

ワンショットスキャンによる動物体の密な 3 次元形状復元手法

古川 亮[†] 川崎 洋^{††} 佐川 立昌^{†††} 八木 康史^{†††}

[†] 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

^{††} 埼玉大学工学部 〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{†††} 大阪大学産業科学研究所 〒 567-0047 茨木市美穂ヶ丘 8 - 1

E-mail: [†]ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp, ^{††}kawasaki@cgv.ics.saitama-u.ac.jp,

^{†††}{sagawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 表情変化に伴う顔の形状変化などのように、テクスチャが少なく動きのある物体の表面形状を、密に 3 次元計測する手法が求められている。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。パターンコード化法による手法は、大きく 2 つに分類される。一つは、複数の投影パターンを用いて、プロジェクタ画素の位置情報を時間的にコード化する手法であり、もう一つは単一の投影パターンにおいて、複数画素から構成される領域に、位置情報を空間的にコード化する手法である。前者は十分なパターン数があれば画素毎での高密度な復元が可能である一方で、速い動きに対応できないという問題がある。後者は、単一のパターンのみを用いるため、動物体にも対応できるものの、複数画素を用いて一つの対応関係を得ることから、復元の密度が低くなってしまいう問題があり、また、画像処理も一般に不安定である。本論文では、後者のように一枚の画像を入力としながら、高密度な復元が可能であり、さらに画像処理に関しても頑健な形状復元を実現する手法を提案する。

キーワード アクティブ 3 次元復元、共面性からの形状復元、動物体の形状復元、ワンショットスキャン

Dense dynamic scene reconstruction based on one-shot scanning

Ryo FURUKAWA[†], Hiroshi KAWASAKI^{††}, Ryusuke SAGAWA^{†††}, and Yasushi YAGI^{†††}

[†] Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University Hiroshima, Japan

^{††} Faculty of Engineering, Saitama University Saitama, Japan

^{†††} The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University Osaka, Japan

E-mail: [†]ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp, ^{††}kawasaki@cgv.ics.saitama-u.ac.jp,

^{†††}{sagawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract 3D acquisition techniques to measure dynamic scenes and deformable objects with little texture are greatly needed for applications like the motion capturing of human facial expression. To allow such measurement, several techniques using structured light have been proposed. These techniques can be largely categorized into two types. The first involves techniques to temporally encode positional information of a projector's pixels using multiple projected patterns, and the second involves techniques to spatially encode positional information into areas or color spaces. Although the former allows dense reconstruction with a sufficient number of patterns, it has difficulty in scanning objects in rapid motion. The latter technique can capture dynamic scene since it uses a single pattern. However, since it uses multiple pixels to obtain a single correspondence, reconstruction results gets coarse and the image processing tend to be more difficult. In this paper, we propose a technique that requires only a single-frame image, achieves dense shape reconstruction, and has the advantage of being robust in terms of image processing.

Key words active 3D scanning, shape from coplanarity, dynamic scene shape reconstruction, one-shot scanning

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、例えば顔などを計測するためには、計測の高速性、高密度の点群の獲得、正確性、などが重要となる。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。このため、アクティブ3次元計測手法、特にパターンコード化法を高速化することで動きのあるシーンの形状取得を行なうというアプローチが近年盛んに研究されている。

パターンコード化法では、プロジェクタで単一又は複数のパターンをシーンに投影し、撮影することで3次元復元を行なう。このために、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これを行なう。この方式において、必要なパターンの数を減らし、さらに、パターンの速度を上げることで、動きのあるシーンの3次元形状の獲得を行なう方法がある。この方法では、必要な数のパターンを投影する間、シーンの時間的な移動量が非常に少ないことを仮定しているため、動きが速い場合には正確な形状が得られず、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という問題点がある。

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の情報を空間的なパターンとしてコード化し埋め込むことで、一枚の撮影画像のみからシーンを復元する(ワンショットスキャン)手法がある。この方法では、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、複数の画素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、対象物の形状によってパターンの歪みや不連続性などが起きやすく、コード化された情報の抽出が不安定となる問題もある。

パターンコード化法において、対応点の決定に一般に利用される制約条件としてエピソード拘束がある。しかし、特徴点の数が多い場合や、特徴点の配列などの条件によってエピソード線上に複数の特徴点がある場合には、一意に対応付けることはできない。このような時に、特徴点どうしに相互的な関係がある場合、その情報を効率よく利用することで、一意の対応付けを実現できる可能性がある。そこで、本論文では、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を提案する。このような特徴点を用いれば、縦と横の接続関係という特徴点どうしの情報が得られるため、共面性からの形状復元[1]を応用して、縦線と横線の交点として矛盾のない3次元形状を、1パラメータの解集合として作成することができる。また、この1自由度は、グリッドパターンが既知である場合、1次元探索により高速に決定することが出来る。

提案する手法では、一意な対応付けに十分な数の接続情報さえ得られれば形状がグローバルに滑らかである必要が無く、オ

クルージョンによる急激なデプスの変化等があっても復元できるという利点がある。また、多数の直線で構成された単純なグリッドパターンにおいて、縦と横のみが識別可能であれば良いため、画像処理の問題も少ない。

2. 関連研究

パターン光による形状復元では、投影されるパターンの時間的あるいは空間的变化にプロジェクタの画素の位置情報をコード化する。画像の時間的变化のみを利用する方法は、画素ごとに実装が容易なため、古くから利用されている[2]。しかし、この方法では、位置情報のコード化に必要なパターンの枚数が多く、高速なキャプチャに不向きである。

一方で、パターンの空間的コードのみを利用する方法[3]~[5]では、単一フレーム画像のみによる計測(ワンショットスキャン)が可能であるものの、各画素の位置情報を空間的な広がりのあるパターンにコード化するため、解像度が落ちてしまう問題がある。また、パターンが各画素の周囲で局所的かつ一意的にコード化される必要性から、これを実現するためのパターンは比較的複雑なものとなり、抽出のための画像処理も複雑となる。このため、物体の色や形状の影響によりコード化された情報の抽出に失敗することが起こりやすく、結果不安定になりやすい。

Rusinkiewiczら[6]は、時間的变化と空間的变化の両方を利用して、必要なパターンの数を減らした。しかし、この方法でも、複数枚のパターンを照射する間、シーンが事実上静止していなければならないという制約がある。また、動きの遅い剛体物に限り、位置あわせによる解決手法を提案してはいるものの、人間の顔や体の動きなど、剛体以外の対象に動きがある場合には対応できない。

また、厳密にはパターンコード化法では無いが、動きも含めた時空間ステレオマッチングにより復元をする研究もある[7]、[8]。この方法では、カメラペアのステレオにおいて、プロジェクタは時間的に変化するテクスチャを与えることのみで使用される。このため、時空間画像上で不連続性が生じるような速い動きがある場合には正しく復元されないという問題がある。また、[6]~[8]共通の課題として、早い動きに対応するために非常に高速同期して動作するシステムを構築しなければならない点や、処理が比較的重いという問題もある。

一方で、VanGoolらは、直線状パターンの集合という単純なパターンを用いて、画像一枚から密な形状復元が可能な方法を提案した[9]。この方法は、密な縞模様パターン(直線状パターンの繰り返し)の抽出による局所的な形状復元を基本とし、これに補助的な疎な直線状パターン抽出によるグローバルな位置推定を組み合わせることで、ユークリッド形状の復元を実現している。このため、この疎な直線状パターンの検出に失敗したり、縞模様の抽出に失敗すると再構成が出来ないという問題がある。

古川らは、未校正なラインレーザによって照射された画像を複数利用して、シーンの3次元復元を行なった[1]。これは、ラインレーザによって照射される点の共面性条件を解くことで実

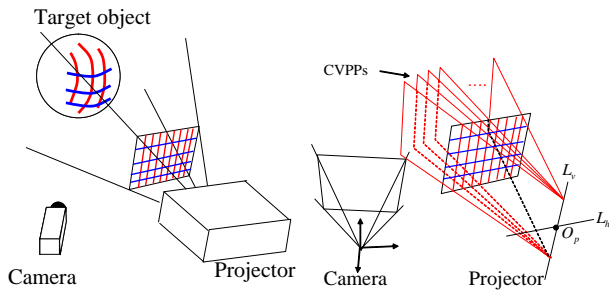


図 1 スキャニングシステム:(左) システム構成, (右) CVPP.

現される．本論文では，この手法を応用し，プロジェクタから照射される 2 種類の直線状パターンについて，これらパターンどうしの交点に共面性条件が成立することを利用して，3 次元形状の復元を行う．Van Gool らの方法と違い，提案手法は，縞模様パターン自体は用いず，そのパターン同士の交点情報のみに基づいて 3 次元再構成を行なうため，画像処理や 3 次元再構成の安定性が高く実用的な手法と言える．

3. グリッドパターンからの形状復元

3.1 問題設定

提案する 3 次元計測システムは，カメラ 1 台とプロジェクタ 1 台 (図 1(左)) からなり，縦・横，2 種類の直線状のパターンを投影し，カメラで撮影する．縦と横のパターンは，色により識別される．2 パターンの識別だけで良いため，単純に RGB のうち 2 色を用いるだけで物体色の影響を受けにくい安定した識別が実現できる．

プロジェクタによって投影された直線状パターンは，空間中に平面を定義する．縦パターンと，横パターンで表される平面を，それぞれ vertical pattern plane(VPP), horizontal pattern plane(HPP) と表記する．

プロジェクタとカメラの内部パラメータは既知であり，プロジェクタ・カメラ間の相対位置も外部キャリブレーション等の手法によって既知であると仮定する．つまり，空間中に存在する VPP と HPP は，全てカメラ座標系での平面の位置とパラメータが既知である (以下の記述では，平面，直線等のパラメータ，点の 3 次元位置は，全てカメラ座標系で表すものとする)．これら，位置パラメータが既知であるような VPP,HPP を，CVPP(calibrated VPP) 及び CHPP と呼ぶ．また，全ての CVPP は，図 1(右) のようにプロジェクタの光学中心を含む単一の直線を共有する．また，CHPP も，同様に，単一の直線を共有する．これらの直線を，それぞれ， L_v, L_h と表記する．これらの直線の交点は，プロジェクタの光学中心 O_p と一致する． O_p と， L_v, L_h の方向ベクトルは，プロジェクタ・カメラ間の相対位置が既知であれば計算により求めることができる．

対象シーンの表面に投影された縦パターンと，横パターンの交点を，カメラで撮影された画像から特徴点として抽出する．これらの特徴点を，「キャプチャされた交点」と呼ぶ．画像処理によって，これらの交点同士の接続関係を抽出する．本論文では，交点同士の関係として，同一の縦パターンや，横パターン

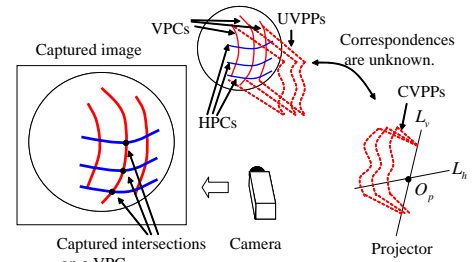


図 2 CVPP と UVPP の定義.

上にある，という関係を利用する．同一の縦パターン上にある交点は，「同一の VPP 上にある」と言うことができる．ただし，それぞれの交点が存在する VPP,HPP が，具体的にどの CVPP あるいは CHPP であるかは，最初は分からない．このように，検出された縦パターンが表す VPP は，観測時点では CVPP に対応づけられていないので，これを UVPP(unknown VPP) と呼ぶ (図 2)．同様に，検出された横パターンが表す HPP を，UHPP と呼ぶ．

最終的に，全ての UVPP および UHPP を，CVPP, CHPP に対応づける (これを UVPP,UHPP を同定するという) ことがこの論文の目的である．UVPP は画像面上の縦パターンであり，CVPP は既知の 3 次元平面であるから，この対応から，光切断法によって，縦パターン上の点の 3 次元位置を求めることができる．単一の CVPP に照射された点が，オクルージョンなどによって画像面上で不連続になると，複数の縦パターンとして観測される．この場合，複数の UVPP が，一つの CVPP に対応することになる．UHPP と CHPP についても同様である．

3.2 処理の概要

提案手法における解法の概要を述べる．まず，UVPP あるいは UHPP について成立する共面性の条件から複数の線形方程式を導く (3.3 節)．これらの方程式を連立方程式として解くと，次節で述べるように，UVPP,UHPP の集合に関して，1 自由度の不定性を持った一般解が得られる．解の不定性の自由度が 1 であることから，一つのパラメータを決定することで，全ての UVPP,UHPP の位置が決まる．そこで，この 1 自由度の不定性を，UVPP 及び UHPP の集合と，CVPP 及び UVPP の集合とのマッチングによって解消する．この処理は，平面どうしのマッチング誤差を定義し，その和が最小となるパラメータを 1 次元探索することで行なわれる (3.4 節)．

3.3 共面性条件の解

キャプチャされた交点の集合から，UVPP, UHPP に関する拘束式を得て，それらの平面に関する解を 1 自由度を除いて得る方法を述べる．

まず，関係する平面 (CVPP,CHPP,UVPP,UHPP) を表すための記号を定義する．投影されるパターンから得られた CVPP の集合を V_1, V_2, \dots, V_M と表し，CHPP の集合を， H_1, H_2, \dots, H_N と表す．また，画像から得られた UVPP,UHPP の集合を，それぞれ， v_1, v_2, \dots, v_m ，及び， h_1, h_2, \dots, h_n と表記する．

v_k と h_j の交点がキャプチャされ，画像上での位置が正規化

カメラの座標表記で $\mathbf{u}_{k,l} = [s_{k,l}, t_{k,l}]^T$ であるとする。 v_k と h_j の 2 個の平面は、次の式で表される。

$$\mathbf{v}_k^T \mathbf{x} = -1, \quad \mathbf{h}_l^T \mathbf{x} = -1. \quad (1)$$

ここで 3 次元ベクトル \mathbf{v}_k 及び \mathbf{h}_k は平面のパラメータを表し、 \mathbf{x} は平面上の任意の点を表す。キャプチャされた交点 $\mathbf{u}_{k,l}$ の 3 次元位置を $\mathbf{x}_{k,l}$ とすると、 $\mathbf{x}_{k,l}$ は $\mathbf{u}_{k,l}$ を利用して、

$$\mathbf{x}_{k,l} = \gamma[\mathbf{u}_{k,l}^T \quad 1]^T \quad (2)$$

と表される。方程式 (1) に $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{k,l}$ を代入して、式 (1) と (2) から $\mathbf{x}_{k,l}$ と γ を消去すると、

$$[\mathbf{u}_{k,l}^T \quad 1] (\mathbf{v}_k - \mathbf{h}_l) = 0 \quad (3)$$

が得られる。この式は、 $\mathbf{v}_k, \mathbf{h}_l$ を変数とする一次方程式であり、この方程式を全てのキャプチャされた交点について並べると、 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m, \mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_n$ を変数とする連立一次方程式となる。これを行列形式で表現したとき、 $\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{0}$ と表されるとする。ただし、 $\mathbf{q} = [\mathbf{v}_1^T, \dots, \mathbf{v}_m^T, \mathbf{h}_1^T, \dots, \mathbf{h}_n^T]^T$ である。

方程式 (3) には差 $(\mathbf{v}_k - \mathbf{h}_l)$ のみが見れるので、連立方程式 $\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{0}$ の解 $\mathbf{q} = [\mathbf{v}_1^T, \dots, \mathbf{v}_m^T, \mathbf{h}_1^T, \dots, \mathbf{h}_n^T]^T$ について、そのスカラー倍、 $s\mathbf{q} = [s\mathbf{v}_1^T, \dots, s\mathbf{v}_m^T, s\mathbf{h}_1^T, \dots, s\mathbf{h}_n^T]^T$ もまた解である。さらに、任意の 3 次元定数ベクトル \mathbf{c} を並べたベクトルを加算したものの $\mathbf{q} + [\mathbf{c}^T, \mathbf{c}^T, \dots, \mathbf{c}^T]^T = [\mathbf{v}_1^T + \mathbf{c}^T, \dots, \mathbf{v}_m^T + \mathbf{c}^T, \mathbf{h}_1^T + \mathbf{c}^T, \dots, \mathbf{h}_n^T + \mathbf{c}^T]^T$ もやはり解となる。これより、連立方程式 $\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{0}$ の一般解は、

$$\mathbf{v}_k = s\mathbf{v}'_k + \mathbf{c}, \quad \mathbf{h}_l = s\mathbf{h}'_l + \mathbf{c} \quad (4)$$

と表される。ただし、 $\mathbf{q}' = [\mathbf{v}'_1^T, \dots, \mathbf{v}'_m^T, \mathbf{h}'_1^T, \dots, \mathbf{h}'_n^T]^T$ は $\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{0}$ の特殊解である。

本論文の問題では、全ての UVPP は直線 L_v を含み、全ての UHPP は直線 L_h を含む、という条件が存在する。さらに、 L_v と L_h は点 O_p で交わる。これらの条件から、式 (4) の任意変数 s と \mathbf{c} には拘束が生じ、解の不定性の自由度が減る。以下に、上記の条件を考慮した一般解の求め方を述べる。

2 個の直線 L_v と L_h を含む平面を、projector focal plane (PFP) と呼び、その平面パラメータを \mathbf{p} と表記する。直線 L_v と L_h の方向ベクトルを、それぞれ \mathbf{l}_v 及び \mathbf{l}_h と表記する。また、プロジェクタの光学中心 O_p の 3 次元位置を \mathbf{o}_p と表記する。全ての UVPP は直線 L_v を含み、全ての UHPP は直線 L_h を含む。また、全ての UVPP 及び UHPP は点 O_p を含む。これより、

$$\mathbf{l}_v^T \mathbf{v}_k = 0, \quad \mathbf{l}_h^T \mathbf{h}_l = 0, \quad \mathbf{o}_p^T \mathbf{v}_k = -1, \quad \mathbf{o}_p^T \mathbf{h}_l = -1 \quad (5)$$

が得られる。また、前述の特殊解 \mathbf{q}' も上記の条件を満たすとする。つまり、

$$\mathbf{l}_v^T \mathbf{v}'_k = 0, \quad \mathbf{l}_h^T \mathbf{h}'_l = 0, \quad \mathbf{o}_p^T \mathbf{v}'_k = -1, \quad \mathbf{o}_p^T \mathbf{h}'_l = -1 \quad (6)$$

である。また、PFP は、直線 L_v, L_h と点 O_p を含むので、

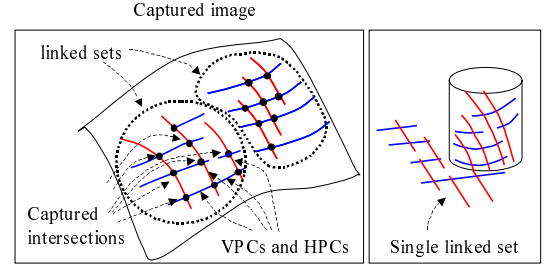


図 3 連結集合:(左) 連結集合。(右) シーンに不連続性がある場合の連結集合。

$$\mathbf{l}_v^T \mathbf{p} = 0, \quad \mathbf{l}_h^T \mathbf{p} = 0, \quad \mathbf{o}_p^T \mathbf{p} = -1, \quad \mathbf{o}_p^T \mathbf{p} = -1 \quad (7)$$

が成立する。式 (5),(6),(7) より、

$$\begin{aligned} \mathbf{l}_v^T (\mathbf{v}_k - \mathbf{p}) &= 0, \quad \mathbf{l}_h^T (\mathbf{h}_l - \mathbf{p}) = 0, \\ \mathbf{o}_p^T (\mathbf{v}_k - \mathbf{p}) &= 0, \quad \mathbf{o}_p^T (\mathbf{h}_l - \mathbf{p}) = 0, \\ \mathbf{l}_v^T (\mathbf{v}'_k - \mathbf{p}) &= 0, \quad \mathbf{l}_h^T (\mathbf{h}'_l - \mathbf{p}) = 0, \\ \mathbf{o}_p^T (\mathbf{v}'_k - \mathbf{p}) &= 0, \quad \mathbf{o}_p^T (\mathbf{h}'_l - \mathbf{p}) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

が得られる。これらの式から、 $\mathbf{v}_k - \mathbf{p}$ と $\mathbf{v}'_k - \mathbf{p}$ が、両方とも \mathbf{l}_v 及び \mathbf{o}_p に直交することがわかる。 \mathbf{l}_v と \mathbf{o}_p は一般には平行でないので、これらの両方に直交するベクトルは、スケーリングを除いて一意に決まる。これより、

$$(\mathbf{v}_k - \mathbf{p}) = s(\mathbf{v}'_k - \mathbf{p}) \quad (9)$$

が得られる。同様に、

$$(\mathbf{h}_l - \mathbf{p}) = s(\mathbf{h}'_l - \mathbf{p}) \quad (10)$$

である。式 (9),(10) より、方程式 (3) 及び (5) の一般解は、

$$\mathbf{v}_k = s(\mathbf{v}'_k - \mathbf{p}) + \mathbf{p}, \quad \mathbf{h}_l = s(\mathbf{h}'_l - \mathbf{p}) + \mathbf{p} \quad (11)$$

の形で表される。既に述べたように、 $[\mathbf{v}'_1^T, \dots, \mathbf{v}'_m^T, \mathbf{h}'_1^T, \dots, \mathbf{h}'_n^T]^T$ は特殊解の一つであり、 \mathbf{p} は平面 PFP のパラメータベクトルである。式 (4) の一般解の不定性が L_v 及び L_h の条件により減少した結果、式 (11) における不定性は、スカラー値 s による 1 自由度のみとなったことが分かる。

式 (11) は、縦パターンと横パターンとの交点の像から、それらに対応する平面、つまり UVPP 及び UHPP 全体の位置の解が、1 自由度を除いて求められることを表す。実際には、このような解が求められるためには条件がある。これを以下に述べる。ある UVPP と UHPP の交線上の点が画像上で観測されているとき、これらは連結している、と定義する。また、この意味で平面 a と b が連結しており、かつ、平面 b と c が連結しているとき、平面 a と c は連結していると定義する。ある UVPP 及び UHPP の集合があり、その任意の要素が他の全ての要素と連結しているとき、これを連結集合と呼ぶことにする。図 3 に連結集合の例を示す。この時、ある UVPP 及び UHPP の集合が連結集合ならば、その集合全体の位置の解は式 (11) の形で求められる。

これは、直観的には、以下のように証明できる．ある一つの UVPP v_f に着目すると、 v_f は直線 L_v を含むことから、その位置の不定性は 1 自由度である．ここで、 v_f の不定な 1 個のパラメータを仮に定め、 v_f と交点のある UHPP h_g を考える． v_f の位置を定めると、交点の位置が定まり、かつ h_g は直線 L_h を含むため、 h_g の位置も定まる．このように、ある平面を定めると、その平面と交点を持つ平面が定められるため、これを繰り返すと連結集合全体の解が定まる．この時、不定性は、最初の平面の 1 自由度のみであり、式 (11) はこの解の形式を表す．逆に、UVPP 及び UHPP の集合が連結集合でないならば、連結集合でない平面同士には拘束条件がないので、全体としての解は 2 自由度以上になる．よって、平面の集合全体が解は式 (11) の形で求められる必要十分条件は、その集合が連結集合であることである．

提案手法では、UVPP 及び UHPP の集合が連結集合であると仮定する．もし、対象シーンから複数の連結集合が得られる場合には、それぞれの連結集合ごとに提案手法を適用すればよいので、このことは本手法の一般性を損なわない．

3.4 不定性の解消

前節の解は、UVPP, UHPP に関して、キャプチャされた交点のみから得られ、CVPP 及び CHPP の情報は利用されていない．提案手法では、この解と、CVPP 及び CHPP とのマッチングを行なうことで、UVPP と CVPP, あるいは UHPP と CHPP との対応関係を求める．解の自由度が 1 であることから、マッチングを 1 次元探索によって効率的に行なうことができる．

まず、UVPP と CVPP の対応を表すための表記方法を定義する． k 番目の UVPP v_k が、 i 番目の CVPP V_i に対応することを、 $v_k \rightarrow V_i$ と表記する．これは、 v_k が V_i に同定されたことを意味する．

具体的なマッチング処理について述べる．最初に、適当な UVPP を選ぶ．例えば、 v_{10} が選ばれたとする．次に、 v_{10} に対して、CVPP V_1 を対応させ、この対応から、全ての UVPP, UHPP の位置、つまり $v_1, \dots, v_m, h_1, \dots, h_n$ の位置を求める．この時、得られた UVPP, UHPP ($v_1, \dots, v_m, h_1, \dots, h_n$) の位置が、全体として CVPP, CHPP ($V_1, \dots, V_M, H_1, \dots, H_N$) に一致しているかどうかを評価する．

同様に、 v_{10} に対応させる CVPP を、 V_2, V_3, \dots と変化させ、それぞれの対応について得られた UVPP, UHPP の位置が、全体として CVPP, CHPP に一致しているかどうかを評価する．

UVPP, UHPP の位置が、全体として最も CVPP, CHPP に一致していると判断される時の UVPP と CVPP の対応関係、及び UHPP と CHPP の対応関係を、求める対応関係として出力する．

一致しているかどうかを判断する手法について以下に述べる．式 (11) はパラメータ s による不定性を持つが、特定の UVPP と CVPP の対応を仮定すると、以下に述べる計算によりこのパラメータが決定される．仮に、 k' 番目の UVPP が、 i' 番目の CVPP に対応する (つまり $v_{k'} \rightarrow V_{i'}$) とすると、

$$\mathbf{V}_{i'} = \mathbf{v}_{k'} = s(\mathbf{v}_{k'} - \mathbf{p}) + \mathbf{p} \quad (12)$$

が成り立つ．ただし、 $\mathbf{V}_{i'}$ は CVPP $V_{i'}$ のパラメータベクトルである．この式から、 s は、

$$s = \|\mathbf{V}_{i'} - \mathbf{p}\| / \|\mathbf{v}_{k'} - \mathbf{p}\| \quad (13)$$

と計算される．計算された s によって、 $v_{k'} \rightarrow V_{i'}$ の対応関係を仮定した場合の全ての UVPP 及び UHPP を計算することが出来る．

式 (13) の s を $s(k', i')$ と表記する．そして、 $v_{k'} \rightarrow V_{i'}$ 対応関係を仮定して計算された \mathbf{v}_k 及び \mathbf{h}_l を、 $\mathbf{v}_k(k', i')$, $\mathbf{h}_l(k', i')$ と表記する．すると、これらの平面は、

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k(k', i') &= s(k', i')(\mathbf{v}_k - \mathbf{p}) + \mathbf{p}, \\ \mathbf{h}_l(k', i') &= s(k', i')(\mathbf{h}_l - \mathbf{p}) + \mathbf{p} \end{aligned} \quad (14)$$

で表される．

次のステップとして、計算された UVPP (又は UHPP) と、CVPP (又は CHPP) を比較する．これには、それぞれの UVPP について、その UVPP と、その UVPP に最も近い CHPP との差を誤差として利用する．これにより、対応関係 $v_{k'} \rightarrow V_{i'}$ に関する一致度を、全ての UVPP についての誤差の自乗和として定義できる (誤差の自乗和が小さいほど一致度は高い)．誤差関数が最小となるような対応関係を探索することで、UVPP (又は UHPP) と CVPP (又は CHPP) との最適な対応を求めることが出来る．

上記の比較は、UVPP の集合 $\mathbf{v}_k(k', i'), (k = 1, \dots, m)$ と CVPP の集合 $\mathbf{V}_i, (i = 1, \dots, M)$ の間、及び、UHPP の集合 $\mathbf{h}_l(k', i'), (l = 1, \dots, n)$ と CHPP の集合 $\mathbf{H}_j, (j = 1, \dots, N)$ の間で行なわれる．本論文では、これらの平面の比較は、平面同士の角度差によって行なわれる．すなわち、誤差関数は具体的には以下のように定義される．

$$\begin{aligned} E_{k'}(i') &\equiv \sum_{k=1}^m \min_{i=1, \dots, M} \{D(\mathbf{v}_k(k', i'), \mathbf{V}_i)\}^2 \\ &+ \sum_{l=1}^n \min_{j=1, \dots, N} \{D(\mathbf{h}_l(k', i'), \mathbf{H}_j)\}^2. \end{aligned} \quad (15)$$

ただし、 D は 2 個の平面の成す角度を表し、以下のように定義される．

$$D(\mathbf{v}_k, \mathbf{V}_i) \equiv \arccos((\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{V}_i) / (\|\mathbf{v}_k\| \|\mathbf{V}_i\|)). \quad (16)$$

これにより最終的に、

$$i'_{min} \equiv \arg \min_{i'} E_{k'}(i') \quad (17)$$

による探索の結果、得られた平面の集合 $\mathbf{v}_k(k', i'_{min}), (k = 1, 2, \dots, m)$ と $\mathbf{h}_l(k', i'_{min}), (l = 1, 2, \dots, n)$ が解となる．

3.5 3次元形状復元

以上の処理により全ての UVPP が同定されたため、光切断法により形状の復元を行う．具体的には、図 4 のように、平面パラメータと、検出されたエッジとカメラ中心とを結ぶ視線との交点として 3 次元座標が計算される．

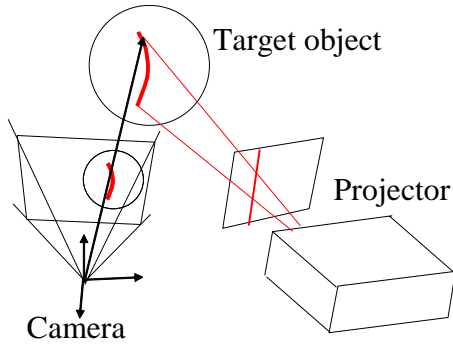


図 4 光切断法による復元方法

4. 実 装

4.1 投影パターン

投影パターンである CVPP, CHPP の配置は、式 (17) の探索の安定性に影響する。仮に、平面の真の対応が、 $v_1 \rightarrow V_1, \dots, v_m \rightarrow V_m, h_1 \rightarrow H_1, \dots, h_n \rightarrow H_n$ であるとすると、このとき、解に誤差が無いとすると、式 (11) の真の s について、 $V_1 = v_1, \dots, V_m = v_m, H_1 = h_1, \dots, H_n = h_n$ である。ここで、式 (11) の真の値とは違うある値 s' を代入して、真の位置とは別の UVPP 及び UHPP ($v_1, \dots, v_m, h_1, \dots, h_n$) を定めたとき、任意の k, i について $V_q = v_k, (k \neq q), H_r = h_i, (i \neq r)$ となるような q, r が存在するとすると、この s' は真の値 s と見分けが付かず、唯一解を求めることが出来なくなる。

このような状況は一般には起こらないものの、CVPP, CHPP が規則的に配置されている場合などには、対応関係が 1 つずれても評価関数に大きな差が現れないため、解が不安定になることがある。これを防ぐ簡単な方法としては、CVPP, CHPP をプロジェクタの画像面上で不規則な間隔で配置することが挙げられる。この場合、 V_q, H_r の集合の配置が不規則なものになるため、上式の条件が成立しにくくなる。実際には縦・横の両方が不規則である必要はなく、例えば、CHPP は不規則な間隔で配置し、CVPP は高密度に規則的に配置することが考えられる。このようなパターンにすると、CHPP の不規則性によって探索の安定性が確保され、CVPP の密度によって再構成される形状の密度が高くなる利点がある。このようなパターンの例を図 5 に示す。

提案手法は、過去のワンショットスキャンのように、個々にパターンを同定する訳ではないため、deBruijn 系列のようにコード化可能なパターンである必要性が無く、しかも 1 色だけで良い。このように単色で良いため、対象物体表面のテクスチャの影響を受けにくくなり、簡単な画像処理で、安定した検出が可能となる。また空間的にエンコードされる訳ではないため 1 ピクセル幅のパターンで良く、非常に密な形状復元が可能となる。

4.2 Coarse-to-fine による密な形状復元パターン

提案手法は、単色パターンを縦か横が識別するだけでよいため、テクスチャ等に関してはロバストになるものの、形状に関する問題は残る。例えば、円筒のように、正面と側面で視点からの法線方向が大きく異なる形状の場合、同じ周波数のパター

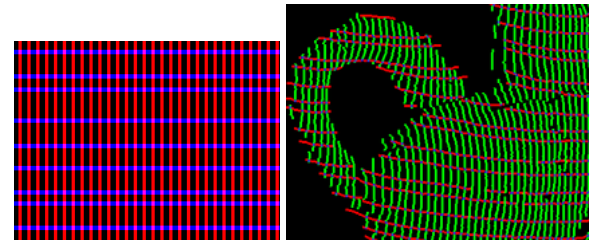


図 5 (左) 投影パターン例, (右) 抽出された線状パターン. 右図において、赤い曲線は横パターン、緑の曲線は縦パターン、交点は青い点で表される。

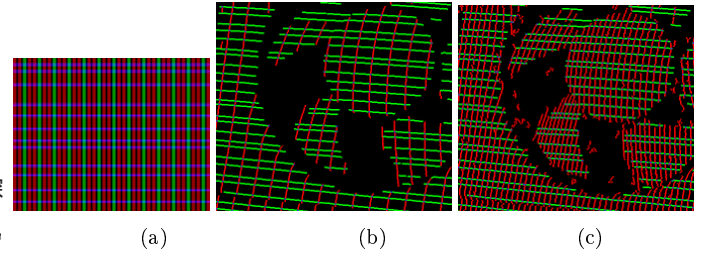


図 6 Coarse-to-fine の利用: (a) 投影パターン, (b) 検出された疎なパターン, (c) 検出された密なパターン. (b),(c) において、緑は横パターン、赤は縦パターン、青は高密度パターンを表す。

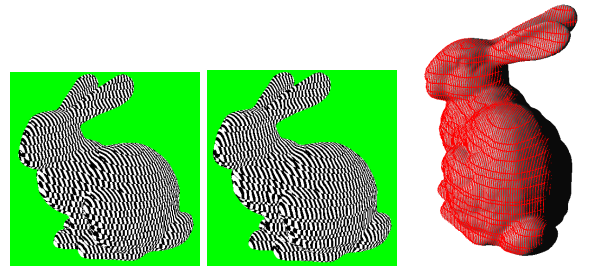


図 7 シミュレーションによる入力画像と実験結果: (左) 均等なパターンによる入力画像, (中) 乱雑な間隔のパターンによる入力画像, (右) 乱雑な間隔のパターンによる画像の処理結果. 処理結果において、赤い点は再構成結果を、シェーディングされた表面は真の形状を表す。

ンを投影したとしても、撮影画像上では側面付近のパターンが圧縮され潰れてしまうことで計測出来ないことが起こりうる。そこで、本論文では周波数の異なるパターンを追加することで現実的な解決を目指す。今回は、市販のプロジェクタ・カメラを前提としているため、RGB の 3 色のみによる識別を考え、1 色を疎で不規則な横パターン、2 色を疎・密の規則的な縦パターンとすることができる。実際に作成したパターンを図 6(a) に示す。このパターンを利用して縦横パターンを検出した結果を図 6(b)(c) に示す。疎なグリッドと密なグリッドがそれぞれ識別されていることが分かる。

5. 実 験

5.1 シミュレーションデータ

最初に提案手法の有効性を示すために、シミュレーションにより作成されたデータを用いて本手法の検証を行なった。シミュレーションは、複数のグリッドパターンを用いて行った。第 1 のパターンは均一な間隔のパターンとし、第 2 のパターンは、

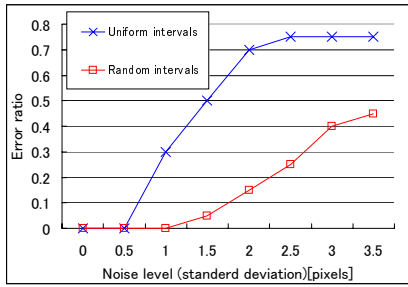


図 8 雑音の大きさに対する誤り率.

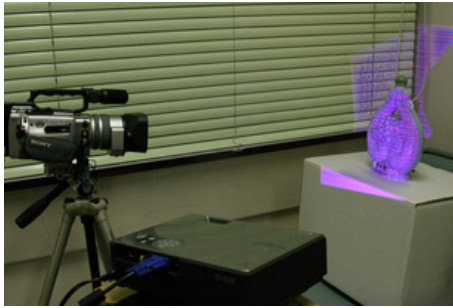


図 9 3D スキャニングシステム

第 1 のパターンにおいて、水平パターンの間隔を意図的に乱数によって乱したものを利用した。第 2 のパターンは、4.1 節で述べた理由によって、対応探索の安定性が上がると考えられる。それぞれのパターンを仮定して生成されたシミュレーション画像を図 7(左),(中) に示す。これらの画像において、縦パターンの間隔は約 5 画素であった。グリッドパターンの交点を画像から抽出し、UHPP 及び UVPP から CVPP 及び CHPP への対応関係を提案手法によって抽出した。それぞれのパターンにおいて、UHPP と UVPP の正しい対応関係が抽出され、再構成された形状は、真の形状に一致した。第 2 のパターンの画像での再構成結果と真の形状を図 7(右) に示す。

次に、入力データ (画像からキャプチャされた交点集合の位置) にノイズを加えた場合の、提案手法の安定性を調べるための実験を行なった。本手法の安定性は、投影するパターンによって変化するので、図 7(左),(中) に示される 2 種類のパターンについて実験を行なった。キャプチャされた交点の位置には、様々な大きさの分散を持った、等方的な 2 次元ガウシアンノイズを加え、それぞれの分散値ごとに、提案手法による 3 次元再構成を 20 回ずつ行った。 i_{min} の探索の失敗の割合を、図 8 に示す。この結果から、不規則な間隔を持ったパターンを利用することで、アルゴリズムの安定性が向上したことがわかる。

5.2 実物体 (剛体) の計測

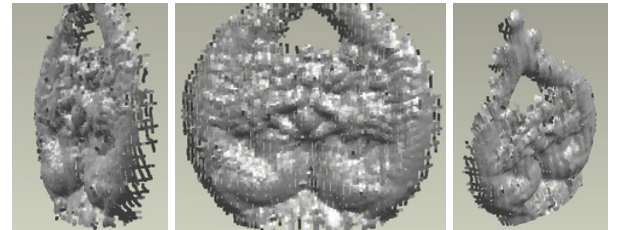
次に、図 9 に示す実験装置を用いて実物体の計測実験を行った。投影パターンの解像度は 1024×768 であり、これを 720×480 画素の解像度の CCD カメラで撮影し、3 次元復元を行った。

図 10 に、計測対象と計測結果の例を示す。実験では、複雑な形状を持った物体や、テクスチャの付いた物体などを用いて計測を行ったが、いずれも密で正確な形状を復元することができた。

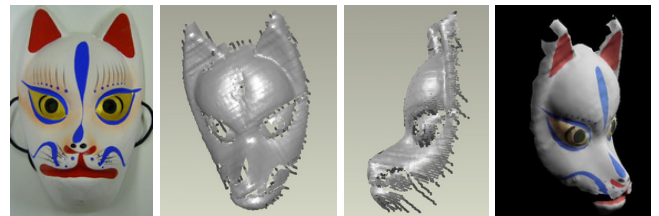
次に、箱 (大きさ: $0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$) と円筒 (高さ:



(a) (b)



(c) (d) (e)



(f) (g) (h) (i)

図 10 静的シーンの再構成結果: (a)(b) 対象物体 (陶器の瓶), (c)(d)(e) 再構成結果, (f) 対象物体 (紙のお面), (g)(h) 再構成結果, (i) テクスチャマッピングされたモデル.

0.2 m , 半径: 0.2 m) のシーンを、4.2 節の coarse-to-fine による手法で計測した。評価のために、同一のシーンをパターンコード化法 [10] によって計測し、真の形状とした。図 11(k) に統合された形状を、(l)-(n) に復元形状 (赤と緑の点群) と真の形状 (ポリゴンメッシュ) を示す。粗密を組み合わせた縦パターンを用いることで、法線方向が大きく異なる形状を欠損無く密に計測できていることが分かる。また、復元結果には少しづれが観測されるものの、この実験における RMS 誤差は 0.52 mm であり、高い精度で復元できたことが分かる。

5.3 実物体 (非剛体) の計測

最後に、変形する物体の 3 次元計測実験として、人物の顔の形状計測を行った。実験の様子を図 12(a) に示す。また、計測結果として 3 つの表情の復元例を同図 (c)-(e) に示す。それぞれ複雑な表情が密で正確な形状として復元できていることが分かる。

6. 結 論

本論文では、動きのあるシーンや物体を密に 3 次元計測する手法を提案した。提案手法は、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来た、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、格子パターンの交点の接続情報を用いて形状を 1 パラメータの自由度を残して再構成し、投影されるパターンと再構成結果の比較によって最終的な形状を決定

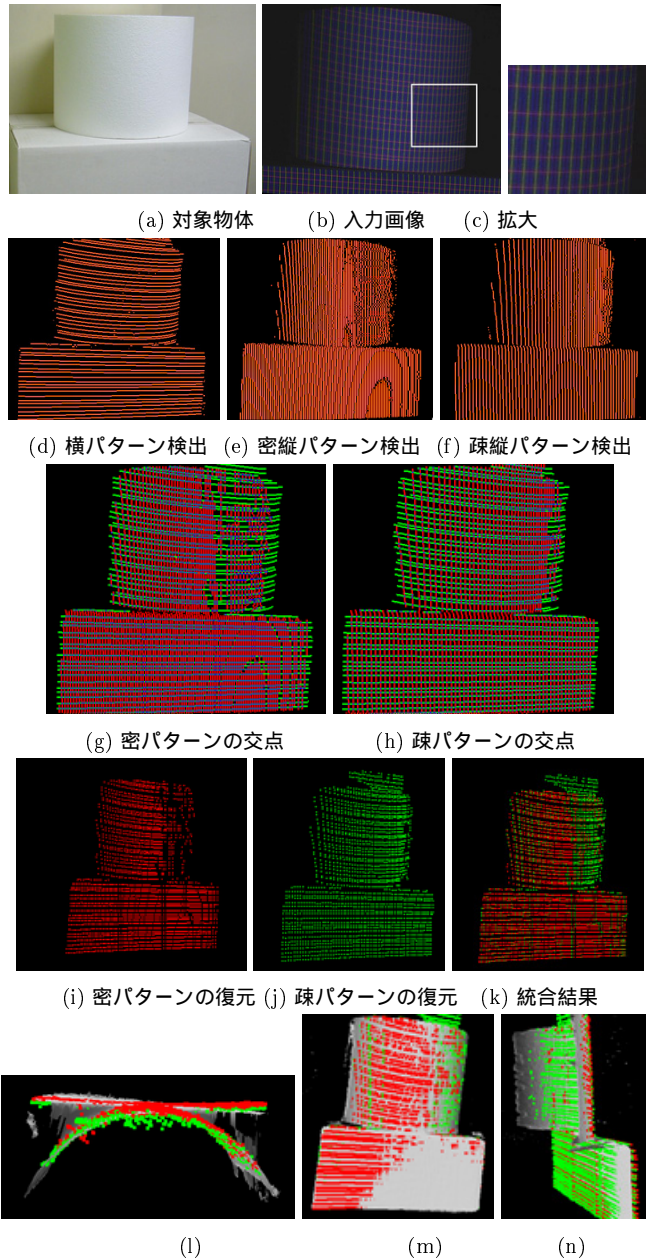


図 11 復元及び評価結果: (l)-(n) 復元された形状と真の形状 (赤及び緑の点群: 復元形状, シェーディングされた形状: 真の形状). する手法となっている. このため, 形状に不連続性やオクルージョンがあるような場合でも, 密なパターンを用いた密な形状復元を実現できる. また, 投影されるパターンも単純なグリッドパターンであるため, 物体のテクスチャや形状による影響を受けにくく, 頑健な形状復元が実現できる. シミュレーションデータ及び実際の装置による実験を行ったところ, 提案するワンショットスキャン方法により正しく 3 次元復元できることが確認された.

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) 若手 ICT 研究者育成型研究開発 (072103013) および科研費 (19700098, 19700157) の助成を受けて実施されたものである.

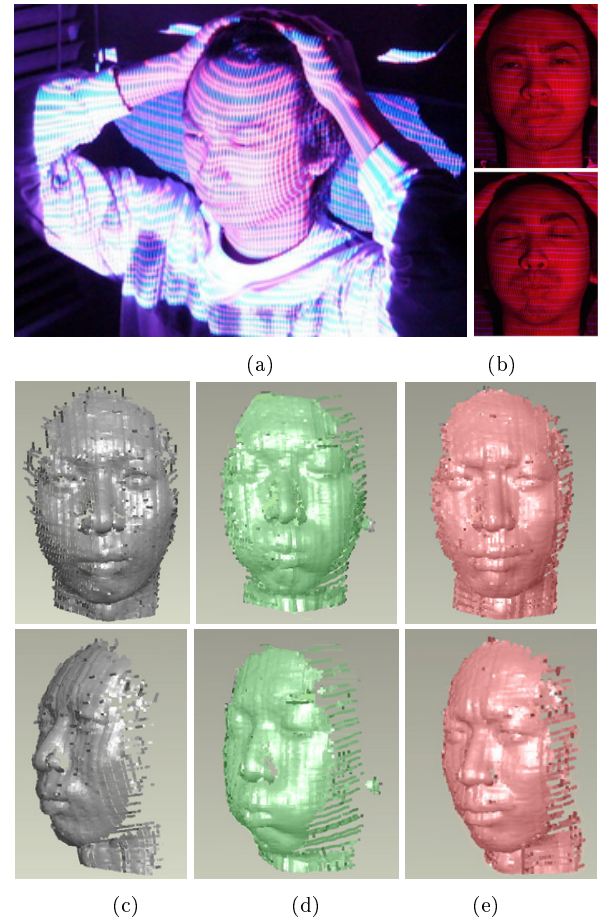


図 12 顔の表情の再構成: (a) 対象シーン, (b) 入力画像, 再構成結果 (c) 表情 1, (d) 表情 2, (e) 表情 3 (表情 1 に対して, 眉間にしわのあることが観測できる).

文 献

- [1] R. Furukawa and H. Kawasaki: "Self-calibration of multiple laser planes for 3D scene reconstruction", 3DPVT, pp. 200-207 (2006).
- [2] S. Inokuchi, K. Sato and F. Matsuda: "Range imaging system for 3-D object recognition", ICPR, pp. 806-808 (1984).
- [3] C. Je, S. W. Lee and R.-H. Park: "High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging", ECCV, Vol. 1, pp. 95-107 (2004).
- [4] J. Pan, P. S. Huang and F.-P. Chiang: "Color-coded binary fringe projection technique for 3-d shape measurement", Optical Engineering, **44**, 2, pp. 23606-23615 (2005).
- [5] J. Salvi, J. Battle and E. M. Mouaddib: "A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement", Pattern Recognition, **19**, 11, pp. 1055-1065 (1998).
- [6] S. Rusinkiewicz: "Real-time 3D model acquisition", ACM SIGGRAPH, pp. 438-446 (2002).
- [7] O. Hall-Holt and S. Rusinkiewicz: "Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects", ICCV, Vol. 2, pp. 359-366 (2001).
- [8] L. Zhang, N. Snavely, B. Curless and S. M. Seitz: "Space-time faces: High-resolution capture for modeling and animation", ACM Annual Conference on Computer Graphics, pp. 548-558 (2004).
- [9] T. P. Koninckx and L. V. Gool: "Real-time range acquisition by adaptive structured light", IEEE Trans. on PAMI, **28**, 3, pp. 432-445 (2006).
- [10] K. Sato and S. Inokuchi: "Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask", Proc. of First ICCV, pp. 657-661 (1987).