

Belief-Propagation による高密度なグリッドパターン検出およびデブルーイン系列を用いた高速動物体のロバストな 3 次元計測手法

大田 雄也^{†a)} 佐川 立昌^{†b)} 古川 亮^{††c)} 川崎 洋^{†††d)}
八木 康史^{†e)} 浅田 尚紀^{††f)}

High Speed 3D Reconstruction method from Dense Grid Pattern using de Bruijn Sequence and Line Detection Technique based on Belief-Propagation

Yuya OHTA^{†a)}, Ryusuke SAGAWA^{†b)}, Ryo FURUKAWA^{††c)},
Hiroshi KAWASAKI^{†††d)}, Yasushi YAGI^{†e)}, and Naoki ASADA^{††f)}

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、動物体形状計測、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

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、高速に旋回す

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情報を利用する手法が適している。

[†] 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
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

^{††} 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

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

^{†††} 埼玉大学 工学部 〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255
Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

a) E-mail: ohta@am.sanken.osaka-u.ac.jp

b) E-mail: sagawa@am.sanken.osaka-u.ac.jp

c) E-mail: ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp

d) E-mail: kawasaki@cgv.ics.saitama-u.ac.jp

e) E-mail: yagi@am.sanken.osaka-u.ac.jp

f) E-mail: asada@hiroshima-cu.ac.jp

空間的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、あまりパターンの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 が不要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。そこで本論文では変数を減らすことで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 で良い。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。さらに、密なパターンを使用すると異なる線が 1 本につながって見えるという問題がある。そこで、異なる線には異なる ID が割り振られるという事実を利用して、つながった線を切断することができる。縦横同色を用いた密なグリッド

パターンを抽出するために、belief-propagation(BP) に基づいた方法を提案し、縦横別々に安定に線検出することを実現する。

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の提案。(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) 実際のシステムによる超高速物体を計測。

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变化により位置情報を埋め込む [8]。時間的变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、時間的变化と空間的变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 フレームの画像から復元を行う研究が行われている。

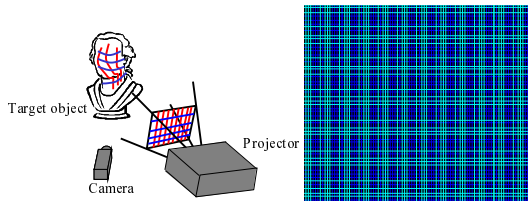


図 1 (左) 復元システム．複数の直線を投影し，その交点を用いて復元を行う．(右) 投影パターン

Fig. 1 (Left) Scanning system: multiple lines are projected and their intersections are detected and used for reconstruction and (right) projected pattern.

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]．この手法は各ラインの輝度値が異なるパターンを投影し，撮影画像中の複数のラインの輝度値からラインを一意的に決定する．しかし，輝度値の変化を用いるため，対象物体の色などに影響され，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．また，構造化光法ではないが，山根らはメッシュ情報を用いて形状を復元する手法を提案している [16]．この手法もメッシュから得られた交点の連結性を用いることで対応関係を導き，復元を行う．しかし，対象物体にメッシュを貼り付ける必要があるため，限られたシーンでしか使用できない．

3. グリッドパターンからの効率的な形状復元

3.1 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．本来，このシステムではグリッドパターンは縦か横かの識別が必要であるが，提案手法ではその必要が無い．これは本論分大きな貢献の 1 つである．

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．さらに，パターンを安定して検出・識別するためにデブルーイン系列を用いた手法を提案する．提案手法では 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. 節)．

投影された直線は 3 次元空間中に平面を形成する．縦方向の直線から形成される平面を縦平面，横方向の直線から形成される平面を横平面と呼ぶことにする．この時，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，横平面が解として得られ，シーンを再構成できる．

3.2 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，

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

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 $\mathbf{q} \equiv (q_1, q_2, p_3)$ を方向ベクトルとする直線を含む．これから，

$$v_1p_1 + v_2p_2 + v_3p_3 + 1 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} + 1 = 0 \quad (2)$$

(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当たり，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．

$$v_1q_1 + v_2q_2 + v_3q_3 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

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

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \eta(\mathbf{p} \times \mathbf{q}) \quad (4)$$

と表せる．ただし \mathbf{v}_0 は式 (2), (3) 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．プロジェクトの光学中心を通り，画像平面に平行な平面 (プロジェクトの focal 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 \mathbf{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

$$\mathbf{v} = \mathbf{s} + \eta\mathbf{v}', \quad \mathbf{h} = \mathbf{s} + \rho\mathbf{h}' \quad (5)$$

となる．

3.3 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，

$$\tilde{\mathbf{u}} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{h}) = 0 \quad (6)$$

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，

$$\eta(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{v}') = \rho(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{h}') \quad (7)$$

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，

$$F_{i,j}\eta_i = G_{i,j}\rho_j \quad (8)$$

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 (8) は，

$$\mathbf{T}\vec{\eta} = \mathbf{R}\vec{\rho} \quad (9)$$

となる．

式 (9) を最小自乗法で解くには，

$$\|\mathbf{T}\vec{\eta} - \mathbf{R}\vec{\rho}\|^2 = \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{T} & -\mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\eta} \\ \vec{\rho} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (10)$$

を最小化する．そのためには， $(M + N) \times (M + N)$ 行列 $\begin{bmatrix} \mathbf{T} & -\mathbf{R} \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \mathbf{T} & -\mathbf{R} \end{bmatrix}$ 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できる．

3.4 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 (9) 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 (9) からは求められないが， 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，プロジェクト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できる [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の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

$$E(c) = \sum_{1 \leq i \leq N} \min_{1 \leq l \leq P} e(g_l, s + c\rho_j \mathbf{h}^l) \quad (11)$$

で行う．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，非常に多くの極小値を含むので，ニュートン法などの最適化の手法は利用しにくい．このため，必要な精度の幅で最適な c の値を探索する．

本論文では，解探索の安定性を改善するために，後述するデブルーイン系列の ID を使用する．デブルーイン系列の識別によって各線には 0~7 の ID が割り当てられるため，具体的には，式 (22) で投影パターン g_l の ID と観測平面 $s + c\rho_j \mathbf{h}^l$ 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} のデブルーイン 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，5.1 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．

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) のようなストライブパターンが使用されていた．この場合，ストライブ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，過去研究のストライブ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

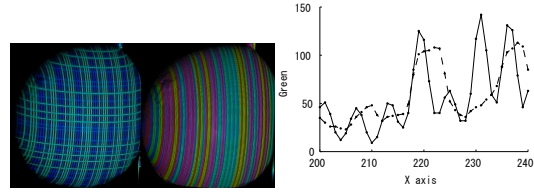


図 2 線検出：(左) 提案手法での利用パターン，(中) 過去の研究での利用パターン，(右) 提案手法のパターンと過去研究のパターンの画像データ

Fig. 2 Line detection: (left) projected pattern of the proposed system, (middle) projected pattern of a previous study, and (right) the profiles for the images for the proposed pattern (solid lines) and the previous study (dotted lines).

いると考えられる．密な直線の検出を行うために，線の位置を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 1 ピクセルおきに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 [17] 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．

$$E(f) = \sum_{p \in V} D_p(f_p) + \sum_{(p,q) \in U} W_{pq}(f_p, f_q), \quad (12)$$

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．

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

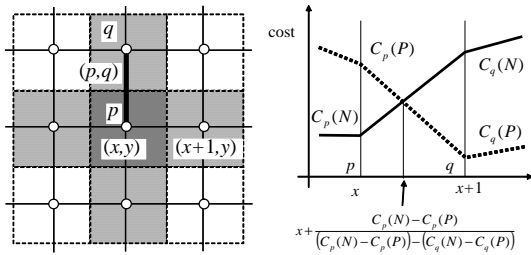


図3 線検出: (左)BP のグラフ, (右) サブピクセルの計算法

Fig.3 Line detection: (left) Graph for BP, and (right) subpixel calculation.

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 .

$$D_p(f_p) = \begin{cases} I(x+1, y) - I(x, y) & \text{if } f_p = N \\ |I(x+1, y) - I(x, y)| & \text{if } f_p = 0 \\ -(I(x+1, y) - I(x, y)) & \text{if } f_p = P \end{cases}, \quad (13)$$

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 .

$$W_{pq}(f_p, f_q) = \begin{cases} -\lambda(f_q - f_p)(I(x+1, y) - I(x, y)) & \text{if edge } (p, q) \text{ is along x-axis} \\ |f_q - f_p| & \text{if edge } (p, q) \text{ is along y-axis} \end{cases}, \quad (14)$$

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 .

$$x + \frac{C_p(N) - C_p(P)}{(C_p(N) - C_p(P)) - (C_q(N) - C_q(P))}, \quad (15)$$

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

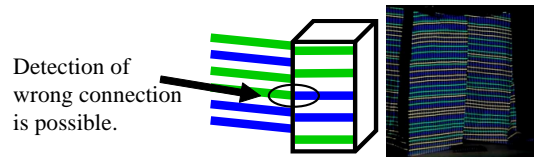


図4 (左) ストライプを利用した場合の誤接続, (右) 画像例

Fig.4 (Left) Using color stripes for detection of wrong connection and (right) actual example image.

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 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 . このライン検出はグラフに拡張されたグラフカットで解くこともできるが, サブピクセル位置を計算する際にコストを考慮するため BP のほうが適している .

実際に縦線を検出する過程を図5に示す . (a) は入力画像, (b)(c)(d) はメッセージパッシングの繰り返しによるラベルの変化を表しており, 画像中の色はそれぞれ, 赤: ラベル P , 青: ラベル N , 黒: ラベル 0 を表す . 初期状態では横線の影響が残っているが, メッセージパッシングを繰り返すことにより, 少しずつ横線が消え, 10 回目では横線がほとんど無くなった . 線検出結果を図5(e)に示す . ただし, 赤線はポジティブピーク, 緑線はネガティブピークを表す .

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3.4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 . さらに, 識別されたラインを用いると, 2つの重なった物体の境界部分で異なる線が連続した線に見えるという問題も解消できる . そこで, 本論文では, デブルーイン系列 [11], [18], [19] 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 .

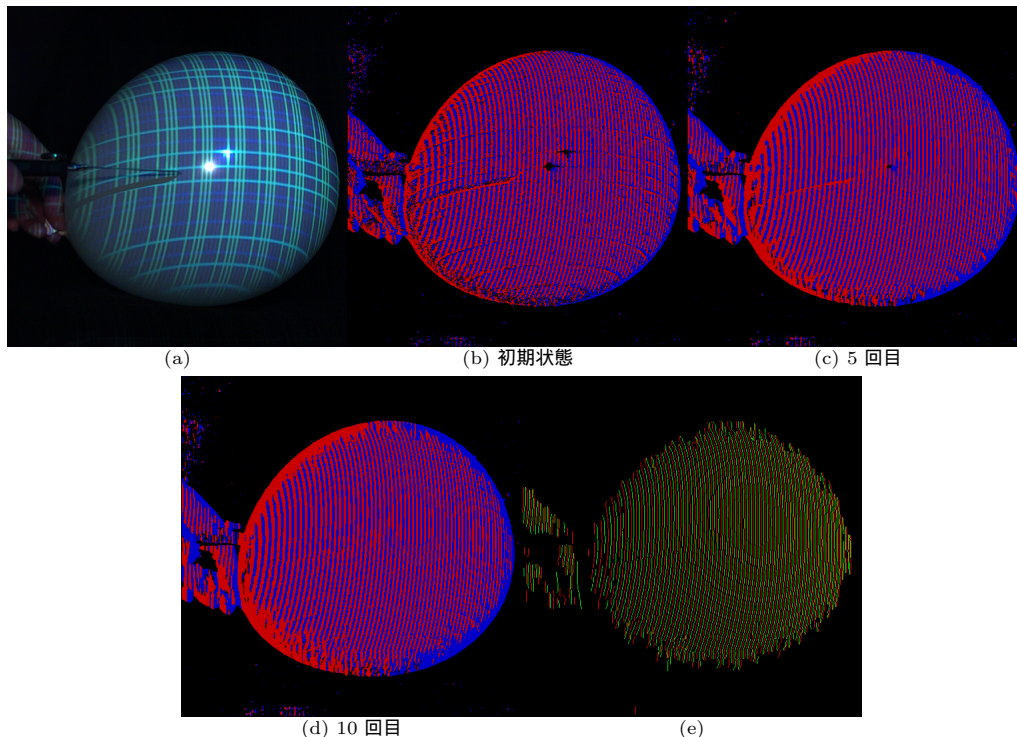


図 5 BP による線検出の過程。(a) 入力画像, (b)(c)(d) メッセージパッシングの繰り返しによるラベルの変化, (e) 線検出結果

Fig. 5 Line detection by BP : (a) input image, (b)(c)(d) change of label by message passing, and (e) result of line detection.

カラーパターンを用いる利点は 2 つある。まず, 1 つ目の利点は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 3. 節で示す) 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 本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 倍にできる。その上, カラーパターンを使用した以前の手法では, 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 で作られた周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, [19] 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, その接続情報を利用して 2 次元グラフを作る。そのグラフ上で BP に基づいた 2 方向正則化を行い, 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。

横線でのデブルー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。

$$D_p(f_p) = |H(p) - H(f_p)|, \quad (16)$$

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。

$$W_{pq}(f_p, f_q)$$

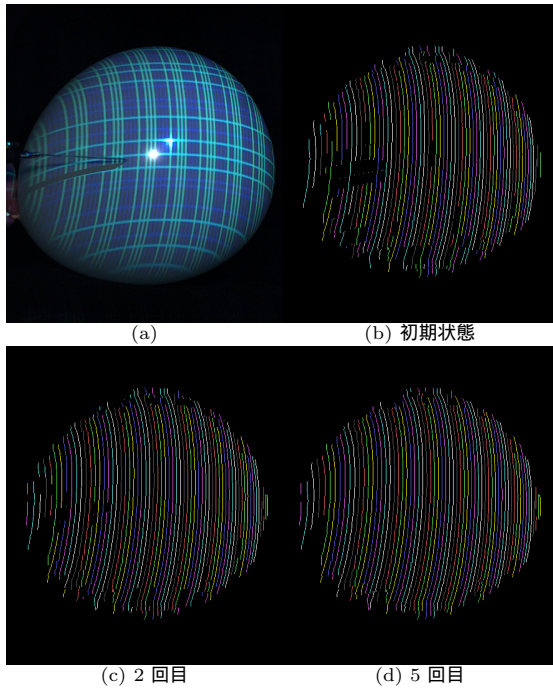


図 6 BP によるデブルーイン系列識別の過程 . (a) 入力画像, (b)~(d) メッセージパッシングの繰り返しによるラベルの変化
Fig. 6 Detection of de Bruijn sequence by BP : (a) input image, and (b)(c)(d) change of labels by message passing

$$= \min(|(f_p + d(p, q)) \bmod 8 - f_q|, |8 - (f_p + d(p, q)) \bmod 8 - f_q|)^2 \quad (17)$$

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 .

実際に縦線のデブルーイン系列を識別する過程を図 6 に示す . (b)~(d) はメッセージパッシングの繰り返しによるラベルの変化を表しており, ラインの色はそれぞれラベル 0~7 を表す . 初期状態ではラベルを識別できない部分があるが, メッセージパッシングを繰り返すことにより, ラベルを安定して決定することができる .

5. 実 験

5.1 カラーコード法との比較実験

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 のデブルーイン系列を縦線と横線に使用した . また, 比

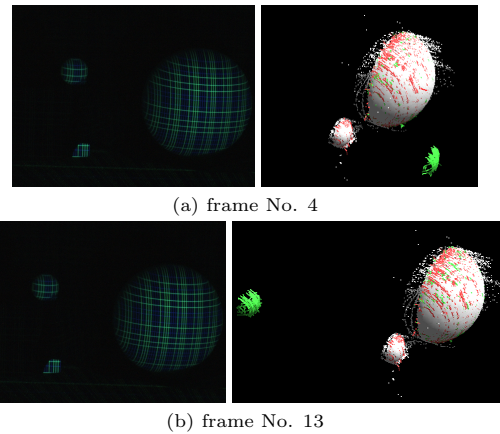


図 8 安定性向上による効果 (左) 入力画像 (右) 復元結果 . 赤 : デブルーイン系列あり, 緑 : デブルーイン系列無し, 白 : 時間的コード化法
Fig. 8 (left) input image, (right) reconstruction result. red : with de Bruijn sequence, green : without de Bruijn sequence, white : temporal code method

較のため, デブ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 [19] を使用し, 形状計測を行った .

図 7 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, 提案手法ではその必要がなく, 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 .

5.2 解探索の安定性向上による効果

次に, デブルーイン系列を用いることで, どの程度解探索が安定するのか検証した . ここでは図 8 (左) のように大小のボールの形状を計測した . また, 比較のため, 時間的コード化法を用いた復元も行った . 結果を図 8 (右) に示す . ただし, それぞれの色は, 赤 : デブルーイン系列あり, 緑 : デブルーイン系列無し, 白 : 時間的コード化法, に対応する . デブルーイン系

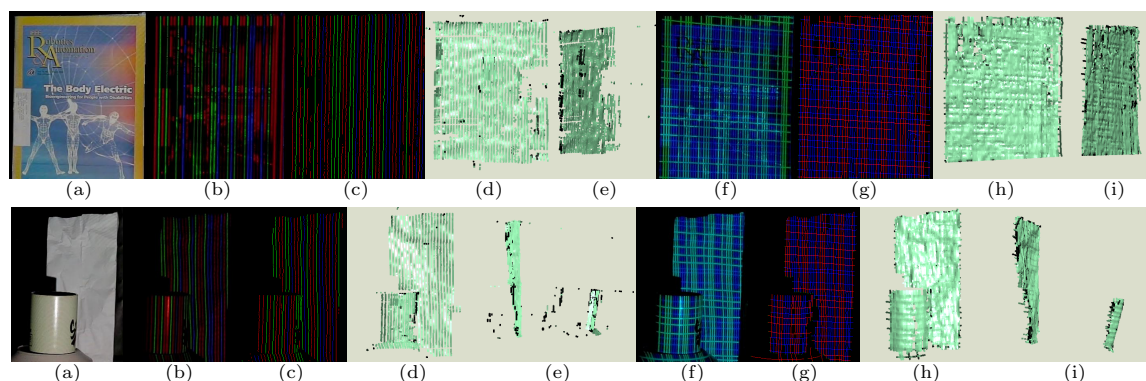


図 7 カラーコード法 [19] と提案手法との比較 . (a) 目標物, (b) カラーコード法での撮影画像 (c) カーブ検出 (d)(e) 復元結果 (f) 提案手法での撮影画像 (g) カーブ検出 (h)(i) 復元結果

Fig. 7 Comparison between color coding method [19] and our method: (a) target object, (b) captured scene with color coding method, (c) detect curves (d)(e) reconstructed shape, (f) captured scene with our method, (g) detected curves, and (h)(i) reconstructed shape.

列を用いずに復元を行った場合、小さいボールの復元を誤っている。これは、大きいボールには多くのラインが投影されているため、解探索が安定するが、小さいボールに投影されるラインの数が少ないため、解探索が安定せず、対応付けを誤ったためと考えられる。一方、デプラーイン系列を用いて復元を行った場合、比較候補が $\frac{1}{8}$ になるため、解探索の安定性が向上し、小さいボールのように投影されたラインの数が少なくても正しく復元された。

5.3 誤接続解消による効果

また、デプラーイン系列を用いて誤接続を解消することで、結果にどのような影響が出るのかを調べた。ここでは、図 9(a) のように誤接続が発生しているシーンに対し、誤接続を切断せずに復元した場合と、切断して復元した場合の結果を比較した。結果は図 9(b) ~ (e) のようになった。ただし、(b)(c) が誤接続を解消しない場合の復元結果、(d)(e) が誤接続を解消した場合の復元結果である。誤接続を切断しない場合では風船の手前と奥が 1 つの塊として認識され、正しく復元できなかった。一方、誤接続を切断した場合には、風船の手前と奥は別々の塊として認識され、球状の復元結果が得られた。このように、誤接続を切断することで形状を正しく復元できることが確認できた。

5.4 風船の破裂と陶器の皿の破壊

最後に、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

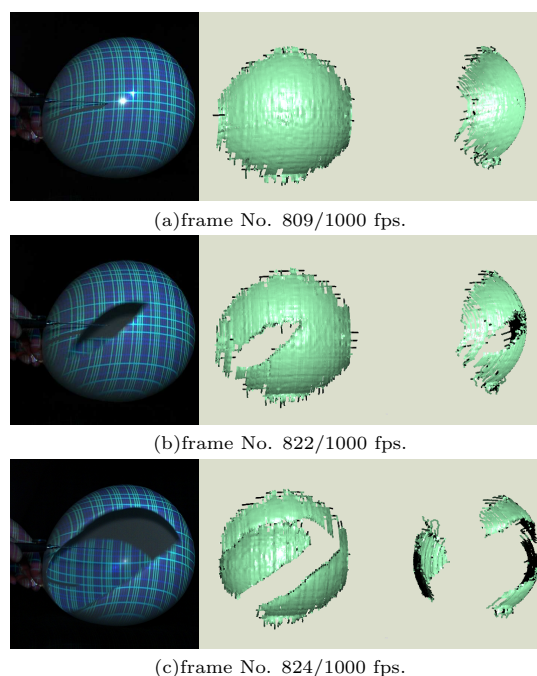


図 10 破裂した風船の復元結果

Fig. 10 Results of a exploding balloon.

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 10 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。

6. 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

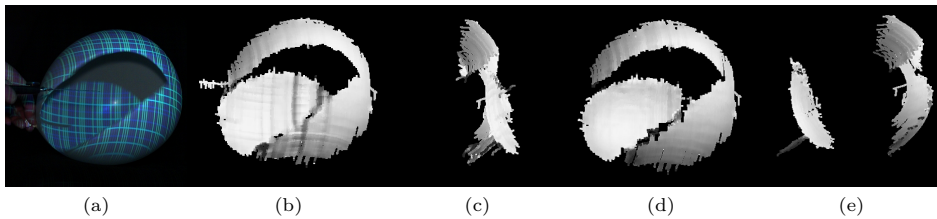


図 9 (a) 入力画像, (b)(c) 誤接続を解消しない場合の復元結果, (d)(e) 誤接続を解消した場合の復元結果
Fig.9 (a) input image, (b)(c) reconstruction result with wrong connection, and (d)(e) reconstruction result without wrong connection

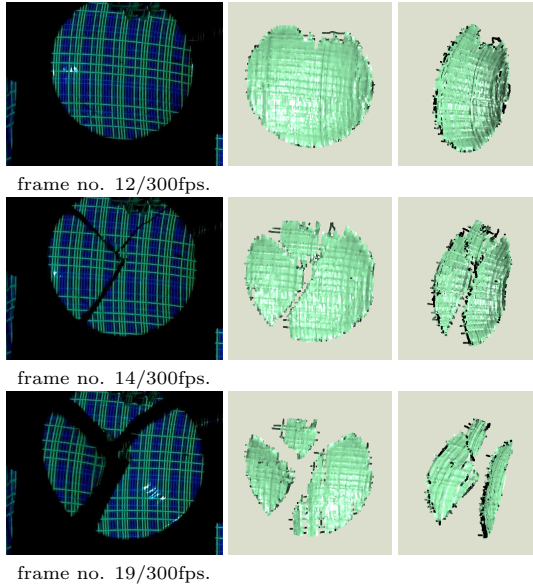


図 11 皿を壊したときの復元結果
Fig. 11 Results of a breaking dish.

ト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。

しかし、撮影画像中の各ラインの間隔が狭いと線検出に失敗することがある。そのため、5 ピクセル程度開けておかなければならない。また、1 次元探索の際、ある程度の連結が必要となる。そのため、撮影物体がある程度の大きさが必要であるという問題がある。これらを解決することが今後の課題である。

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, Aug. 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), vol.27, no.2, pp.296–302, Feb. 2005.
- [4] J.-Y. Bouguet, M. Weber, and P. Perona, "What do planar shadows tell about scene geometry?," CVPR, vol.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, June 23–28 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), pp.●●–●●, Nov. 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, vol.31, no.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), pp.●●–●●, June 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. Vuytsteke and A. Oosterlinck, “Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.12, no.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,” 信学論 (D), vol.J89-D, no.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, vol.28, no.3, pp.432–445, March 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] 山根 克, 谷江博昭, 中村仁彦, “再帰反射性メッシュマーカによる三次元形状のリアルタイムキャプチャ,” 信学論 (D), vol.J90-D, no.8, pp.1938–1947, 2007.
- [17] P. Felzenszwalb and D. Huttenlocher, “Efficient belief propagation for early vision,” IJCV, vol.70, pp.41–54, 2006.
- [18] J. Salvi, J. Batlle, and E.M. Mouaddib, “A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement,” Pattern Recognition, vol.19, no.11, pp.1055–1065, 1998.
- [19] 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.

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