パターン平面の集合が、双対空間中でも等間隔の点となる。このことは、直感的には、画像面上でのパターンの無限遠の位置と、双対空間中での無限遠点 (カメラの光学中心を含む平面) が一致することから示される。本論文ではプロジェクタとカメラが、このように配置されているとする。

4. 赤外線装置を用いた 3 次元復元

4.1 赤外装置

図 4 のような二波長近赤外センシング装置、二波長近赤外センシング装置、2 台の赤外線光線装置 (図 6) を用いてシステムを構築する。本論文で用いた赤外線光線の波長は、850nm と 940nm である。ここで用いた二波長近赤外センシング装置は内部にそれぞれの帯域に対応したカメラが二つとプリズムが入っており、プリズムで分離された波長の光がそれぞれのカメラで撮影される (図 5)。計測の様子を図 7 に示す。



図 4 赤外センシング装置

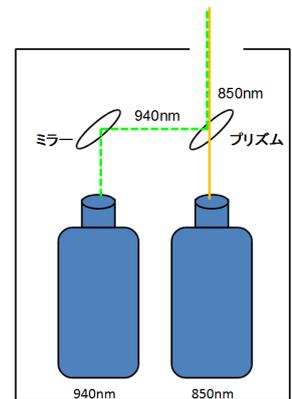


図 5 赤外センシング装置内部

4.2 2 台のカメラのホモグラフィによる位置合わせ

2 波長の赤外線を 1 つの赤外カメラにより撮影しているが、この赤外カメラの内部には実質二つの赤外カメラ



図 6 赤外ライン光線発生装置

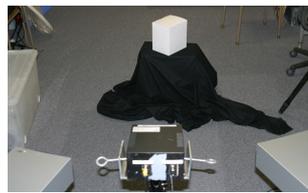
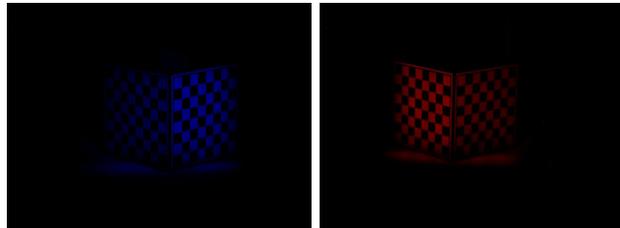


図 7 計測風景



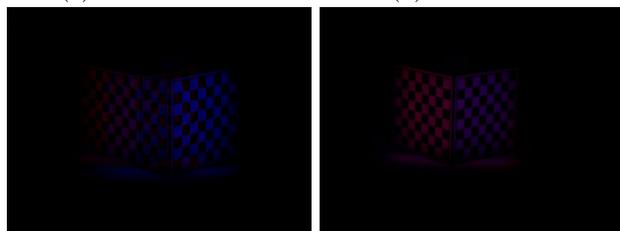
(a) グレーコード (b) グレーコード

図 12 キャリブレーションの際投影するパターン



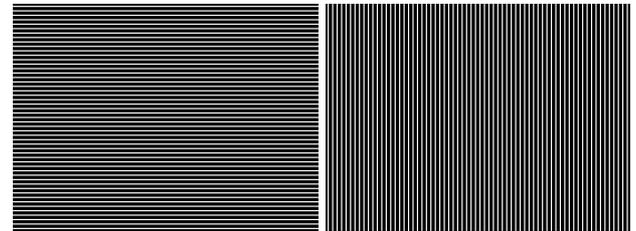
(a)850nm カメラ

(b)940nm カメラ



(c) カメラ間の位置ずれ (d) ホモグラフィ変換後

図 8 ホモグラフィ変換



(a) 横ラインパターン (b) 縦ラインパターン

図 13 ワンショット復元の際投影するパターン

枚の画像を一致させる．キャリブレーション用に撮影したボックスにおける各カメラごとの特徴点の座標を取得し，それを用いてホモグラフィを推定する（図 9）．今回は 840nm 側の画像をホモグラフィ変換することにより，940nm のカメラ側に画像を統一した．

4.3 装置のキャリブレーション

これらの装置を用いて，ラインベースのワンショットスキャンをするためには，2つの赤外プロジェクタと赤外カメラのキャリブレーションが必要となる．本論文では形状復元のキャリブレーション用パターンの印刷された専用のボックスを用いてキャリブレーションを行った（図 10）．パターンの撮影方法としては，コード化したパターン（図 12）を OHP フィルムに印刷し，赤外ライン光線発生装置の中に OHP フィルムを挿入し，物体に投影した．これを既定の枚数のコード化パターン分，赤外カメラで静止画としてキャプチャする．この時用いたグレーコードの例を図 14 に示す．こうして得られた画像群からグレーコード画像を作成する．このグレーコード画像をデコードすることでカメラとプロジェクタのピクセル同士の対応関係が得られる．そこで，この対応関係を用いて赤外センシング装置の内部パラメータ，赤外ライン光線発生装置の内部パラメータ，および外部パラメータのキャリブレーションを行う．キャリブレーションにはカメラ用のアルゴリズムが利用できる．本論文では，LM 法によるバンドル調整法を実装し用いた．

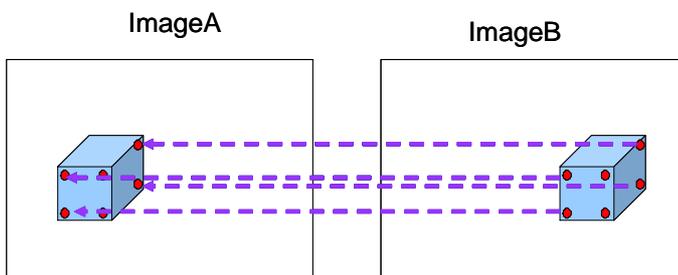


図 9 各画像における同一の特徴点をもとにホモグラフィ行列の推定を行う



図 10 キャリブボックス

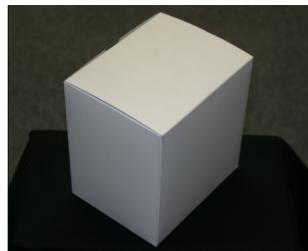


図 11 復元に用いた箱

が内蔵されており，それぞれのカメラに於いて別々に各波長の赤外線を撮影している．

しかし，こうして得られた画像はカメラの設計上，完全に同じ位置で撮影されてはいない（図 8）．そこで，2枚の画像間のホモグラフィ行列を推定することにより，2

4.4 3次元計測

二つの赤外線装置から出る 850nm，940nm の光線を，それぞれ縦と横のラインとして投射する．また，投射するパターンは既知とする．縦と横のパターンが投射されている画像から縦ラインと横ラインをそれぞれ別々に検

出しそれらの交点を求め、共面性条件を用いて、3次元復元を行う。ここで撮影した画像のうち850nmの画像はホモグラフィ変換で940nmのカメラで撮影した画像に変換され、さらに、2枚の画像を統合し形状復元に使用する。

5. 実験

5.1 赤外システムのキャリブレーション

図7のように各装置を配置し、実験を行った。キャリブレーションボックスを4.3節の手法により撮影し、キャリブレーションを行った。OHPに印刷したグレーコードを縦横それぞれ20枚用いて、キャプチャし得られたグレーコードにより、キャリブレーションを行った。

キャプチャした画像の例を図14に示す。キャプチャした静止画から生成した2値化画像を図15に示す。2値化画像セットより生成したグレーコード画像を図16に示す。このグレーコード画像を用いてキャリブレーションを行った。推定されたパラメータの精度の確認のため、キャリブレーション用のボックスを推定したパラメータを用いて復元した。復元結果を図17に示す。ボックスの直角が再現されており、正しくキャリブレーションされていることが分かる。

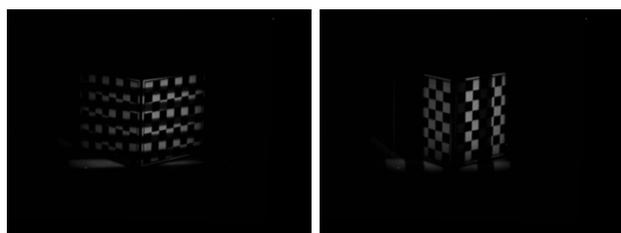


図14 キャプチャした静止画

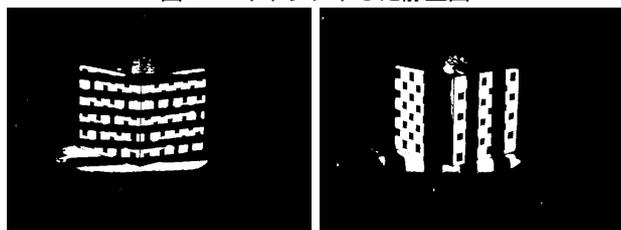


図15 二値化画像

5.2 赤外プロジェクタ1台によるワンショット計測

本論文では、評価の為に2プロジェクタワンショットスキャンと同様の物体を、1台のプロジェクタと1台のカメラを用いてグリッドワンショットスキャンを行った。940nmと850nm波長両方で、ワンショット復元を試した。使用したグリッドパターンを図18に、940nmで撮影した画像例を図19に示す。撮影物体は90°の角度を持つ箱(図11)を用いた。復元結果を図20と図21に示す。どちらの復元においても、正しく直角が表現されていることがわかる。また2つの形状を同じ座標系に持っていき、ほぼ一致することを確認した。

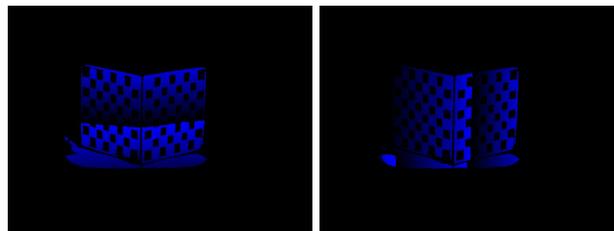


図16 グレーコード画像

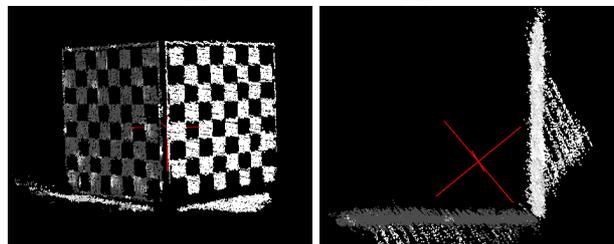


図17 ボックスの復元結果

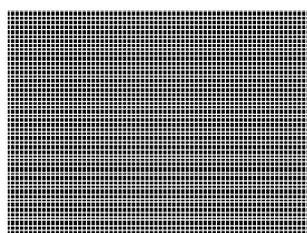


図18 グリッドパターン

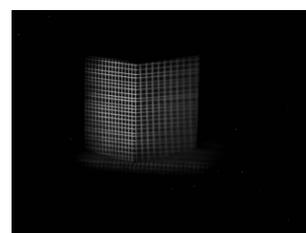
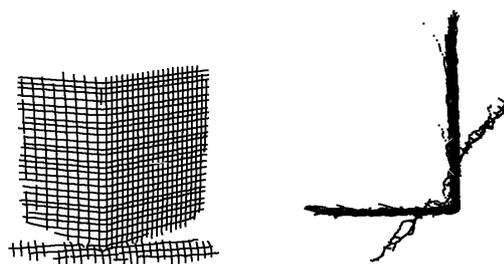


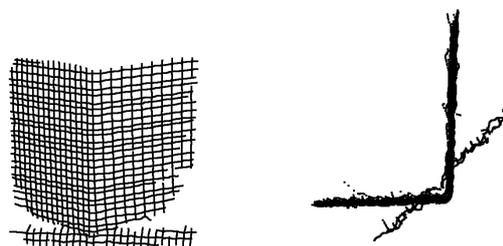
図19 撮影画像



(a) 正面

(b) 上部

図20 850nm側の復元



(a) 正面

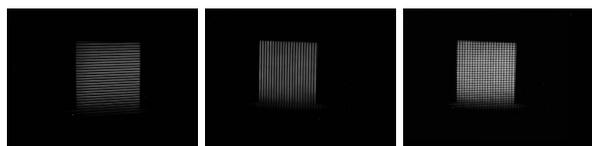
(b) 上部

図21 940nm側の復元

5.3 赤外プロジェクタ2台によるワンショット計測

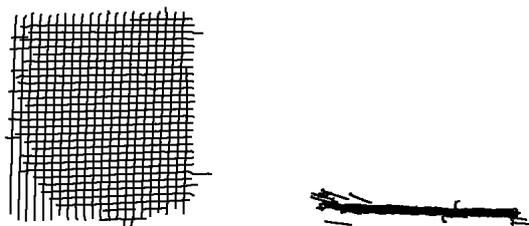
本論文では、2台のプロジェクタと1台のカメラを用いてワンショットスキャンを行った。実験装置により2波長を同時に撮影し、縦・横それぞれを前述のホモグラフィ

フイ変換を用いて仮想的に 940nm 波長のカメラで撮影した画像を作り、さらに、各ピクセルの輝度値の和をとることにより一枚の画像に統合して復元に用いた。(図 22)。復元結果を図 23 に示す。平面が正しく復元されていることがわかる。さらに 90°の角度を持つ箱(図 11)をプロジェクタ 1 台によるワンショットスキャンと同様に撮影し、復元したものを図 24 に示す。プロジェクタ 1 台による復元と同様に 90°の角度が正しく復元されていることが確認できる。さらに形状が複雑なオブジェクト(図 25)を計測し復元した結果を図 26 に示す。曲面などが正しく復元できていることが分かる。



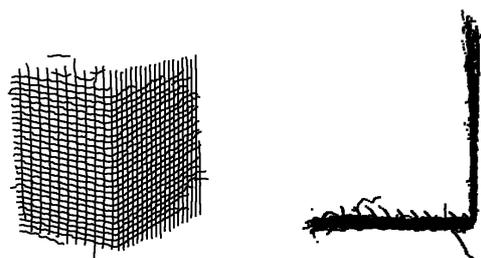
(a)850nm (b)940nm (c) 統合した画像

図 22 復元に用いた画像



(a) 正面 (b) 上部

図 23 平面を復元した画像



(a) 正面 (b) 上部

図 24 ボックスを復元した画像

6. 結 論

本論文では赤外プロジェクタを用いたワンショットスキャンによる 3 次元計測する手法を提案した。利用したワンショットスキャンは、これまでの 1 フレームからの形状復元において行われてきた複数画素を用いて位置情報をコード化する方式ではなく、グリッドパターンの交点の接続情報を用いて形状復元をする手法とした。提案



図 25 撮影した画像

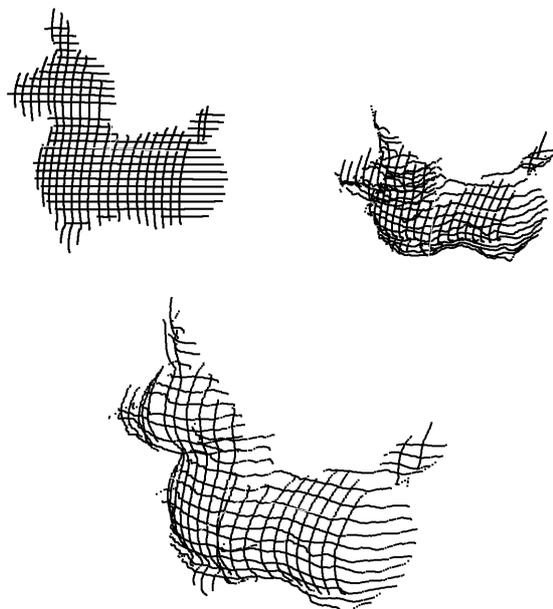


図 26 少し形状が複雑な物体を復元した画像

するシステムは赤外線を用いているため、環境光やテクスチャによる影響を受けにくく、人の目に眩しくないなどの人体に影響の少ない 3 次元復元が可能となる。しかし、OHP 用紙を用いた手動によるキャリブレーションや、2 波長の赤外線を照らし、2 つのカメラで撮影した事による位置ずれなどの問題により、本来のワンショットスキャンシステムよりも若干精度に欠ける結果となった。ボックスの復元においても本来滑らかである物体の表面に波状の線が生じるなど、誤差も残っており、これの解消が今後の課題である。

7. 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 *The 6th IEEE*

- Conf. 3DIM*. IEEE, 2007.
- [2] J. Batlle, E. Mouaddib, and J. Salvi. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern Recognition*, 31(7):963–982, 1998.
- [3] O. Faugeras. *Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint*. The MIT press, Cambridge, MA, 1993.
- [4] 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.
- [5] R. Furukawa, H. Kawasaki, R. Sagawa, and Y. Yagi. Shape from grid pattern based on coplanarity constraints for one-shot scanning. *IPSJ Transaction on Computer Vision and Applications*, 1:139–157, 2009.
- [6] O. Hall-Holt and S. Rusinkiewicz. Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects. In *ICCV*, volume 2, pages 359–366, 2001.
- [7] C. Je, S. W. Lee, and R.-H. Park. High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging. In *ECCV*, volume 1, pages 95–107, 2004.
- [8] 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.
- [9] T. P. Koninckx and L. V. Gool. Real-time range acquisition by adaptive structured light. *IEEE Trans. on PAMI*, 28(3):432–445, March 2006.
- [10] S. Narasimhan, S. Koppal, and S. Yamazaki. Temporal dithering of illumination for fast active vision. In *European Conference on Computer Vision*, volume 4, pages 830–844, October 2008.
- [11] J. Pan, P. S. Huang, and F.-P. Chiang. Color-coded binary fringe projection technique for 3-d shape measurement. *Optical Engineering*, 44(2):23606–23615, 2005.
- [12] 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.
- [13] K. Sakashita, R. Sagawa, R. Furukawa, H. Kawasaki, and Y. Yagi. A system for capturing textured 3d shapes based on one-shot grid pattern with multi-band camera and infrared projector. In *International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT)*, 2011.
- [14] J. Salvi, J. Batlle, and E. M. Mouaddib. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement. *Pattern Recognition*, 19(11):1055–1065, 1998.
- [15] J. Tajima and M. Iwakawa. 3-D data acquisition by rainbow range finder. In *ICPR*, pages 309–313, 1990.
- [16] A. O. Ulusoy, F. Calakli, and G. Taubin. One-shot scanning using de bruijn spaced grids. In *The 7th IEEE Conf. 3DIM*, 2009.
- [17] P. Vuylsteke and A. Oosterlinck. Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern. *IEEE Trans. on PAMI*, 12(2):148–164, 1990.
- [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] M. Young, E. Beeson, J. Davis, S. Rusinkiewicz, and R. Ramamoorthi. Viewpoint-coded structured light. In *CVPR*, June 2007.
- [20] 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.
- [21] 川. 俊央, 川. 洋, 古. 亮, 大. 雄也, 佐. 立昌, and 八. 康史. グリッドパターンを用いたワンショットスキャンによるリアルタイムな人体計測システム. In *PRMU*, pages 43–48, 6 2009.