

複数プロジェクタを用いたワンショット動体形状計測のための線形解法

阪下 和弘[†] 大田 雄也[†] 頭師 陵太^{††} 佐川 立昌^{†††} 古川 亮^{††}
川崎 洋^{††††} 八木 康史[†] 浅田 尚紀^{††}

[†] 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

^{††††} 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

^{††} 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

^{†††} 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

E-mail: [†]{sakashita,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{†††}ryusuke.sagawa@aist.go.jp,

^{††††}{ryo-f,asada}@hiroshima-cu.ac.jp, ^{†††††}kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

あらまし プロジェクターカメラシステムによる構造化光の投影による形状復元を、動的シーンに適用するには、複数パターンの投影を行う方法より、1 パターンのみの投影を行うワンショット手法が望ましい。著者らは、その解決手法として、縦横の線からなるグリッドパターンを用いたワンショット形状計測法を提案してきた従来手法では、交点情報のみによる解には曖昧性があり、一意に解を決めるには線間隔の粗密といった追加情報が必要であった。本論文では、2 台のプロジェクタから縦横の平行線を投影することで、追加情報無しに交点のみから一意解を得る手法を提案する。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必要がなくパターン密度を上げることが可能となる。さらに、複数のプロジェクタを用いることによって、パターンが遮蔽されて形状計測できない部分を大きく減らすことが可能である。

キーワード プロジェクタ-カメラシステム, ワンショット形状計測, 線形解法

Linear solution for oneshot 3D reconstruction using multiple projectors for moving objects

Kazuhiro SAKASHITA[†], Yuya OHTA[†], Ryota ZUSHI^{††}, Ryusuke SAGAWA^{†††}, Ryo FURUKAWA^{††},
Hiroshi KAWASAKI^{††††}, Yasushi YAGI[†], and Naonori ASADA^{††}

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

^{††††} Kagoshima University, 1-21-40 Kohrimoto Kagoshima-city, 890-0065, Japan

^{††} Faculty of information sciences, Hiroshima City University
3-4-1 Ozuka-higashi, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194, Japan

^{†††} Intelligent Systems Research Institute National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568 Japan

E-mail: [†]{sakashita,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{†††}ryusuke.sagawa@aist.go.jp,

^{††††}{ryo-f,asada}@hiroshima-cu.ac.jp, ^{†††††}kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

Abstract To apply active 3D scanning based on coded-structured-light to dynamic scenes, a oneshot scanning method that uses a single static image is preferable than those that uses multiple patterns. In previous works, we have proposed oneshot scanning methods that use intersection points of grid patterns. In those methods, solutions only from intersection points have ambiguity, and thus, additional information, such as variation of grid intervals, were used to solve this. However, the variation of grid intervals makes it difficult to increase the density of the pattern. In this work, we propose a system that consists of a camera and multiple projectors and each of the projectors projects a parallel line patterns instead of grid patterns. Shape is reconstructed from the intersection points between those two sets of parallel lines. It is shown that a unique linear solution is possible for such a system, thus, dense grid patterns with uniform intervals can be used to increase density of the pattern. Furthermore, by using two projectors, blind areas caused by occlusion and self-occlusion are drastically reduced.

Key words projector-camera system, oneshot 3D scanning, linear solution

1. はじめに

高密度かつ高フレームレートでダイナミックな動きのある対象物体の3次元計測が必要とされている。例えば、運動する人物の筋肉の変化や、物体が破裂する瞬間の構造解析などは、高密度で高フレームレートでの形状復元が望まれている。

このような、実用的な3次元計測ではこれまで、アクティブ計測法が主な解決策と考えられてきた。特にダイナミックに変化するオブジェクトに関しては、短時間に広範囲を取得可能なプロジェクタを利用した方法が適している。しかし、プロジェクタによるアクティブ手法を動物体の高密度な形状計測に用いることには本質的な課題がある。プロジェクタを用いた3次元計測として、主に、時間エンコード法と空間エンコード法の2つが知られている。時間エンコード法は複数のパターンを投影する手法のため、動いている物体の高フレームレートでの計測には本質的に適していない。また、広い範囲をカバーしようとして複数のプロジェクタを利用する場合、同期を取ることが難しくなる。一方で、空間エンコード手法の場合、各プロジェクタの投影パターンは不変であり、撮影画像も一枚で済むため動きのある物体の計測には適しているが、パターン自体が複雑になるため、物体表面の色や形状との干渉などの問題が生じ、しばしば画像処理が困難となる。

もし、固定された単色ラインパターンを投影した1フレームの画像から形状復元できれば、上記問題を全て解消することができる。そのような手法として、縦・横の直線からなるグリッドパターンを用いた、共面性拘束原理 (coplanarity constraint, COP) に基づくワンショット復元手法 (shape from grid pattern, SFG) が最近提案されている [7], [10], [12]。SFG では唯一の解を得るために、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。

そこで、本論文では、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を提案する。提案手法は、交点の情報のみから、不定性のない解を得ることができ、パターンの粗密情報を利用する必要がないため、縦横両方のパターンを密にすることができる。先行研究では、特に細い領域の復元などにおいて、グリッドパターンの接続関係の検出が困難になり、復元が失敗する場合があったが、提案手法ではこの問題が大きく軽減される。提案手法のもう一つの利点として、複数のプロジェクタを用いるため、パターンが遮蔽されて形状計測できない部分を大きく減らすことが可能、ということが挙げられ

る。例えば、カメラとプロジェクタ一台ずつの場合、カメラから見えていても、物体自身に影によりプロジェクタの光のあたらない部分は形状復元が出来ない。しかし左右から照らすことが出来れば、このような遮蔽部分を減らすことが出来る。

提案手法では理想的な条件では一意な線形解を得ることができるが、実際には交点検出の誤差の影響を受けて不安定になることがある。そこで、さらなる解の精度向上のため次に挙げる2種類の追加的な情報を用いる手法もあわせて提案する。一つは検出された線の隣接情報であり、もう一つはデブルーイン (de Bruijn) 系列に基づいた線 ID を用いる手法である。デブルーインによる線 ID は大域的に一意に定まるものではないが、誤差を含んで計算された線の位置を一意に決定するのに十分である。実験では、実際にシステムを構築し、形状復元や、提案手法の分析と評価を行った。

本論文の貢献は以下のようにまとめられる。(1) 複数プロジェクタ・カメラ方式による密なワンショット形状計測の実現。(2) グリッドパターンをもちいたワンショット復元の線形解法の提案。(3) 高フレームレートで動物体を計測する実験システムの構築。

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おり、これまでの歴史や代表的手法などもまとめられている [1], [15]。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なため、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 [14] 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 [9] 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 [5], [15]。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。また、撮影画像上の情報を用いた同期により、装置による同期を不要とした手法も提案されているが [9]、一般には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

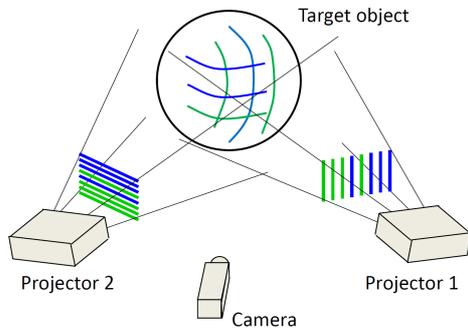


図1 提案手法の最小構成 (プロジェクタ 2 台, カメラ 1 台).
Fig.1 The minimum setup of the proposed approach consist of two projectors and a camera.

能であり [3], [6], [8], [13], [16], 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, それらのパターンの分離は難しい.

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 [7], [10], [12] 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.

3. 提案手法の概要

3.1 システム構成

提案する 3 次元計測システムでは, 複数のプロジェクタから投影されたラインパターンをカメラで観測する. 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 台のプロジェクタと 1 台の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. カメラと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.

2 台のプロジェクタはそれぞれ垂直, 水平線パターン

を投影する. 提案手法では, 本質的には単色のパターンでの形状復元が可能であるが, 精度と安定性の向上のためにカラーパターンを利用する. 本論文では, **belief propagation** に基づく線検出と, 周期的なパターンであるデブルーイン系列に基づいたカラーコード [6], [11], [16] を用いて, 安定した縦・横の線検出と分離を実現する.

3.2 カラーコードと線検出

カラーコードを安定に検出するには, 全体の色数を減らすことが望ましい. そこで, 縦・横のパターンに同じ色を用いつつ, それらを識別するために, 文献 [10] において提案された線検出法を用いる.

デブルーイン系列はそれぞれの線に与えられた線 ID の決定に用いられる. 長さ n , 記号数 q のデブルーイン系列は, 長さ q^n の数列であり, 長さ n の部分数列を観測すれば, 数列中の位置が一意に特定可能という特徴を持つ. 投影パターンを画像中で区別できる 2 つ以上の記号でコード化した場合, 投影パターンと観測パターン間の対応が長さ n の数列のマッチングによって一意に決まる. 文献 [6], [16] ではグローバルに一意な ID を決定するため, 大きな q と n の値が用いられていたが, 提案手法では文献 [10] のように, 小さな値を用いて生成されたパターンを用いる. これは, 本手法ではデブルーイン ID は, ノイズなどの影響による誤推定の修正にのみ利用されるため, 局所的な一意性が確保されれば十分なためである. 小さい q と n のため, ID を決定するために必要な連続パターン数が少なく済み, 形状の凹凸や, 画像処理の影響を受けにくくなる. 本論文では色数 $q = 2$, およびコードの長さ $n = 3$ を用いた. すなわち, カラーパターンの周期は 8 本となり, 各線に与えられる線 ID は 0 から 7 となる. また, オクルーディングエッジなどにおいて起こる線の誤接続も, このデブルーイン ID を用いて解消することができる [10].

縦パターンと横パターンの交点の位置はサブピクセル精度で計算される. また検出された線の連続性を用いて, 隣接する交点に分かるので, 線検出の結果として, 交点を格子状に接続したグリッドグラフが得られる. この交点座標と, 交点の接続情報であるグリッドグラフにより, 次節で述べる手法により 3 次元復元が実現される.

4. 3 次元再構成アルゴリズム

4.1 複数の pencils of planes による形状復元

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

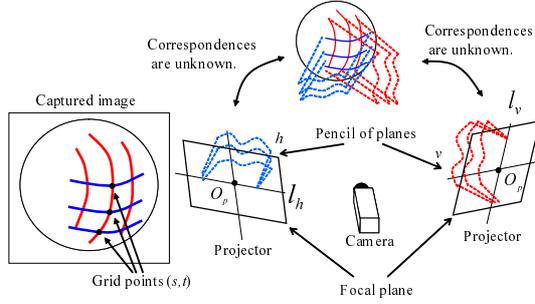


図2 縦パターン平面が通過する軸と、横パターン平面の軸がねじれの位置になるようにプロジェクタを配置する。
Fig. 2 Two projectors are placed so that the axes of the pencil of planes are configured to be skew.

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[4],[10]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[4]。文献[4],[10]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[12]は、デブルーイン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[4]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 4.2 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 $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{c}$ によって解を求める。 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ の計算には LU 分解による方程式解法を利用すればよい。

4.2 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面に平行な平面を、Faugeras [2] 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

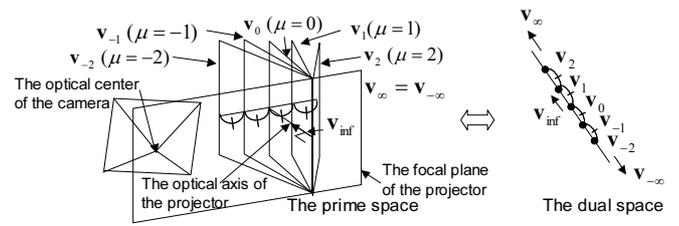


図 3 プロジェクタの画像面上でのパターン位置と μ が線形になる条件。

Fig. 3 The condition that locations of the patterns on the image plane of the projector become proportional to μ .

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。

4.3 デブルーイン系列を用いた精度向上

前節で線型連立方程式から、検出された曲線を含むパターン平面の 3 次元位置を一意に決定する方法について述べた。しかし、実際には、画像処理における誤差の影響で誤った線およびグリッドポイントが検出された場合、得られる解に誤差が生じることが生じる。そこで提案手法では、デブルーイン系列によって曲線に付けられた周期的な線 ID を利用して、解の誤差を修正する。

本論文ではカメラとプロジェクタは校正済みであると仮定しているため、プロジェクターから投影されるパターン平面のパラメータと、それぞれの平面のデブルーイン系列の線 ID は既知である。このとき、可能な解はこれらの平面に対して面の位置と線 ID が一致するものに限られる。これを利用して解の修正を行う。

具体的には、前節で得られた検出された曲線についての解の周辺で、投影パターンの ID が一致するものと対応させ、各交点の条件である式 (5) が成立しているかどうかを調べる。この条件は、実際には 2 枚の平面の交線をカメラに投影したものと、検出されたグリッドポイントとの画像上での距離が 0 であることを表す。そこで、これらの距離を各グリッドポイントについて求め、それらの二乗和を求め、それが小さい解を選べば良い。

異なるグリッドと線の間距離の最小化のみであれば、真値以外の場所でも値が小さくなるケースの発生することが考えられるものの、提案手法では、線形解法で残る不定性の解消にのみ ID を用いるため、そのような組み合わせは起こりにくいと考えられ、実際に実験においてそのようなケースの発生することは無かった。

5. 実験

実験では、図 4 に示すようにカメラと 2 台のプロジェクタを配置し計測を行った。各装置の配置は観測対象によって毎回調整を行い、人物の計測においては、カメラ・プロジェクタの間隔は約 1m、相対角は約 25 度とした。カメラの解像度は 1280x960 ピクセルでフレームレートは 15FPS、プロジェクタの解像度は 1024x768 ピクセルである。



図4 実験システム.

Fig. 4 Experimental system.

5.1 隣接情報および線 ID を用いた解の精度向上の評価

隣接情報および線 ID を用いて形状復元を行う効果について、次の3つの条件で立方体を観測し、3次元復元結果を比較した。

(方法 A):グリッドポイントの拘束のみの利用

(方法 B):グリッドポイントと隣接情報の拘束の利用

(方法 C):グリッドポイントと隣接情報の拘束に加え、線 ID を用いた解修正の利用

復元した点データを2つの平面に当てはめ、面当てはめの二乗平均平方根誤差 (root mean square error, RMSE) と2面間の角度を評価した。実験環境においてカメラから観測対象までの距離は 1.6m であった。

入力画像とプロジェクタの配置を図5に示す。立方体の2面を3次元形状復元した結果を図6に示し、平面間の角度および平面当てはめにおける RMS 誤差を表1に示す。これらの結果より、2面間の角度は、隣接情報(方法 B)、線 ID (方法 C) を使うことにより、90度に近づくため、形状の精度が改善されていることが分かる。グレイコードを使った時間エンコード法と比較すると、方法 C では、線 ID を用いた対応付けによって、正しい対応が得られたため線検出による誤差を除き、グレイコード法と同じ結果が得られた。

3次元形状復元結果を平面に当てはめた際の RMS 誤差は追加情報を与える毎に大きくなった。これは以下の理由により、自然な結果である。追加情報がない場合には縦線と横線それぞれを復元すると、交点においてその間の距離を最小化する最適化のため、縦線と横線のずれが小さくなり、結果として平面当てはめ時の RMS 誤差は小さくなる。逆に隣接関係や線 ID の拘束を追加する場合、縦線と横線のずれが大きくなり、平面当てはめ時の誤差が大きくなる。これは、実際のシステムにおいては、画面全体にわたりサブピクセル以下の精度で校正を行うことが困難なためである。

次に、図7に示したプロジェクタの配置を用いて、2つのペンシルの軸どうしの距離が短い場合について評価を行った。同様に立方体の計測を行い、3次元形状復元した結果を2個の平面に当てはめ、面間の角度および当てはめ時の RMS 誤差を表2に示す。カメラと観測対象間の距離は 3.7m であった。この条件の下では、方法 A はランク落ちにより失敗したが、方法 B, C では、隣接情報による拘束を用いることで3次元形状復元が可能と

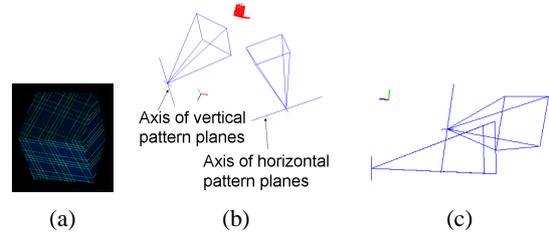


図5 精度向上の評価実験のセットアップ: (a) 入力画像, (b) プロジェクタの配置の上面図, (c) 側面図. (b),(c)において、カメラ座標の x,y,z 座標軸が、それぞれ R,G,B 各色の線分で表されている。

Fig. 5 Configuration of experiments for evaluation of accuracy improvement: (a) the source image, (b),(c) positions of the projectors. (b) is viewed from the top and (c) is from the side. In (b) and (c), the x,y and z-axis of the camera coordinates are indicated by R,G and B-colored line segments, respectively.

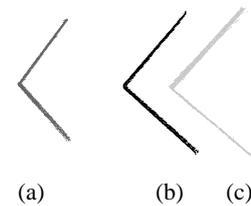


図6 3つの手法による復元結果を同じ座標系に表示: (a) 方法 A, (b) 方法 B, (c) 方法 C. 方法 A,B,C の結果はそれぞれ、濃灰色, 薄灰色, 黒で表記. 方法 C の結果はグレイコード法による結果と一致し、用いた校正精度の元で最も正確な結果が得られた。

Fig. 6 Reconstructed shape of each method in the common coordinate system: (a) method A, (b) method B, and (c) method C. The result of method A,B and C are shown by points of dark gray, light gray, and black, respectively. The result of method C becomes the same as the gray code measurement, which is correct up to calibration accuracy.

表1 隣接情報と線 ID の利用による精度向上の評価

Table 1 Evaluation of accuracy improvement by using adjacency information and de Bruijn sequence.

Evaluation values	Methods		
	A	B	C
Angle between 2 faces(degrees)	102.6	87.5	89.2
Deviation from gray-code measurement(mm)	225.8	96.5	the same
RMSE of points from fit planes(mm)	0.46	0.75	2.46

なることが示された。

5.2 小物体の形状復元

次に、1プロジェクタのみを用いる従来法によるワンショット形状復元 [10] との比較を行った。従来法では線形解法で残っていた1自由度を決定するために1次元探索が必要であったが、提案手法では必要ないため、[10] と比べて密なパターンが利用できる。その利点は細い指などの細かな形状の復元が容易になることである。図8は

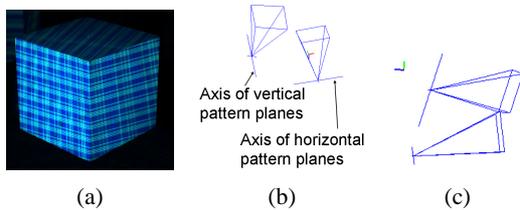


図7 2つのペンシルの軸どうしの距離が短い場合に対する評価実験: (a) 入力画像, (b) プロジェクタの配置, 上面図. (c) 側面図. カメラ座標の座標軸については図5と同様.

Fig. 7 Configuration of experiments for a small axes distance condition: (a) the source image, (b),(c) positions of the projectors. (b) is from the top and (c) is from the side. The camera coordinates are indicated similarly with Fig. 5.

表2 隣接情報と線IDの利用による精度向上の評価(2つのペンシルの軸どうしの距離が短い場合)

Table 2 Evaluation of accuracy improvement by using adjacency information and de Bruijn sequence for a small axes distance condition.

Evaluation values	Methods		
	A	B	C
Angle between 2 faces(degrees)	fail	89.9	89.0
Deviation from gray-code measurement(mm)	fail	70.1	the same
RMSE of points from fit planes(mm)	fail	1.46	2.47

両手法による結果の比較である. 上段は入力画像, 中段は線検出によって得られたグリッドグラフ, 下段は3次元形状復元結果である. 従来法ではパターン不足から指が欠けているのに対し, 提案手法では, 指が欠けることなく形状復元できていることが分かる.

5.3 人体の密な形状計測

最後に, 動いている人物の上半身を計測した. 図9は, 複数のポーズについての形状復元結果である. 図において, 列(a)は入力画像であり, 線検出処理によって, 線検出およびラインIDを決定した結果が列(b)である. 各線の色によってラインIDを表している. 列(c)は線検出結果を用いた形状復元結果の結果である. 脇腹や肩といったいくつかの部分では, 片方のプロジェクタから死角になっており, 縦あるいは横のパターンしか投影されていない部分があるが, そのパターンが死角になっていない部分とつながることにより, 形状復元された箇所が幾つかあった. 図中の赤い曲線で示された領域はその1例で, 縦パターンが投影されていない入力から復元されている. これは, 複数のプロジェクタを用いる利点の1つと言える.

6. おわりに

本論文では, 動く物体の形状を, 密に計測するための, 複数プロジェクタと1つのカメラを用いたシステムを提案した. このために, それぞれのプロジェクタから2色の線で構成される平行なパターンを投影する手法を提案

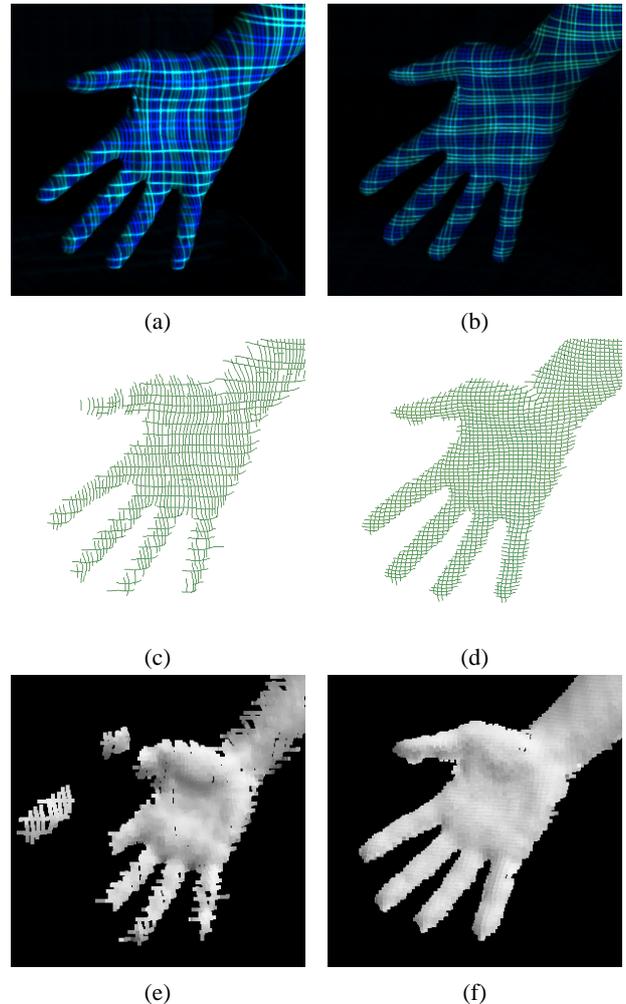


図8 従来法[10](左)と提案手法(右)による手の形状復元結果:(上段)入力画像,(中段)線検出結果,(下段)復元結果.

Fig. 8 A hand reconstructed by [10] (left) and the proposed method (right): (top row) the input images, (middle) the detected patterns, and (bottom) the reconstructed shapes.

した. このパターンを用いると, その交点の情報を用いた線形解法によって一意に解を求めることができる. さらに解の精度を向上させるため, 検出した線の隣接関係を用いた拘束, およびカラーコードによって得られる線IDを用いたマッチングを加える方法を提案した. 実験においては, 2つのプロジェクタと1つのカメラから構成されるシステムを構築し, 静止物体を計測する実験によって正しくプロジェクタとカメラ間で線の対応が得られることを示した. さらに, 動いている人物の撮影を行い, 3次元形状復元ができることを示した. 今後の研究としては, プロジェクタとカメラの台数を増やし, 全体形状を取得することが挙げられる.

文 献

- [1] J. Battle, 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.
- [2] O. Faugeras. *Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint*. The MIT press, Cambridge, MA, 1993.

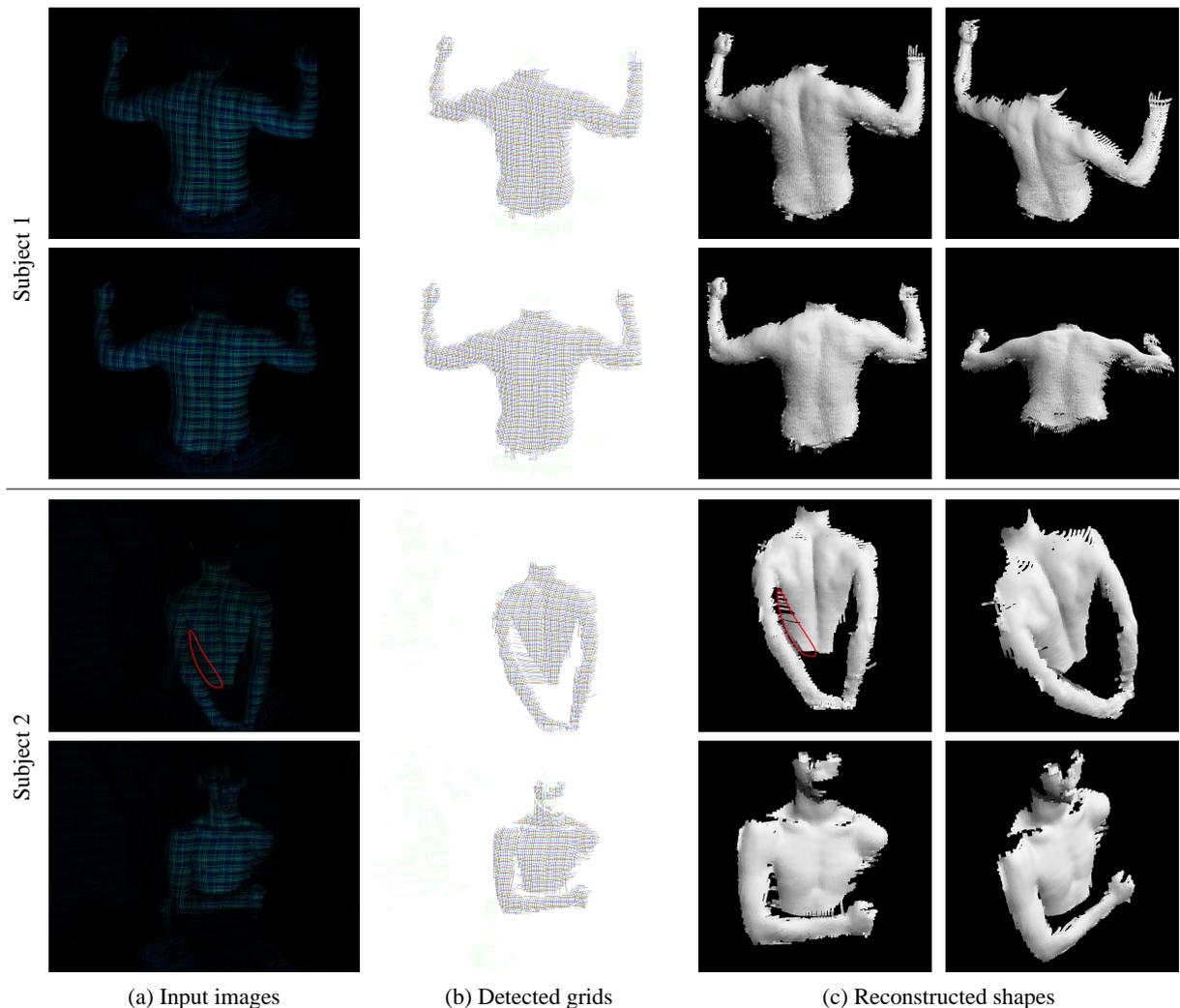


図9 動く人体の再構成: (a) 入力画像, (b) 検出されたパターン, (c) 再構成結果.

Fig. 9 Reconstruction of moving human bodies: (a) input images, (b) detected patterns, and (c) reconstructed shapes.

- [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] Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Ryusuke Sagawa, and Yasushi Yagi. Shape from grid pattern based on coplanarity constraints for one-shot scanning. *IPSIJ Transaction on Computer Vision and Applications*, 1:139–157, 2009.
- [5] 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.
- [6] Changsoo Je, Sang Wook Lee, and Rae-Hong Park. High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging. In *ECCV*, volume 1, pages 95–107, 2004.
- [7] Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa, , Ryusuke Sagawa, and Yasushi Yagi. Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern. In *CVPR*, pages 1–8, June 23–28 2008.
- [8] Thomas P. Koninckx and Luc Van Gool. Real-time range acquisition by adaptive structured light. *IEEE Trans. on PAMI*, 28(3):432–445, March 2006.
- [9] S.G. Narasimhan, S.J. 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.
- [10] Ryusuke Sagawa, Yuichi Ota, Yasushi Yagi, Ryo Furukawa, Naoki Asada, and Hiroshi Kawasaki. Dense 3d reconstruction method using a single pattern for fast moving object. In *ICCV*, 2009.
- [11] Joaquim Salvi, Joan Batlle, and El Mustapha Mouaddib. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement. *Pattern Recognition*, 19(11):1055–1065, 1998.
- [12] Ali Osman Ulusoy, Fatih Calakli, and Gabriel Taubin. One-shot scanning using de bruijn spaced grids. In *The 7th IEEE Conf. 3DIM*, 2009.
- [13] P. Vuylsteke and A. Oosterlinck. Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 12(2):148–164, 1990.
- [14] T. Weise, B. Leibe, and L. Van Gool. Fast 3d scanning with automatic motion compensation. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'07)*, pages 1–8, June 2007.
- [15] Mark Young, Erik Beeson, James Davis, Szymon Rusinkiewicz, and Ravi Ramamoorthi. Viewpoint-coded structured light. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2007.
- [16] 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.