

複数プロジェクタを用いた線形解法による ワンショットアクティブ形状計測

古川 亮^{†1} 川崎 洋^{†2} 佐川 立昌^{†3}
阪下 和弘^{†4} 大田 雄也^{†4} 頭師 陵太^{†1}
八木 康史^{†4} 浅田 尚紀^{†1}

本論文では、プロジェクタ-カメラシステムを用いて、動きのある対象の形状を高密度かつ高フレームレートに計測するシステムを提案する。非常に速い動きがあるシーンを高密度に計測するためには、時系列にパターンを切り替える手法は向かず、ワンショットでの計測が望ましい。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の交点を用いたワンショット形状計測法を提案されてきた。しかしこれまで提案された手法では、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。そこで本論文では、追加情報なしに交点のみから一意解を得る手法を提案する。提案手法は、1つのカメラと2つのプロジェクタからなり、それぞれのプロジェクタ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。実験では、実際にシステムを構築し、動物体の高密度な形状をビデオレートで計測することに成功した。

Linear Solution for Oneshot Active 3D Reconstruction Using Multiple Projectors

RYO FURUKAWA,^{†1} HIROSHI KAWASAKI,^{†2}
RYUSUKE SAGAWA,^{†3} KAZUHIRO SAKASHITA,^{†4}
YUYA OHTA,^{†4} RYOTA ZUSHI,^{†1} YASUSHI YAGI^{†4}
and NAOKI ASADA^{†1}

Development of active 3D scanning system that can capture fast-moving dy-

namic objects is an important research topic for many applications. To capture fast-moving objects, a oneshot scanning method that uses a single static image is preferable than those that uses multiple patterns. Recently, oneshot scanning methods that use intersection points of grid patterns have been proposed. 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. In the experiment, we built a system which consists of two projectors and a single camera, i.e., a minimum configuration of the method, and successfully captured a dense shape of fast moving object with video rate.

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。たとえば、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

^{†1} 広島市立大学
Hiroshima City University

^{†2} 埼玉大学
Saitama University

^{†3} 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{†4} 大阪大学
Osaka University

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、同期をとることが難しい。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 1 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なため、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、上記の問題をすべ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^{4),7),10),12)}。SFG では、共面性拘束原理のみの解には 1 自由度の不定性が残るため、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でき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、過去のワンショットスキャンでは難しかった、細い、あるいは小さな領域の形状復元が可能となる。提案手法のもう 1 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、ということがあげられる。単純に過去手法^{4),7),10),12)}を 2 台以上のプロジェクタに適用しようとしても、それぞれのプロジェクタがグリッドパターンを投影するため、それらが干渉しあい、ライン検出は非常に困難となる。

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あげる 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。1 つは検出された線の隣接情報であり、もう 1 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。

本論文の構成は以下のとおりである。次章では関連研究について述べ、3 章では、提案手法の概要について説明する。4 章において 3 次元形状復元の理論とアルゴリズムについて説明し、5 章で実験結果と評価を示す。最後に結果について議論し結論を述べる。

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^{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ゆっくりである必要がある。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^{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誤差が大きくなったりする、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^{4),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が

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 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決定する必要があった。その結果、形状の復元密度が低くなったり、細かい部分が復元されなくなったりするという問題が生じていた。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を分離・検出にかかる画像処理が安定化し、さらに線形解法において一意に決定できる。

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を投影されるため、カメラ・プロジェクタ間で同期の必要がない。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 つ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 つ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も形状復元可能であるが、精度と安定性の向上のためにカラーパター

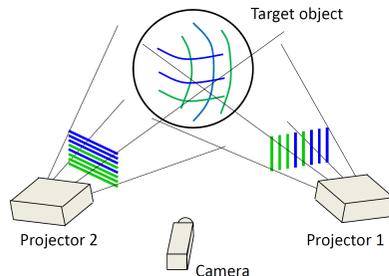


図 1 提案手法の最小構成は 2 台のプロジェクタと 1 台のカメラとなる。それぞれのプロジェクタから縦線と横線を投影し、カメラはそれらの線の交点を観測する

Fig.1 The minimum setup of the proposed approach consist of two projectors and a camera. The two projectors project vertical and horizontal lines patterns, respectively, and the camera observes the intersection points of the lines.

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⁾。色の選択に関しては、物体が反射する色を選択することになるが、後述の実験では、プロジェクタの RGB のうち、青・緑のプレーンを用いてカラーパターンを生成した。たかだか 2 色の分離ができれば十分であるため、カメラおよびプロジェクタの RGB のスペクトルに相互に干渉がある場合でも、安定に色を見分けることが可能である。

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。グリッドグラフは交点をグラフノードとして、検出された線上で隣接した交点を連結したグラフ構造である。すなわち、パターンによって得られるプロジェクタ座標系とカメラ座標系間の情報が、このグリッドグラフによって表されており、この情報を用いて、次章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 複数の平面束による形状復元

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、平行な線の画像を、パターンとして投影する場合を考える。プロジェクタから投影されるパターン上の光は、プロジェクタの光学中心と、画像面上の平行線を含む平面を通過する。このような、直線状パターンの光が通過する平面を、パターン平面と呼ぶことにする。

1つのプロジェクタから投影されるすべてのパターン平面は、画像面上の平行線と平行であり、かつプロジェクタの光学中心を通るような1つの直線を共有する。つまり、これらは、この直線を軸とする平面束（同一の直線を共有する面の集合）の要素である。平面束に属するすべての平面は、軸を含む任意の平面を、軸を中心に回転することで生成することができ、平面束に属する平面の自由度は1である。このことから、校正済みのプロジェクタから投影されるパターン平面は、1つの直線（この直線はプロジェクタの外部パラメータから計算可能である）を共有する平面束の要素として、1個のパラメータで表現できる。後に述べるように、適当な1パラメータ表現を利用することで、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が得られる。

これまで文献4), 7), 10), 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。このとき、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), 7), 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なっていた。また、文献12)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手法を提案する。複数のプロジェクタは、図2に示すように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配置する。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できる。

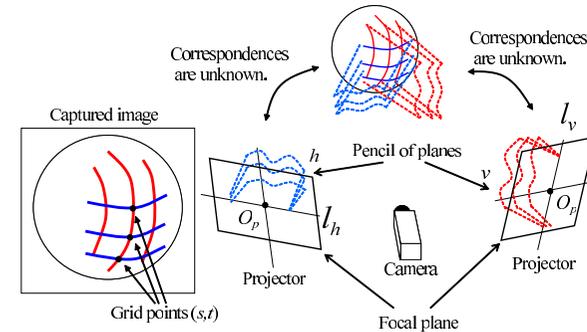


図2 縦パターン平面が通過する軸と、横パターン平面が通過する軸がねじれの位置になるように2つのプロジェクタを配置する

Fig. 2 Two projectors are placed so that the axes of the pencil of planes are configured to be skew.

仮定として、パターン平面は、カメラの光学中心を含まないとする。これは、カメラの光学中心を含むようなパターン平面では、光切断法による3次元計測を行うことができず、3次元計測に寄与しないためである。このような仮定の下で、カメラ座標系で表した縦パターン平面 v を

$$v_1x + v_2y + v_3z + 1 = \mathbf{v}^\top \mathbf{x} + 1 = 0, \quad (1)$$

で表す。このとき、3次元ベクトル $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)^\top$ を、縦パターン平面 v のパラメータベクトルと呼ぶことにする。平面 v のパラメータベクトル \mathbf{v} は、 v の法線ベクトルでもある（正規化はされていない）。

以後の議論では、多くのパラメータベクトルを扱う。パラメータベクトル \mathbf{p} で表される平面について、別の記号を定義する煩雑を避けるために、記号 \mathbf{p} で平面そのものを表すことができるとする。また、パラメータベクトルは位置ベクトルではないが、これを3次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^3 のベクトルと考え、距離や位置の概念が定義されているものとする。また、平面とそのパラメータベクトルの同一視は、パラメータベクトルの空間中の点と、対応するパターン平面とを同一視するためにも利用する。また、プロジェクタの画像面上のパターンと、そのパターンから生じるパターン平面には、1対1の対応があるので、これらも同一視できるとする。

縦パターン平面の軸を l_v とする。すなわち、すべての縦パターン平面は、プロジェクタの光学中心を通る直線 l_v を含む。 \mathbf{b}_v を、縦パターンを投影するプロジェクタの光学中心

とし、単位方向ベクトル \mathbf{d}_v を、プロジェクタの画像平面上での縦パターンの直線方向をカメラ座標系で表したものとす。このとき、縦パターン平面の平面束の軸は、 \mathbf{b}_v を含み、 \mathbf{d}_v に平行である。 \mathbf{v} はパターン平面 v の法線ベクトルであり、 v は直線 l_v を含むことから、 $\mathbf{v} \perp \mathbf{d}_v$ である。よって \mathbf{v} は

$$\mathbf{v}^\top \mathbf{d}_v = 0 \quad (2)$$

を満たす。また、 v は \mathbf{b}_v を含むので、式 (1) から、 \mathbf{v} は

$$\mathbf{v}^\top \mathbf{b}_v + 1 = 0 \quad (3)$$

を満たす。式 (2), (3) を、3次元ベクトル \mathbf{v} に関する方程式と考えると、これらは \mathbf{v} に関する線型拘束式なので、 \mathbf{v} の解は1次元ベクトル空間となる。よって、 \mathbf{v} を、パラメータ μ を利用して、

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mu \mathbf{v}_d \quad (4)$$

の形式で表現できる。ただし、 \mathbf{v}_0 は1次元ベクトル空間の任意の要素、 \mathbf{v}_d は1次元ベクトル空間の単位方向ベクトルとする。

式 (2) および (3) に式 (4) を代入したとき、 μ の値にかかわらず等式が成立することに注意すると、 $\mathbf{v}_0^\top \mathbf{d}_v = 0$ 、 $\mathbf{v}_0^\top \mathbf{b}_v = -1$ 、 $\mathbf{v}_d^\top \mathbf{d}_v = 0$ 、 $\mathbf{v}_d^\top \mathbf{b}_v = 0$ が成立することが分かる。 $\mathbf{v}_d^\top \mathbf{d}_v = 0$ 、 $\mathbf{v}_d^\top \mathbf{b}_v = 0$ の条件を満たす \mathbf{v}_d は、外積を用いて $\mathbf{v}_d \equiv \mathbf{d}_v \times \mathbf{b}_v$ で得られる。また、 $\mathbf{v}_0^\top \mathbf{d}_v = 0$ 、 $\mathbf{v}_0^\top \mathbf{b}_v = -1$ となるような \mathbf{v}_0 は、

$$\mathbf{v}_0 = -\frac{\mathbf{b}_v - (\mathbf{b}_v^\top \mathbf{d}_v) \mathbf{d}_v}{\|\mathbf{b}_v\|^2 - (\mathbf{b}_v^\top \mathbf{d}_v)^2} \quad (5)$$

によって得ることができる ($\|\mathbf{d}_v\| = 1$ であることに注意)。

式 (4) は、縦パターン平面 v の、1パラメータ表現である。上記の \mathbf{v}_0 のとり方は一例であり、平面束に属する任意の平面のパラメータを \mathbf{v}_0 としてよい。

横パターン平面のパラメータベクトルも、同様に、

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0 + \rho \mathbf{h}_d \quad (6)$$

と表されるとする。ただし、 \mathbf{b}_h を、横パターンを投影するプロジェクタの光学中心とし、 \mathbf{d}_h を、プロジェクタの画像平面上での横パターンの方向ベクトルとしたとき、 $\mathbf{h}_0 \equiv \frac{\mathbf{b}_h - (\mathbf{b}_h^\top \mathbf{d}_h) \mathbf{d}_h}{\|\mathbf{b}_h\|^2 - (\mathbf{b}_h^\top \mathbf{d}_h)^2}$ 、 $\mathbf{h}_d \equiv \mathbf{d}_h \times \mathbf{b}_h$ である。上記の \mathbf{h}_0 による表現も一例であり、平面束の任意の平面のパラメータベクトルを \mathbf{h}_0 としてよい。

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。このとき、 v, h のパラメータベクトルを \mathbf{v}, \mathbf{h} とし、 $\mathbf{u} = (s, t, -1)^\top$ とすると、文献 4) より、

$$\mathbf{u}^\top (\mathbf{v} - \mathbf{h}) = 0 \quad (7)$$

である。式 (4), (6) を代入して、

$$\mathbf{u}^\top (\mathbf{v}_0 + \mu \mathbf{v}_d - \mathbf{h}_0 - \rho \mathbf{h}_d) = (\mathbf{u}^\top \mathbf{v}_d) \mu - (\mathbf{u}^\top \mathbf{h}_d) \rho + \mathbf{u}^\top (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0) = 0 \quad (8)$$

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できる。 i 番目の縦平面について、式 (4) 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 (6) 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。このとき、

$$\begin{aligned} A_k &\equiv \mathbf{u}_k^\top \mathbf{v}_d, \quad B_k \equiv \mathbf{u}_k^\top \mathbf{h}_d, \quad C_k \equiv \mathbf{u}_k^\top (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0), \\ A_k \mu_{\alpha(k)} - B_k \rho_{\beta(k)} &= -C_k, \end{aligned} \quad (9)$$

が $k = 1, \dots, K$ について成立する。

式 (9) 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、3.2 節で作成したグリッドグラフから、連結な部分グラフを抽出し、部分グラフごとにグリッドポイントから連立方程式

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (10)$$

を生成し、それぞれ解を求める。ただし \mathbf{x} は、部分グラフ中の縦パターンおよ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。

ここで、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、Faugeras²⁾ に倣ってプロジェクタの焦点面 (focal plane) と呼ぶことにする。

1台のプロジェクタを用いる従来法^{4),7),10),12)} の場合には、縦および横のパターン平面が属する平面束は、同一のプロジェクタから投影される。このとき、このプロジェクタの焦点面は、縦パターンの平面束と、横パターンの平面束の両方に含まれる。よって、プロジェク

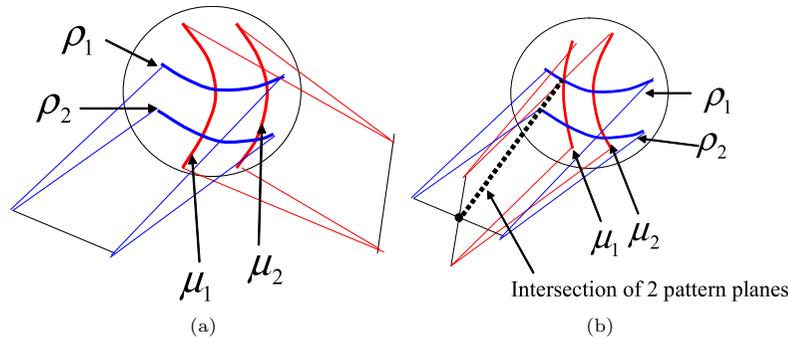


図3 4個のパターン平面の配置: (a) 提案手法の場合, (b) 従来法^{4),7),10)}の場合

Fig. 3 Positions of 4 pattern planes: (a) the case of the proposed method, (b) the case of the previous methods^{4),7),10)}.

タの焦点面がカメラ中心を含まない場合, v_0 と h_0 を焦点面のパラメータベクトルにとることができる. このとき, 式 (9) の定数項 $-C_k$ はつねに 0 となる. このため, 得られる連立方程式は, 行列表現で $Ax = 0$ という形となり, 解 x には定数倍の不定性が生じる. プロジェクタの焦点面がカメラ中心を含む場合にも方程式は不定となる. その理由を, 付録 A.1 に述べる.

一方, 本論文のように 2 個のプロジェクタを利用し, 2 個の平面束の軸をねじれの位置に置く場合には, これらの平面束に共通する平面が存在しない. よって, 前段落のように v_0 と h_0 を同一平面にすることはできず, 式 (9) の定数項 $-C_k$ をつねに 0 とするようにパラメータをとることはできない. このため, 連立方程式は, 一般に $Ax = b \neq 0$ という形となり, 不定方程式にはならず, 唯一の解を持つ.

上記の考察は, 2 個のプロジェクタを利用した場合に解が唯一になることの厳密な証明とはいえないが, 図 3 のような平面 4 個の場合についてのより厳密な証明を付録 A.2 に述べる. この証明から, 観測パターンが図 3 の配置になる場合に唯一解が存在することが分かる. またさらに, 観測パターンのグリッドグラフが, 図 3 の配置のグリッドグラフを部分グラフとして含む場合, 部分グラフに対応する 4 平面が唯一に決まり, それらに連結する平面も, 交点の条件 (9) から決定できることから, 全体として唯一解が存在することを証明できる. 図 3 の配置は, 通常の観測のほとんどに含まれるので, そのような場合に上記の証明を適用できる.

図 3 の配置を含まない場合には, 2 個のプロジェクタを利用して解が不定性を持つ場合がある. たとえば, 得られた縦横のグリッド線の接続をグラフと考えたとき, 全体としてどこにも閉路 (ループ) がない連結なグラフとなる場合には, 1 つの平面を任意に定めてから, 残りの平面を条件 (9) で順次決めることができるので, 1 次元の不定性が残る.

4.2 パターンの隣接性の利用と, プロジェクタとカメラの配置

前節では, 2 個のプロジェクタを利用することで, 線形方程式から唯一解が得られることを述べた. ただし, 実際には, 連立方程式 (10) がランク落ちにならなくても, ランク落ちに近い状態になるだけで得られる解の誤差は大きくなる. たとえば, 式 (9) から, すべての交点が互いに近い場合, つまり $u_1 \approx u_2 \approx \dots \approx u_K$ の場合, 連立方程式はランク落ちに近い状態になることが分かる. これは, 観測された交点の分布領域が狭い場合, 解が不安定になることを意味する. 解を安定して求めるためには, 交点以外の情報を利用することが考えられる.

直線パターンどうし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できる. 特に, 隣接する直線パターンの μ の差が一定値の場合は, 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 は隣接する直線パターンに関して一定間隔で変化するという線形関係があると仮定し, 以下の議論を進める. これは投影するパターンの間隔を調整するか, 次段落以後で述べるように, プロジェクタの配置を工夫することでつねに成立させることができるため, 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,

$$\mu_{\gamma(l)} - \mu_{\delta(l)} = D, \tag{11}$$

となる. D は定数であり, v_0, v_d のとり方と, $\mu_{\gamma(l)}, \mu_{\delta(l)}$ の順序関係からあらかじめ決定できる.

縦パターンを投影するプロジェクタにおいて, 画像面上における縦パターンの x 座標と, 式 (4) における μ は, 1 次元射影変換の関係となり, 一般に線型関係にはならない. このため, プロジェクタの画像上の縦パターンの間隔が一定であっても, 対応するパラメータ μ の間隔は一定にならない. 逆に, 縦パターン平面の集合について, 対応する μ が一定間隔になるようにするためには, プロジェクタ・カメラ間の剛体変換に従って, 画像面上での縦パターンの間隔を調整する必要がある. この場合, プロジェクタとカメラの位置関係を変更するたび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 1 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

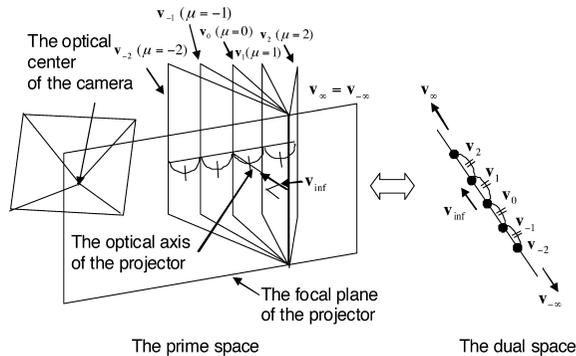


図 4 プロジェクタの画像面上でのパターン位置と μ が線形になる条件

Fig. 4 The condition that locations of the patterns on the image plane of the projector become proportional to μ .

線型となるような配置が考えるられる．図 4 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パラメータベクトルを， v_0 とする．このとき，プロジェクタの画像面における縦パターン v の位置の x 座標を a とすると，対応するパターン平面のパラメータベクトルは， a に対して線型な関係となることを示すことができる (付録 A.3)．このとき，式 (4) から， a と，パターン平面のパラメータ μ が線型の関係となる．よって，画像面に等間隔の平行線を配置することで，各縦パターン平面のパラメータ μ は，数直線上で等間隔に並んだ集合となる．

本論文ではプロジェクタとカメラが，上記の条件を満たすと仮定する．この条件は，プロジェクタの校正結果として得られる外部パラメータにおいて，カメラ座標系からプロジェクタ座標への変換式 (19) の並進ベクトル t_{cp} の z 成分が 0 になることに等しい．よって，この値を目安にしてプロジェクタの位置を調整することで，システムが条件を満たすようにすることができる．

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．

表 1 交点情報，隣接情報を用いた線形線形解法の縮退に関する場合

Table 1 Cases for degeneration of linear solution using information of intersection points and adjacency.

	1 projector	2 projectors
Linear solution only from cross points	1P	2P
Linear solution from both cross points and adjacency	1PAd	2PAd

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 (7) 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よい．

4.4 線形解法の縮退の分析

提案手法では，交点情報による線形拘束式と，パラメータベクトルどうしが等間隔に並ぶようなパターン平面を用いて得られた線形拘束式による線形解法を提案した (プロジェクタ 1 台のみを用いる従来法^{4),7),10),12)} の場合には，不定性が生じるため線形解法のみで一意に解を決定することは不可能であった)．これらの線形拘束式は，プロジェクタ 1 台のみを用いる場合にも，プロジェクタ 2 台を用いる場合にも，利用可能である．ただし，パターン平面の配置によっては，ランク落ちによる縮退が生じ，どのようなパターンが観測されても，解を一意に定められなくなる場合がある．本節では，プロジェクタの配置によって，線形解法の縮退が生じる条件を述べる．

表 1 にあげた 4 個の場合 (以下，プロジェクタ数と，隣接性 (adjacency) の有無によって，1P, 2P, 1PAd, 2PAd の略称を使用) について，縮退が起こる条件は，以下のとおりである．ただし，隣接関係を利用する条件 1PAd, 2PAd では，縦パターン，横パターンは，どちらも図 4 のように，パラメータ空間中で等間隔に並んでいることを仮定する．

1P つねに縮退する．

2P 縦，横のパターン平面の平面束の軸が交わる場合に縮退する．

1PAd, 2PAd 縦パターン平面の平面束の軸とカメラ中心を含む平面 (図 4 の v_{∞} に相

当)と、横パターン平面の平面束の軸とカメラ中心を含む平面が一致する場合に縮退する。

以下、個別の場合について説明する。プロジェクタ 1 台のみを用いて、隣接情報を利用しない場合 (1P) には、ランク落ちが生じるため、線型解法のみによる 3 次元復元は失敗する^{4),7),10),12)}。

プロジェクタが 1 台で、パターンの隣接情報を利用する場合 (1PAd) を考える。縦、横ともに、均一な間隔の平行線の画像をプロジェクタで照射する場合、パラメータベクトルどうしの間隔を一定にするためには、焦点面上にカメラの光学中心を置く必要がある。このとき、縦パターン平面の平面束の軸とカメラの光学中心を含む平面と、横パターン平面の平面束の軸とカメラの光学中心を含む平面とは、どちらも焦点面に一致するため、縮退の条件が成立する。このため、1PAd の場合では、縦、横ともに均一な間隔の平行線を利用して線形解法を適用することはできない。1PAd の場合であっても、平行でない線の画像を利用して、縮退条件が生じないようにすることは可能である。

2 台のプロジェクタを用いて、交点情報のみによる線型方程式を利用する場合 (2P)、縦および横パターン平面の平面束の軸が交わらない (ねじれの位置にある) 場合には、一般に復元が可能である。平面束の軸が交わる場合には縮退が生じる。

2 台のプロジェクタで、交点情報と隣接情報を両方用いた場合 (2PAd) も、一般に 3 次元復元が可能である。この場合、2 つの軸が交わる場合でも、一般にはランク落ちにならず、3 次元復元が可能である。ただし、2 つの軸が交わり、かつこれらの軸を含む平面がカメラ中心を含む場合には、縮退条件が成立する。

上記のそれぞれの縮退条件は、完全に成立しなくても、それに「近い」状態であれば、方程式がランク落ちに近い状態になり、3 次元復元が失敗しやすい。たとえば、条件 P1 において、2 つの軸がねじれの位置にあっても、それら直線どうしの距離が小さければ、ランク落ちに近い状態になり、3 次元復元が失敗する。

5. 実験

実験では、図 5 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 $1,280 \times 960$ ピクセルでフレームレートは 15 FPS、プロジェクタの解像度は $1,024 \times 768$ ピクセルである。



図 5 1 台のカメラと 2 台のプロジェクタで構成された実験システム
Fig. 5 Experimental system with a camera and two projectors.

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 3 次元復元し結果を比較した。

(Method A): グリッドポイントから得られる拘束のみ

(Method B): グリッドポイントと隣接情報の拘束を利用

(Method C): グリッドポイントと隣接情報の拘束に加え、線 ID を用いた解の修正

立方体を観測し、3 次元形状復元した点データを 2 つの平面にフィッティングした。その際、フィッティング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。また、実験環境においてカメラから観測対象までの距離は 1.6 m であった。

入力画像とプロジェクタの配置を図 6 に示す。まず、この入力画像に対して線検出を行った結果が図 6 (d) および (e) である。各線の色は 8 つのライン ID を表している。縦横それぞれの線を分離して別々に検出できていることが分かる。これらの線から交点を計算し、交点座標の精度を評価した。観測対象は平面で構成されているため、ある線上の交点は直線上に並ぶ。同一直線上の交点を直線にフィッティングし、その誤差を交点座標の精度の評価基準とした。フィッティングされた直線からの各交点の距離の平均は 0.55 ピクセルであり、サブピクセル精度での交点位置の計算ができているといえる。

次にプロジェクタの配置に関しては、隣接性の条件を利用するために、カメラ位置はプロジェクタの焦点面に近くなるように、目視で調整した。事前の校正で得られた外部パラメータでは、縦パターンおよび横パターンを照射する各プロジェクタとカメラの距離は、それぞれ 0.999 m、0.978 m であり、焦点面からのずれはそれぞれ 0.035 m、0.033 m であった。今回、プロジェクタ位置は目視で調整し、そのまま利用したが、外部パラメータを目安にし

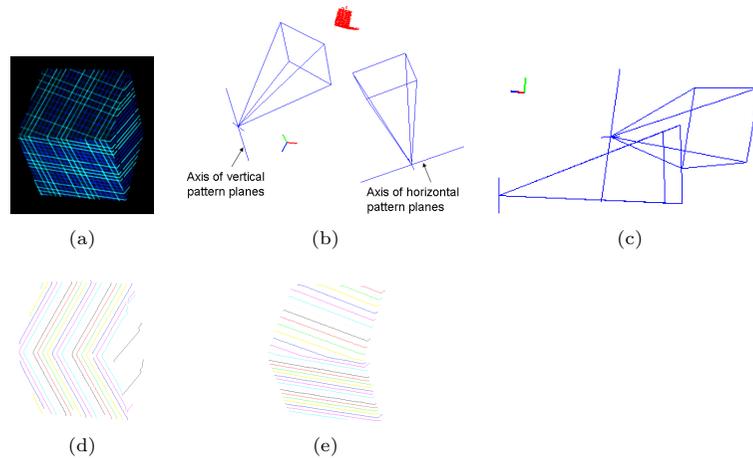


図 6 精度向上の評価実験のセットアップ: (a) 入力画像, (b) プロジェクタの配置の上面図, (c) 側面図, (d) 縦線の検出結果, (e) 横線の検出結果

Fig. 6 Configuration of experiments for evaluation of accuracy improvement: (a) the source image, (b), (c) positions of the projectors, (c) is viewed in the direction of the axis of the horizontal pattern planes, (d) and (e) are the results of line detection for vertical and horizontal lines, respectively.

てさらに調整すれば, 焦点面からのずれをさらに小さくすることが可能である.

立方体の 2 面を 3 次元形状復元した結果を図 7 に示し, 平面間の角度およびフィッティングにおける RMS 誤差を表 2 に示す. これらの結果より, 2 面間の角度は, 隣接情報 (Method B), 線 ID (Method 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, Method 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フィッティングした際の RMS 誤差は追加情報を与えるごとに大きくなった. これは以下の理由により, むしろ自然な結果といえる. 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, その間の距離を最小化する最適化のため, 隣接関係や線 ID の拘束を追加する場合よりも, 縦線と横線のずれが小さくなり, 結果として平面フィッティング時の RMS 誤差は小さくなる. 追加情報により縦線と横線がずれる主な原因としては, 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カメラ校正を

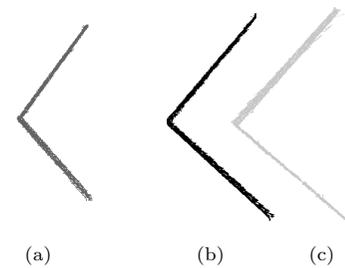


図 7 3 つの手法による復元結果を同じ座標系に表示: (a) グリッドポイントの拘束のみを用いた Method A による復元結果, (b) 隣接情報による拘束を加えた Method B による復元結果, (c) 隣接情報および線 ID を利用した Method C による復元結果, Method A, B, C の結果はそれぞれ, 濃灰色, 薄灰色, 黒で表されている. Method C の結果はグレイコード法による結果と一致し, 用いた校正精度のもとで最も正確な結果が得られた

Fig. 7 Reconstructed shape of each method in the common coordinate system: (a) the result of method A using only information of grid points viewed from direction of the edge between the faces, (b) the result of method B using adjacency information, and (c) the result of method C using de Bruijn sequence seen in the same way. The result of method A is shown by dark gray points, the result of method B is shown by light gray points, and the result of method C is shown by black points. In the result of method C, the position becomes the same as the gray code measurement, which is the correct up to the calibration accuracy.

表 2 隣接情報と線 ID の利用による精度向上の評価

Table 2 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
Debiasation from gray-code measurement (mm)	225.8	96.5	the same
RMSE of points from fit planes (mm)	0.46	0.75	2.46

行うことが現実には困難なため, ということがあげられる. 追加情報によって補正すると, カメラ校正時の誤差によって形状復元の拘束条件である共面性が失われ, 平面フィッティング時の誤差が大きくなったといえる.

次に, 図 8 に示したプロジェクタの配置を用いて, 2 つの平面束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の 2 面間の角度およびフィッティング時の RMS 誤差を表 3 に示す. カメラと観測対象間の距離は

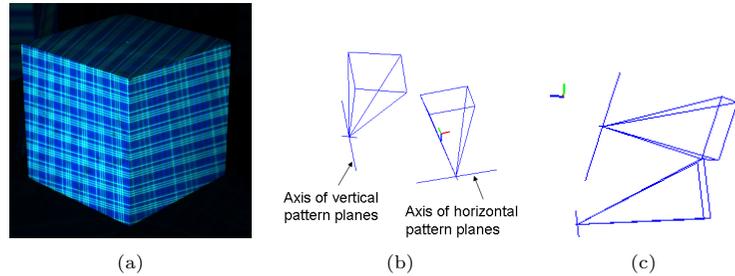


図 8 2つの平面束の軸どうしの距離が短い場合に対する評価実験：(a) 入力画像，(b) プロジェクタの配置，上面図 (c) 側面図
 Fig. 8 Configuration of experiments for a small axes distance condition: (a) the source image, (b), (c) positions of the projectors. (b) is viewed in the direction of the axis of the horizontal pattern planes.

表 3 隣接情報と線 ID の利用による精度向上の評価 (2つの平面束の軸どうしの距離が短い場合)
 Table 3 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
Debiatation from gray-code measurement (mm)	fail	70.1	the same
RMSE of points from fit planes (mm)	fail	1.46	2.47

3.7m であった。この条件の下では、Method A はランク落ちにより失敗したが、Method 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、文献 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 9 は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の不足から指が欠けているのに対し、提案手法で

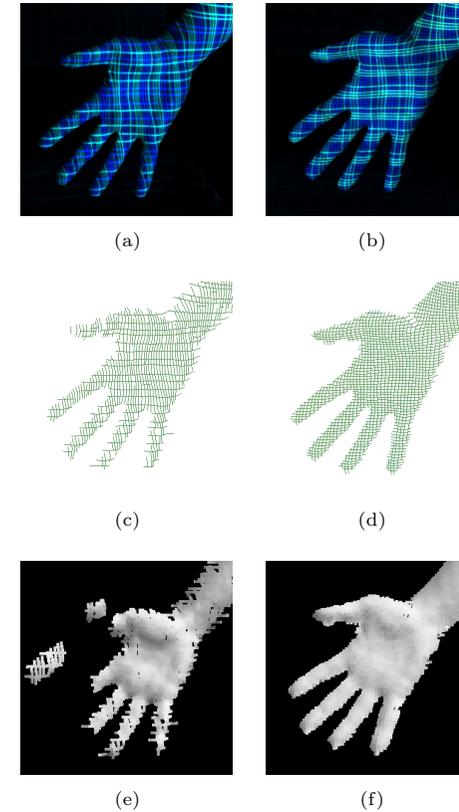


図 9 従来法¹⁰⁾ (左) と提案手法 (右) による手の形状復元結果：(上段) 入力画像，(中段) 線検出によって得られたグリッドグラフ，(下段) 3次元形状復元結果
 Fig. 9 A hand is reconstructed by¹⁰⁾ (left) and the proposed method (right). The top row is the input images, the middle row is the grid graph by line detection, and the bottom row is the reconstructed shape.

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。

形状復元に利用した交点数は、従来法では 891 点であったのに対し、提案手法では、2,394 点であった。したがって、約 2.7 倍の交点数、すなわち拘束式 (9) の数を用いて計算することになり、解を安定化することができる。また、復元結果の形状モデルは、従来法では

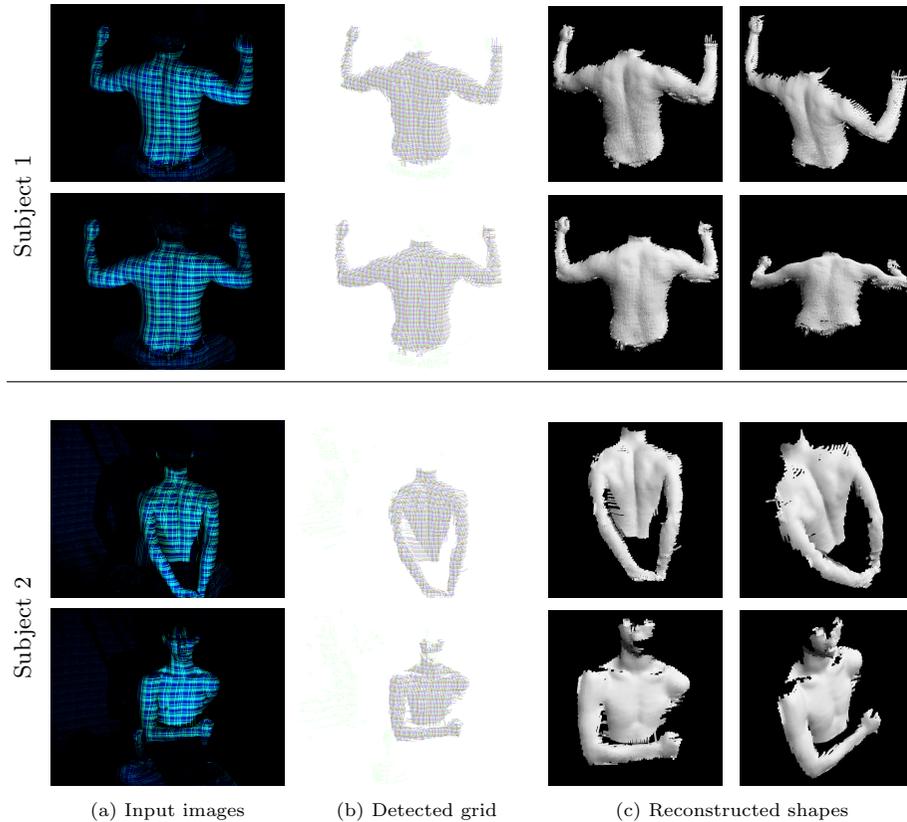


図 10 動く人体の復元: (a) 入力画像, (b) 検出されたグリッドパターン, (c) 再構成結果
 Fig. 10 Reconstruction of moving human bodies: (a) input images of different poses, (b) detected grid patterns and (c) reconstructed shapes for poses.

25,454 点, 提案手法では 37,676 点の 3 次元データ点から構成されている。これは提案手法が縦線, 横線のいずれも密なパターンを用いることができたためであり, 約 1.5 倍にサンプル密度を上げることができたといえる。

5.3 人体の密な形状計測

ここでは, 動いている人物の上半身を計測した。図 10 は, 複数のポーズについての形状復元結果である。カラム (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

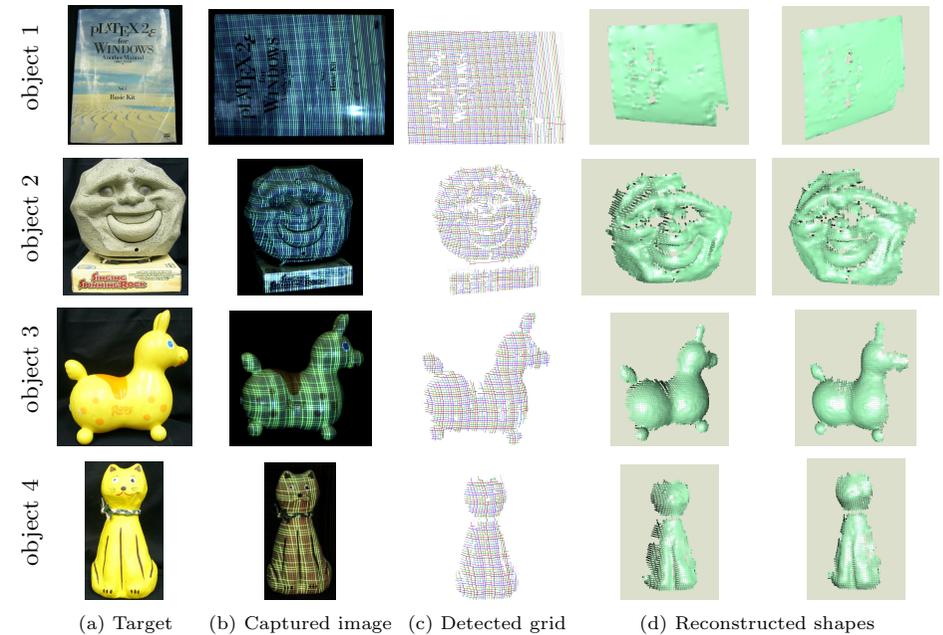


図 11 テクスチャのある物体の復元: (a) 対象物体, (b) 入力画像, (c) 検出されたグリッドパターン, (d) 再構成結果
 Fig. 11 Reconstruction of object with texture: (a) target object, (b) input images, (c) detected grid patterns and (d) reconstructed shapes.

ID を決定した結果がカラム (b) である。各線の色によってライン ID を表している。カラム (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。しかし, 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, 形状復元されていることが分かる。これは, 複数のプロジェクタを用いる本手法の利点の 1 つといえる。

5.4 テクスチャのある物体の形状復元

提案手法では少ない色 (2 色) しか使わないため, テクスチャ付きの物体の計測も安定して行える。そこで, 実際にテクスチャのある雑誌や人形などの計測実験を行った。図 11 に計測対象物体とラインの検出結果および形状復元結果を示す。テクスチャの中で, 色の濃い

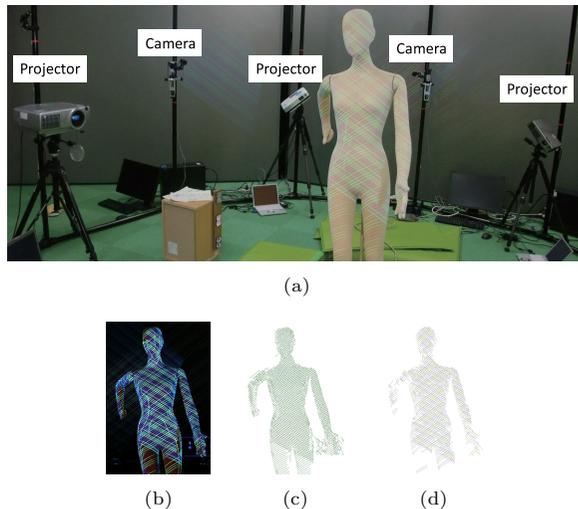


図 12 複数台のプロジェクタ, カメラを利用した全集形状復元 (実験装置と線検出結果): (a) 実験環境 (6 プロジェクタ, 6 カメラ. 図は環境の一部), (b) 撮影画像, (c) 検出された曲線, (d) デブルイン系列による ID
 Fig. 12 Experiment of entire shape acquisition using multiple projectors and cameras (System configuration and curve detection): (a) Experimental system (6 projectors and 6 cameras. The figure shows a part of the system.), (b) captured image of one camera, (c) detected curves, (d) de Bruijn ID.

部分や黒い箇所などはライン検出ができないため, 形状が復元されていないが, それ以外の部分においてはデブルイン ID が正しく検出され, 形状も正しく復元されていることが分かる.

5.5 複数台のカメラ, プロジェクタを用いた全集形状復元

最後に, 3 台以上のプロジェクタを利用して, 広い範囲の形状を復元するシステムの実現可能性を示すために, 6 カメラ, 6 プロジェクタを利用した全周囲形状計測システムによる計測実験について述べる. システムの外観を図 12 (a) に示す. カメラは Point Grey Research 社の Flea2 (SXGA resolution), プロジェクタは SXGA 解像度の液晶プロジェクタである.

プロジェクタとカメラは, 対象物体の周囲に交互に設置されており, 各カメラでは, 左右のプロジェクタを利用して復元が行われる. 各カメラでの撮影画像から, 左右のプロジェクタのパターンを取り出すには, 色情報と, 曲線の角度が利用される. 本システムでは, 赤, 青, 黄色, シアンの 4 色の線が利用される. あるカメラから観測を行う場合, そのカメラが

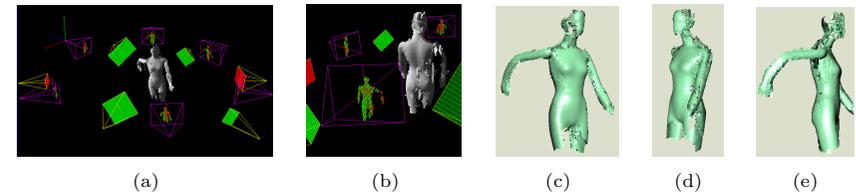


図 13 複数台のプロジェクタ, カメラを利用した全集形状復元 (復元結果): (a), (b) 復元された形状と, カメラ・プロジェクタ位置, (c)-(e) 陰影付けされた復元結果
 Fig. 13 Experiment of entire shape acquisition using multiple projectors and cameras (reconstruction results): (a), (b) recovered shape with camera and projector position and (c)-(e) shaded results.

ら 100 度以上異なる角度に設置されたプロジェクタからの照射パターンは, ほとんど観測されない. このため, 各カメラから観測可能なパターンを照射するプロジェクタの個数は, ほとんどの領域で 2 個から 3 個である. このことを利用して, 少ない色数と角度によって, 各曲線を特定のプロジェクタに対応付けることが可能となっている.

カメラで撮影された画像の 1 つを図 12 (b) に示す. さらに, パターンの検出結果を図 12 (c), (d) に示す. 各カメラで復元した結果をあわせたものを図 13 に示す. 図から, 大きな連結領域が正確に復元されていることが分かる. ただし, プロジェクタで照射されない領域は, 復元されていない. また, 大きな領域と, 観測された曲線で連結されなかった領域には, 復元に失敗している箇所が見られた. これらの領域の結果の向上は今後の課題である.

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. この問題を解くために, 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あげられる.

謝辞 本研究の一部は、内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030)、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, 21200002) 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) Batlle, J., Mouaddib, E. and Salvi, J.: Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey, *Pattern Recognition*, Vol.31, No.7, pp.963–982 (1998).
- 2) Faugeras, O.: *Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint*, The MIT press, Cambridge, MA (1993).
- 3) Frueh, C. and Zakhor, A.: Capturing 21/2d depth and texture of time-varying scenes using structured infrared light, *Proc. 5th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.318–325 (2005).
- 4) Furukawa, R., Kawasaki, H., Sagawa, R. and Yagi, Y.: Shape from grid pattern based on coplanarity constraints for one-shot scanning, *IPSP Trans. Computer Vision and Applications*, Vol.1, pp.139–157 (2009).
- 5) Hall-Holt, O. and Rusinkiewicz, S.: Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects, *ICCV*, Vol.2, pp.359–366 (2001).
- 6) Je, C., Lee, S.-W. and Park, R.-H.: High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging, *ECCV*, Vol.1, pp.95–107 (2004).
- 7) Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R. and Yagi, Y.: Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern, *CVPR*, pp.1–8 (June 2008).
- 8) Koninckx, T.P. and Van Gool, L.: Real-time range acquisition by adaptive structured light, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.28, No.3, pp.432–445 (2006).
- 9) Narasimhan, S.G., Koppal, S.J. and Yamazaki, S.: Temporal dithering of illumination for fast active vision, *European Conference on Computer Vision*, Vol.4, pp.830–844 (Oct. 2008).
- 10) Sagawa, R., Ota, Y., Yagi, Y., Furukawa, R., Asada, N. and Kawasaki, H.: Dense 3D reconstruction method using a single pattern for fast moving object, *ICCV* (2009).
- 11) Salvi, J., Batlle, J. and Mouaddib, E.M.: A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement, *Pattern Recognition*, Vol.19, No.11, pp.1055–1065 (1998).
- 12) Ulusoy, A.O., Calakli, F. and Taubin, G.: One-shot scanning using de bruijn spaced grids, *7th IEEE Conf. 3DIM* (2009).
- 13) Vuylsteke, P. and Oosterlinck, A.: Range image acquisition with a single binary-

encoded light pattern, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.12, No.2, pp.148–164 (1990).

- 14) Weise, T., Leibe, B. and Van Gool, L.: Fast 3D scanning with automatic motion compensation, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1–8 (2007).
- 15) Young, M., Beeson, E., Davis, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R.: Viewpoint-coded structured light, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (June 2007).
- 16) Zhang, L., Curless, B. and Seitz, S.: Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming, *Proc. 1st International Symposium 3D Data Processing Visualization and Transmission*, pp.24–36 (2002).

付 録

A.1 1 プロジェクタを利用し、プロジェクタの焦点面がカメラ中心を含む場合の解の不定性

1 プロジェクタを利用する手法で、プロジェクタの焦点面がカメラ中心を含む場合、光学中心を表すベクトル $\mathbf{b}_v = \mathbf{b}_h$ は焦点面に含まれる。また、定義から、 $\mathbf{d}_v, \mathbf{d}_h$ も焦点面に含まれる。このことから、 $\mathbf{v}_d = (\mathbf{d}_v \times \mathbf{b}_v)$ と、 $\mathbf{h}_d = (\mathbf{d}_h \times \mathbf{b}_h)$ はともに焦点面の法線ベクトルであるので、定数 κ を利用して、 $\mathbf{h}_d = \kappa \mathbf{v}_d$ の関係が成立する。このとき、式 (9) から、

$$A_k \mu_{\alpha(k)} - B_k \rho_{\beta(k)} = A_k (\mu_{\alpha(k)} - \kappa \rho_{\beta(k)}) = -C_k \quad (12)$$

である。この方程式に μ_i, ρ_j についての解がある場合、その解のすべての μ_i に κ を加え、すべての ρ_j に 1 を加えることで、別の解を作ることができる。よって、この方程式は不定である。

A.2 2 個のプロジェクタを利用した場合に解が唯一になることの証明

2 個のプロジェクタを利用する本論文の手法が、特殊な場合を除いて唯一解を持つことを、図 3 (a) のように平面が 4 個の場合について証明する。これを示すには、パターン平面の位置を解くために用いる連立方程式について、係数行列の行列式が恒等的に 0 とはならないことを示せばよい。以下の証明では、背理法を用いる。まず、1 台のプロジェクタを用いる従来法^{4),7),10)} における平面 4 個の場合 (図 3 (b)) には、係数行列の行列式が恒等的に 0 に等しいと仮定しても、矛盾が生じない議論を示す。次に、2 台のプロジェクタを用いる場合には、同様の仮定と議論から矛盾が生じることを示す。

従来法^{4),7),10)} では、本文中で述べたように、式 (10) の連立方程式が $\mathbf{Ax} = \mathbf{0}$ となるよ

うにパラメータをとることができる． $x \neq 0$ となる解（真の解）が存在することから， A の行列式は，恒等的に $|A| = 0$ である．

図 3(b) の場合の行列方程式は

$$\begin{pmatrix} A_{1,1} & 0 & -B_{1,1} & 0 \\ A_{1,2} & 0 & 0 & -B_{1,2} \\ 0 & A_{2,1} & -B_{2,1} & 0 \\ 0 & A_{2,2} & 0 & -B_{2,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \rho_1 \\ \rho_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ C_{2,1} \\ C_{2,2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

となる．ただし，たとえば $A_{1,2}$ の下付の添え字は， μ_1 で表される縦パターン平面と， ρ_2 で表される横パターン平面との交点から得られる係数であることを示すとす．このとき，係数行列 A の行列式 $|A|$ を計算すると，

$$\begin{aligned} |A| &= -A_{1,1}A_{2,2}B_{1,2}B_{2,1} + A_{1,2}A_{2,1}B_{1,1}B_{2,2} \\ &= -(\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{v}_d)(\mathbf{u}_{2,2}^\top \mathbf{v}_d)(\mathbf{u}_{1,2}^\top \mathbf{h}_d)(\mathbf{u}_{2,1}^\top \mathbf{h}_d) \\ &\quad + (\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{h}_d)(\mathbf{u}_{2,2}^\top \mathbf{h}_d)(\mathbf{u}_{1,2}^\top \mathbf{v}_d)(\mathbf{u}_{2,1}^\top \mathbf{v}_d) \end{aligned} \quad (14)$$

となる．ただし， $\mathbf{u}_{i,j}$ は， μ_i で表される縦パターン平面と， ρ_j で表される横パターン平面の交点の，カメラからの方向ベクトルを表す．

上記の行列式の値を評価するとき，交点位置を表すベクトル $\mathbf{u}_{1,1}$ ， $\mathbf{u}_{1,2}$ ， $\mathbf{u}_{2,1}$ ， $\mathbf{u}_{2,2}$ が任意に変化するわけではないことに注意する必要がある．これらの交点は，パターン平面の配置と，それぞれの交点の深さによって決まり，物理的に可能な交点位置には制約が存在する．

$\bar{\mu}_1$ ， $\bar{\mu}_2$ ， $\bar{\rho}_1$ ， $\bar{\rho}_2$ を真の解とすると，たとえば $\mathbf{u}_{1,1}$ の交点は，式 (8) より

$$(\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{v}_d)\bar{\mu}_1 - (\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{h}_d)\bar{\rho}_1 + \mathbf{u}_{1,1}^\top (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0) = 0 \quad (15)$$

を満たす必要がある．逆に $\mathbf{u}_{1,1}$ が式 (15) を満たすならば， $\mathbf{u}_{1,1}$ を変化させても，全体として整合性のある解が得られる．これは， μ_1 と ρ_1 で表されるパターンの交点位置を，これらに対応するパターン平面の交線（図 3(b) の点線）に沿って動かすことで，平面パターンの位置を変えずに 1 つの交点の深さを変化させることに相当する．交点の配置は変わるが，解としての整合性はとれているので，行列式 $|A|$ は 0 に等しいままとなるはずである．

1 プロジェクタの場合には $\mathbf{v}_0 = \mathbf{h}_0$ になるようにパラメータをとることで，式 (15) は，

$$(\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{v}_d)\bar{\mu}_1 = (\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{h}_d)\bar{\rho}_1 \quad (16)$$

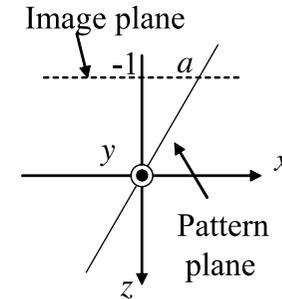


図 14 プロジェクタ座標でのパターン平面の位置
Fig. 14 Pattern plane position in projector coordinates.

と同値になる．

条件式 (16) を満たすように $\mathbf{u}_{1,1}$ を動かしても，行列式 (14) が 0 であることに矛盾は生じない．実際，行列式 (14)=0 の式から，

$$\frac{(\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{v}_d)}{(\mathbf{u}_{1,1}^\top \mathbf{h}_d)} = (\mathbf{u}_{1,1} \text{ に依存しない値}) \quad (17)$$

となるが，条件式 (16) から同様な式が得られる．

次に，2 台のプロジェクタを利用する場合に，同様な仮定と議論で矛盾が生じることを示す．行列式 (14) が式 (15) を満たすような $\mathbf{u}_{1,1}$ の変化に対して恒等的に 0 に等しいと仮定する．プロジェクタ 2 台の条件では，式 (15) は，式 (16) に変形できないので，一般に式 (15) において $\mathbf{u}_{1,1}^\top (\mathbf{v}_0 - \mathbf{h}_0) \neq 0$ である．このため，式 (15) は，式 (17) と矛盾する．

以上により，2 台のプロジェクタを利用する手法では，行列式 (14) は，恒等的には 0 にならないことが示された．つまり，特殊な場合を除いて，本論文の手法は唯一解を持つ．

A.3 パターンの画像面での位置とパラメータの線型関係に関する証明

縦パターン v の位置の画像面上での x 座標が，式 (4) の μ と線型な関係になる条件が，プロジェクタの焦点面にカメラの光学中心が含まれることであることの証明を述べる．カメラ座標系と同様に，プロジェクタの光学中心を原点とするプロジェクタ座標系を考える．このとき，図 14 のように，縦パターン v が画像面上で $x = a$ の位置にある場合，プロジェクタ座標系での方程式は $x - az = 0$ となる．これを斉次座標系で表現すると，プロジェクタ座標系での平面上の点を x_p として，

$$(1 \ 0 \ -a \ 0) \begin{pmatrix} x_p \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (18)$$

となる。

x_p をカメラ座標系で表した点が x_c であるとし、 x_c から x_p への変換式が、回転行列 R_{cp} と並進ベクトル t_{cp} によって、 $x_p = R_{cp}x_c + t_{cp}$ と表されるとする。

パターン平面の方程式 (18) をカメラ座標系での表現に変換する。平面上の点は、カメラ座標系では、

$$\begin{pmatrix} x_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{cp} & t_{cp} \\ \mathbf{0}^\top & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

となる(ただし $\mathbf{0} \equiv (0 \ 0 \ 0)^\top$)。このとき、斉次座標での平面パラメータベクトル $(1 \ 0 \ -a \ 0)$ は、カメラ座標系では

$$(1 \ 0 \ -a \ 0) \begin{pmatrix} R_{cp} & t_{cp} \\ \mathbf{0}^\top & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

となる。 R_{cp} の第 i 行ベクトルを r_i とし、 t_{cp} の第 i 成分を t_i とすると、変換された斉次平面パラメータベクトルは、 $(r_1 - ar_3 \ t_1 - at_3)$ となる。これは、式 (1) のパラメータベクトルにあてはめると、 $t_1 - at_3 \neq 0$ の場合には

$$\mathbf{v} = \frac{(r_1 - ar_3)^\top}{t_1 - at_3} \quad (21)$$

であり、 $t_1 - at_3 = 0$ の場合にはカメラの光学中心をパターン平面が通過するため仮定に反する。

式 (21) は、 $t_3 = 0$ のとき、かつそのときのみ、パラメータベクトル \mathbf{v} が、画像面上での位置 a に対して線型に表されることを意味する。このとき、カメラの画像中心は、プロジェクタ座標系で $z = 0$ の面、つまりプロジェクタの焦点面にある。

(平成 22 年 3 月 15 日受付)

(平成 23 年 2 月 4 日採録)



古川 亮 (正会員)

1993 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。1997 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。広島市立大学情報科学部助手を経て、現在、広島市立大学大学院情報科学研究科講師。コンピュータ・ビジョン、コンピュータ・グラフィックに関する研究に従事。工学博士。



川崎 洋 (正会員)

1994 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2003 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。博士(工学)。現在、埼玉大学工学部情報システム工学科准教授。主としてコンピュータ・ビジョン、アクティブ 3 次元計測、街のモデリング、コンピュータ・グラフィクスに関する研究に従事。VR 学会、IEEE 各会員。



佐川 立昌 (正会員)

1998 年京都大学工学部情報工学科卒業。2000 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程修了。2003 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て 2007 年 4 月より同大学助教。2010 年より産業技術総合研究所研究員。2008 ~ 2009 年スイス連邦工科大学チューリヒ校客員研究員。実時間視覚処理と物体のモデリングの研究に従事。博士(工学)。日本ロボット学会、電子情報通信学会、IEEE 各会員。



阪下 和弘

2009 年岡山大学工学部情報工学科卒業。現在、大阪大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在籍中。



大田 雄也

2008年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。2010年同大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻修士課程修了。現在、キヤノン株式会社勤務。



頭師 陵太

2008年広島市立大学情報科学部卒業。2010年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。現在、株式会社NTTドコモ勤務。



八木 康史 (正会員)

1983年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985年同大学大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事。1990年大阪大学基礎工学部情報工学科助手。同学部システム工学科講師、同大学院助教授を経て、2003年より同大学産業科学研究所教授。1995~1996年英オックスフォード大学客員研究員、2002年仏ピカルディー大学招聘助教授、全方位視覚センシング、画像理解、知能ロボットに関する研究に従事。1996年度電子情報通信学会論文賞、2003年ACM VRST2003 Honorable Mention Award、IEEE、日本ロボット学会各会員。博士(工学)。



浅田 尚紀 (正会員)

1979年京都大学工学部電気工学科卒業。同大学大学院博士課程修了。福井医科大学医学部助手、京都大学工学部助手、岡山大学工学部助教授を経て、1995年から広島市立大学情報科学部教授。2006年から同大学学長。現在に至る。1989年シカゴ大学客員研究員。工学博士。コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックス、文書画像理解、医用画像診断支援の研究に従事。1993年情報処理学会論文賞受賞。IEEE CS、人工知能学会、医用画像工学会各会員。