

デブルーイン系列と Belief-Propagation を用いた高密度ラインパターン 検出による高速動体の 3 次元計測手法

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

[†] 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

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

^{†††} 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

E-mail: [†]{ohta,sagawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{††}{t_kawa,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp,
^{†††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 非常に高速に動く 3 次元物体の形状を高密度、高フレームレートで取得できれば、多くの物体解析や事故防止等に大きく貢献できる。本論文ではラインベースによるワンショットスキャンを拡張して密な形状を取得できるシステムを提案する。ワンショットスキャンは 1 枚の画像から物体の形状を計測できるが、密なパターンを使用できないため、計測結果が疎になるなど幾つかの解決すべき課題があった。そこで、パターンの交点を用いた形状計測の拡張、デブルーイン系列と belief-propagation による線検出の効率化、という手法を組み合わせるこれらの課題を解決した。この提案手法とハイスピードカメラを用いて実験を行ったところ、高フレームレートで高速移動物体の密な形状の取得に成功した。

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

3D reconstruction method with detection of dense pattern using the de Bruijn sequence and Belief-Propagation

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

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

^{††} Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

^{†††} Faculty of information sciences, Hiroshima City University

3-4-1 Ozuka-higashi, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194, Japan

E-mail: [†]{ohta,sagawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{††}{t_kawa,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp,
^{†††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract Dense 3D reconstruction of extremely fast moving objects could contribute to various applications such as body structure analysis and accident avoidance and so on. In this paper, we propose such a technique based on a one-shot scanning method that reconstructs 3D shape from a single image. To realize dense 3D reconstruction from a single image, there are several issues to be solved; *e.g.* the reconstruct result is sparse because it can not use a dense pattern. This paper describes the solutions of the issues by combining two methods, that is (1) extension of shape from intersections of lines method, and (2) efficient line detection technique based on de Bruijn sequence and belief-propagation. In the experiments, the proposed method successfully captured the sequence of dense shapes at high frame rate.

Key words Active scanning system, Shape reconstruction of moving object, Projector-camera system, One-shot scanner, Shape from coplanarity

1. はじめに

非常に高速に動く物体の密な3次元形状を正確に計測することが幅広い分野で強く求められている。例えば、物体が破裂する瞬間の形状変化や、高速に回転するタービンの羽などを停止することなくその3次元形状を取得できれば、多くの物体解析や事故防止等に大きく貢献できると考えられる。

これを実現するために、多くのレーザベースの3次元計測システムが開発されている。しかし、これらの方式は1方向、または2方向にレーザ光を走査する必要があるため、時間がかかり、高速移動物体に対して利用できない。また、パッシブステレオ法は一度の撮影で済むものの、テクスチャの少ない物体に対して密な形状計測を行うのが困難である。

一方、高速な形状計測のためにプロジェクタのように面光源を用いる手法 [1], [2] が提案されている。これらの手法ではカメラとプロジェクタ間の対応付けが重要であり、対応を一意に決定するために各画像中の点を特徴付ける情報が利用される。この情報は空間的な情報と時系列的な情報の2つに分けられる。本論文では、非常に高速移動する観測対象を計測することを目指しているため、1枚の画像のみを使用する空間的な情報を利用する手法が適している。

空間的な情報を用いた手法の例として、ウィンドウマッチングにより形状計測を行うカラーコード法が挙げられる [1], [3]。しかし、多くのカラーコード法は計測精度と密度に重大な問題がある。これらの手法はカメラ-プロジェクタ間の対応を決めるために、各ウィンドウ内の情報を用いてIDを一意に決定する必要がある。しかし、形状によるテクスチャ圧縮などの影響を受けるため、あまりパターン密度を上げることが出来ず、復元結果は疎になってしまう。また、出来るだけ多くの位置情報を効率よく埋め込む必要性から、多くの色情報が用いられることが一般的であるため、物体表面のテクスチャの影響を受けやすくなり不安定となる。

もし、色数の少ない、密度の高いパターンによりワンショット復元が実現できれば、上記の問題が解消され、高速物体の3次元形状が高密度、高精度で復元できる。本論文では、これを実現するために、(1) カメラ-プロジェクタ間のIDの対応を明確に決める必要の無い復元手法、(2) 2色のみから成るデブルーイン系列を縦横に用いて周期的なIDをパターンに埋め込む手法、という2つの手法を組み合わせた計測手法を提案する。

前者は直線パターン同士の交点から復元する手法 [4] ~ [6] を用いる。これらの手法はパターンのIDが必要ないという大きな利点があるが、多くの計算を必要とする。さらに、1自由度を持つ射影復元解しか得られないため、最後にユークリッドアップグレード処理が必要となり、不安定になりやすい [7]。このため、パターンを密にする

ことが出来ず、その結果、疎な復元になってしまう。本論文では大幅に計算効率を高める手法を用いることでこれらの問題の解決を目指す。

また、後者に関して、デブルーイン系列を用いた密なグリッドパターンを提案する。通常、すべてのピクセルに一意的なIDを割り振るためにはデブルーイン系列に多くの色が必要となる。一方、提案手法で用いる復元手法は形情報に拘束を加えるため、周期的なIDが良い。そのため、少ない色数で十分である。また、パターンが常に正しく検出される必要も無いため、非常に密なパターンを使うことができる。パターンを安定して抽出するために、belief propagation (BP) を用いることで縦横それぞれの隣接ピクセルも考慮に入れる。

以上で述べた両者の方法を組み合わせることにより、色数が少なく、単純なパターンでありながら、密で安定したワンショットスキャンを行なうことができる。その結果、高速物体の高密度、高精度な復元が実現できる。本論文の貢献は次の通りである。(1) 密で単純なパターンを用いた1画像からの形状計測の実現。これにより高速物体の密で安定した復元が可能となる。(2) BPによりパターンを安定して検出する手法を提案。(3) ペンシル構造による直線パターンの幾何拘束とデブルーイン系列の両方を用いた効率の良い安定した形状復元手法の提案。(4) 超高速物体の計測可能なシステムを実際に構築。

2. 関連研究

構造化光による復元ではパターンの時間的あるいは空間的な変化により位置情報を埋め込む [8]。時間的な変化のみを利用する方法は実装が容易であり、かつ、正確、密で安定なため、実アプリケーションにおいて広く利用されている [9]。しかし、この手法は複数の画像を必要とするため、高速な復元には不向きである。また、時間的な変化と空間的な変化の両方を利用して必要なパターン数を減らした研究もある [2], [10]。これらの手法でも物体の移動速度に制限があるため、超高速物体の復元には適さない。

また、厳密には構造化光法ではないが、動きも含めた時空間ステレオマッチングにより形状を復元する手法もある [1], [3]。これらの手法でも複数のパターンを必要とするため超高速物体の復元には適さない。

パターンの空間的なコード化のみを利用する手法では、1フレームの画像しか使わないため高速移動物体の復元に適している [11], [12]。しかし、これらの手法では位置情報のコード化に複数のパターンや色を使用するため、空間的な情報を一意に決定するためには、パターンを複雑にしなければならないという問題がある。このような複雑なパターンはテクスチャや、形状の不連続性、傾いた表面で起こるテクスチャ圧縮に影響されやすい。このため、過去の手法ではパターンの密度を低くしており、3次元復元結果は一般に疎で不安定である。

一方で、簡単な直線、またはストライプから成る1フ

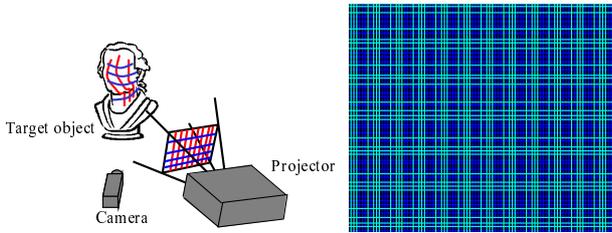


図 1 (左) 復元システム．複数の直線を投影し，その交点を用いて復元を行う．(右) 投影パターン

レームの画像から復元を行う研究が行われている．特に，パターンに直線を利用した手法では密な復元に適した位置情報を含む．長らは強度組み合わせを最適化した直線からなるパターンを用いた手法を提案した [13]．しかし，ID の決定に輝度値変化を用いるため，使用用途が限られる．また，Koninckx らはストライプの集合という単純なパターンを用いて，密に形状復元可能な手法を提案した [14]．この手法は密なパターンに相対的に番号付けを行い，物体の表面の局所的滑らかさを仮定するため，形状の不連続性または線抽出の失敗によって形状復元が阻害される．同様に Frueh と Zakhor [15] は縦方向のストライプと横方向の直線を使用した．ストライプは形状復元に用いられ，直線はストライプの位置特定に用いられた．投影された直線パターンを 3 次元平面とシーン間の交点とみなすことにより 3 次元形状を復元する手法も提案されているが [4] ~ [6]，これらの手法は計算量と解の不安定性より疎なパターンしか使用できないという問題があった．

3. システム構成

提案する 3 次元計測システムは，図 1(左) のように，カメラ 1 台，プロジェクタ 1 台からなる．カメラとプロジェクタはキャリブレーション済みとする．つまり，それぞれの内部パラメータとカメラ-プロジェクタ間の並進，回転は既知である．投影パターンは変化しないため，同期の必要はない．縦横の直線を組み合わせたグリッドパターンをプロジェクタから投影し，カメラで撮影する．グリッドパターンは縦か横かのみ識別が必要であるが，ライン一つ一つの識別は不要である．

本研究ではこのシステム構成の下で，効率的な 3 次元復元手法を提案する．初めに，投影パターンを撮影画像から抽出し，縦と横に識別する．パターンを安定して検出・識別するために belief propagation(BP) とデブルーイン系列を用いた手法を提案する．この手法では BP で使用するため各ピクセルにラベル付けを行い，曲線の境界をサブピクセルの精度で検出する (4. 章)．

投影された直線は 3 次元空間中に平面を形成する．グリッドパターンの交点(グリッド点)は縦方向，横方向で検出された曲線から抽出され，これらのグリッド点から縦平面，横平面について簡単な拘束が得られる．すべてのグリッド点に対する拘束条件を解くことで縦平面，横

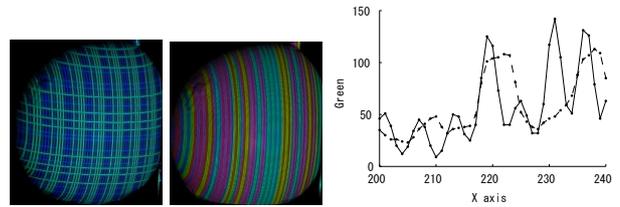


図 2 線検出：(左) 提案手法での利用パターン，(中) 過去の研究での利用パターン，(右) 提案手法のパターンと過去の研究のパターンの画像データ

平面が解として得られ，シーンを再構成できる (5. 章)．

4. ワンショットスキャンで用いる高密度パターンの検出

本論文で提案する直線パターンの検出は 2 ステップから成る．それは，色によらない直線検出と，図 1(右) と図 2(左) のようなデブルーインパターンに基づくカラーコードの識別である．

過去の研究では，図 2(中) のようなストライプパターンが使用されていた．この場合，ストライプの色がお互いに混ざり合うという問題がある．図 2(右) では図 2 の左と中央の画像における緑の輝度値を比較している．実線と破線はそれぞれ，提案パターンを用いた場合の輝度値の分析結果，過去の研究のストライプパターンを用いた場合の輝度値の分析結果を表しており，変化率は破線より実線のほうが大きい．このため，一般に良く利用される，色の変化に基づくライン検出手法では，細い直線の方が密なパターンの検出に適していると考えられる．密な直線の検出を行うために，線の垂直方向の輝度値のピークと定義する．この定義により，理想的には全てのピクセルで直線検出が可能である．さらに，輝度値の極小部分(ネガティブピーク)を検出することにより直線の密度を倍増できる．

提案手法の利点は以下の通りである．(1) 縦線と横線が同じ色であっても，方向を指定することで投影されたグリッドパターンを検出できる．(2) 各ピクセルのラベルは隣接ピクセルの情報を使って決定されるため，ノイズに強い．

4.1 密な直線パターンの検出

belief propagation(BP) に基づく手法を提案する．BP [16] とは，次の式で定義されたグラフのエネルギー最小化問題である．

$$E(f) = \sum_{p \in V} D_p(f_p) + \sum_{(p,q) \in U} W_{pq}(f_p, f_q), \quad (1)$$

ここで， f は決定されたラベルの集合， V はノードの集合， U はエッジの集合， p はグラフのノードを表す． $D_p(f_p)$ はラベル f_p を p へ割り振るときのデータコストである． $W_{pq}(f_p, f_q)$ はラベル f_p と f_q を隣接ノードに割り振るときの不連続性コストである．

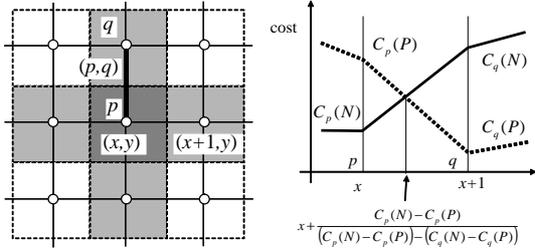


図3 線検出: (左)BP のグラフ, (右) サブピクセルの計算法

提案手法は縦線と横線を独立して検出する．ここでは縦線の検出について考えることとする．直線の検出では，ノードはピクセルに対応し，エッジは4近傍の隣接ピクセル(図3(左)のようなピクセル)のつながりに対応する．提案手法はすべてのピクセルを，カメラの x 軸(水平)方向に沿った輝度値の導関数に基づいた3つのラベルに区別する．そのラベルとはポジティブ (P)，ネガティブ (N)，およそゼロ (0) である．上記の線の定義から，線をラベル P と N の境界として検出する．

データコスト $D_p(f_p)$ は次の式によって計算される．

$$D_p(f_p) = \begin{cases} I(x+1, y) - I(x, y) & \text{if } f_p = N \\ |I(x+1, y) - I(x, y)| & \text{if } f_p = 0 \\ -(I(x+1, y) - I(x, y)) & \text{if } f_p = P \end{cases}, \quad (2)$$

ここで， $I(x, y)$ はピクセル $p = (x, y)$ の輝度値を表す．不連続性コスト $W_{pq}(f_p, f_q)$ は以下のようにエッジの向きに依存する．

$$W_{pq}(f_p, f_q) = \begin{cases} -\lambda(f_q - f_p)(I(x+1, y) - I(x, y)) & \text{if edge } (p, q) \text{ is along x-axis} \\ |f_q - f_p| & \text{if edge } (p, q) \text{ is along y-axis} \end{cases}, \quad (3)$$

ここで， f_p と f_q は $0, 1, 2$ のいずれかであり，それぞれ $N, 0, P$ を表す．エッジ方向に対する不連続性コストの変化により，提案手法は横線が同じ色でもそれを無視して縦線を検出できる．max-product BP アルゴリズムに基づくノード間のメッセージの反復送信により解を求めることができる．

各ノードでは最小コストのラベルを選択する．ラベル P から N への境界を検出した場合，線のサブピクセル位置を以下の計算で求める．

$$x + \frac{C_p(N) - C_p(P)}{(C_p(N) - C_p(P)) - (C_q(N) - C_q(P))}, \quad (4)$$

ここで， $C_p(f_p)$ はデータコストとメッセージの合計値である最終コストを表す(図3右)． p の x 座標を x とすると， q の x 座標は $x+1$ となる．

横線は方向を変えることで同じような手法で検出できる．ネガティブピークの検出も同じように行う． P から

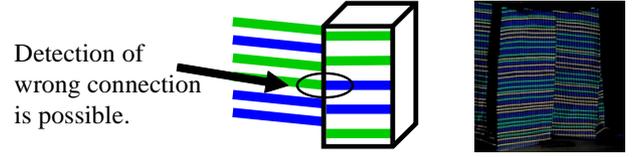


図4 (左) ストライプを利用した場合の誤接続, (右) 画像例

N への境界を見つける代わりに， N から P への境界をネガティブピークとする．

4.2 カラーコードの識別

提案手法は本来ライン一つ一つの識別は不要である．しかし，最終的なユークリッドアップグレード(第5.4節)の際に，ラインパターン群同士の適合性を見て1自由度を解消するため，少しでも識別されたラインがあればより安定した解が期待できる．そこで，本論文では，デブルーイン系列[11], [17], [18]に基づいたカラーコードの識別を行う．

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．

カラーパターンを用いる利点は2つある．初めに，線の誤接続が色情報により解消できる点である．物体の境界では，違う線がつながり，連続した線のように見える現象が起こる．たとえこのような現象が起こったとしても，図4のようにカラーパターンによって不連続性を認識できる．

2つ目の利点は平面集合のマッチング(詳細なアルゴリズムは5.章で示す)がカラーパターンによって簡単になる点である．カラーパターンを使わない場合，あいまい性を決定するためには投影パターンと観測パターン間のすべての組み合わせを比較しなければならない．デブルーイン系列を使用する場合，観測された直線は q^n ごとに投影パターンと比較すればよい．これは原理的には線の密度が q^n 倍になったといえる．その上，カラーパターンを使用した以前の手法は多くの直線を一意に識別する必要があるため， q と n は大きな数でなければならない．しかし，提案手法では小さな q と n で作られた定期的なパターンで十分である．本論文では図1(右)のような色数2，ウィンドウサイズ3のデブルーイン系列を使用した．すなわち，パターンの直線は8本周期となる．

安定してデブルーイン系列を識別するために[18]では動的計画法が使われたが，提案手法では縦線と横線を用いているため，BPに基づいた2方向正則化を利用することでより安定したデブルーイン系列の識別ができる．縦線と横線を決定すると，交点を求めることができる．そのため，交点をグラフのノード，エッジを観測線とみ

なす．1 サイクルに 8 本の直線を含むため，ラベルの数は 8 である．

横線でのダブルイン系列の識別のデータコスト $D_p(f_p)$ は以下の式で与えられる．

$$D_p(f_p) = |H(p) - H(f_p)|, \quad (5)$$

ここで， $H(p)$ は交点 p と隣接する交点の中間点での色相， $H(f_p)$ は投影パターンでのラベル 0~7 の線の色相である．

不連続コスト $W_{pq}(f_p, f_q)$ は次の式で与えられる．

$$\begin{aligned} W_{pq}(f_p, f_q) &= \min(|(f_p + d(p, q)) \bmod 8 - f_q|, \\ &|8 - (f_p + d(p, q)) \bmod 8 - f_q|)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで， $d(p, q)$ は， q が y 軸方向の隣の横線なら 1， y 軸方向と逆の隣の横線なら -1，それ以外は 0 である．すなわち， $W_{pq}(f_p, f_q)$ もエッジ方向に依存する．

5. グリッドパターンからの効率的な形状復元

5.1 概要

本論文では，グリッドパターンを照射してシーンを再構成する．構造化光の一種として，平面状の広がりを持つ光を利用する方法がある．このような構造化光は，ラインレーザや，プロジェクタの直線パターン，直線状エッジの影などで生じる．平面が校正されていれば，復元は三角測量で行なわれる．しかし，提案手法では縦や横の平面は校正されていないため，このままでは復元が出来ない．最近，校正されない平面から形状を復元する研究が行われている (Shape from coplanarity) [4], [5], [7], [19]．さらに，グリッドパターンから形状復元する研究も行われている [6]．しかし，上記の手法は平面を 3 パラメータで表現して解く方式のため，平面の数が増えると急激に計算量が増え，解も不安定になるという問題があった．そのため疎にならざるを得ず密な復元が実現出来ない．

一方で，Shape from coplanarity 問題に関して，平面に拘束を与えて平面パラメータを減らして，解を安定的に求める研究が行われている．Bouguet らは，全ての平面が，単一の光源から生じるため一点を共有すると仮定し，この拘束により，平面を 2 つのパラメータで表現することで，計算量を減らし，安定した解を得ている [4]．

本論文では，Bouguet らの考えを拡張し，平面がある軸を共有する場合を考える．このような構造は，pencil of planes (図 5(左)) として知られる．このように軸を共有するような平面群を構造化光として利用するケースは，例えば，プロジェクタでグリッドパターンを投影する場合である．一つの平面は，通常 3 パラメータで表現できるが，平面が pencil of planes を構成する場合，これらの平面は 1 パラメータで表現できる．この表現を利用してシーン復元を定式化すると，3 パラメータを利用する

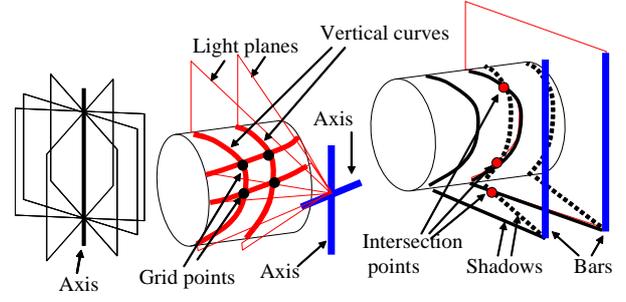


図 5 (左) ペンシル構造，(中) cast-shadow の例，(右) ワンショットアクティブステレオの例

場合に対して変数の数と計算量が大幅に削減でき，解の安定性が増す．

具体的には， L 交点を持つ $M \times N$ のグリッドの場合，3 パラメータ表現では $\{L + 2(M + N)\} \times 3(M + N)$ の行列の SVD を全て解くが，提案手法では $N \times N$ 対称行列の最小固有値に対応する固有ベクトルを求めるのみでよい．

5.2 平面の表現

Kawasaki らは，各平面を 3 パラメータで表現していた [6]．しかし，縦平面の集合が pencil of planes であることを利用すると，それぞれの縦平面は 1 パラメータで表現される^(注1)．これにより大幅な変数の削減が可能となり，効率的な処理が可能となる．横平面も同様である．

まず，縦平面と横平面は両方とも原点を通らないと仮定する．この時，縦平面は，

$$v_1x_1 + v_2x_2 + v_3x_3 + 1 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{x} + 1 = 0 \quad (7)$$

と表される． $\mathbf{v} \equiv (v_1, v_2, v_3)$ は平面パラメータで， $\mathbf{x} \equiv (x_1, x_2, x_3)$ は空間中の点である．この平面は，プロジェクタの光学中心 $\mathbf{p} \equiv (p_1, p_2, p_3)$ を通り，プロジェクタの上方向 $\mathbf{q} \equiv (q_1, q_2, q_3)$ を方向ベクトルとする直線を含む．これから，

$$v_1p_1 + v_2p_2 + v_3p_3 + 1 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} + 1 = 0 \quad (8)$$

$$v_1q_1 + v_2q_2 + v_3q_3 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (9)$$

である．これらを \mathbf{v} に関する方程式ととらえると，1 自由度の一般解は

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \eta(\mathbf{p} \times \mathbf{q}) \quad (10)$$

と表せる．ただし \mathbf{v}_0 は式 (8), (9) の条件を満たす任意の平面パラメータ (例えば， $\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{p} + 1 = 0, \mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{q} = 0$) である．同様に，横平面のパラメータ $\mathbf{h} \equiv (h_1, h_2, h_3)$ も， $\mathbf{h} = \mathbf{h}_0 + \rho(\mathbf{p} \times \mathbf{r})$ と表せる．ただし \mathbf{r} は横平面が共有する直線の方向ベクトルである．プロジェクタの光学中心を通り，画像平面に平行な平面 (プロジェクタの focal

(注1): 双対空間の中では，各平面は 1 点で表される．pencil of planes は双対空間中では直線にあたり，1 パラメータ表現は直線上の点を 1 パラメータで表現することに相当する．

plane) は、横平面と縦平面の集合で共有されるので、この平面パラメータを s とし、 $\mathbf{v}' \equiv \mathbf{p} \times \mathbf{q}$ 、 $\mathbf{h}' \equiv \mathbf{p} \times \mathbf{r}$ と定義すると

$$\mathbf{v} = \mathbf{s} + \eta \mathbf{v}', \quad \mathbf{h} = \mathbf{s} + \rho \mathbf{h}' \quad (11)$$

となる。

5.3 解法

縦平面 \mathbf{v} と横平面 \mathbf{h} の交線上の点が、正規化カメラ座標で $\mathbf{u} = (u, v)$ に観測された場合、 $\tilde{\mathbf{u}} = (u, v, 1)$ として、

$$\tilde{\mathbf{u}} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{h}) = 0 \quad (12)$$

が成り立つ [6]。この式に平面パラメータの式を代入すると、

$$\eta(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{v}') = \rho(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{h}') \quad (13)$$

という式が得られる。これは、交点の座標から、縦平面のパラメータ η と、横平面のパラメータ ρ の比率が求まることを意味する、非常に簡単な関係式である。

観測された縦方向の各曲線は、ある縦平面を表す。この曲線のインデックスを i とし、対応する縦平面のパラメータを η_i とする。また、観測された横曲線のインデックスを j とし、対応する横平面のパラメータを ρ_j とする。このとき、これらの曲線の交点の 2 次元座標を $\mathbf{u}_{i,j}$ とすると、 $\eta_i(\mathbf{u}_{i,j} \cdot \mathbf{v}') = \rho_j(\mathbf{u}_{i,j} \cdot \mathbf{h}')$ である。定数 $F_{i,j} \equiv \mathbf{u}_{i,j} \cdot \mathbf{v}'$ 、 $G_{i,j} \equiv \mathbf{u}_{i,j} \cdot \mathbf{h}'$ を定義すると、

$$F_{i,j} \eta_i = G_{i,j} \rho_j \quad (14)$$

である。全ての交点についての上記方程式は、観測された縦曲線の数を M 、観測された横曲線の数を N 、交点数を L とし、 $(M+N)$ 個の変数 ($\eta_i, \rho_j, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$) を持つ、 L 個の方程式となる。

交点のインデックスを k とし、 k 番目の交点が縦平面 $i(k)$ と横平面 $j(k)$ の交点であるとする。行列 \mathbf{T} を、 k 行 $i(k)$ 列の要素が $F_{i(k),j(k)}$ であり、残りの要素が 0 であるような行列であるとし、 \mathbf{R} を、 k 行 $j(k)$ 列の要素が $G_{i(k),j(k)}$ であり、残りの要素が 0 であるような行列であるとする。 $\vec{\eta} \equiv (\eta_1, \dots, \eta_M)^\top$ 、 $\vec{\rho} \equiv (\rho_1, \dots, \rho_N)^\top$ と定義すると、方程式 (14) は、

$$\mathbf{T} \vec{\eta} = \mathbf{R} \vec{\rho} \quad (15)$$

となる。

式 (15) を最小自乗法で解くには、

$$\|\mathbf{T} \vec{\eta} - \mathbf{R} \vec{\rho}\|^2 = \left\| [\mathbf{T}] - \mathbf{R} \begin{bmatrix} \vec{\eta} \\ \vec{\rho} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (16)$$

を最小化する。そのためには、 $(M+N) \times (M+N)$ 行列 $[\mathbf{T}] - \mathbf{R}^\top [\mathbf{T}] - \mathbf{R}$ の最小固有値に対応する固有ベクトルを求めればよい。このような問題には、効率的な解法が知られており、そうした方法を利用することで高速に

解を求めることが出来る。

さらに変数を減らすことも可能である。

$$\min_{\vec{\eta}, \vec{\rho}} \|\mathbf{T} \vec{\eta} - \mathbf{R} \vec{\rho}\|^2 = \min_{\vec{\rho}} (\min_{\vec{\eta}} \|\mathbf{T} \vec{\eta} - \mathbf{R} \vec{\rho}\|^2) \quad (17)$$

であるが、 $\min_{\vec{\eta}} \|\mathbf{T} \vec{\eta} - \mathbf{R} \vec{\rho}\|^2$ は、疑似逆行列 $\mathbf{T}^\dagger \equiv (\mathbf{T}^\top \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^\top$ を利用して、 $\vec{\eta} = \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} \vec{\rho}$ の時に達成される。 $\mathbf{T}^\top \mathbf{T}$ の (r, c) 成分は、

$$(\mathbf{T}^\top \mathbf{T})_{r,c} = \sum_s \mathbf{T}_{r,s}^\top \mathbf{T}_{s,c} = \sum_s \mathbf{T}_{s,r} \mathbf{T}_{s,c} \quad (18)$$

$$= \begin{cases} \sum_s T_{s,r}^2 & \text{if } r = c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

となるので、これは対角行列である (式 (19) は、 $\mathbf{T}_{s,c}$ の各行には非零成分が一つしか無いことによる)。よって、 $(\mathbf{T}^\top \mathbf{T})^{-1}$ をすぐに求めることができ、 \mathbf{T}^\dagger を直接計算できる。 $\vec{\eta} = \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} \vec{\rho}$ を式 (17) に代入すると、

$$\min_{\eta, \rho} \|\mathbf{T} \vec{\eta} - \mathbf{R} \vec{\rho}\|^2 = \min_{\rho} (\|\mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} \vec{\rho} - \mathbf{R} \vec{\rho}\|^2) \quad (20)$$

$$= \min_{\rho} (\|(\mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} - \mathbf{R}) \vec{\rho}\|^2) \quad (21)$$

より、 $(\mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} - \mathbf{R})^\top (\mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} - \mathbf{R})$ の最小固有値に対応する固有ベクトルを求めれば、 $\vec{\rho}$ の最適値 $\hat{\rho}$ が求まり、 $\vec{\eta}$ の最適値 $\hat{\eta} = \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} \hat{\rho}$ も求められる。 $(\mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} - \mathbf{R})^\top (\mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger \mathbf{R} - \mathbf{R})$ は $N \times N$ 行列なので、式 (16) の最適化と比べて、さらに計算時間を短縮することが出来る。

5.4 あいまい性の解消

前記固有ベクトルは、スケーリングの自由度を持つ。実際、方程式 (15) が成立するとき、 $\vec{\eta}$ と $\vec{\rho}$ を $c\vec{\eta}$ と $c\vec{\rho}$ に置き換えても成立する。そこでユークリッドアップグレードによりこのあいまい性を解消する必要がある。また、全ての曲線が、1 以上の交点を通じて「連結」していれば、この方程式はスケーリング以外の自由度を持たない。よって、3 次元復元は、交点でつながったグリッド線の連結集合ごとにおこなう。

c の値は方程式 (15) から求められないが、 c の真の値を \bar{c} とすると、 $\bar{c}\vec{\eta}$ 、 $\bar{c}\vec{\rho}$ で表される平面の集合は、プロジェクタから実際に照射されている、与えられたグリッドパターンと一致するはずである。そこで、 \bar{c} を c に関する 1 次元の探索で求めることが出来る [6]。本研究でも、あいまい性解消のために、同様の手法を利用する。

簡単のために、求められた解の横平面と、照射される横パターンのみ的一致度を判定するとする。照射される横パターンの数を P とし、これらの横パターンを通る平面のパラメータが、 $g_l, 1 \leq l \leq P$ であるとする。これらのパラメータは、与えられたグリッドパターンから事前に計算できる。この時、 $c\rho_j, 1 \leq j \leq N$ と $g_l, 1 \leq l \leq P$ との照合を、誤差関数

$$E(c) = \sum_{1 \leq i \leq N} \min_{1 \leq l \leq P} e(\mathbf{g}_l, \mathbf{s} + c\rho_j \mathbf{h}'^l) \quad (22)$$

とする．ただし， $e(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ は，ベクトル \mathbf{a}, \mathbf{b} のなす角度の自乗とする．この関数 $E(c)$ を c について最小化することで， c を求めることが出来る． $E(c)$ は，非常に多くの極小を含むので，最適化の手法は利用しにくい．

そこで，本論文では，解探索の安定性を増やすために，デプルーイン系列の ID を使用する．具体的には，式 (22) で投影パターン \mathbf{g}_l の ID と観測平面 $\mathbf{s} + c\rho_j \mathbf{h}'^l$ の ID が同じときのみ比較を行うものとした．つまり， $B(\mathbf{a})$ を平面 \mathbf{a} のデプルーイン ID とすると， $B(\mathbf{a}) = B(\mathbf{b})$ の場合， $e(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ は平面 \mathbf{a} と \mathbf{b} のなす角度の自乗を出力し，それ以外では 0 を出力する．これにより，比較候補が大幅に減り（本論文の場合，約 $\frac{1}{8}$ ），解探索の安定性は大幅に増加する．また，一部の ID を誤識別したとしても，全体の最適化に及ぼす影響は極めて限定的であり，ほとんど復元に影響しないと考えられ，実際，6.1 節の実験によりこれが確認できた．これは，誤識別が直接的に影響するカラーコード法に対する本手法の大きなメリットである．

6. 実験

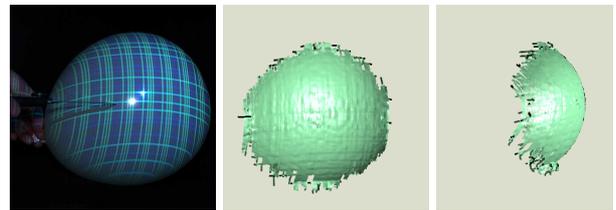
6.1 比較と評価

本手法の有効性を確認するために，テクスチャ付きの物体（本）とオクルージョンのある物体（カップ）の計測を行った．提案手法では青と緑の 2 色で長さ 3 のデプルーイン系列を縦線と横線に使用した．また，比較のため，デプルーイン系列に基づいた縦線のみを用いたカラーコード法 [18] を使用し，形状計測を行った．

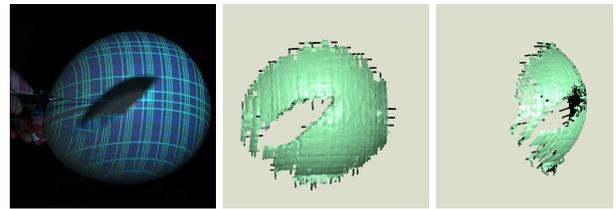
図 6 に結果を示す．カラーコード法では，ID の対応があいまいでもグリッド点から得られた幾何的情報とコード ID の両方を用いて 3 次元形状を復元する．提案手法では 2 色しか使用しないため，エッジの抽出はテクスチャに影響されない．また，提案手法とカラーコード法での復元点の数はそれぞれ 43852(本)/24796(カップ)と 12321/8319 であった．これより，提案手法は密なパターンを使用しているため，カラーコード法より 3.3 倍多くの点を復元できていることが分かる．また，本の表面は平面である事を利用し，復元点からそれぞれ平面を当てはめ，平面と復元点との RMS 誤差を求めた．提案手法とカラーコード法の RMS 誤差はそれぞれ 2.09mm と 4.15mm であった．カラーコード法の RMS 誤差を計算する際，多くの外れ値を手作業で取り除いたが，提案手法では必要がなく，提案手法は過去のカラーコード法より，密で安定した復元を行うことができることが確認できた．

6.2 風船の破裂と陶器の皿の破壊

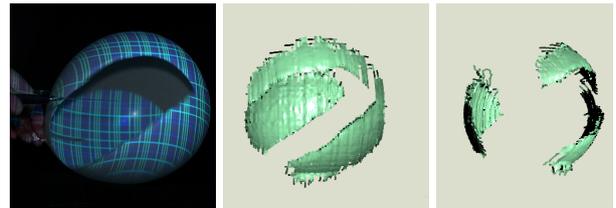
次に，高フレームレートでの復元の可能性を検証するため，形が変わる物体を使用して密な 3 次元形状の復元



(a) frame No. 809/1000 fps.

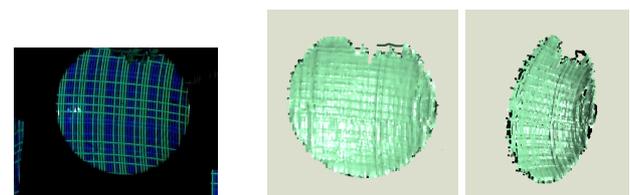


(b) frame No. 822/1000 fps.

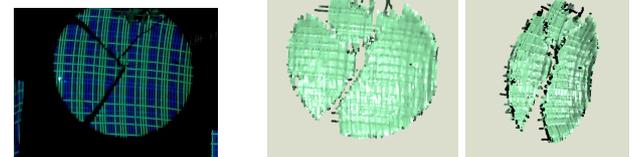


(c) frame No. 824/1000 fps.

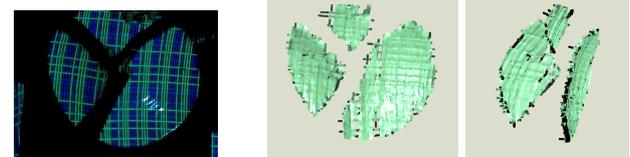
図 7 破裂した風船の復元結果



frame no. 12/300fps.



frame no. 14/300fps.



frame no. 19/300fps.

図 8 皿を壊したときの復元結果

を行った．ここではフレームレート 1000fps，シャッタースピード 1/20000 で風船の破裂，フレームレート 300fps，シャッタースピード 1/3200 で皿を割る様子という 2 つのシーンを撮影した．風船に関して，破裂が早く，割れる瞬間は図 7 のように数フレームしか撮影できなかったが，正しく形状復元されていることが分かる．皿に関して，密な復元手法のおかげで，皿のひびが広がる様子を 3 次元情報で知ることができる．

7. 結論

本論文では密な 3 次元形状を復元できるワンショット

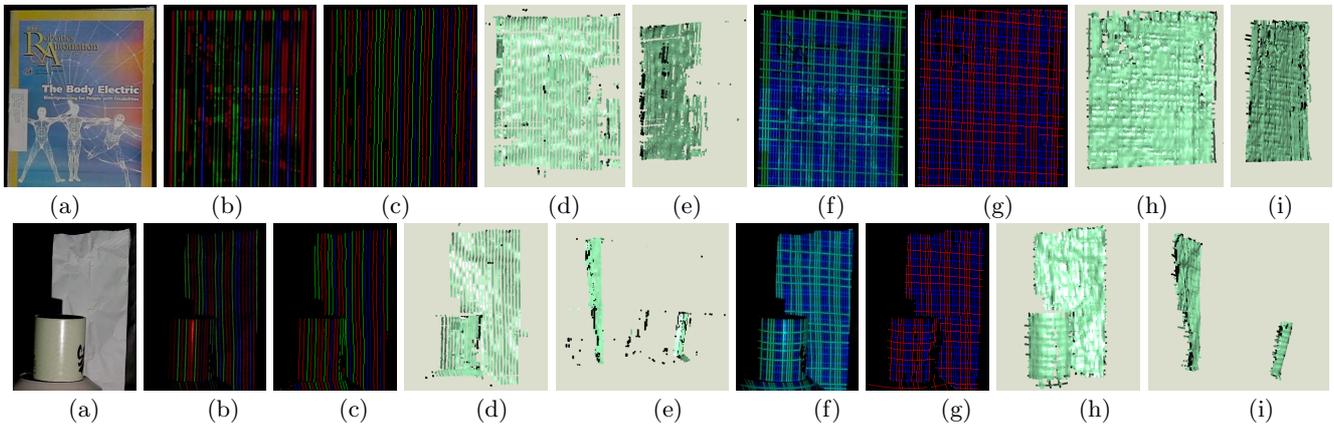


図6 カラーコード法 [18] と提案手法との比較 . (a) 目標物, (b) カラーコード法での撮影画像 (c) カーブ検出 (d)(e) 復元結果 (f) 提案手法での撮影画像 (g) カーブ検出 (h)(i) 復元結果

アクティブステレオシステムを提案した。提案手法ではグリッドパターンをプロジェクタから投影し、それをカメラで撮影することで復元を行う。密な投影パターンの線を安定して検出するために、belief propagation (BP) に基づいてピクセルを分類し、その境界を使うことでサブピクセル精度で直線パターンを抽出する。

さらに、本論文では3次元復元において、投影パターンによる幾何制約として pencil of planes を用いることで大幅に計算量を削減する手法を提案した。この復元手法は、パターンを一意に決定する必要がないため、グリッドパターンに用いる色は2色で十分であり、安定してパターンを抽出できる。さらに、抽出した線にデブルーイン系列を用いたIDをラベル付けすることで、最終的なあいまい性の解消を安定化させる手法も同時に提案した。

提案手法の有効性を示すため、風船や陶器の皿の破壊のような高速物体の復元を行ったところ、高速・高密度な復元に成功した。

文 献

- [1] L. Zhang, N. Snavely, B. Curless and S. M. Seitz: "Spacetime faces: High-resolution capture for modeling and animation", ACM Annual Conference on Computer Graphics, pp. 548–558 (2004).
- [2] 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).
- [3] J. Davis, D. Nehab, R. Ramamoorthi and S. Rusinkiewicz: "Spacetime stereo: A unifying framework for depth from triangulation", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), **27**, 2, pp. 296–302 (2005).
- [4] J.-Y. Bouguet, M. Weber and P. Perona: "What do planar shadows tell about scene geometry?", CVPR, **01**, pp. 514–520 (1999).
- [5] H. Kawasaki and R. Furukawa: "Shape reconstruction from cast shadows using coplanarities and metric constraints", ACCVLNCS 4843, Vol. II, pp. 847–857 (2007).
- [6] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa and Y. Yagi: "Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern", CVPR, pp. 1–8 (2008).
- [7] H. Kawasaki and R. Furukawa: "Shape reconstruction and camera self-calibration using cast shadows and scene geometries", IJCV (published online, to appear for print) (2008).
- [8] 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, pp. 963–982 (1998).
- [9] S. Inokuchi, K. Sato and F. Matsuda: "Range imaging system for 3-D object recognition", ICPR, pp. 806–808 (1984).
- [10] M. Young, E. Beeson, J. Davis, S. Rusinkiewicz and R. Ramamoorthi: "Viewpoint-coded structured light", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2007).
- [11] 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).
- [12] P. Vuylsteke and A. Oosterlinck: "Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., **12**, 2, pp. 148–164 (1990).
- [13] 長元気, 盧存偉: "最適強度組み合わせパターン光投影手法と強度・位相解析手法を用いた高速高感度な三次元計測", 電子情報通信学会論文誌 D, **J89-D**, 4, pp. 883–887 (2006).
- [14] 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).
- [15] C. Frueh and A. Zakhor: "Capturing 21/2d depth and texture of time-varying scenes using structured infrared light", Proc. the 5th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 318–325 (2005).
- [16] P. Felzenszwalb and D. Huttenlocher: "Efficient belief propagation for early vision", IJCV, **70**, pp. 41–54 (2006).
- [17] J. Salvi, J. Batlle and E. M. Mouaddib: "A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement", Pattern Recognition, **19**, 11, pp. 1055–1065 (1998).
- [18] L. Zhang, B. Curless and S. Seitz: "Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming", Proc. First International Symposium 3D Data Processing Visualization and Transmission, pp. 24–36 (2002).
- [19] A. Ecker, K. N. Kutulakos and A. D. Jepson: "Shape from planar curves: A linear escape from flatland", CVPR, pp. 1–8 (2007).