The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	グリッドパターン投影式能動ステレオに基づく動体形状計測に関する研究
Author(s)	阪下, 和弘
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/67045
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

グリッドパターン投影式能動ステレオに基づく動体形状計測に関する研究

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科
提出年月　**2017**年**4**月

阪 下　和 弘

関連業績リスト

A. 受賞

1. 映像情報メディア学会優秀研究発表賞, 糟谷望, 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, “単色波線グリッドパターンを用いたプロジェクタ・カメラ能動ステレオ”, 映像情報メディア学会技術報告，vol.36, no.43, pp.13-16, 2012 年 10 月
2. 山下記念研究賞, 阪下 和弘，佐川 立昌，古川 亮，川崎 洋，八木 康史， “近赤外ワンショット形状計測による動体 3D 映像撮影” 情報処理学会研究報告, vol.2011-CVIM-176, no.22, pp.1-8, 2011 年 3 月． 情報処理学会

B. 英論文誌 (査読あり)

1. Kazuhiro Sakashita, Ryusuke Sagawa, Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Yasushi Yagi, “Capturing Textured 3D Shapes based on Infrared One-shot Grid Pattern”, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol. 4 (2012) pp.161-169, 10.2197/ipsjtcva.4.161

C. 日本語論文誌 (査読あり)

1. 阪下和弘，佐川立昌，古川亮，川崎洋，八木康史 “波線グリッドパターンを用いたワンショット形状計測システム”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J100-D,No.1,pp.115-128,Jan. 2017.

D. 国際会議 (査読あり)

1. Ryusuke Sagawa, Kazuhiro Sakashita, Nozomu Kasuya, Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa, Yasushi Yagi, “Grid-based Active Stereo with Single-colored Wave Pattern for Dense One-shot 3D Scan”, Proc. 2012 Second Joint 3DIM/3DPVT Conference, pp. 363-370, Zurich, Switzerland, Oct. 13-15, 2012.
2. Kazuhiro Sakashita, Ryusuke Sagawa, Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Yasushi Yagi “A System for Capturing Textured 3D Shapes based on One-shot Grid Pattern with Multi-band Camera and Infrared Projector”, In Proc. 2011

International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), pp.49-56, Hangzhou, China, May 16-19, 2011

E. 国内会議 (査読あり)

1. 糟谷望, 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, “単色波線グリッドパターンを用いたプロジェクタ・カメラ能動ステレオ”, 映像情報メディア学会技術報告，vol.36, no.43, pp.13-16, 2012 年 10 月.
2. 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, 八木康史, “高密度 3 次元形状復元のための単色波線パターンを用いたグリッド能動ステレオ”, 第 15 回画像の認識・理解シンポジウム予稿集, 2012 年 8 月
3. 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, 八木康史, “近赤外グリッドパターンを用いたワンショット形状計測” 第 14 回画像の認識・理解シンポジウム予稿集, 2011 年 7 月

F. 査読なし国内会議・ワークショップ等

1. 阪下和弘，佐川立昌，古川亮，川崎洋，八木康史, “波線グリッド形状計測のための最適なパターン選択手法” 第 16 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2013), 2013 年 7 月
2. 阪下和弘 “近赤外グリッドパターンによるテクスチャ付き 3 次元形状計測システム”, TX テクノロジー・ショーケース in つくば 2012, 2012 年 1 月
3. 阪下 和弘，佐川 立昌，古川 亮，川崎 洋，八木 康史， “近赤外ワンショット形状計測による動体 3D 映像撮影” 情報処理学会研究報告, vol.2011-CVIM-176, no.22, pp.1-8, 2011 年 3 月.

G. 商業誌

1. 糟谷望, 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋 “波線パターン投影による高速表面形状計測”, 検査技術, 日本工学出版, vol.18, no.5, pp.16-21, 2013 年 5 月
2. 糟谷望，阪下和弘，佐川立昌, “単色波線グリッドを用いた能動ステレオ法による動物体の高精度・高密度な形状計測”, O plus E，vol.34, no.12, pp.1182-1186, 2012 年 12 月

その他の業績リスト

H. 受賞

1. 情報処理学会論文賞, Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Kazuhiro Sakashita, Yasushi Yagi, Naoki Asada “Entire Shape Acquisition Technique Using Multiple Projectors and Cameras with Parallel Pattern Projection”, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, vol.4, pp.40-52, Mar., 2012, doi:10.2197/ipsjtcva.4.40
2. Best Paper Award, Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Kazuhiro Sakashita, Yasushi Yagi, Naoki Asada, “One-shot Entire Shape Acquisition Method Using Multiple Projectors and Cameras”, In Proc. The Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, Singapore, Nov. 2010.

I. 英論文誌 (査読あり)

1. Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Kazuhiro Sakashita, Yasushi Yagi, Naoki Asada “Entire Shape Acquisition Technique Using Multiple Projectors and Cameras with Parallel Pattern Projection”, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, vol.4, pp.40-52, Mar., 2012, doi:10.2197/ipsjtcva.4.40

J. 国際会議 (査読あり)

1. Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Yuya Ohta, Kazuhiro Sakashita, Ryota Zushi, Yasushi Yagi, Naoki Asada, “Linear solution for oneshot active 3D reconstruction using multiple projectors”, In Proc. Fifth International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, Paris, May, 2010.
2. Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Kazuhiro Sakashita, Yasushi Yagi, Naoki Asada, “One-shot Entire Shape Acquisition Method Using Multiple Projectors and Cameras”, In Proc. The Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, Singapore, Nov. 2010.

K. 国内会議 (査読あり)

1. 阪下 和弘，大田 雄也，頭師 陵太，佐川 立昌，古川 亮，川崎 洋，八木 康史，浅田 尚紀，“複数台のプロジェクタ・カメラを用いた動きのある物体の 3 次元形状計測システム”, 第 13 回画像の認識・理解シンポジウム予稿集, pp. 633-640, 2010 年 7 月.

L. 査読なし国内会議・ワークショップ等

1. 阪下 和弘，大田 雄也，川崎 俊央，佐川 立昌，古川 亮，川崎 洋，八木 康史，“複数台のプロジェクタ・カメラを用いた動きのある物体の 3 次元形状計測システム”, 第 16 回画像センシングシンポジウム講演論文集, 2010

平成 29 年度 博士学位論文

グリッドパターン投影式能動ステレオに基づく
動体形状計測に関する研究

阪下 和弘

概要

3 次元形状計測は，鋳造等を始めとして古くから用いられてきた技術である．その後，コンピュータの普及によりコンピュータビジョンの 1 つの分野として 3 次元形状計測が扱われてきたが，その多くは静止物体を対象とした研究であった．静止物体の計測に関する研究は，現在までに多様な状況・条件に対して数多くのアプローチが行われいる．一方，近年では，コンピュータの急速な発達により動物体の形状計測が注目されている．静止物体に対して研究されてきた高精度かつ安定的な形状計測手法の多くは，数秒からの計測時間を要することから，動物体の形状計測には適していない．そこで，時間経過による物体の変動に対応した 3 次元形状計測手法が求められている．

3 次元形状を高フレームレートで計測する方法の 1 つとして，グリッドパターンを用いたプロジェクタ・カメラシステムが研究されている．この手法はプロジェクタから縦線と横線から構成されるグリッド状のパターンを計測対象に投影し，カメラで撮影することにより，三角測量の原理に基づき，単一の画像から形状を計測する．しかしながらこの手法には，プロジェクタからの照明によってテクスチャが干渉を受けるため，同時にテクスチャを取得できないという問題がある．

そこで本論文で提案するシステムでは，形状計測に用いる波長とテクスチャ計測に用いる波長を分離することにより，この問題を解決する．パターン光は近赤外光を用いて投影し，テクスチャは可視光を用いて取得する．この際，近赤外光のカメラと可視光のカメラが異なる位置にあれば，テクスチャと形状の間にずれが生じ，テクスチャ付き 3D モデルの精度が低下する．そのため，同一視点から可視光と近赤外光を取得するマルチバンドカメラを開発した．さらに，複数の光の波長を用いた 3 次元形状計測を行うために，マルチバンドグリッドパターンを作り出す近赤外光パターンプロジェクタを開発した．また，固定されたグリッドパターンを用いてシステムを校正する手法を提案する．

また，従来のグリッドパターンを用いたプロジェクタ・カメラシステムには複数のカラーパターンを用いることにより計測対象のテクスチャに影響を受け，形状計測が安定しないと

いう問題もあった．そこで本論文では，従来直線のグリッドであったカラーパターンから波線の単色グリッドパターンに変更した 3 次元計測の実現した．本論文で用いる波線グリッドパターンは，同一周期の縦横の正弦波から構成される．これを周期とは異なる間隔で配置することで，交点周りの形状に特異性を付与する．この形状は一定のサイクルで同一の形状が現れるが，ステレオ視における対応点がエピポーラ線上にのるという制約や，グリッドの接続情報に基づく制約により，最適な対応を取得することが可能である．この手法では，撮影した画像中から Belief Propagation による最適化を用いて波線を縦横別々に検出する．検出された縦横の波線から交点を求め，それぞれの交点をノードとしたグラフを作成する．次に，各ノードに対応するエピポーラ線をプロジェクタが投影するパターン上で計算し，その線付近の交点を対応点候補とする．この交点グラフを Belief Propagation によって最適化することで交点における対応点を取得する．その後，撮影した画像とプロジェクタパターンとのマッチングを行うことで，各画素での深さを算出し，高密度の 3 次元形状を獲得する手法を提案する．

主な用語

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

目 次

関連業績リスト 1

その他の業績リスト 3

1 序論 12

2 3 次元形状計測法 17

2.1 時間コード化法 20

2.1.1 グレイコード法 21

2.2 空間コード化法 23

2.2.1 ダイレクトメソッド 23

2.2.2 擬似ランダムコード化パターン投影法 24

2.3 従来研究の特徴と本論文の位置付け 25

3 グリッドベースワンショット形状計測法 27

3.1 システム構成 28

3.2 平面の表現 29

3.3 平面パラメータの取得 29

3.4 曖昧性の解消 30

3.5 カラーコード識別によるワンショット形状復元の安定化・高密度化 31

3.6 密な直線パターンの検出 33

3.6.1 画像の平滑化 33

3.6.2 Belief-Propagation に基づくライン検出 34

3.7 カラーコードの識別 36

3.7.1 グリッドの作成 39

3.7.2 2 次元 BP を用いたカラーコードの識別 39

3.7.3 時間方向の交点接続 40

3.7.4 3 次元 BP を用いたカラーコード識別 41

3.7.5 カラーコードによる誤接続解消 43

3.8 全画素を用いた高密度復元 43

3.9 まとめ 45

4 近赤外グリッドベースワンショット形状計測システム 47

4.1 システムの概要 48

4.2 単一視点から可視光と近赤外光の撮影用マルチバンドカメラ 48
4.3 グリッドパターンを投影する近赤外プロジェクタ 50
4.4 システムの校正 52
4.4.1 イメージセンサ間の校正 52
4.4.2 プロジェクタ・カメラシステムの校正 53
4.5 実験 56
4.5.1 センサ性能評価 56
4.5.2 静止物体の計測 57
4.5.3 動物体の計測 58
4.6 まとめ 58

5 波線ワンショット形状計測法 60
5.1 手法の概要 61
5.2 単色波線グリッドによる暗黙的符号化 62
5.3 グリッド上でのプロジェクタ・カメラ系ステレオ法 63
5.3.1 エネルギー最小化のためのデータ項 64
5.3.2 SSD によるコスト 64
5.3.3 線の距離によるコスト 65
5.3.4 グリッド上でのエネルギー最小化による対応推定 66
5.4 格子点間の補間による密な形状生成 67
5.5 最適なパターン選択のための評価手法 68
5.6 実験 71
5.6.1 シミュレーションデータによる評価 71
5.6.2 静止物体に対する形状計測実験 73
5.6.3 SSD と線の距離での比較実験 75
5.6.4 最適なパターン選択実験 75
5.6.5 動物体に対する形状計測実験 77
5.6.6 近赤外波線グリッドパターンによる形状計測 78
5.7 まとめ 78

6 結論 84

謝辞 86

参考文献 87

図 目 次

2.1 3 次元形状計測法の分類 17
2.2 (左) 受動的ステレオ，(右) 能動的ステレオ. 19
2.3 (左) 時間コード化法，(右) 空間コード化法. 20
2.4 $N = 3$ の場合のグレイコードパターン投影の例. 21
2.5 2 値符号化に基づく投影パターン. 22
2.6 ダイレクトメソッド :（左）Carrihill ら [1] の手法.（右）田島ら [2] の手法 . . 24
2.7 擬似ランダムコード化パターン投影法 :（左）丸山ら [3] の手法.（右）Durdle ら [4] の手法 25
3.1 (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 28
3.2 グリッドパターン検出と高密度復元の概要 32
3.3 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輝度値変化 34
3.4 線検出での BP のグラフ 35
3.5 サブピクセルの計算法 36
3.6 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 37
3.7 (左) ストライプを利用した場合の誤接続，(右) 画像例 38
3.8 カラーコード識別での BP のグラフ 39
3.9 交点の位置とエピポーラ線の関係 41
3.10 BP によるカラーコード識別の過程．(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 42
3.11 時間方向の接続情報の有無によるカラーコード識別精度の比較．(a) 入力画像，(b) 時間接続無し，(c) 時間接続有り 43
3.12 縦平面パラメータ補間に使用する縦線と位相の関係 44
4.1 近赤外プロジェクタとマルチバンドカメラで構成されたテクスチャ付き 3 次元形状計測の提案システム. 48
4.2 (a) 提案したマルチバンドカメラの試作システム．(b) 光学部品の拡大図．対物レンズは C マウントレンズとリレーレンズを備える．C マウントレンズを交換することにより，画角を変えることができる. 49
4.3 提案したマルチバンドカメラの内部構造．カメラは対物レンズ，波長分離プリズム，及びイメージセンサで構成される. 50

4.4 対物レンズから白色光と図 4.7 で示された近赤外光が入射した時の，出射面からの光の分布．80 % 以上の光が出射される． 51
4.5 3 つの近赤外 LED アレイと，透明なフィルムに印刷されたマスクパターンと，対物レンズを持つ近赤外プロジェクタの試作機． 52
4.6 投影するグリッドパターンの例．3 つのレンズからのラインパターンが一致するように形成される． 53
4.7 各レンズから出射された光の強度．最大値が 1 となるように標準化した． . . 54
4.8 全てのイメージセンサで仮想的に光路を共通化した様子．ずれがあるため，入射光はイメージセンサで異なる画素に投影される． 55
4.9 校正に利用するワンショット 3 次元形状計測用のパターン．マーカを用いて，手動でプロジェクタの絶対座標を与える． 55
4.10 立方体の画像．(a) 可視光のカラー画像．(b) 765nm 波長のパターンが投影された画像．(c) 850nm 波長のパターンが投影された画像．(d) 765nm と 850nm の画像を統合して作成したグリッドパターンが投影された画像． . . . 56
4.11 立方体の復元結果．(a) と (b) は入力画像の曲線の画素を点として復元した結果．(c) と (d) はテクスチャ付き 3 次元形状． 57
4.12 頭部モデル (上) とクマのぬいぐるみ (下) のテクスチャ付き 3 次元形状結果 1 列目からそれぞれ，可視光，近赤外光，テクスチャ無しの形状，テクスチャ付きの形状の図を示す． 58
4.13 波打つ布のテクスチャ付き 3 次元形状結果．一行目は各フレームでの可視光によるテクスチャ画像，二行目は近赤外光の画像，三行目はテクスチャ無しの形状復元結果，四行目はテクスチャ付きの形状復元結果を示す． 59
5.1 スキャンシステム: 複数の波線が投影され，交点が検出され復元に利用される． 61
5.2 (a) 波線グリッドのパラメータ．S_x,S_y は隣接する波線の間隔，W_x,W_y は波線の波長，A_x,A_y は波の振幅である．(それぞれ縦，横線に対応する)．(b) 波線グリッドの例． 62
5.3 縦横の波線検出：(a) 入力画像，(b) 検出されたグリッド．破線の円内部の点は，同一の横線 ID を持つ． 63
5.4 格子点 p 周囲の四角パッチ $R(p)$ がプロジェクタ画像面に再投影される．t_p は p の対応候補である． 65

5.5 x_1, x_2, x_3 は再標本化された標本画素である．全画素の奥行きは標本画素の補間によって求められる．各画素は奥行き情報を利用してプロジェクタ画像面に再投影される．再投影は，$P_{D+\Delta D}(x)$ で表される．各画素の再投影には $D + \Delta D$ の部分ベクトルが利用される． 68
5.6 0°のパターンを基に回転した波線パターン． 69
5.7 候補点選択． 70
5.8 提案手法と色符号化による方法 [5] の比較． 71
5.9 グリッドベースステレオで再構成されたメッシュと補間によって高精度化されたメッシュ．図 5.8(b) は (a) の入力画像であり，図 5.8(g) は (b) の入力画像である． 72
5.10 提案された波パターンによる 3 次元再構成：(a) 入力画像，(b) ステレオマッチング後の検出グリッド，(c) グリッドの再構成結果，(d) 補間後の再構成結果． 73
5.11 立方体形状の再構成結果：(a) 入力画像，(b) 3 次元再構成結果，(c) 他方向から見た形状． 74
5.12 環境光の影響下における再構成結果． 75
5.13 手の形状計測実験．上：SSD による復元結果．下：線の距離による復元結果． 76
5.14 各特徴量基準を用いた場合の正しい対応点に対する値と誤対応する点に対する値．上：SSD を特徴量とした場合の値．下：線の距離を特徴量とした場合の値． 79
5.15 正方グリッドで分割された評価用パターン実験．(a)2 × 2 点のグリッドパターン．(b)7 × 7 点のグリッドパターン．(c) 平面上に復元された点と外れて復元された点． 80
5.16 候補点同士の非類似度．正しい候補点とそれを除いた候補点中で最も相関が高い点との相関の差分値． 80
5.17 図 5.16 を (5.10) 式で評価した最適パターンの選択基準． 81
5.18 平面に正方のグリッドで分割したパターンを投影した時，正しく復元された点の割合． 81
5.19 最適パターンの選択と正方グリッドの復元割合との間の散布図． 81
5.20 指を開く動作を再構成した手の 3 次元形状． 82
5.21 パンチ動作を再構成した人体の 3 次元形状．服の詳細形状が計測されている． 82
5.22 近赤外波線グリッド計測の実験環境． 83
5.23 近赤外波線グリッドによるパンチ動作を再構成した人体の 3 次元形状． . . . 83

第1章
序論

3次元形状計測は，近年その技術の向上により多種多様な分野で用いられている技術である．例えば，工場や医療現場における外観検査に基づく製品管理 [6]，産業用ロボットや自立・自走型ロボットの視覚情報として利用するロボットビジョン [7]，文化財などの劣化・変質の対策としてそのデータをコンピュータ上に保存しておくデジタルアーカイブ [8]，CAD/CAM のデータ入力に利用して実物体に対して困難である加工や変形のシミュレーション [9]，航空機写真からの山の標高推定 [10]，ネットワークを通じた形状データの共有など，多岐に渡り利用されている．特に最近では，コンピュータの急速により扱える情報量が増大したことから，静止した物体の3次元形状の計測だけでなく，時間的な変化・変形をする物体，すなわち動物体の3次元形状を計測する研究が活発に行われている．

代表的な3次元形状の計測手法として，ステレオ法 [11]，レンズ焦点法 [12, 13, 14]，光切断法 [15]，光レーダ法 [16, 17]，アクティブステレオ法 [18, 19] などがある．光学的な方法に基づいた形状計測手法は，大きく分けてパッシブ手法とアクティブ手法に分けられる．前者は，カメラなど受動的なセンサのみを用いる方法であり，後者は，プロジェクタなど光を照射するデバイスと組み合わせて計測する手法である．アクティブステレオ法は，プロジェクタとカメラを組み合わせて三角測量に基づいて形状計測を行う方法であり，計測精度，計測密度，安定性などにおいて秀でており，これまで多くの手法が研究され，様々な場面で実用的に利用されている．その中で，グレイコード法 [20, 21] は一般的なビデオプロジェクタを用いて実現できる，代表的なアクティブステレオ法である．しかし，この手法は複数の照射パターンを撮影することで形状を計測するため，静止した物体に対しては性能を十分に発揮できるが，動きや変化のある物体に対しては，複数パターン撮影する間に対象が変動してしまうため，動物体のの計測には不適当である．そこで，高精度，高密度，高フレームレートで形状を計測する手法として，計測に必要な照射パターンの数を減らすなど，様々な研究

が行われてきた．その 1 つとして，グリッドパターンを用いたプロジェクタ・カメラシステムが研究されている． [22, 23] この手法はプロジェクタから 2 色の縦線と横線から構成されるグリッド状の固定パターンを計測対象に投影し，カメラで撮影することにより，撮影した画像からパターンを検出し，投影したパターンと撮影したパターンの対応を推定する．この対応関係を利用し，三角測量の原理に基づき，単一の画像から形状を計測する．各フレーム毎の映像から形状を計測可能であることから，高速に運動・変形する対象に対してもカメラのフレームレートに応じた頻度で形状を計測することが可能である．この方法を様々な場面に対して応用する際には，様々な課題が残されている．本論文では，その中で下記の 2 つの課題について検討する．

- 課題 1：物体表面のテクスチャの計測

1 つ目の問題は，2 色のカラーパターンを投影するため，物体表面のテクスチャに干渉し，物体本来のテクスチャが損なわれてしまう点である．この手法は固定パターンを物体に照射し続けるため，カメラとプロジェクタの同期を取る必要がなく，カメラのフレームレートのみに従って高速な計測が可能であるが，常にパターンが照射されていることにより，形状計測中にテクスチャは計測できない．そのため，デジタルアーカイブのような分野では，対象の形状だけでなく色情報も不可欠なものであるが，パターンが投影されたテクスチャでは情報の保存という面で不完全となる．また，ロボットビジョンにおいて AR マーカ等を用いて対象を認識する場合，マーカにパターンが乗ってしまうと識別に悪影響を及ぼす危険がある．この問題を解決し，物体表面のテクスチャの計測を実現することが課題となる．

- 課題 2：形状計測システムの簡易化

2 つ目の問題は，色情報を用いることによる形状計測システムの肥大化・複雑化である．計測にカラーパターンを利用する方法では，ハード・ソフトの両面において制約が存在する．ハード面では，最低でもカラーパターンが投影可能なプロジェクタ，及び光を波長別に観測可能なカラーカメラが必要となる．そのため，単色の光を投射する投光機などと比べ，色を合成するためのプリズムなどが必要となり，デバイスの小型化が困難になることや，各色要素間のスペクトル分布が干渉し，各画素の色の決定には誤差が生じやすいという問題が発生する．ソフト面では，撮影された線の検出に対応した色の識別が必要となる．色の識別は目標物体の表面が RGB 各色要素を十分に反射する必要があり，計測対象のテクスチャにより，色の誤識別や線の誤検出に繋がり，形状計測の不安定さを引き起こす要因となる．色情報が必要とする点が，計測システムの複雑化をまねく原因となることから，色情報を用いることなく形状計測を実現する手法の研究が課題となる．

本論文の貢献は，これらの問題を解決し，動物体に対する 3 次元形状計測の一般化・簡易化を目的とし，その可能性を広げることである．そのため本論文では，これらの問題に対してそれぞれの解決法を提案する．

- 解決法 1：テクスチャ・形状同時計測システム

1 つ目の課題を解決するために，本論文で提案するシステムでは物体が本来持つテクスチャと 3 次元形状を同時に計測する．この実現のためには，テクスチャ計測に用いる波長と形状計測に用いる波長を分離することにより，それぞれの波長で別々の情報を獲得することにより同時計測を実現する．具体的には，近赤外光で 2 波長のグリッドパターンを投影し，近赤外カメラでを撮影することで形状を計測する．それと同時にカラーカメラで可視光を撮影することにより，パターン投影の影響を受けないテクスチャを計測できる．この時，近赤外カメラとカラーカメラが異なる視点にある場合，テクスチャと形状で計測対象の異なる位置の情報を獲得してしまう問題がある．そこで本論文では，近赤外光と可視光を同一視点から撮影できるマルチバンドカメラを開発する．マルチバンドカメラは単一視点から入射した光をプリズムで分光し，分光した先でカラーカメラを用い可視光を撮影する．グリッドパターンに基づいた形状計測には 2 波長のグリッドを利用するため，分光したもう一方の光はさらにプリズムにより分光し，それぞれをバンドパスフィルタを通してモノクロカメラを用いることにより，異なる 2 波長の近赤外光を撮影する．これにより同一視点から 2 波長の近赤外光と可視光を撮影できるマルチバンドカメラを実現する．また，このシステムで形状を計測するためには，近赤外光で 2 波長のグリッドパターンを投影する必要があるが，そのような機能を持つプロジェクタは一般的には普及していない．そこで本論文では，そのような要求を満たした近赤外グリッドパターンが投影できる近赤外プロジェクタを開発する．このプロジェクタは L 字の構造であり，3 個のレンズと 850nm が 2 つ，765nm が 1 つの合計 3 つの近赤外 LED を持つ．近赤外 LED から放たれた光を固定のマスクパターンを通してレンズから投影する．L 字構造によりそれぞれのレンズから投光ラインパターンが同軸上に投影されるため，異なる波長のグリッドパターンを同一座標に投影することができる．このプロジェクタでは，プリズムを用いた合成行わないため，プリズムで減衰することなく，光量が不足しがちである近赤外光を利用することが可能である．しかし，プロジェクタは固定のマスクパターンを用いているため新たな問題がある．一般的なカメラ・プロジェクタシステムではパターンを切り替えた複数の画像を撮影することにより，プロジェクタとカメラの相対的な位置関係を推定していたが，本論文で開発したプロジェクタは固定のパターンであるため，この手法を用いることができない．これを解決するために，計測用のグリッドパターンをにプロジェクタ座標値が既知であるマーカを埋め込んだ，校正と計測を同時に行うことができるパターンを利用する．投影されたパターンを撮影すると，マーカが検出出来るため，

そのカメラ座標に対応するプロジェクタ座標を与える．残りの座標は撮影された画像に対して線検出を行い，その接続関係から対応を推定する．以上のシステムを用いて動物体のテクスチャ・形状の同時計測を実現する．

- 解決法 2：単色グリッドパターンによる形状計測

2 つ目の課題を解決するために，本論文では従来 2 色であったグリッドパターンの単色化を実現する．解決法 1 のシステムにおいても 2 波長の近赤外光を用いたため，市販されていない 2 波長投影可能な近赤外プロジェクタを新たに開発する必要があった．計測に必要な波長が 1 波長であれば，先のシステムにおいても大幅な簡易化・低価格化が可能となる．また，単色であれば色の識別をする必要がなくその輝度値だけを対応に用いるので，対象のテクスチャに頑強な計測が可能となる．しかし，単純にグリッドパターンを単色化しただけでは，これまで色情報を用いて補っていた対応に必要な情報が欠落し，パターンの対応関係を正しく推定することができず誤対応が起きる．そこで，今まで直線で構成されていたグリッドパターンを波線で構成することにより，直線パターンの場合には存在しなかった交点の交わり方という新しい情報を活用し，パターンの対応を推定する．本論文で提案する手法で用いる波線グリッドパターンは等間隔に縦線と横線を並べた周期的な正弦波パターンである．このパターンは縦線の間隔と横線の間隔を異なる距離とすることで，交点部分における線の交わり方を変化させ，この交わり方を特徴として対応推定に利用する．カメラ画像中の交点に対応するプロジェクタ画像中で候補となる交点は，ステレオ系においてエピポーラ線上にあるという制約により絞り込む．ここで，交点周辺の局所領域を平面と仮定することにより，カメラで撮影した交点の周辺領域をプロジェクタ画像上のそれぞれの候補点に対して再投影してマッチングを行う．しかし，波線グリッドパターンは単純かつ周期的なパターンであるため，候補点中に類似，もしくは同一の交わり方をした点が存在する可能性があることから，1 対 1 のマッチングでは，対応を一意に決定することが困難である．そこで，投影しているパターンがグリッドであることから交点が同一線上にある場合，その候補点も同一線上にある可能性が高いことを利用する．具体的にはマッチングで計算された交点と候補点の誤差をデータ項とし，隣接した交点に対応した候補点が隣接していない場合に重みをつけたエネルギー関数を最小化することにより，全ての交点と候補点の対応を一度に推定する．この時，候補点中に類似，もしくは同一の交わり方をした点が頻繁に存在すると誤対応の原因となる．そこで本論文では，プロジェクタが投影するパターンを回転させることにより，そのプロジェクタ・カメラ配置における類似候補点を減少させて，誤対応を低減する方法について研究を行う．カメラ座標中の交点に対応するプロジェクタ上の正しい対応点と，交点に対応するエピポーラ線上の候補点の差を評価値とすることにより，各回転角における誤対応の発生しにくさの評価関数を定義し，最適なパターンを推定する．以上により単色パターンによ

る動物体の形状計測を実現する．

本論文の構成は以下の通りである．まず，第 2 章では 3 次元形状計測に関わる先行研究について述べる．第 3 章では，2 色のグリッドパターンによる形状計測法について説明し，第 4 章でテクスチャと形状の同時計測システムについて述べる．第 5 章では，単色グリッドパターンを利用した 3 次元形状計測について述べる．最後に，第 6 章で結論を述べる．

第2章
3次元形状計測法

3次元形状計測は計測目的や計測対象に応じて図2.1のように多様なアプローチが行われてきた．本章では，各3次元形状計測法についての特徴や問題点について述べる．

従来からの3次元形状計測法は接触式計測法と呼ばれる，接触式プローブ（計測機器先端部分）で対象に触れることにより，計測点を特定し，その位置座標を機械的なスケールを読み取ることで決定する方式が一般的であり，3次元座標測定機（CMM:coodinate measuring machine）として普及している [24, 25]．この手法では，計測点は安定して計測できるが，この原理に基づいた計測システムが発展すると，その機能的な限界が顕在化し，問題点が浮かび上がってきた．例えば，接触に伴い測定力が発生するために軟物体の場合には変形が生じてしまうことや，計測対象に損傷を与えることもある．また，プローブの当て方により計測結果の再現性が損なわれることや，プローブの経年劣化に伴い測定値に影響が生じる．さら

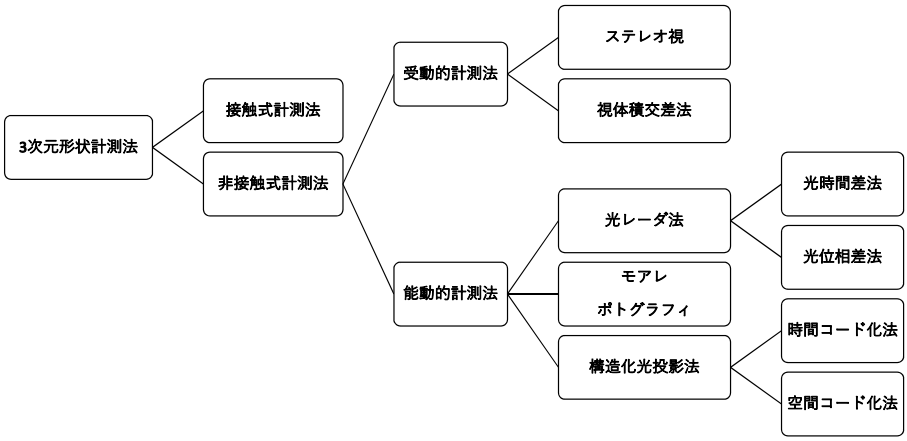


図 2.1: 3次元形状計測法の分類

には，点計測であることによる制約が発生する．例えば，計測時間が長くなることや，時間的に変化する形状を捉えることが困難であることなどである．そして，テクスチャを始めとする形状情報以外の物体の表面性状を得ることも困難である．

これに対して，非接触式計測法 [26, 27, 28] は，形状を取得するための手法として，プローブを利用しないことにより，高速，高精度，簡便な操作性等，上記の問題点の多くを解決している．中でも，光，電波，音波などの計測のために制御されたエネルギーを照射する能動的 3 次元形状計測法とそのようなエネルギーを照射しない受動的 3 次元形状計測法の 2 つに大別される．

受動的な手法には，ステレオ視 [29, 30, 31, 32] や視体積交差法 [33, 34, 35] ，運動視差の利用 [36, 37]，焦点差の利用 [14]，照度差の利用 [38, 39, 40]，等が挙げられる．これらの手法はカメラのみを用いて形状を計測するため，形状とテクスチャの同時計測に適した方法である．また，カメラのフレームレートで映像を記録できるため，高速な形状データ取得が可能である．しかし，形状計測の精度は一般的に能動的な手法に劣ることが多く，計算時間が多くなることや，計測対象にある程度のテクスチャを必要とする等の問題点がある．視体積交差法は多数のカメラを用いて観測対象の周囲から計測することが必要であり，巨大なシステムに伴う多大なコストが生じる．

一方，能動的な手法には，同軸計測方式 [41] や，モアレポトグラフィ [42, 43]，光レーダ法 [44]，構造化光投影法 [45] 等が挙げられる．モアレポトグラフィは，一枚の画像から，投影光の走査なしに，全ての場所の 3 次元情報が求められる利点があるため，動きがある対象や固定することが難しい対象などにしばしば用いられている．しかし，凹凸の判定ができないこと（凹でも凸でも同じモアレパターンを示す），計測対象の奥行きの相対変位しか分からず絶対距離が求められないなどの問題がある．光レーダ法は，高精度で形状が取得できるため形状計測法としてしばしば用いられる．三角測量型 [46]，時間差計測型 [47]，位相差計測型 [48] などの方法があるが，発射したレーザ光が観測物体で反射して戻ってくるまでの時間から距離を計測するタイプのセンサ，光の強度を正弦波状に変調したレーザ光の反射光と元の光の位相差から距離を計測するタイプのセンサは，鏡を用いてレーザ光の方向を変化させるため，計測に数秒から数分かかり，高速な形状計測には不向きである．また近年，高フレームレートのレンジセンサ [16, 17] が開発されているが，高速化によるトレードオフのため解像度，距離精度が十分ではない．

構造化光投影型のセンサ [49] は，プロジェクタなどを用いて 2 次元パターン光を観測対象に投影し，カメラでその光を観測する方法である．この手法はビデオプロジェクタの普及により，低コストかつ安定的な計測手法として注目されている．また，モアレポトグラフィと同様に形状を計測するために走破を必要としないことから，動的シーンの計測手法として期待されている．受動的手法の 1 つであるステレオ視（図 2.2（左））は，左右 2 つのカメラ

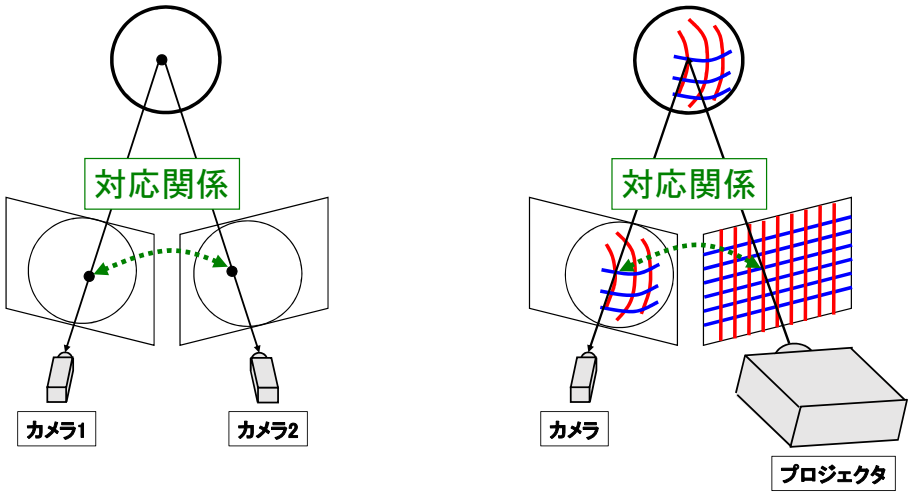


図 2.2: (左) 受動的ステレオ，(右) 能動的ステレオ.

から得られる画像の間で対応点を見つけて三角測量を適用するものであった．しかし，受動的ステレオの最大の問題である 2 つの画像間の対応付けは，不確実なプロセスであり，信頼性が重視される状況においては用途が限られる．そこで，一方のカメラを光を投影するプロジェクタに置き換えた能動的ステレオ（図 2.2（右））の研究が活発に行われている．原理的にはステレオ視と同様であることから，対応点問題を解くためにエピポーラ拘束という条件を利用することができる．この拘束条件は一方の画像上にある点はもう一方の画像上ではエピポーラ線と呼ばれる直線上に投影されるというものである．これを利用すれば，カメラ画像上の点とプロジェクタ画像上の点の対応付けは，エピポーラ線上の一次元の探索に限定されることから，計測時間の短縮や形状計測の安定化につながる．また，パターン光の工夫によって，カメラとプロジェクタ間で対応付けを行い，三角測量によって形状が計測できる．この構造化光投影法は複数枚の画像から形状を計測する時間コード化法（図 2.3（左））と一枚の画像から形状を計測するする空間コード化法（図 2.3（右））に分類される．また，構造化光投影型センサには高速に形状計測できる手法が提案されている [50, 51, 52, 53]．これらの手法は高速に形状を計測可能であり，特に [52, 53] ではカラーパターンを用いることにより，一回の撮影によって形状計測が可能であり，実時間形状計測に適している．しかし，形状計測に可視光のパターンを投影するため，同時にテクスチャを取得できないという問題がある．この問題を解決するため，構造化光による計測とテクスチャの取得を高速な時分割処理で行う手法 [54, 55, 56, 57, 58, 59] と，波長帯を分割する手法 [60, 61, 18] の 2 つの方法が提案されている．

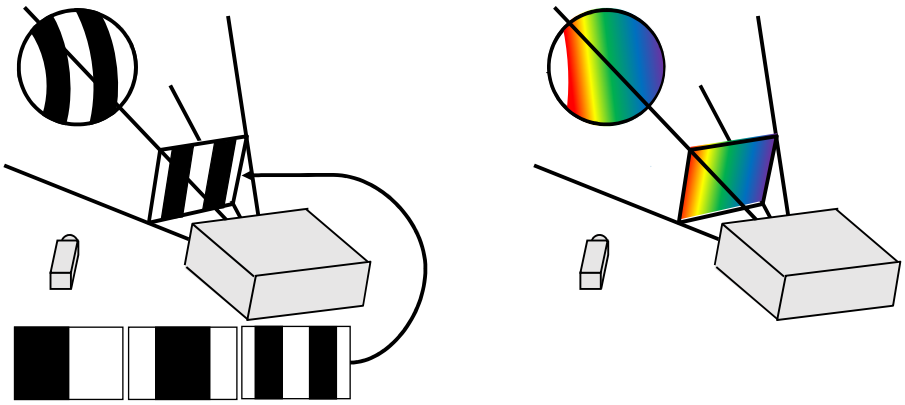


図 2.3: (左) 時間コード化法，(右) 空間コード化法.

2.1 時間コード化法

時間コード化法では複数のパターンを投影し，パターンの各点の時間変化の中に情報が符号化される．[62, 63, 64, 65, 66, 67, 5] このため，動物体計測には適さないと言えるが，この欠点を補うためにいくつかの方法が提案されている．例えば，パターンを高速に切り替える方法 [50]，位相パターンを用いて，必要な枚数を減らす方法 [56]，あるいは，DMD パターンを使う方法 [68] 等である．また，通常の能動ステレオとは少し異なるアプローチとして，カメラを 2 台以上用いて，時間変化するパターンを照射する，時空間ステレオ法 [69] 等も提案されている．現在，動き推定を組み合わせる等して 100fps 程度での計測に成功した例も紹介されているが，複数フレームの情報を必要とするため，高速な物体の計測には本質的に適さない．また，形状を計測するためだけでなく，照明された物体のテクスチャを取得するためにも構造化光を用いる．撮影画像から構造化光パターンを取り除けば，テクスチャ画像として用いることが可能となる．構想化光パターンを取り除くためには，時分割多重化パターンのイメージの平均，または干渉縞の低域フィルタリングを計算することによって，得ることができる．この手法の利点は同じカメラを用いてテクスチャと形状を獲得することができる点である．しかし，構造化光を形状とテクスチャの両方に用いるため，周囲の照明によって利用できないことが考えられる．その結果，この方法が適切に利用できる照明環境は制限される．さらに，対象の動きが非常に速い場合，形状とテクスチャの取得時間が異なっているため，形状とテクスチャの間にずれが生じる可能性がある．

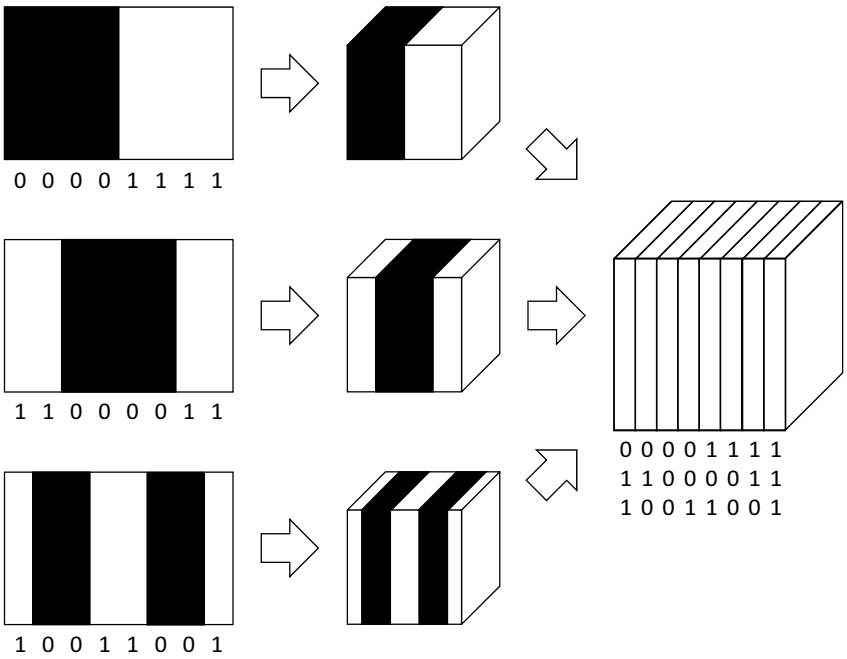


図 2.4: $N = 3$ の場合のグレイコードパターン投影の例.

2.1.1 グレイコード法

時間コード化法としてよく用いられる方法が，2 値コードで明暗付けられたパターン光を投影する方法である．

図 2.5（左）のように，プロジェクタから投影するパターンを 2 値コードで明暗付ける時，パターンの領域は 1 枚目の明暗情報により 2 分割される．さらに 2 枚目のパターンで 2 分割され，2 枚のパターンを合わせて考えると，パターン画像は 4 つの領域に分割される．もう 1 種，3 枚目のパターンを投影した場合も明暗 2 種の領域に分けられ，さらに，パターンの数を増すと，分割されたパターン画像の幅は次第に細っていき，N ビットの 2 進数で符号化された N 枚のパターンを用いれば，2^N 個の領域に細分することができる．これにより，投影するパターンを各画素の x 座標を，N ビット長の符号 $\mathbf{c} = c_0 c_1 \cdots c_{N-1}$ で表現できる．この時，i 枚目パターンの各画素は，$\mathbf{c}$ の最上位ビット (MSB) から i ビット目の値 c_i で決められる．この時，明るい領域であれば $c_i = 1$, 暗い領域であれば $c_i = 0$ を与える．このように作成した N 枚のパターンを投影して測定領域を 2^N 個に分割する．測定領域も投影パターンも明るい領域であれば 1, 暗い領域であれば 0 として符号化すると，N ビット長の符号 $\mathbf{d} = d_0 d_1 \cdots d_{N-1}$ で表現できる．2 値化での誤りがなければ，$\mathbf{d} = \mathbf{c}$ であり，$\mathbf{c}$ に対応するプロジェクタ座標 x は一意に決定できるので，画像の画素とプロジェクタ座標 x との対応が求められる．さらにエピポーラ拘束を適用することにより，画像の画素とプロ

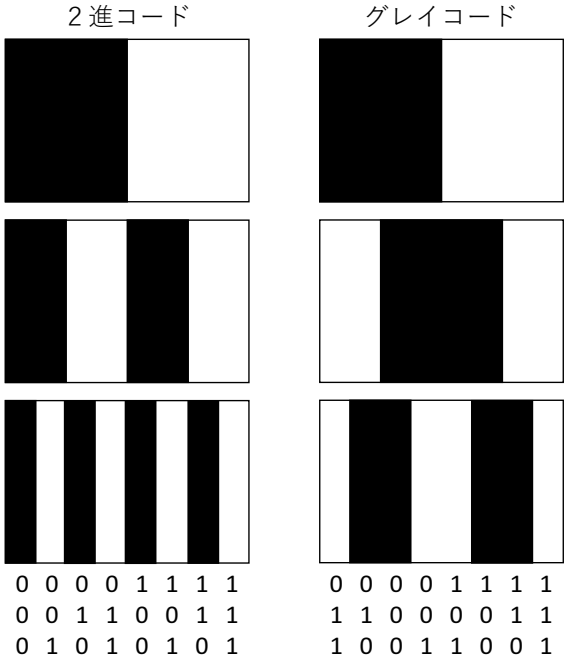


図 2.5: 2 値符号化に基づく投影パターン．

ジェクタの画素を一意に求めることができる．

しかし，実際には投影と撮影で 2 度の光の遷移の間に，明暗の境界等で符号の観測に誤りが発生しやすい．そこで，符号化に誤りがあった場合のリスク軽減について考える．投影するパターンの符号化に純 2 進コードを適用すると，図 2.5（左） のような $N = 3$ の場合，座標値 $x = 0$ に対応するコードの c_0 を誤ると，本来”000” であったコードが，”100”となる．これは $x = 4$ に相当するコードであり，1 ビットの誤りが 4 の距離の誤差となってしまう．

そのため，一般にはグレイコード（交番 2 進コード）と呼ばれる特殊な 2 進コードで明暗付けられたパターンがよく用いられる．このコードは， 図 2.5（右）のように，座標値 x に対応するコード $\mathbf{c}(x)$ と隣り合う座標 $x-1, x+1$ に対応するコード $\mathbf{c}(x-1), \mathbf{c}(x+1)$ が，1 ビットしか変化しないという性質がある．例えば図 2.5（右） の時ような $N = 3$ の場合，座標値 $x = 4$ に対応するコードは $\mathbf{c}(4) =$ ”101” となり，隣接する座標値のコードはコードはそれぞれ，$\mathbf{c}(3) =$ ”001”, $\mathbf{c}(5) =$ ”100” となり，隣接コードが 1 ビットしか変化しないという性質が分かる．

ここで，x の 2 進コードを $\mathbf{b} = b_0 b_1 \cdots b_{N-1}$，グレイコードを $\mathbf{g} = g_0 g_1 \cdots g_{N-1}$ とすると，$\mathbf{b}$ から $\mathbf{g}$ への変換は

$$
\begin{aligned}
g_0 &= b_0(\mathrm{MSB}), \\
g_{i+1} &= b_i \oplus b_{i+1},
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

逆に **g** から **b** への変換は

$$
\begin{aligned}
b_0 &= g_0(\mathrm{MSB}), \\
b_{i+1} &= b_i \oplus g_{i+1},
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

で行うことができる．図 2.5 で考えると，$x = 4$ の 2 進コード”100”とグレイコード”101”が対応する．

2.2 空間コード化法

一方で，空間符号化方式では，静的パターンを用いて，一枚のみの入力画像から形状を復元するため，動物体計測に向いている．しかし，パターンの空間的な領域に情報を埋め込む必要性から解像度が低く，かつ，対象物体表面のテクスチャや形状によりパターンが歪むため，不安定になりやすい．このため，これを軽減する方法が多数提案されている．例えば，同じ組み合わせの無いように複数の色の帯を用いる方法 [2, 59]，ラインベースの手法 [70, 71]，特異な点線を利用する手法 [3, 72]，エリアに情報を埋め込み，ウィンドウマッチングなどにより対応関係を得る手法 [73, 74]，二次元的なパターンに情報を埋め込む手法 [18, 75] 等がある．しかし，精度・解像度および安定性の全てにおいて十分な性能を満たしている手法は未だ存在していない．波長帯を分割する手法では，形状とテクスチャで別の波長を用いる．形状は近赤外光を用いて計測し，テクスチャは可視光を用いて撮影する．近赤外光による構造化光パターンは可視光のカメラには写らないため，形状とテクスチャの同時計測が可能となる．Frueh と Zakhor [60] の手法では，近赤外光の縦縞と横線を用いる．縦縞は形状復元に用いられ，横線は縦縞の識別に利用する．日浦ら [61] は，近赤外光の縞を高速に計測することにより，30Hz で距離画像を取得するレーザーレンジファインダを提案した．このシステムでは同時にテクスチャを獲得する．Microsoft Kinect [18] では，近赤外プロジェクタとカメラを用いて形状を，CCD カメラを用いてテクスチャを同時に獲得する．本論文の手法とは一枚の画像から形状復元を行うなどの類似性があるが，本論文では，単一視点から形状とテクスチャを観測するため，Kinect より精度よくテクスチャマッピングできる．

2.2.1 ダイレクトメソッド

パターンに情報を埋め込む手法として，最も単純な方法は，投影するパターンの全てのピクセルをラベル付けすることである．これをダイレクトメソッドと呼ぶ．ダイレクトメソッドでは，全ての点が一意的にコード化される．これを実現するためには，広範囲の輝度値や色彩を用いるか，周期的なパターンにする必要がある．本手法は全ての点がコード化されているため，高密度な形状が計測できる．しかし，コード同士の差異，すなわち各点同士の色

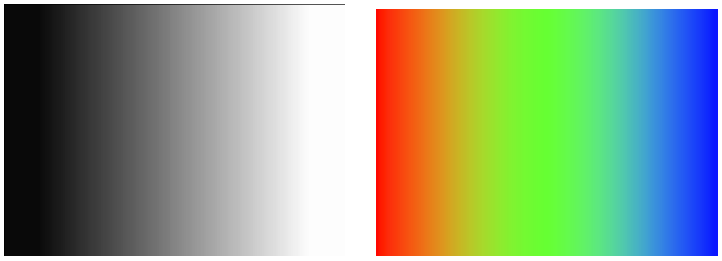


図 2.6: ダイレクトメソッド：（左）Carrihill ら [1] の手法.（右）田島ら [2] の手法

の差がほとんどないため，ノイズの影響を非常に受けやすいという問題がある．さらに，カメラで撮影される色は投影したパターンの色だけではなく，物体表面の色にも大きく影響される．これを解決する方法として多くの場合，コード化を補間する画像を用いる．従って，この手法は動的なシーンの計測には適していない．また，ダイレクトメソッドは一般的に中間色，もしくは薄い色の対象に制限され，色の全スペクトルを撮影し，識別することが必要となるため, 実用化は難しいと考えられる．

ここではダイレクトメソッドのうち 2 つの手法について示す．1) 輝度に基づくコード化：パターンの各点をコード化するために，輝度の濃淡を利用する．2) 色に基づくコード化：パターンの各点をコード化するために，色彩を利用する．

1 つ目の手法として，図 2.6（左）のようなグレイスケールの線形に垂直方向へ広がる濃淡のパターンを用いる手法が提案されている [1]．この手法は，一定の照明下で撮影した画素値と濃淡パターンで撮影された同じ画素の値の比を利用する手法である．この手法は，液晶プロジェクタのノイズや濃淡に対する影響が大きいため，低い精度でしか計測できない．

2 つ目の手法は原理的には 1 つ目の方法と同じ方法を用いる．ただし，グレイスケールを用いる代わりに色を用いてコード化する．田島ら [2] は，図 2.6（右）のような虹状のパターンを用いる手法を提案している．この手法は，垂直方向の細いスリットがことなる波長で符号化されたもので，赤から青へと遷移するパターンである．

2.2.2 擬似ランダムコード化パターン投影法

一様な光パターンを投影する際，そのパターンに局所的な特徴を与えて空間をコード化することができる．例えば，丸山ら [3] は等間隔に作られたスリットパターンを特徴づける方法として，図 2.7（左）に示すようにスリットをランダムに切断して短い線分にする方法を提案している．この手法はパターンの全ての線分を，等しい長さで観察されたスリットと一致させる．撮影された各線分には複数の一致する線分が見つかるため，正しい対応を行うために 6 本の隣接線分の長さを考慮して対応させる．しかしこの手法は，線分の長さがカメラ

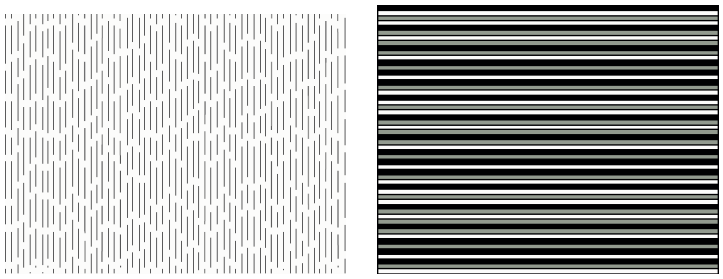


図 2.7: 擬似ランダムコード化パターン投影法：（左）丸山ら [3] の手法.（右）Durdle ら [4] の手法

と対象の距離，及びカメラとプロジェクタの光学系によって変化してしまうという問題があり，安定的に計測することができない．

また，グレイスケールでコード化された水平スリットで構成される周期的なパターン図 2.7（右）も提案されている [4]．このパターンは以下の順序列より形成されている．

$$BWGWBGWGBGWBGBWBGW \tag{2.3}$$

この時，B は 4 画素の黒色の水平スリットであり，W は 4 画素の白色の水平スリット，G は 4 画素の灰色の水平スリットを示す．この順序はパターンの解像度分まで周期的に繰り返されるため，パターンの周期よりも大きい面の途切れは計測できない．計測には，まず投影された 1 周期分のテンプレートと画像列の相関のピークを見つけることにより，全てのパターン周期の開始位置を探索する．次に，部分順序 WBG, WGB, GWB, を見つけるために再度テンプレートマッチングを行う．

2.3 従来研究の特徴と本論文の位置付け

表 2.1 に受動的計測法で代表的なステレオ視，及び従来の能動的計測法に関する特徴をまとめ，本論文の手法の位置づけを示す．ステレオ視は，ワンショットで計測可能であり，テクスチャ計測も可能な手法である．しかし，物体表面にある程度のテクスチャを必要とし，複数のカメラ間の対応が取りづらいことから精度や安定性の面で劣る．光レーダ法は，精度や安定性は高い手法であるが，1 点ずつ，もしくは 1 ラインずつ計測する必要があるため，計測に時間がかかってしまい動物体の計測には適していない．レーザーによる物体表面のテクスチャに影響がある．グレイコード法は，精度や安定性が高く，パターンを含まない画像も撮影することでテクスチャの計測も容易である．一方，複数枚の画像を用いることから動物体の計測は困難である．ダイレクトメソッドは，ワンショットでカメラとプロジェクタの

表 2.1: 3 次元形状計測法の特徴

	ワンショット	高精度	安定性	テクスチャ計測
ステレオ視	○	×	×	○
光レーダ法	×	○	○	×
グレイコード法	×	○	○	○
ダイレクトメソッド	○	○	×	×
破線方式	○	×	×	×
グリッドベース計測法（3 章）	○	○	×	×
本論文の手法	○	○	○	○

全画素の対応が取得できるため，高精度に動物体の計測ができる．しかし物体表面のテクスチャにより投影した色が変質するため計測が安定せず物体本来のテクスチャも失われる．破線方式は，ワンショットで計測できる手法である．しかし，破線の長さを利用して対応付けることから物体の凹凸により観測される線分の長さが変化すると安定的に計測できない．グリッドベース計測法（3 章）は，ワンショットで計測できる手法であり，交点の接続を利用することにより破線方式より安定的に計測できる．しかし，カラーパターンを利用することにより，物体のテクスチャに計測が影響を受け，また物体のテクスチャは損なわれる．

そこで本論文では，グリッドベース計測法の問題であったカラーパターンを用いることによる形状計測の不安定さとテクスチャ喪失を解消する新たな 3 次元形状計測法を実現する．

第3章
グリッドベースワンショット形状計測法

従来，レンジセンサを用いて形状計測を行う研究には，静止した物体を扱った研究がほとんどであった．そのため，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．本章ではラインベースによるグリッドパターンからの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に関する従来行われた研究について述べる．

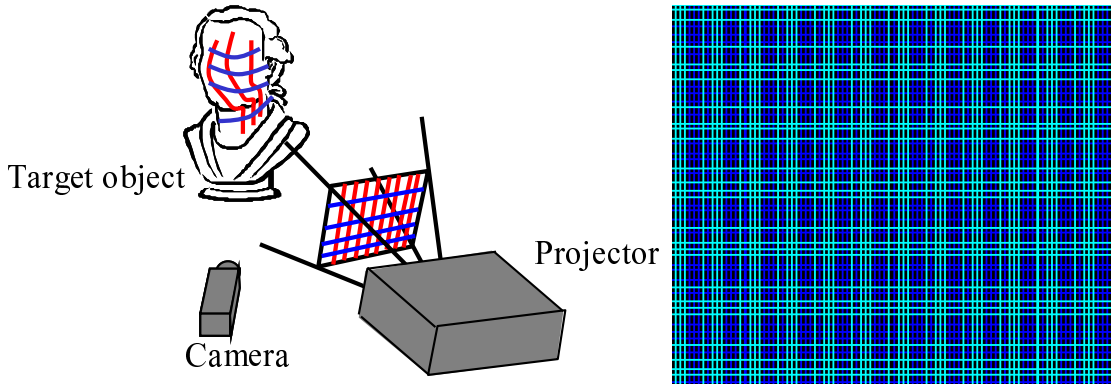


図 3.1: (左) 復元システム．複数の直線を投影し，その交点を用いて復元を行う．(右) 投影パターン

3.1 システム構成

提案する 3 次元計測システムは，図 3.1(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．これは本論文の大きな貢献の 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，Belief-Propagation (BP) により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 (3.5 章)．

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縦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 [22]．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[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，

$$v_1x_1 + v_2x_2 + v_3x_3 + 1 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{x} + 1 = 0 \tag{3.1}$$

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，

$$v_1p_1 + v_2p_2 + v_3p_3 + 1 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} + 1 = 0 \tag{3.2}$$

$$v_1q_1 + v_2q_2 + v_3q_3 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{q} = 0 \tag{3.3}$$

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

$$\mathbf{v} = \mathbf{v_0} + \eta(\mathbf{p} \times \mathbf{q}) \tag{3.4}$$

と表せる．ただし $\mathbf{v_0}$ は式 (3.2)，(3.3) 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 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

$$\mathbf{v} = \mathbf{s} + \eta\mathbf{v}', \quad \mathbf{h} = \mathbf{s} + \rho\mathbf{h}' \tag{3.5}$$

となる．

3.3 平面パラメータの取得

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，

$$\tilde{\mathbf{u}} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{h}) = 0 \tag{3.6}$$

が成り立つ [22]．この式に平面パラメータの式を代入すると，

$$\eta(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{v}') = \rho(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{h}') \tag{3.7}$$

[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．

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，

$$F_{i,j}\eta_i = G_{i,j}\rho_j \tag{3.8}$$

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 として，$(M+N)$ 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．$\boldsymbol{\eta} \equiv (\eta_1, \cdots, \eta_M)^\top$，$\boldsymbol{\rho} \equiv (\rho_1, \cdots, \rho_N)^\top$ と定義すると，方程式 (3.8) は，

$$\mathbf{T}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{R}\boldsymbol{\rho} \tag{3.9}$$

となる．

式 (3.9) を最小自乗法で解くには，

$$||\mathbf{T}\boldsymbol{\eta} - \mathbf{R}\boldsymbol{\rho}||^2 = \left\| [\mathbf{T}| - \mathbf{R}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta} \\ \boldsymbol{\rho} \end{bmatrix} \right\|^2 \tag{3.10}$$

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，QR 法など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．

3.4 曖昧性の解消

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 (3.9) が成立するとき，$\boldsymbol{\eta}$ と $\boldsymbol{\rho}$ を $c\boldsymbol{\eta}$ と $c\boldsymbol{\rho}$ に置き換えても成立する．すなわちこの方程式には 1 個の自由度が存在する．本論文の場合，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 (3.9) からは求められないが，c の真の値を $\bar{c}$ とすると，$\bar{c}\boldsymbol{\eta}$，$\bar{c}\boldsymbol{\rho}$ 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 [22]．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，$\mathbf{g}_l, 1 \leq l \leq P$ 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 $\mathbf{g}_l, 1 \leq l \leq P$ との照合を，誤差関数

$$E(c) = \sum_{1 \leq j \leq N} \min_{1 \leq l \leq P} e(\mathbf{g}_l, \mathbf{s} + c\rho_j \mathbf{h}') \tag{3.11}$$

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 3.11 で投影パターン $\mathbf{g}_l$ の ID と観測平面 $\mathbf{s} + c\rho_j \mathbf{h}'$ 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 ∞ 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る．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．

3.5 カラーコード識別によるワンショット形状復元の安定化・高密度化

本章では図 3.1(右) と図 3.3(左) のようなデブルーイン系列に基づくカラーコードの埋め込まれたグリッドパターンの検出，全画素用いた復元結果の高密度化について説明する．カラーコードにより線を識別できれば，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．また，平面集合のマッチングを簡単にすることができる．

全体の流れを図 3.2 に示す．本論文で提案するグリッドパターンの検出は 2 ステップから成る．それは，色によらない直線検出と，カラーコードの識別である．投影パターンに用い

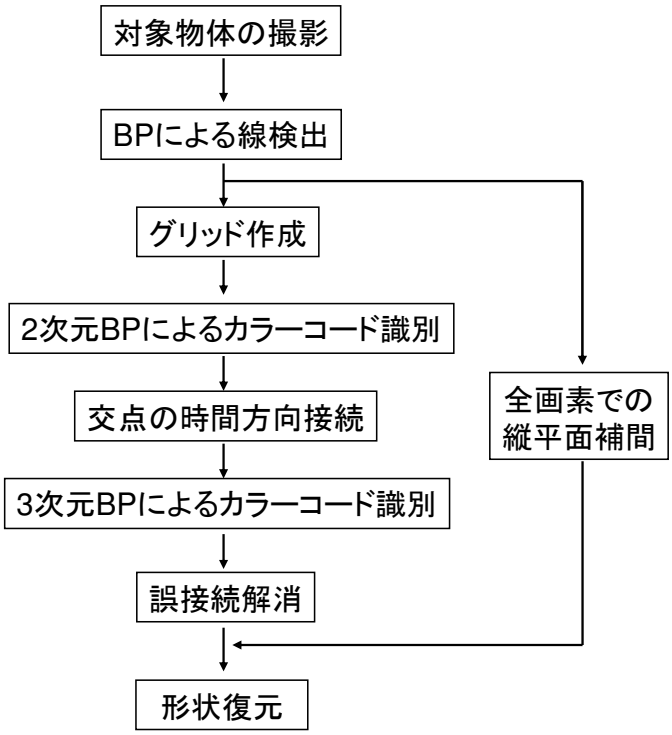


図 3.2: グリッドパターン検出と高密度復元の概要

る色は，物体の表面の色の影響を減らすために縦線，横線に同じ色を使用する．そこで，縦線と横線が同じ色でも線を検出するために，Belief-Propation(BP) を用いる．画素の並びをグラフと考え，コスト関数を画素の輝度値変化とすることで，向きを指定するだけで安定してそれぞれの方向の線を検出できる．また，カラーコード識別に関しても検出された線からグラフを作成できるため，BP が利用できる．縦線横線による接続だけでなく，時間方向の接続も考慮し，3 次元グラフを作成することでカラーコード識別の精度が向上する．

さらに，復元結果をより密に表示するために，全画素を用いた高密度復元を行う．すべての画素に架空の縦線が投影されていると考え，その縦線の平面パラメータを求めることで 3 次元空間中の位置を決定できる．この縦平面のパラメータは近傍の縦線を通る縦平面から補間により求める．検出した線だけを用いた復元結果より復元点が増えるため，密な復元結果が得られる．

3.6 密な直線パターンの検出

過去の研究では，図 3.3(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 3.3(右) では図 3.3 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，線の位置を線に対して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．

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．

3.6.1 画像の平滑化

カメラで撮影された画像にはノイズが含まれるため，線検出やカラーコードの識別に影響が出る．そこで，ノイズの影響を軽減させるため，画像の平滑化を行う．平滑化には 3×3 のガウシアンフィルタを用いる．ガウシアンフィルタとは式 3.12 のようなガウス関数を用いて重み付けを行ったフィルタである．

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}) \tag{3.12}$$

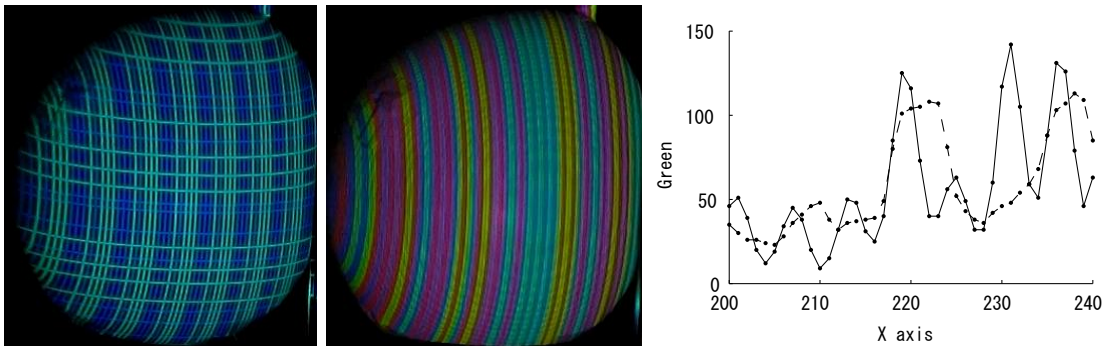


図 3.3: 線検出：(左) 提案手法での利用パターン，(中) 過去の研究での利用パターン，(右) 提案手法のパターンと過去研究のパターンの輝度値変化

式 3.13 のようにガウシアンフィルタと画像の各画素との畳み込みを行い，さらに正規化することで画像全体の明るさを変えずに平滑化を行う．

$$I_G(x,y) = \frac{\sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1} I(x+i,y+j)G(i,j)}{\sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1} G(i,j)} \tag{3.13}$$

ここで，$I(x,y)$ は画素 (x,y) の輝度値を表す．

3.6.2 Belief-Propagation に基づくライン検出

直線の連続性を考慮し，belief propagation(BP) に基づく手法を提案する．BP とは，[76] で定義されたグラフのエネルギー最小化問題である．

$$E(f) = \sum_{p\in V} D_p(f_p) + \sum_{(p,q)\in U} W_{pq}(f_p, f_q) \tag{3.14}$$

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 と q 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．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 3.4 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) であり，それぞれ輝度値の増加，減少，一定を意味

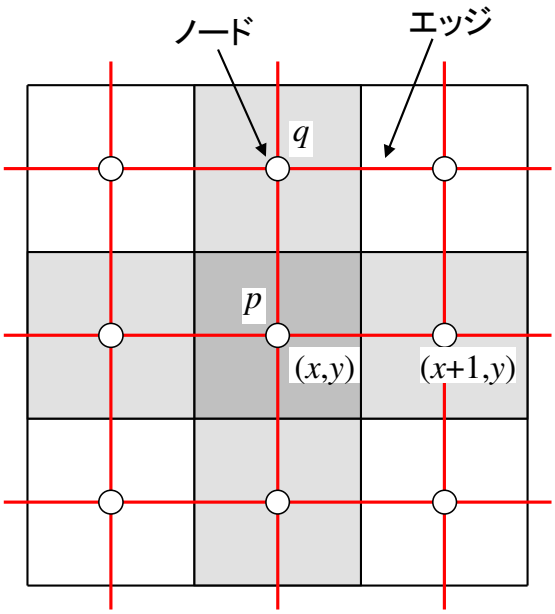


図 3.4: 線検出での BP のグラフ

する．ここでは線の位置を線に対して垂直方向の輝度値のピークと定義するため，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．

$$D_p(f_p) = \begin{cases} I(x+1,y) - I(x,y) & \text{if } f_p = N \\ |I(x+1,y) - I(x,y)| & \text{if } f_p = 0 \\ -(I(x+1,y) - I(x,y)) & \text{otherwise } f_p = P \end{cases} \tag{3.15}$$

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．

$$W_{pq}(f_p, f_q) = \begin{cases} -\lambda(f_q - f_p)(I(x+1,y) - I(x,y)) \\ \qquad \text{if edge } (p,q) \text{ is along x-axis} \\ |f_q - f_p| \\ \qquad \text{if edge } (p,q) \text{ is along y-axis} \end{cases} \tag{3.16}$$

ここで，f_p と f_q は 0，1，2 のいずれかであり，それぞれラベル 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，

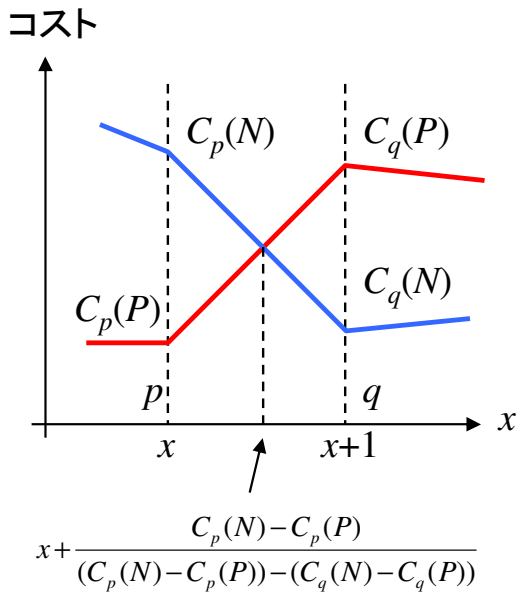


図 3.5: サブピクセルの計算法

線のサブピクセル位置を以下の計算で求める．

$$x + \frac{C_p(N) - C_p(P)}{(C_p(N) - C_p(P)) - (C_q(N) - C_q(P))} \tag{3.17}$$

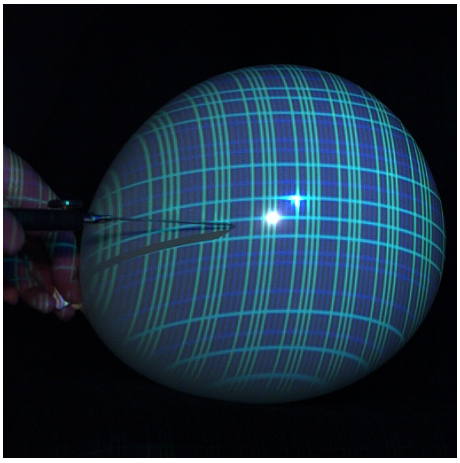
ここで，$C_p(f_p)$ はデータコストとメッセージの合計値である最終コストを表す．p の x 座標を x とすると，q の x 座標は $x+1$ となる (図 3.5)．

横線は方向を変えることでにより，同じ手法で検出できる．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，コストを考慮してサブピクセル位置を計算するため，本論文では BP を採用した．

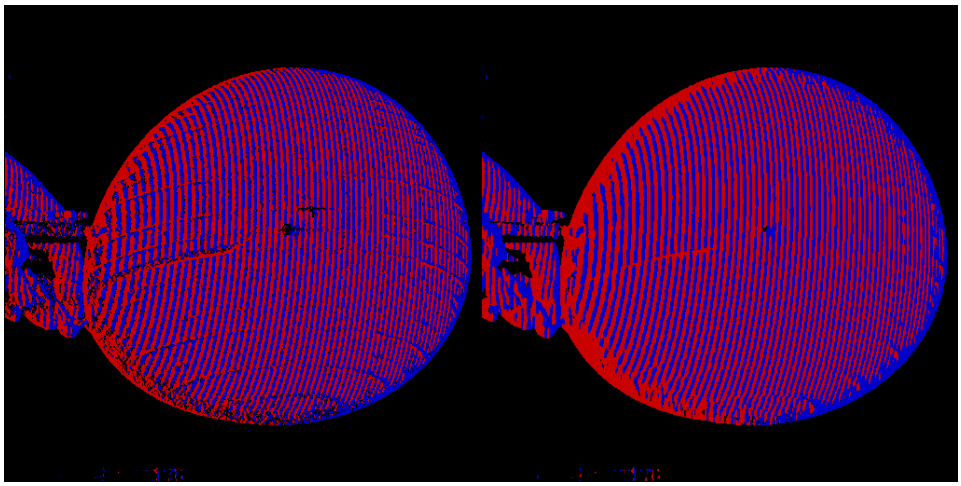
実際に縦線を検出する過程を図 3.6 に示す．(a) は入力画像，(b)(c)(d) はメッセージパッシングの繰り返しによるラベルの変化を表しており，画像中の色はそれぞれ，赤：ラベル P，青：ラベル N，黒：ラベル 0 を表す．初期状態では横線の影響が残っているが，メッセージパッシングを繰り返すことにより，少しずつ横線が消え，10 回目では横線がほとんど無くなった．線検出結果を図 3.6(e) に示す．

3.7 カラーコードの識別

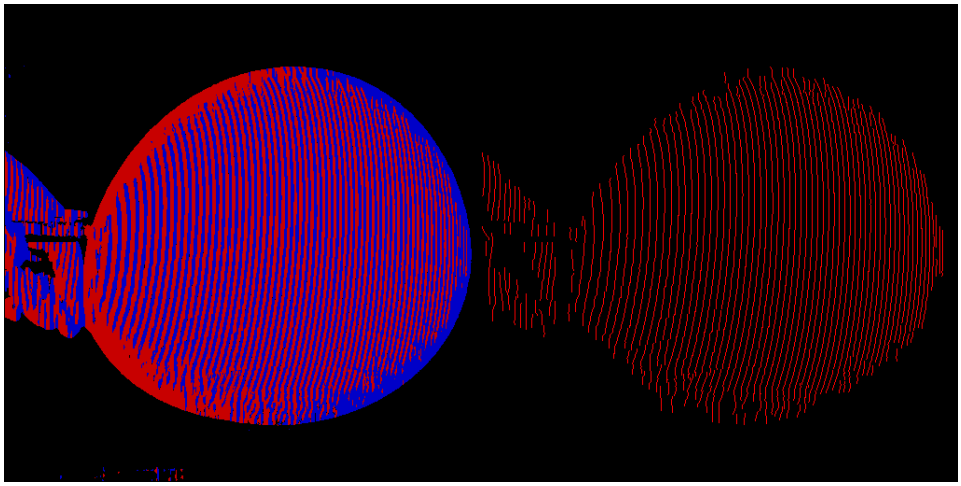
提案手法は本来ライン 1 つ 1 つの識別は不要である．しかし，最終的なユークリッドアップグレード（3.4 節）の際に，ラインパターン群同士の適合性を見て 1 自由度を解消するため，少しでも識別されたラインがあればより安定した解が期待できる．さらに，識別され



(a)



(b) 初期状態　　(c) 5 回目



(d) 10 回目　　(e)

図 3.6: 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

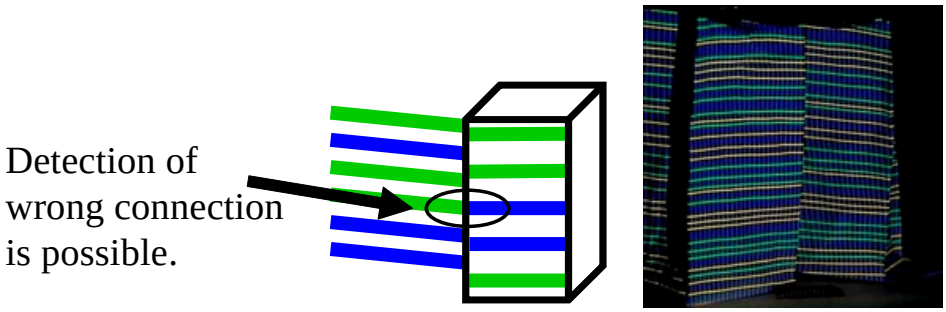


図 3.7: (左) ストライプを利用した場合の誤接続，(右) 画像例

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 [52, 53, 77] に基づいたカラーコードを用いる．

ウィンドウサイズ 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．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．誤接続とは，物体の境界で違う線がつながり，連続した線のように見える現象のことである．たとえこのような現象が起こったとしても，図 3.7 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，曖昧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．本論文ではウィンドウサイズ 3，記号数 2 のデブルーイン系列を使用した．すなわち，数列の周期は 8 となる．この数列に基づき縦線，横線の色を決めることで，図 3.1(右) のようなカラーコードを含むグリッドパターンが得られる．

安定してカラーコードを識別するために，[52] では動的計画法が使われた．一方，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 次元グラフを作り，BP に基づきカラーコードを識別する．さらに，その識別結果を利用して時間軸方向の接続情報を

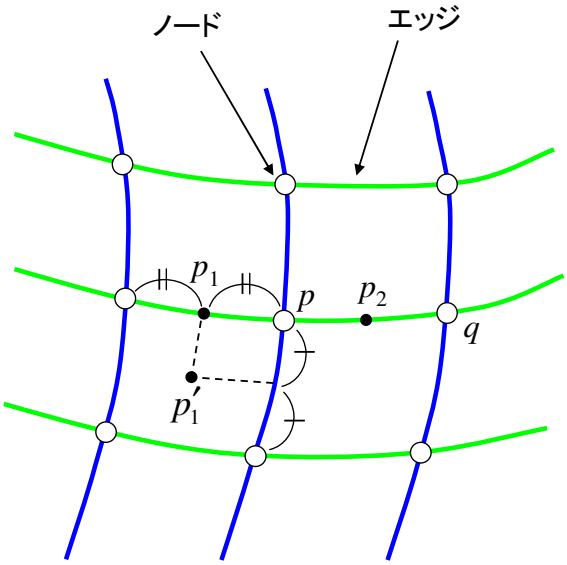


図 3.8: カラーコード識別での BP のグラフ

加えた 3 次元グラフを作成し，BP に基づいた 3 方向正則化を行うことで，より安定してカラーコードを識別できる．

3.7.1 グリッドの作成

BP を用いてカラーコードを識別するため，3.6 節で抽出した縦線と横線から交点の上下左右の接続関係を含むグリッドを作成する．交点の上下の接続関係を求めるには，それぞれの縦線の上端から下に向けてそのライン上に存在する交点を順に探索し，交点が見つかるごとに，前の交点のと接続を記録する．交点の左右の接続関係の場合も同様に横線上の交点を探索する．また，線の位置はサブピクセルの精度で決定されるため，交点の位置もサブピクセル精度で求めることができる．

3.7.2 2 次元 BP を用いたカラーコードの識別

図 3.8 のように，3.7.1 節で作成したグリッドの交点をグラフのノード，観測線をエッジとみなす．デブルーイン系列の 1 サイクルに 8 本の直線を含むため，ラベルの数は 0〜7 の 8 つである．

ここでは横線のカラーコード識別について考える．カラーコード識別のデータコスト $D_p(f_p)$

は以下の式で与えられる．

$$D_p(f_p) = \left| H\left(\frac{R'_{p_1}+R'_{p_2}}{2}, \frac{G'_{p_1}+G'_{p_2}}{2}, \frac{B'_{p_1}+B'_{p_2}}{2}\right) - H_{f_p} \right| \tag{3.18}$$

ここで，$H(R,G,B)$ は色相，H_{f_p} は投影パターンでのラベル f_p の線の色相を表し，p_1，p_2 は図 3.8 のように交点 p の左右の接続関係にある交点との中点である．R'_{p_1}，G'_{p_1}，B'_{p_1} は点 p_1 の周りの画素を考慮した赤，緑，青の画素値であり次の式で定義される．

$$R'_{p_1} = R_{p_1}\frac{C}{R_{p'_1}}, \quad G'_{p_1} = G_{p_1}\frac{C}{G_{p'_1}}, \quad B'_{p_1} = B_{p_1}\frac{C}{B_{p'_1}}$$

ただし，$C = \max(R_{p'_1}, G_{p'_1}, B_{p'_1})$ であり，点 p'_1 は図 3.8 のような線の検出されない画素である．交点では縦線と横線が交わるため，点 p の色相は信頼性が低い．そのため，交点以外のライン上の画素を利用する．また，ラインの周囲の画素も利用することにより，物体表面の色の影響を考慮したコストを導く．

不連続コスト $W_{pq}(f_p, f_q)$ は次の式で与えられる．

$$W_{pq}(f_p, f_q) = \min(|(f_p + d(p,q)) \bmod 8 - f_q|, |8 - (f_p + d(p,q)) \bmod 8 - f_q|)^2 \tag{3.19}$$

ここで，$d(p,q)$ は，交点 p に対して交点 q が下に接続されていれば 1，上に接続されていれば -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．

縦線のカラーコードの識別も横線の場合と同様に行う．

3.7.3 時間方向の交点接続

交点の接続情報について上下左右だけでなく，時間軸方向も考慮することで，3 次元グラフを作成することができるため，さらなるカラーコード識別の精度向上が見込める．ここでは前後の隣接フレームの交点との接続を行う．上下左右の交点の接続と異なり，時間方向には線でつながっていないため，抽出した線に沿って接続を決定することができない．そこで，接続先の交点の探索にはエピポーラ線を利用する．エピポーラ線とは図 3.9 のように，カメラの画像平面上でのプロジェクタ中心と空間中の点を結んだ直線となる．カメラとプロジェクタの位置は固定されているため，画像平面上でのプロジェクタ中心は一定である．また，投影パターンは変化しないため，交点が投影される方向は変化しない．そのため，エピポーラ線は各交点に対して一定となり，任意のフレームに対して各交点は自身を通るエピポーラ線上に必ず存在する．しかし，1 枚の画像上において，エピポーラ線上の交点は複数存在する可能性があるため，一意に接続を決定することができない．そこで，あらかじめ 2 次元 BP を用いてカラーコードを仮決定し，縦線と横線のカラーコードが同じ場合のみ，時間方向に接続する．

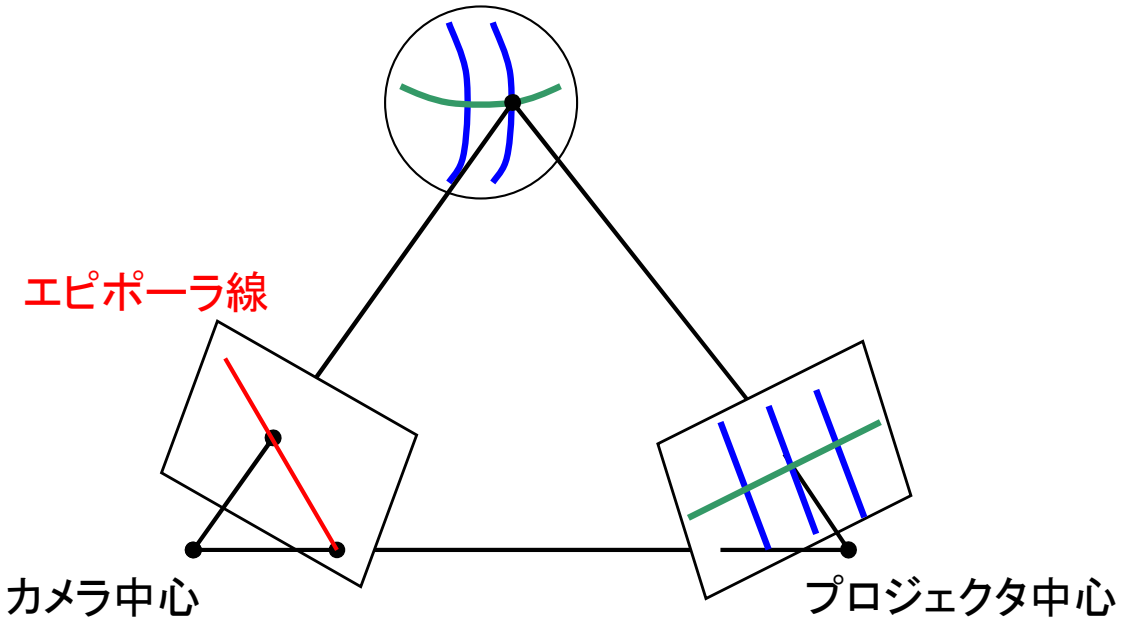


図 3.9: 交点の位置とエピポーラ線の関係

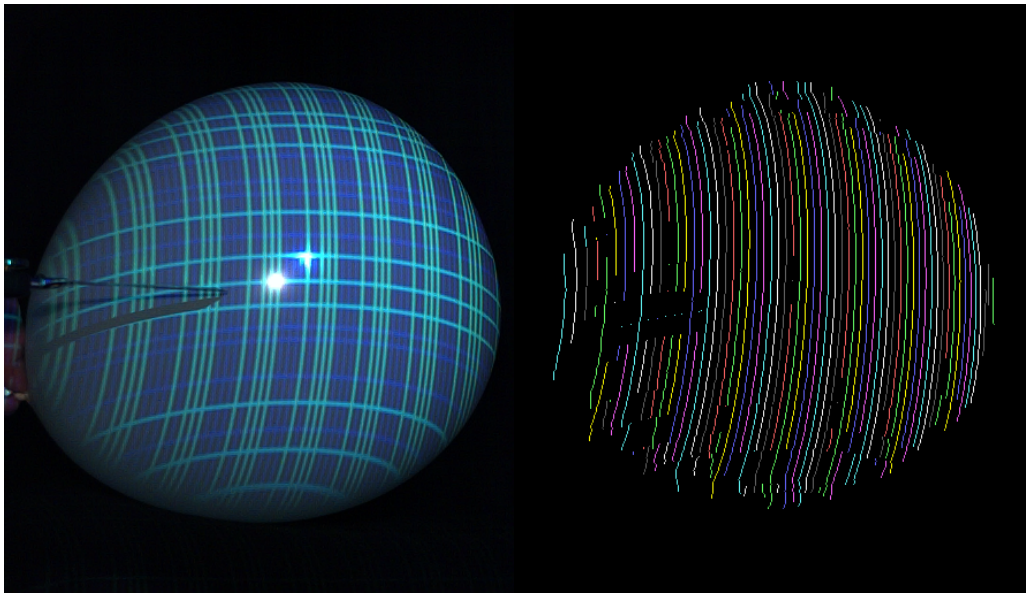
しかし，エピポーラ線とカラーコードによる拘束を加えても，全く異なる交点と接続される場合がある．時間方向の誤接続は復元精度に大きな影響を与えるため，誤接続を切断しなければならない．そこで，それぞれの線上の交点は隣接フレームの同じ線上の交点と接続されるということを利用する．各線上の交点と接続された交点がすべて同じ線上にあれば，誤接続は無いと判断できる．一方，いくつかの線上にある場合，それぞれの線上の交点の数がある閾値以下のとき，その線上にある交点との接続は誤りと判断し切断する．

3.7.4　3 次元 BP を用いたカラーコード識別

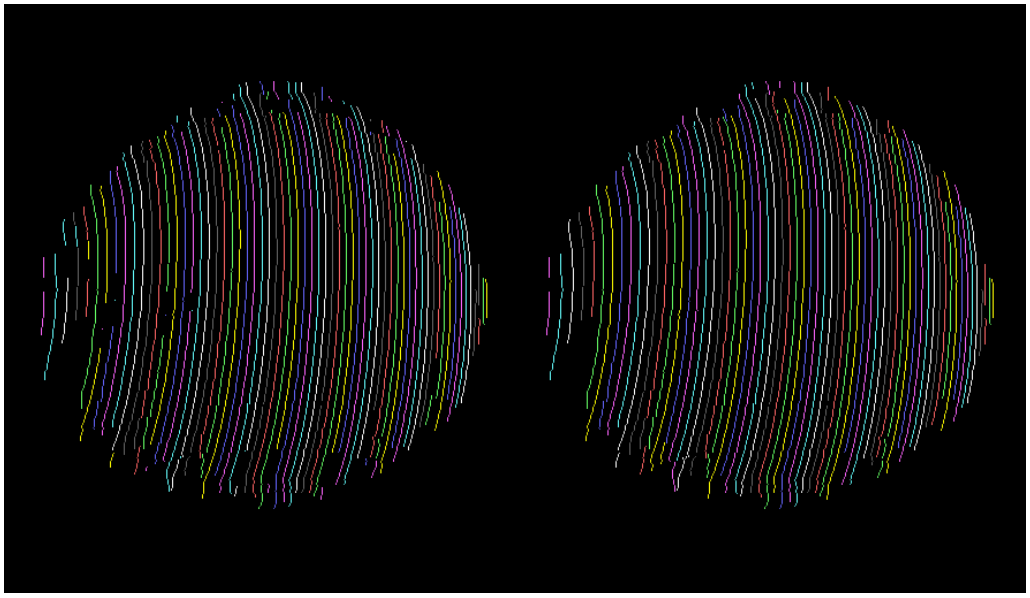
3.7.2 節では縦と横の接続関係を用いた 2 次元グラフを使用していたが，時間軸方向の接続を加え，グラフを 3 次元に拡張することにより，カラーコード識別の精度向上が見込める．

そのため，3 次元グラフを用いるように BP を拡張する必要がある．ラベルとデータコストは 2 次元 BP の場合と同じだが，不連続コストを表す式 3.19 の $d(p,q)$ に時間方向の場合が加わる．交点 p に対して交点 q が時間方向に接続された交点ならば 0 となる．

実際に縦線のカラーコードを識別する過程を図 3.10 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．

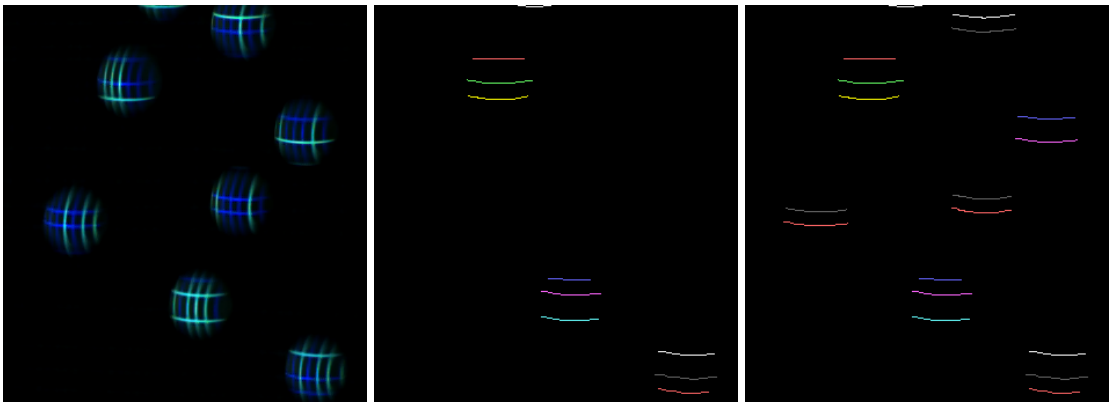


(a) (b) 初期状態



(c) 2 回目 (d) 5 回目

図 3.10: BP によるカラーコード識別の過程．(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



(a) (b) (c)

図 3.11: 時間方向の接続情報の有無によるカラーコード識別精度の比較．(a) 入力画像，(b) 時間接続無し，(c) 時間接続有り

検出された線が少なく，1 枚の画像からカラーコードを識別することができない場合でも，時間接続を加えることにより，カラーコード識別が可能となる．図 3.11 は，ピンポン玉に投影されたパターンから横線のカラーコードを識別した結果である．時間接続の無い場合では，横線が 2 本しか投影されていないためカラーコードの識別ができず，表示されていないところがある．一方，時間接続を加えた場合では，隣接フレームから 3 次元グラフを作成するため，カラーコードを識別することができる．

3.7.5 カラーコードによる誤接続解消

誤接続を含んだまま形状復元を行うと，異なる物体が 1 つの塊と認識されるため，間違った形状を導くという問題がある．この問題を解消するために，誤接続を解消しなければならない．それにはカラーコードを利用する．1 本の線でも途中でコードが変化する場合がある．その場合，誤接続と判断することができる．そこで，線を端から探索し，隣接する交点間でコードが異なる場合，変化前の交点と変化後の交点の間の線を削除することにより，誤接続を解消する．

3.8 全画素を用いた高密度復元

以前の手法では画像から抽出されたパターンと投影パターンと対応付けを行っていたため，線上の点しか 3 次元位置を決定することができず，復元結果が疎になるという問題があった．そこで，画像中の任意の点と投影パターンとの対応付けを求めることができれば，すべての点で 3 次元位置を求めることができるため，復元結果の密度が増える．

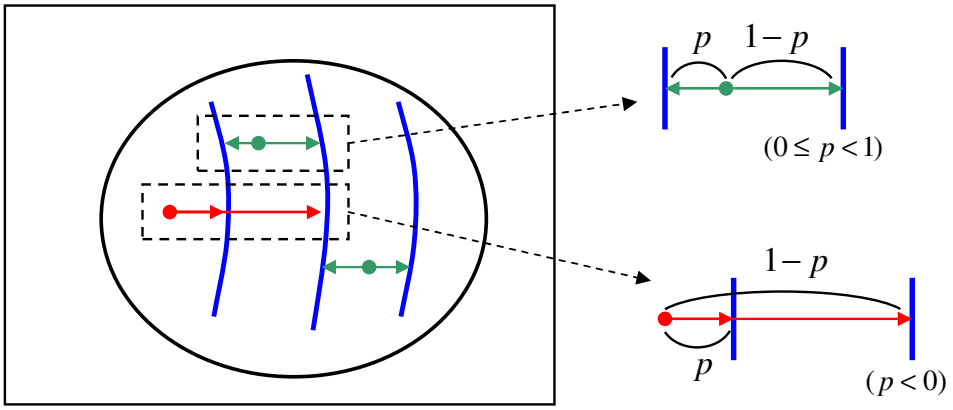


図 3.12: 縦平面パラメータ補間に使用する縦線と位相の関係

対応付けを行うために，画像中の任意の点に仮想的な縦線があるものと考える．この縦線と対応する縦平面のパラメータ η' は縦パターンを通る平面のパラメータから補間でき，式 3.20 で決定できる．

$$\eta' = (1-p)\eta_i + p\eta_{i+1} \tag{3.20}$$

ここで，η_i は投影パターンにおける i 番目の縦平面のパラメータ，p は位相を表す．位相とはカメラ画像中での隣接する 2 つの縦線間の位置を表し，$p=0$ のとき i 番目の縦線，$p=1$ のとき $(i+1)$ 番目の縦線と一致する．画像中の任意の点で，この点をはさむ 2 本の縦線と位相 p を求めることができれば，対応する縦平面を求めることができる．

まず，2 本の縦線を決定するために，図 3.12 の緑点のように，対象となる画素を中心に x 軸の正方向と負方向に走査し，それぞれ最初に見つけた縦線とする．

次に，位相を求めるためにガボールフィルタ（式 3.21）を利用する．

$$G(x,\sigma,\lambda,\phi) = \exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2})\cos(2\pi\frac{x}{\lambda}+\phi) \tag{3.21}$$

ただし，σ は分散，λ は周期を表す．2 つのガボールフィルタと線検出の最終コストとの畳み込みを行い，得られた 2 つの値を実部と虚部に持つ複素数の偏角をその画素における位相とする．そこで，ガボールフィルタを拡張し，

$$G_c(x,\sigma,\lambda) = G(x,\sigma,\lambda,-\frac{\pi}{2}) + iG(x,\sigma,\lambda,0) \tag{3.22}$$

とする．式 3.23 のように，点 (x,y) の周りでガボールフィルタと 3.6.2 節で得られたラベル

P とラベル N のコストの差との畳み込みを行い，複素数 Z を得る．

$$Z(x,y,\sigma,\lambda) = \frac{\sum_{j=2\lambda}^{2\lambda}(C_{(x+j,y)}(P) - C_{(x+j,y)}(N))G_c(j,\sigma,\lambda)}{\sum_{j=2\lambda}^{2\lambda}|G_c(j,\sigma,\lambda)|} \tag{3.23}$$

ただし，$C_{(x,y)}(P)$，$C_{(x,y)}(N)$ は点 (x,y) におけるラベル P とラベル N のコストを表す．ここでは，周期は画像中の縦線の間隔，ガボールフィルタの幅は 2λ とした．この画素における位相は複素数 Z の偏角で表すため，

$$p = \frac{\arg Z}{2\pi} \tag{3.24}$$

で得られる．ただし，$0 \leq \arg Z < 2\pi$ とする．また，$|Z|$ が小さい場合，信頼性が無いと判断し，対応付けを求めない．

一方，図 3.12 の赤点のように，物体の境界付近など縦線に挟まれていない画素では，x 軸の正方向，または負方向のどちらか一方しか縦線が存在しないため，2 本の縦線を決定できない．そこで，式 3.20 において，η_i と η_{i+1} による内挿だけでなく，外挿の場合も考慮することで，縦線にはさまれていない画素に対応する縦平面を求める．また，位相は同じように複素数の偏角として計算するが，外挿するため 0 以下または 1 以上にする必要がある．そこで，位相の周期は 1 であるため，求めた位相に $+1$，または -1 を足すことで，位相を修正する．x 軸の負方向に縦線が無い場合は，x 軸の正方向に 2 本の縦線が見つかるまで走査し，位相を 0 以下に修正する．また，x 軸の正方向に縦線が無い場合も同様に，x 軸の負方向に 2 本の縦線が見つかるまで走査し，位相を 1 以上に修正する．

これにより，縦線にはさまれていない画素においても対応する縦平面を求めることができ，全画素を用いた復元が可能となる．

3.9 まとめ

本章では従来研究された密な 3 次元形状を復元できるワンショットアクティブステレオシステムを述べた．この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．さらに，投影パターンにデブルーイン系列に基いたカラーコードをラベル付けすることで，異なる線が 1 本につながって見える誤接続をなくし，最終的な曖昧性の解消を安定化させる手法も同時に提案した．

密な投影パターンの線を安定して検出するために，Belief-Propagtion(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．提案手法を用いれば，縦線と横線が同じ色であっても，縦横を指定することでそれぞれの線を抽

出できる．カラーコードの識別にも BP を用いることで，隣接する線と時間方向の接続を考慮し，安定してカラーコードを識別することができる．また，ガボールフィルタを用いて位相を求めることにより全画素を用いた復元を実現した．これにより復元結果の密度を増やし，より詳細な形状を得ることができる．

さらに，本章では 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．

この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ている．

しかし，本手法にはカラーパターンを用いたことによるテクスチャと形状を同時に獲得できないこと，物体のテクスチャに影響されて安定した計測が行えないことなどの問題がある．そこでこれらの問題を解決する方法について次章以降で扱う．

第4章
近赤外グリッドベースワンショット形状計測システム

第3章では，2色のグリッドパターンを用いた密な3次元形状を復元できるワンショットアクティブステレオシステムを述べた．しかし,，この手法には，プロジェクタからの照明によってテクスチャが干渉を受けるため，形状計測と同時にテクスチャを取得できないという問題があった．そこで本章で提案するシステムでは，形状計測に用いる波長を分離することにより，この問題を解決する．パターン光は近赤外光を用いて投影し，テクスチャは可視光を用いて取得する．この際，近赤外光のカメラと可視光のカメラが異なる位置にあれば，テクスチャと形状の間にずれが生じ，テクスチャ付き3Dモデルの精度が低下する．そのため，同一視点から可視光と近赤外光を取得するマルチバンドカメラを試作した．さらに複数の光の波長を用いた3次元形状計測を行うために，マルチバンドグリッドパターンを作り出す近赤外光プロジェクタを試作した．また，固定されたグリッドパターンを用いてシステムを校正する手法を提案する．実験では，本システムから獲得したテクスチャ付き3次元形状を示す．

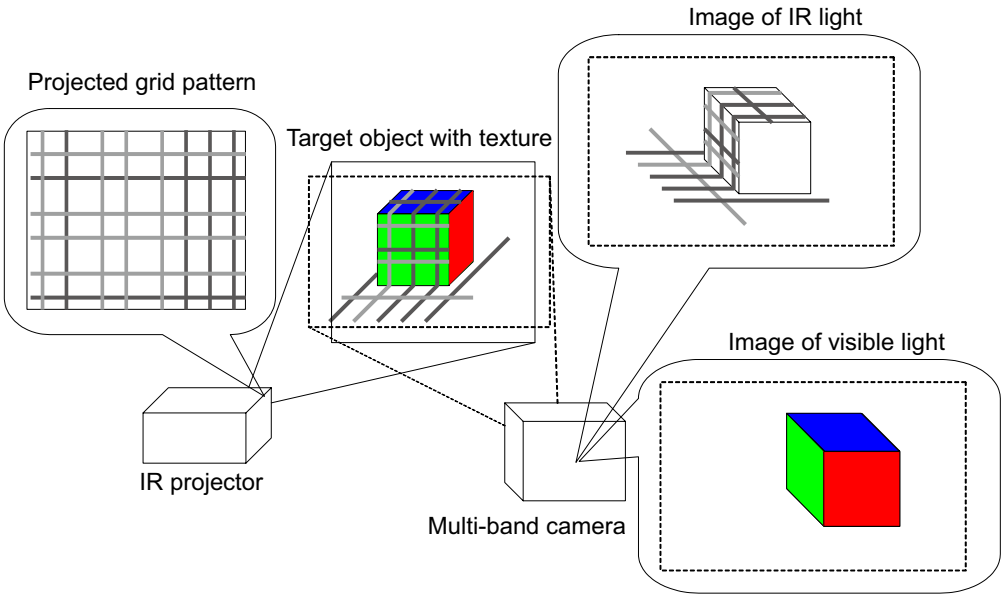


図 4.1: 近赤外プロジェクタとマルチバンドカメラで構成されたテクスチャ付き 3 次元形状計測の提案システム．

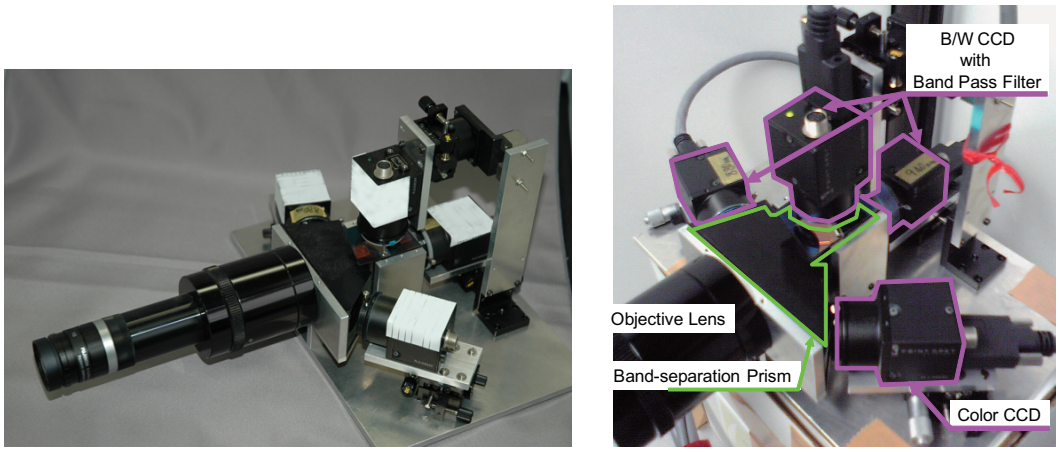
4.1 システムの概要

本システムは，図 4.1 で示すように近赤外プロジェクタとマルチバンドカメラで構成されたテクスチャ付きの 3 次元形状を計測するシステムである．近赤外プロジェクタは縦線と横線で構成された固定グリッドパターンを投影する．縦線と横線はそれぞれ 765nm，850nm の 2 つの異なる波長のパターンを用いる．マルチバンドカメラは同一視点から可視光と近赤外光の両方の波長の光を取得する．テクスチャの計測において，外部光源は照明に利用する．外部光源が近赤外光成分を含む場合には赤外カットフィルタによって干渉を防ぐ．グリッドパターンからの 3 次元形状復元は次章で説明する．

4.2 単一視点から可視光と近赤外光の撮影用マルチバンドカメラ

形状とテクスチャを異なる視点から取得した場合，形状誤差が形状とテクスチャ間のずれを発生させることから，テクスチャ付きの 3 次元形状を計測するためには，同一視点から形状とテクスチャを撮影することが望ましい．そのために，提案するカメラシステムは可視光と近赤外光を同軸から撮影できるデバイスを備えている．

試作したマルチバンドカメラシステムを図 4.2 に示す．対物レンズは C マウントレンズとリレーレンズで構成する．そのため，C マウントレンズを変更することで，画角を変更することが可能となる．図 4.2 (b) に示すように，試作システムで用いたリレーレンズには長



(a) (b)

図 4.2: (a) 提案したマルチバンドカメラの試作システム．(b) 光学部品の拡大図．対物レンズは C マウントレンズとリレーレンズを備える．C マウントレンズを交換することにより，画角を変えることができる．

いバックフォーカスがあるため，入射光は光学部品の後方にあるイメージセンサの表面に焦点を合わせる．

マルチバンドカメラの内部構造を図 4.3 で示す．光学部品は，対物レンズ，波長分離プリズム，及びイメージセンサで構成される．対物レンズに入射する光は，最初に波長分離プリズムによって，可視光と 765nm 及び 850nm の近赤外光に分離する．このフィリップスプリズムは，異なる光の波長帯を分離するための膜でコーティングされた境界面での 4 つのガラス体から構成される．プリズムは 935nm の光も分離できるが，現在のパターンのコード化には 2 種類の波長の光で十分であるため，本論文では 935nm の光は利用しない．935nm の波長の光はパターンのコード化において 3 種類の波長を用いる場合に利用する．図 4.3 におけるプリズムのからの出射面 P_1,P_2, P_3, P_4 は，それぞれ可視光，850nm，765nm，935nm の近赤外光に対応する．

図 4.4 は，外部光源からの白色光と近赤外プロジェクタからの近赤外光が，対物レンズに入射した時に出射面に伝達される光の強度を示す．P_1, P_2, P_3 は，図 4.3 で説明したプリズムの出射面を指し示す．P_2 と P_3 の結果を見ると，異なる波長間でクロストークが発生しているため，バンドパスフィルタを用いて除去した．このシステムにおける光の強度の効率は 80 % 以上となる．対物レンズから 4 つのイメージセンサへの光学距離が等しくなるように設計した．本システムでは，2 つのモノクロカメラを近赤外画像を取得するためのイメージセンサとして用い，カラーカメラを可視光画像を取得するために用いた．

赤坂ら [78] は，同じ視点から近赤外光と可視光を獲得する同様のシステムを提案したが，

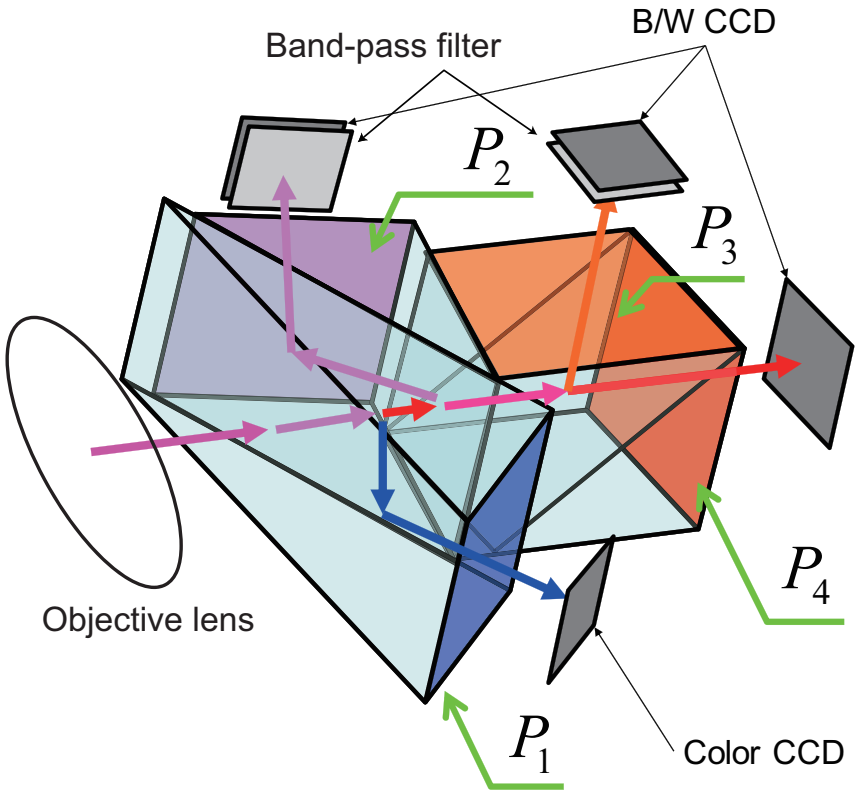


図 4.3: 提案したマルチバンドカメラの内部構造．カメラは対物レンズ，波長分離プリズム，及びイメージセンサで構成される．

彼らのシステムの欠点は光エネルギーの効率の悪さであった．このシステムでは波長に関わらず入射光をビームスプリッタで単純に分離するため，プロジェクタから投影された構造化光の強度は，分離して合成した場合と比べて半分以下に減衰される．その結果，高フレームレートで画像を取得するために，強い光源が必要となる．提案するシステムでは，カメラの光学部品を変更することにより，より効率的な光の強度を達成し，高フレームレートで動物体を撮影することができる．

4.3 グリッドパターンを投影する近赤外プロジェクタ

3 次元形状計測のための近赤外プロジェクタは，以下のような 2 つの要件を満たすように設計した．1) 縦線と横線で構成される固定グリッドパターンを投影できること．2) 2 種類の近赤外波長によりコード化できること．これらの条件を満たす方法の 1 つに，可視光の代わりに近赤外光を投影できるように 3LCD プロジェクタを変更することが考えられる．しかし，プロジェクタの光学部品は可視光に対して特化しており，近赤外光を遮断するフィルタが導入されているため，実際にはプロジェクタを近赤外光を出力するように変更すること

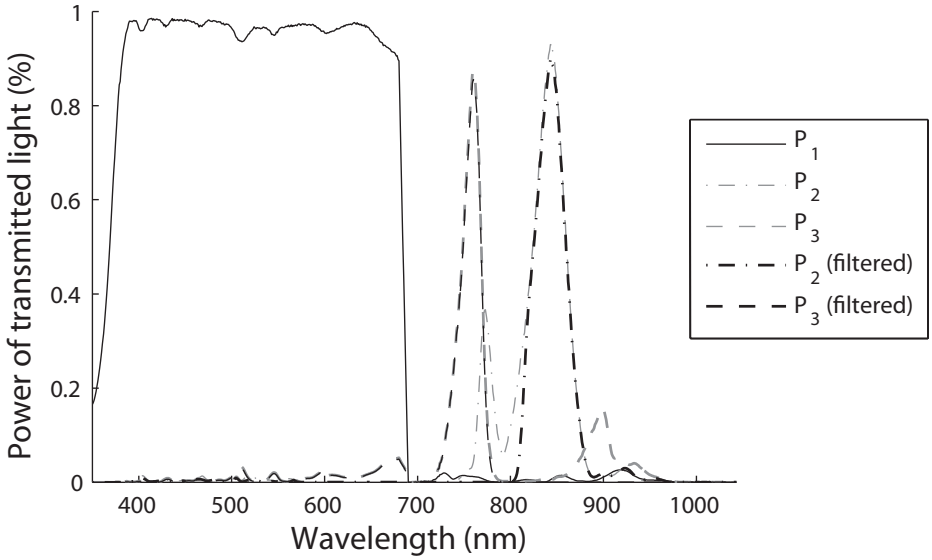


図 4.4: 対物レンズから白色光と図 4.7 で示された近赤外光が入射した時の，出射面からの光の分布．80 % 以上の光が出射される．

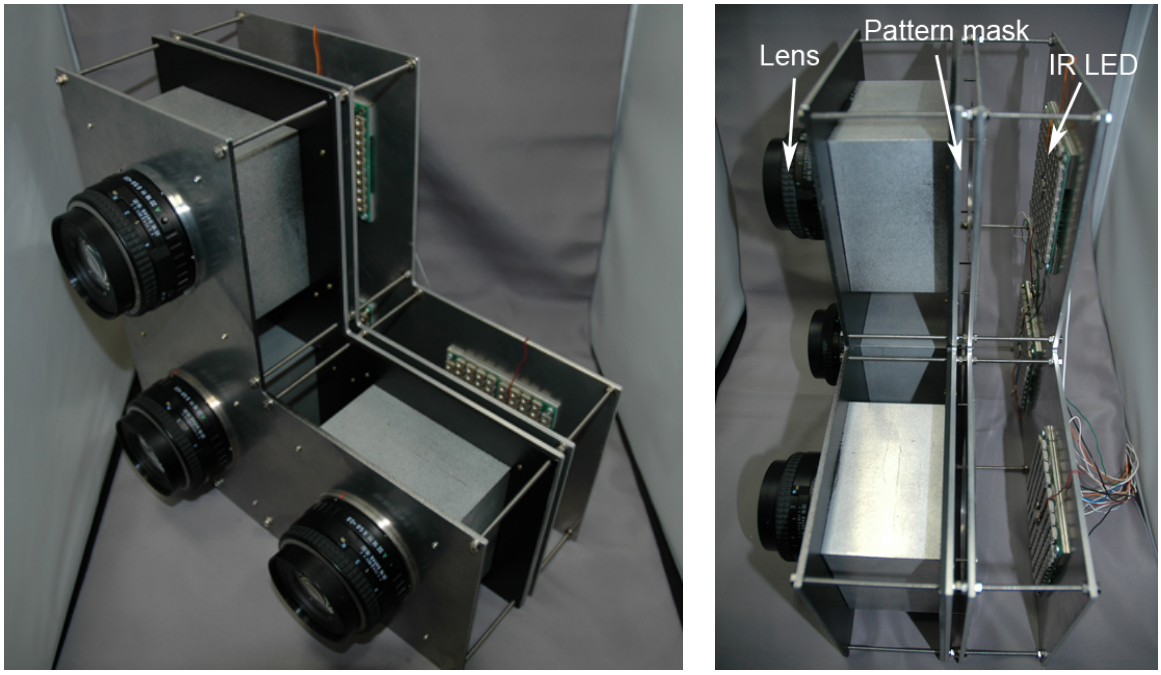
は難しい．

本システムでは固定パターンを用いるため，形状計測中にパターンを変える必要はない．そのため，本システムにおいては，ビデオプロジェクタで使用される LCD フィルタの代わりに，固定マスクパターンを印刷した透明膜を用いることが可能である．

もうひとつの問題は，2 種類の異なる波長の近赤外光を組み合わせることである．一般的な LCD プロジェクタでは，対物レンズを通して投影する前に合成プリズムで異なる色の光を組み合わせる．しかし，提案法で用いるパターンは単純な縦線と横線で構成される．そのため，プリズムを用いずに光を合成することが可能となる．提案するシステムでは，図 4.5 に示すように，L 字形に配置された 3 つのレンズからラインを投影する．

近赤外 LED アレイとマスクパターンは各レンズの後ろに配置する．3 つのレンズに利用するマスクパターンの例を図 4.6 に示す．765nm の光はレンズ 2 を通して投影し，850nm の光はレンズ 1 とレンズ 3 を通して投影する．レンズ 1 とレンズ 2 から投影された直線がレンズ 1 からレンズ 2 への方向に対して平行であれば，2 つのレンズからパターン平面同一のパターン平面が投影される．このことから，対物レンズを通る前に光を合成しなくても，近赤外光の 2 種類の波長によりラインのコード化を実現できる．また，プリズムを通さないことにより，光の強度の効率化が可能となる．850nm のパターンは，デブルーイン系列に基づいて 750nm のパターンに合わせる．

各近赤外 LED アレイは，116 個の LED があり，0.96-1.20W の電力を必要とする．これ



(a) (b)

図 4.5: 3 つの近赤外 LED アレイと，透明なフィルムに印刷されたマスクパターンと，対物レンズを持つ近赤外プロジェクタの試作機.

は，商業用のプロジェクタの光源と比べてはるかに小さい電力である．最大値が 1 となるように正規化した，各レンズから出射された光の強さを，図 4.7 で示す．LED の帯域幅が非常に狭いため，商業用のビデオプロジェクタでは大きな問題となる異なる波長間でのクロストークがほとんど発生しない．

4.4 システムの校正

4.4.1 イメージセンサ間の校正

テクスチャマッピングにおいて，システムを校正して形状とテクスチャ画像を合わせる必要がある．形状を獲得するためのカメラとテクスチャを獲得するカメラが異なる視点であった場合，テクスチャ画像と形状の対応点を予め決定することはできない．しかし，提案するシステムでは，形状とテクスチャを同じ視点から取得するため，イメージセンサ間の校正を行うことにより，前もって対応点を決定できる．

提案するマルチバンドカメラでは，異なる波長の光をプリズムによって分離されているが，センサの位置を除けば，全てのイメージセンサでの光学構造は，他の光学部品に対して仮想的に同一である．しかし，他の光学部品に対して各イメージセンサ間には小さなずれがある

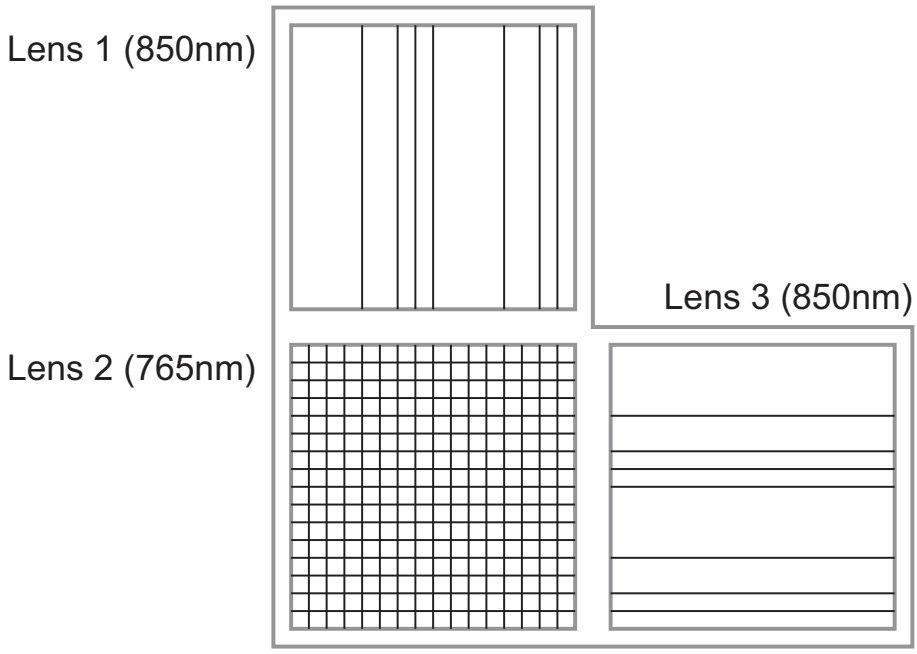


図 4.6: 投影するグリッドパターンの例．3 つのレンズからのラインパターンが一致するように形成される．

ため，入射光はイメージセンサ上の同じ画素に投影されない．この状況を図 4.8 で示す．全てのイメージセンサにおける光路は仮想的に共通であるため，イメージセンサ間のホモグラフィを計算することにより，対応点を求めることができる．

ホモグラフィの計算にはカメラ校正と同じ手法を用いる．まず，平面物体にチェッカーボードを貼り付けて，各イメージセンサで撮影する．そして，撮影した各画像から 4 点以上の対応点を検出することでホモグラフィが計算できる [79]．

4.4.2 プロジェクタ・カメラシステムの校正

プロジェクタ・カメラシステムを校正するためには，プロジェクタ座標とカメラ座標の対応が必要となる．コード化したパターンが投影された画像を撮影することにより，対応を獲得できる．グレイコード法 [20, 21] に基づくパターンのように，時間的にエンコードされたパターンは，構造化光によりコード化された複数枚の画像を利用して，プロジェクタの絶対座標を得るために頻繁に用いられる．しかし，提案するシステムでは透明膜に印刷された固定パターンを用いるため，マスクパターンを変えることによって時間的にエンコードされたパターンを用いることはできない．そのため，システムの校正もできる 3 次元形状計測用のパターンを利用する．利用するパターンは周期的であるため，プロジェクタの絶対座標は自動的に決定できない．この問題を解決するために，まず 1 点について手動で絶対座標を決定

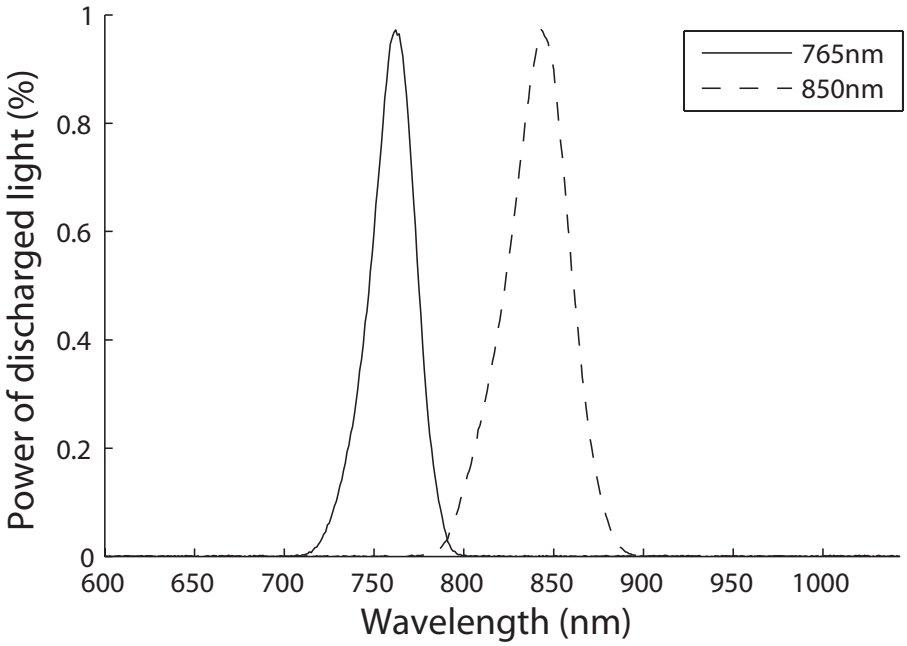


図 4.7: 各レンズから出射された光の強度．最大値が 1 となるように標準化した．

する．そして，残りの点に対しては曲線の接続情報を利用することにより，自動的に決定する．曲線は 佐川ら [23] のアルゴリズムをを用いて自動的に検出する．最初に絶対座標を与える点を用意に決定するため，図 4.9 に示すように，数個のマーカをパターンに付加する．このマーカは曲線の検出アルゴリズムに影響しないようになるべく小さくする．

一旦カメラ座標とプロジェクタ座標の対応を得ることができれば，ステレオシステムの校正として，カメラとプロジェクタの内部パラメータ及び，外部パラメータを計算できる．本論文では，Snavely [80] によって実装されたバンドル調整に基づいて校正に利用する．LCD や DMD のようにパターンをつくるために光学装置を必要とする商業用プロジェクタと比べて，本プロジェクタは大幅に簡素化できる．

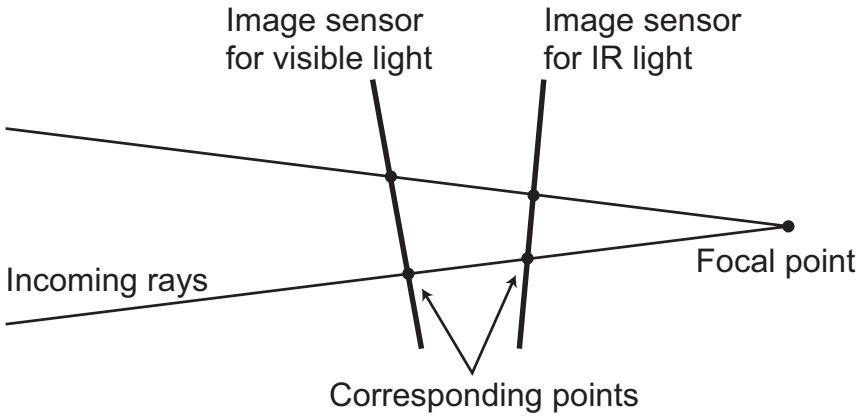


図 4.8: 全てのイメージセンサで仮想的に光路を共通化した様子．ずれがあるため，入射光はイメージセンサで異なる画素に投影される．

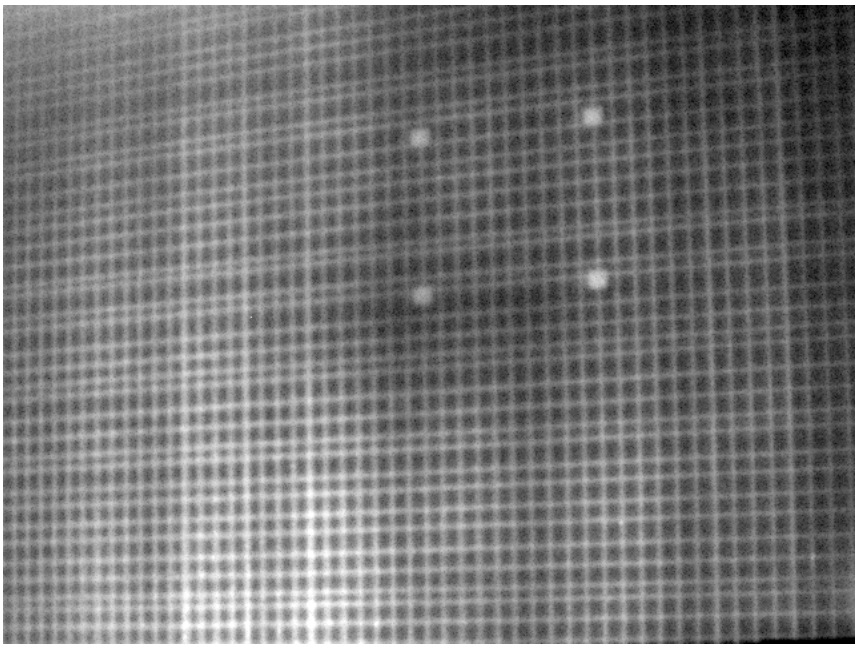


図 4.9: 校正に利用するワンショット 3 次元形状計測用のパターン．マーカを用いて，手動でプロジェクタの絶対座標を与える．

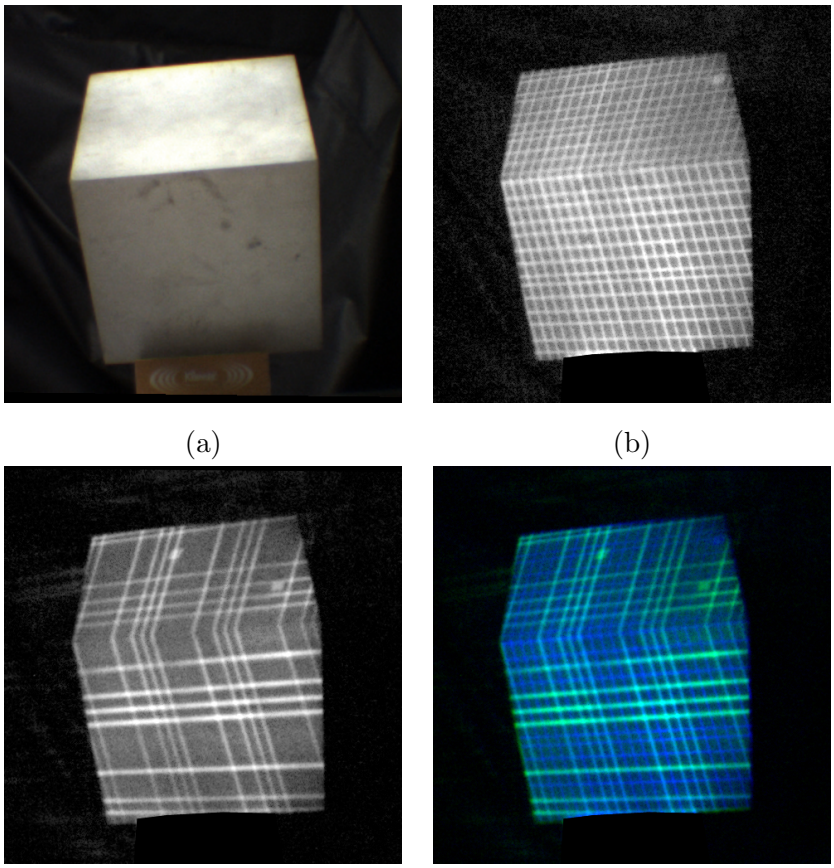
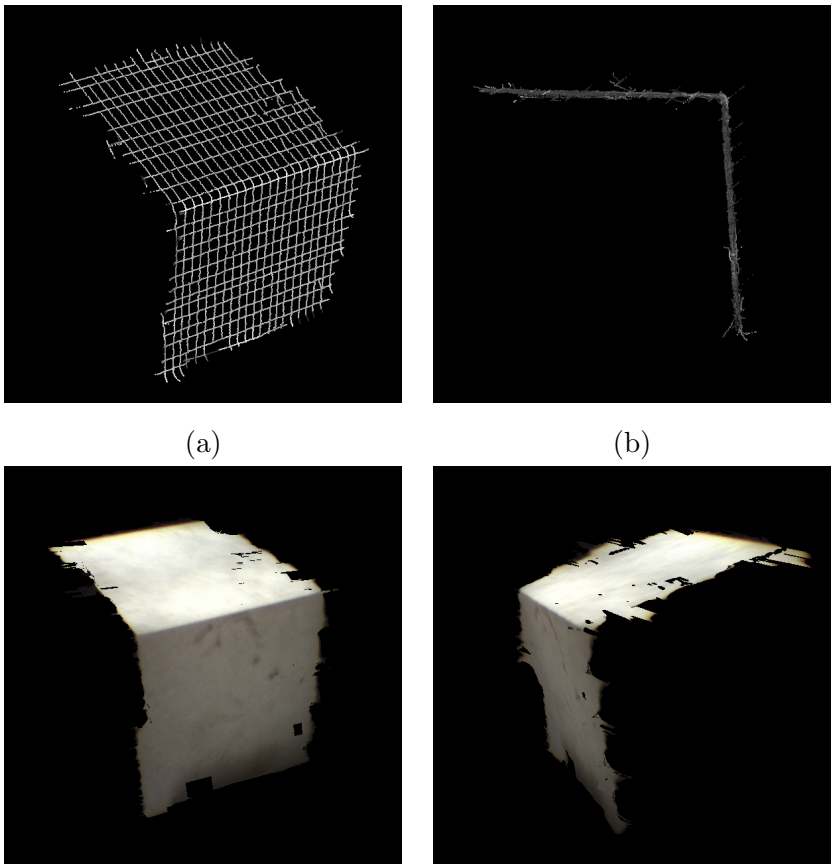


図 4.10: 立方体の画像．(a) 可視光のカラー画像．(b) 765nm 波長のパターンが投影された画像．(c) 850nm 波長のパターンが投影された画像．(d) 765nm と 850nm の画像を統合して作成したグリッドパターンが投影された画像．

4.5 実験

4.5.1 センサ性能評価

実験では，まず既知の物体を計測することにより，試作システムによる計測の精度を測定する．既知物体として図 4.10 に示す立方体の形状を計測する．図 4.10 (a), (b), (c) は，それぞれ可視光，765nm，850nm の近赤外光のカメラで撮影した画像である．図 4.10 (d) は，2 波長の近赤外光の画像を統合することにより作成したグリッドパターンである．ここで，青と緑のラインは，765nm と 850nm の光に相当する．4.4.1 章で説明した手法により計算されたホモグラフィを用いて，各画像間の位置合わせを行う．立方体は，一辺 0.3m で，カメラと立方体の距離は約 0.8m である．波長分離プリズムによって，可視光と 765nm 及び 850nm の帯域間のクロストークが全くないことが分かる．



(a) (b)

(c) (d)

図 4.11: 立方体の復元結果．(a) と (b) は入力画像の曲線の画素を点として復元した結果．(c) と (d) はテクスチャ付き 3 次元形状．

立方体の形状計測結果を図 4.11 で示す．(a) と (b) は入力画像から検出された曲線の画素を点として復元した結果である．交点を補間してからメッシュモデルを作成し，テクスチャを貼り付けた結果が (c) である．立方体の 2 面を平面フィッティングすることで，形状の精度を評価する．平面フィッティングによる二乗平均平方根誤差は 0.48mm である．また，2 面間の角度は 84.8 度であった (真値は 90.0 度である)．本論文では，バンドル調整のみで校正するため，内部パラメータと外部パラメータを同時に計算する．そのことが角度誤差の主な原因と考えられる．今後の研究では，角度誤差を軽減するために内部パラメータを個別に校正することを考える．

4.5.2 静止物体の計測

次に，他のテクスチャ付きの 3 次元モデルを計測した結果を示す．図 4.12 は頭部モデルと熊のぬいぐるみにおけるテクスチャマッピングされた 3 次元形状復元結果である．図はそれ

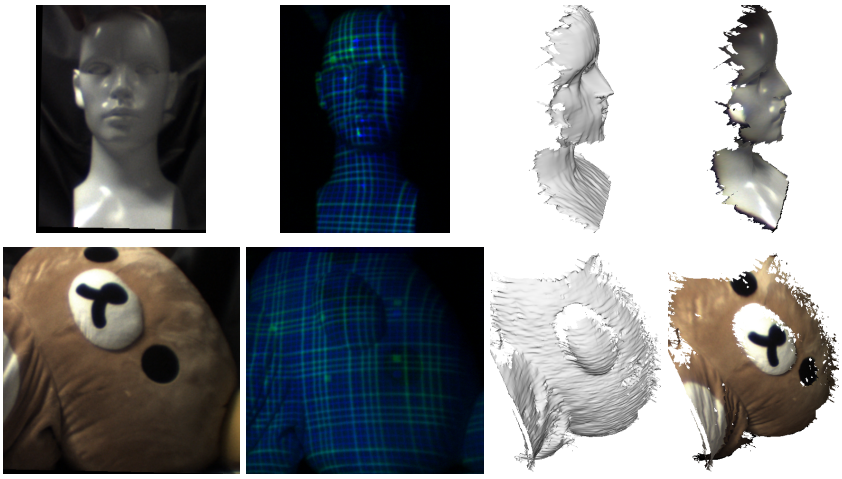


図 4.12: 頭部モデル (上) とクマのぬいぐるみ (下) のテクスチャ付き 3 次元形状結果 1 列目からそれぞれ，可視光，近赤外光，テクスチャ無しの形状，テクスチャ付きの形状の図を示す．

ぞれ可視光の画像，近赤外光の画像，テクスチャなしの形状，テクスチャ付きの 3 次元形状を表す．提案手法は，グリッドパターンを用いた光切断法に基づいているため，ワンショットスキャンを使ってうまく滑らかな表面を復元できる．表面の起伏は，パターンの補間により副次的に引き起こされたアーチファクトであるため，今後の研究で解決するべき問題である．

4.5.3 動物体の計測

最後に，動物体のテクスチャ付き形状を計測した．波打つ布の入力画像と計測結果を図 4.13 に示す．画像は 30fps で撮影した．一行目は，各フレームでの可視光によるテクスチャ画像である．二行目では，近赤外光の画像を示す．三行目は，テクスチャ無しの形状復元結果を表わし，四行目は，テクスチャ付きの形状復元結果である．このように，提案するシステムでは動物体テクスチャ付きの形状を計測することに成功した．近赤外光を反射するような物体であれば，結果に示すように対象が黒い物体であっても形状を計測することが可能である．

4.6 まとめ

本章では，ワンショット形状計測に基づいた，テクスチャ付きの 3 次元形状を計測するためのプロジェクタ・カメラシステムを提案した．提案手法では，形状とテクスチャを同時に取得するため，動物体のテクスチャ付きの形状を計測できる．同時に形状とテクスチャを

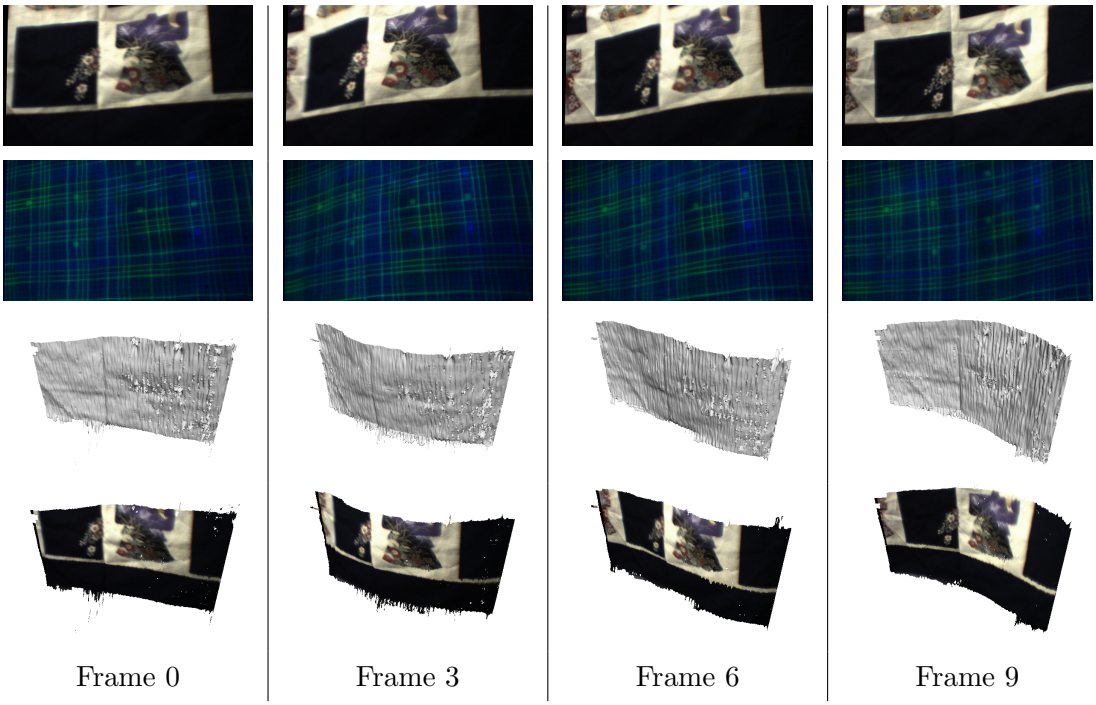


図 4.13: 波打つ布のテクスチャ付き 3 次元形状結果．一行目は各フレームでの可視光によるテクスチャ画像，二行目は近赤外光の画像，三行目はテクスチャ無しの形状復元結果，四行目はテクスチャ付きの形状復元結果を示す．

計測するために，近赤外構造化光プロジェクタとマルチバンドカメラを開発した．マルチバンドカメラは同じ視点から可視光と近赤外光を撮影できるので，3 次元形状復元の形状誤差に影響を受けることなく，テクスチャマッピングが可能となる．提案したプロジェクタは，2 種類の近赤外の波長を用いてコード化された構造化光を投影できる．パターンはお互いに垂直な単純なラインのみで構成されることから，パターンは複数のレンズを持つプロジェクタのシステムで実現できるため，プリズムを必要とせず，観測する光の強度の効率化をもたらした．さらに，ワンショット 3 次元形状復元の固定パターンを用いることで，プロジェクタ・カメラシステムの効率的な校正方法を提案した．提案した校正方法では，若干手作業が必要となるが，これによりシステムを簡素化が可能である．実験では，提案したシステムの精度を評価し，動物体のテクスチャ付き 3 次元形状が計測できることを示した．しかし，本手法には複数波長を用いることにより，デバイスの複雑化を招いたという問題がある．そこで次章では，形状計測に用いる波長を 1 波長に限定することより，本システムにおいてデバイスの簡略化を可能とし，可視光領域においては対象のテクスチャに影響されにくい安定した形状計測について述べる．

第5章
波線ワンショット形状計測法

第2,3章では，2波長のパターンによる形状計測手法について述べた．しかしこれらの手法では，2波長を用いることにより形状計測の不安定化やデバイスの複雑化の問題があった．そこで本章では，単色パターンによる動物体の3次元形状計測システムを提案する．提案手法はこれまでと同様にプロジェクタ・カメラ系を利用し，投影された静的パターンによって単一画像からの復元を行う．これにより，高フレームレートでの動物体計測が可能である．提案手法の目標は，(1) 単色パターンによるワンショット3次元計測の実現，(2) サブピクセル精度の対応点推定による高精度計測である．これらの目標を実現するために，以下の手法を提案する．すなわち，(1) 正弦波グリッドの交点位置における位相ずれを特徴量とした対応点探索 (2) プロジェクタの投影パターンとカメラ画像とのグリッドベースドステレオ法による正確かつ一意的な対応推定，(3) サブピクセル単位の補間および最適化による密な形状計測，および (4) プロジェクタとカメラの位置が既知である場合における形状計測するために最適なパターンの選択である．実験により，提案手法が上記目標を実現していることを示す．

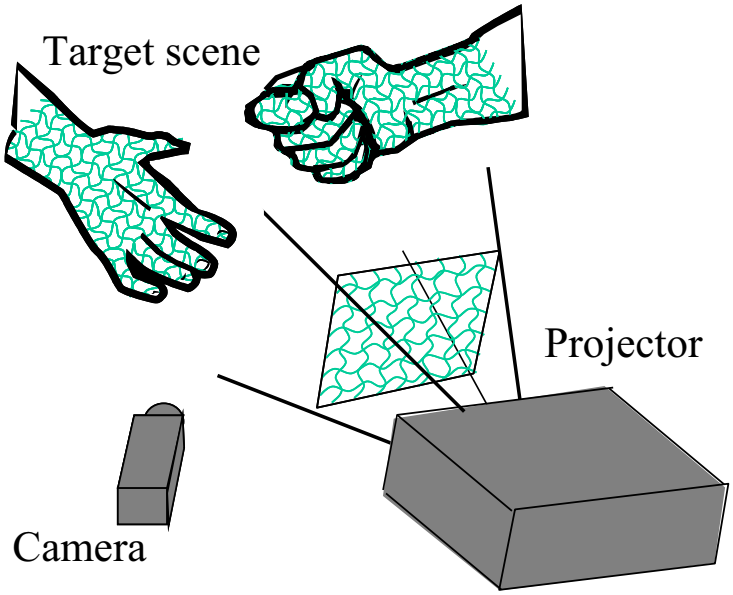
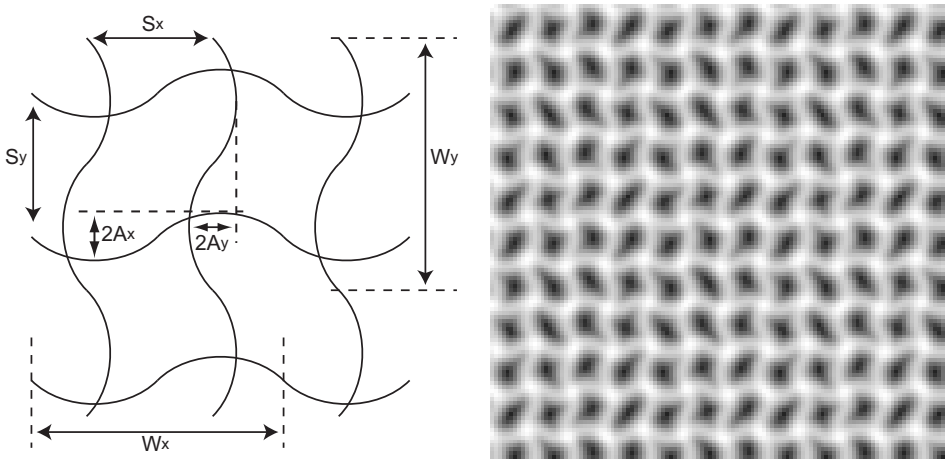


図 5.1: スキャンシステム: 複数の波線が投影され，交点が検出され復元に利用される．

5.1 手法の概要

提案手法のシステムは，プロジェクタとカメラの一台ずつからなる (図 5.1)．プロジェクタは図 5.2(b) に示す静的パターンを投影する．このパターンは，単色のグレイスケールで，正弦波形状の縦横の曲線をグリッド状に配置し，ピーク検出の安定化のためにガウシアンフィルタ（論文中では標準偏差 1.5 ピクセル）をかけたものである．(詳細については 5.2 章で説明する．) パターンは静的であるため，撮影に同期は必要ない．そのため，非常に高いフレームレートでの計測が可能である．

提案手法による復元アルゴリズムの概要を以下に示す．まず撮影した画像から線検出を行う．これは佐川らによって提案された手法 [23] を用いており，Belief propagation(BP) による最適化により，単色のグリッド状の線を，縦と横に安定して別々に検出することができる．検出された縦横の線から交点を算出し，交点をノードとしたグラフを作る．次に各ノードに対応するエピポーラ線の位置をプロジェクタパターン上で計算し，そのライン上にグリッドの交点がある場合，これを対応候補とする．この時，通常は複数の対応候補が見つかるので，BP を利用して各点における対応候補から最適な組み合わせを求める．このままでは復元結果は疎であるので，最後に，各画素での奥行きを，補間とパターンと観測画像の画素単位のマッチングを利用して求めることで，密な 3 次元形状を得る．この復元アルゴリズムをグリッドベースステレオと呼ぶことにする．



(a) (b)

図 5.2: (a) 波線グリッドのパラメータ．S_x,S_y は隣接する波線の間隔，W_x,W_y は波線の波長，A_x,A_y は波の振幅である．(それぞれ縦，横線に対応する)．(b) 波線グリッドの例．

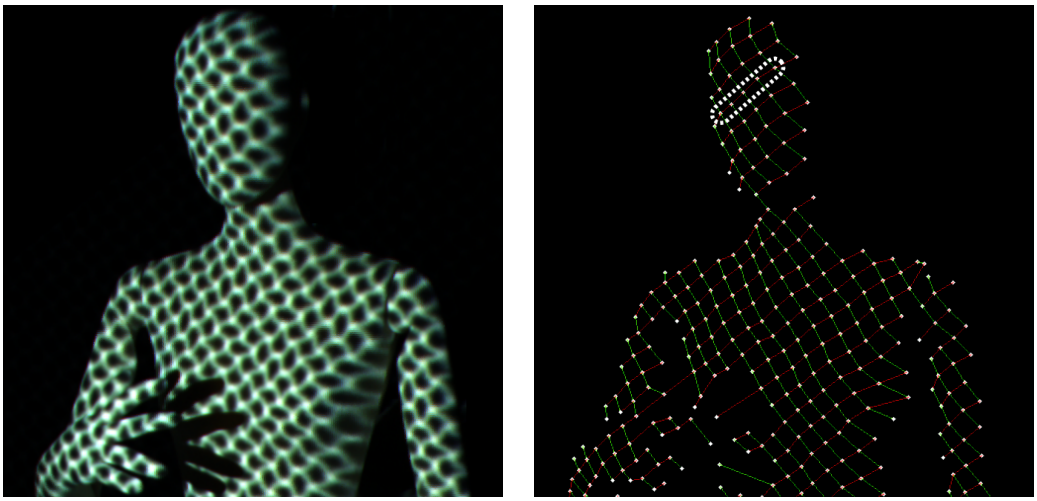
5.2 単色波線グリッドによる暗黙的符号化

プロジェクタとカメラは幾何的には同じ枠組みで考えることができる．本論文では，プロジェクタ画像面から投影するパターンはプロジェクタ画像，カメラ画像面で撮像される画像をカメラ画像と呼ぶことにする．

空間符号化によって，カメラ画像とプロジェクタ画像間で一意な対応付けを得るために，従来法では大きな窓サイズを持つ複雑なパターンが必要であった．さらに，精度の向上には広い基線長が望ましいが，観測されるパターンは大きく歪むため，現実的には復号が困難になる．したがって，検出と復号が簡単な，単純でありながら一意性の高いパターンが望ましい．

本論文では，画像処理によって一意に対応が決まるパターンではなく，対応の優先順位に関する情報を与えるパターンを用いる．具体的には，縦，横の波線からなるグリッドパターンを用いる．波線パターンは単純なパターンであるため，画像中での曲線として検出しやすく，輝度値のピークを計算することにより，その位置をサブピクセル精度で得ることができる．

波線として周期的な正弦波パターンを用いるが，波線グリッドは対応点検出に有効な情報を持つ．提案手法では縦，横の波線の交点を特徴点として用いる．交点の配置は，波線の間隔と波長で決定される．一定の間隔と波長を持つ波線を用いるが，下記に述べるように，縦波線の間隔が横波線の波長の整数倍でない場合，交点位置の位相がずれが生じる．そのため，局所的なパターンが周囲の交点と相違することになり，対応付けのための特徴量として用い



(a) (b)

図 5.3: 縦横の波線検出：(a) 入力画像，(b) 検出されたグリッド．破線の円内部の点は，同一の横線 ID を持つ．

ることができる．

交点周囲の局所的パターンは，投影パターン全体の中で一意性を持つものではない．図 5.2(a) において，S_x，S_y は隣接する波線の間隔，W_x，W_y は波長とすると，$N_x = \mathrm{lcm}(S_x, W_x)/S_x, N_y = \mathrm{lcm}(S_y, W_y)/S_y$ を用いて，同一パターンが，横，縦軸に沿ってそれぞれ N_x，N_y 本の波線ごとに起こる．ここで $\mathrm{lcm}(a, b)$ は a と b の最小公倍数であり，添字 x，y はそれぞれ横，縦軸に沿った値を表すものとする．しかしながら，局所パターンは，各サイクルにおいて識別可能なパターンである．図 5.2(b) は，$S_x = 10, S_y = 11, W_x = W_y = 14, A_x = A_y = 1$ (単位は画素) からなるパターンの例である．この例では，1 周期は縦線 7 本，横線 14 本となる．よって，$98(= 7 \times 14)$ 種類の交点が 1 周期で構成される矩形の中に存在する．

ステレオマッチングでは，対応点候補はエピポーラ線上の点に限られている．あるプロジェクタ画像の交点とエピポーラ線が適当な距離以内に位置している場合，そのプロジェクタ画像の交点は対応点候補の 1 つとして選ばれる．候補の数は，カメラ画像の交点位置に依存する．対応点候補は，プロジェクタ画像において疎に分布するため，画素単位で候補点を探索する通常のステレオ視と比べて，対応候補の数は劇的に少なくなる．

5.3 グリッド上でのプロジェクタ・カメラ系ステレオ法

対応点の最適な組み合わせを見つけるために，局所的なマッチングと正規化を利用した新しい最適化手法を提案する．提案手法では，波状パターンのグリッドを利用し，図 5.3(b) に示すような線検出を行う．カメラ画像上での波状グリッドにおける縦横線の交点を以後格子

点と呼ぶ．もし複数の格子点がグリッド線で接続されていれば，それらはプロジェクタ画像上で同一の波線の上にある．このことは，対応点を決定する際の正規化に利用される．格子点の接続性は線検出によって得る．ただし，線検出による接続性の判定は誤る場合がある．特に，形状の不連続な境界付近では，このような誤りが多くなる．このため，我々は，各格子点に対応点を割り当てるために，グリッド上に定義したエネルギーの最小化を利用する．

5.3.1 エネルギー最小化のためのデータ項

まず，我々はすべての対応候補についてマッチングコストを計算し，これをエネルギー最小化におけるデータ項として利用する．コストは，撮影された画像と，プロジェクタ画像 (パターン画像) での交点の相関として計算する．本論文では，相関を計算する手法として，先行研究 [81] では，一般的な画像マッチング手法である輝度差の二乗和（SSD）を元にマッチング手法を提案したが，本論文ではグリッドに特化したマッチング手法である線の距離の手法を提案する．その 2 つの方法について以下に述べる．

5.3.2 SSD によるコスト

まず，交点同士の相関を計算する手法として交点周辺の四角形の領域の SSD を用いる．しかし，検出された格子点位置には誤差が存在し，カメラで観測された画像は対象物体の形状によって歪むので，四角形の領域に対する単純な SSD はデータ項には適さない．そこで我々は，対象物体における格子点において，その周辺の領域を局所的に平面であると仮定し，格子点の接平面で近似したパッチを考える．これにより，高精度なマッチングコストを計算し，対応点をサブピクセル精度で計算する．

図 5.4 に示すように，対象表面における格子点の周辺形状が局所的に平面であると仮定すると，その平面は $ax + by + cz + 1 = 0$ と表される．ただし，a, b, c は平面パラメータである．このパラメータを画像のひずみを考慮して SSD 最小化により求める．そのアルゴリズムを以下に示す：

1. カメラ画像における格子点周辺の四角パッチを 3 次元接平面に投影し，プロジェクタ画像に再投影する．
2. 再投影されたパッチとプロジェクタ画像との輝度値 SSD を計算する．
3. a, b, c を変数として SSD を最小化する．
4. 上記のステップを数回繰り返す．

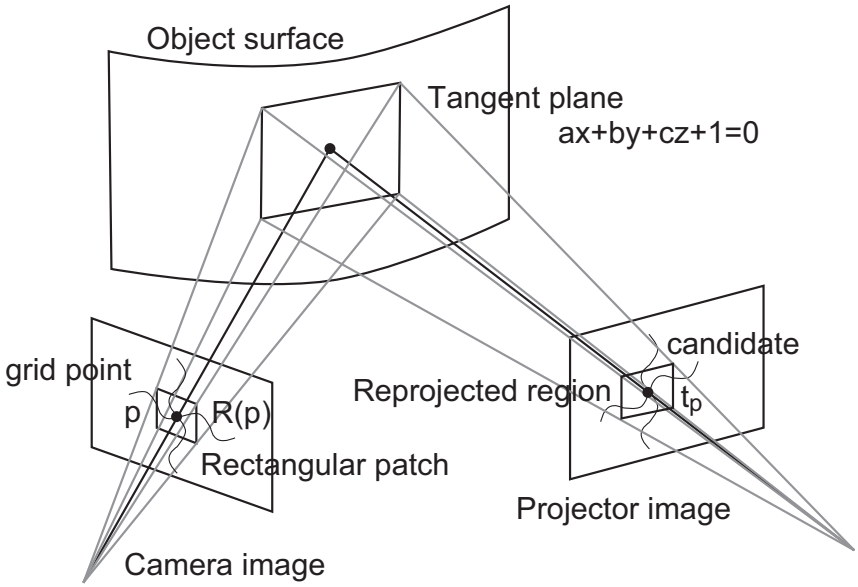


図 5.4: 格子点 p 周囲の四角パッチ $R(p)$ がプロジェクタ画像面に再投影される．t_p は p の対応候補である．

a, b, c の初期値は，接平面が，視差によって計算される格子点の 3 次元位置を含み，カメラの画像面に対して平行になるように設定され，SSD は以下の式で表される．

$$SSD_{a,b,c}(p) = \sum_{p' \in R(p)} (I_c(p') - I_p(H_{a,b,c}(p'))^2 \tag{5.1}$$

ただし，p は格子点，$R(p)$ は p 周辺の四角パッチであり，$H_{a,b,c}(p')$ は p' をプロジェクタ画像面に再投影した場合の変形を表す．$I_c(\cdot)$ と $I_p(\cdot)$ はそれぞれカメラ画像とプロジェクタ画像における輝度値を表す．

式 (5.1) は a, b, c に関して非線形な式となるため，テイラー展開によって 2 次式に近似し，その最小値を取る a, b, c の値を計算する．これを近似解として反復計算し，最終的な a, b, c の値を得る．

5.3.3 線の距離によるコスト

一方，2 つ目の手法では，SSD のように輝度ではなく，線検出によって求められた投影された線の位置を用い，線の位置情報を特徴としてマッチングする手法を提案する．線の位置に関しても SSD の場合と同様にカメラで観測された画像は対象物体の形状によって歪むので，対象物体における格子点において，その周辺の領域を局所的に平面であると仮定し，格子点の接平面で近似したパッチを考える．カメラとプロジェクタの縦線同士の位置のずれと横線同士の位置ずれから線の位置の差分を以下の式で示す．

$$LD_{a,b,c}(p) = \sum_{p_v \in L_v} (X_P(y_{p'_v}) - x_{p'_v})^2 + \sum_{p_h \in L_h} (Y_P(x_{p'_h}) - y_{p'_h})^2 \tag{5.2}$$

ここで格子点 p 周辺の縦線の一点を p_v，縦線の点の集合を L_v，横線の一点を p_h，横線の点の集合を L_h とする．$p'_v = (x_{p'_v}, y_{p'_v})$ は p_v をホモグラフィ $H_{a,b,c}$ によって変換した時のプロジェクタ座標であり，$p'_h = (x_{p'_h}, y_{p'_h})$ は p_h をホモグラフィ $H_{a,b,c}$ によって変換した時のプロジェクタ座標である．$X_P(y)$ は，プロジェクタ画像中で縦座標 y に対応する候補点周辺の縦線の横座標を表し，$Y_P(x)$ は，プロジェクタ画像中で横座標 x に対応する候補点周辺の横線の縦座標を表す．また，a, b, c は 5.3.2 節と同様に，対象表面における格子点の周辺形状が局所的に平面であると仮定した平面 $ax+by+cz+1=0$ の平面パラメータである．

5.3.4 グリッド上でのエネルギー最小化による対応推定

ここで，グリッドは，格子点から成るノード $p \in V$ と，格子点の接続を表すエッジ $(p, q) \in U$ から成る．ただし p,q は格子点であり，V は格子点の集合であり，U はグリッドグラフのエッジ集合である．格子点 p は，対応点の候補 $t_p \in T_p$ を持つ．ここで T_p は格子点 p の対応点候補の集合である．対応の集合をパラメータとして，ステレオマッチングのエネルギーを以下のように定義する：

$$E(T) = \sum_{p \in V} D_p(t_p) + \sum_{(p,q) \in U} W_{pq}(t_p, t_q) \tag{5.3}$$

ただし $T = \{t_p | p \in V\}$ であり，p の対応点を t_p に割り当てた場合の対応点の集合である．$E(T)$ はその対応付けの場合のエネルギーを表す．p に t_p を対応付けした場合に，$D_p(t_p)$ は 5.3.2 節，及び 5.3.3 節で示したコスト計算法で得られるデータ項である．$W_{pq}(t_p, t_q)$ は t_p と t_q を隣り合う格子点に割り当てるための正規化項である．

上記データ項は，前節で述べた方法で計算された SSD もしくは線の位置の差分の値を取る．正規化項は以下の式で定義される．

$$W_{pq}(t_p, t_q) = \begin{cases} 0 & t_p \text{ と } t_q \text{ が同一波線上} \\ \lambda & \text{それ以外の場合} \end{cases} \tag{5.4}$$

ただし λ はユーザが決める定数である．本論文では経験的に λ =0.1 とした．定義されたエネルギーは，BP 法 [76] によって最小化される．

エネルギー最小化を利用する利点として，上記の隣接による正規化項が,「ソフトな条件」となる点が挙げられる．実際のデータでは，線検出の誤りなどにより，誤った接続が生成される場合があるので，上記の点は重要である．先行研究 [23] では，誤った接続を 3 次元再構成の前の線検出段階で排除する必要があるが，提案手法では，誤った接続の除去と 3 次元再構成は同時に実行されるため，線検出時の誤りに依存しない．

5.4 格子点間の補間による密な形状生成

グリッドベースステレオ法により得られた疎な格子点に対応に基づき，次のステップとして，全ての画素の情報を利用して密な対応を求める．まず，格子点間を高密度に再標本化して補間し，奥行きの初期値を求める．次に，これらの画素の奥行きを変数として，カメラ画像とプロジェクタ画像の輝度の差を最小化する．既に先行研究 [5] で高密度な再構成を提案しているが，これは検出されたグリッド線間の補間に基づくものであった．これに対し提案手法では，photo-consistency に基づく最適化によって奥行き推定を行う．

カメラ中心から画素 x へ向かう方向ベクトルを $(u, v, 1)$ と表すと，その画素の奥行き d_x は

$$d_x = \frac{-1}{a_x u + b_x v + c_x}, \tag{5.5}$$

で計算される．ここで，a_x, b_x, c_x は 画素ごとに計算される接平面パラメータである．各画素における a_x は格子点 p の値 a_p を用いて，以下のように補間される：

$$a_x = \frac{\sum_p G(|p-x|)a_p}{\sum_p G(|p-x|)} \tag{5.6}$$

ただし，p は格子点，$G(\cdot)$ はガウス関数，$|p-x|$ は p と x の距離である．b_x と c_x は同様に加重平均で求められる．

最適化において，全ての画素の奥行きを，独立変数として扱い，全画素の奥行きを推定することは可能である．しかし，投影されるパターンが画像解像度に比べて疎であるため，本論文では，画素を縦横について，例えば 3 画素ごとに再標本化し，これらの標本画素について奥行きを推定する (サブピクセル単位の奥行き推定)．

まず，図 5.5 に示すように，標本画素を頂点として，三角メッシュを作成する．標本画素以外の画素における奥行きは線形補間される．繰り返し計算による最適化のために，奥行きを，d_x の微小変位 Δd_x を変数として近似する．図 5.5 における画素 x の奥行きは以下のように表される．

$$d_x + \Delta d_x = \begin{bmatrix} 1 - w_{x_2} - w_{x_3} \\ w_{x_2} \\ w_{x_3} \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} d_{x_1} + \Delta d_{x_1} \\ d_{x_2} + \Delta d_{x_2} \\ d_{x_3} + \Delta d_{x_3} \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

ただし，w_{x_2} と w_{x_3} は線形補間の重みである．

ここで，$D + \Delta D$ を，$d_x + \Delta d_x$ を全ての標本画素について集めたベクトルとする．プロジェクタ画像 (パターン) に対する再投影誤差は，標本画素ばかりでなく，全ての画素につ

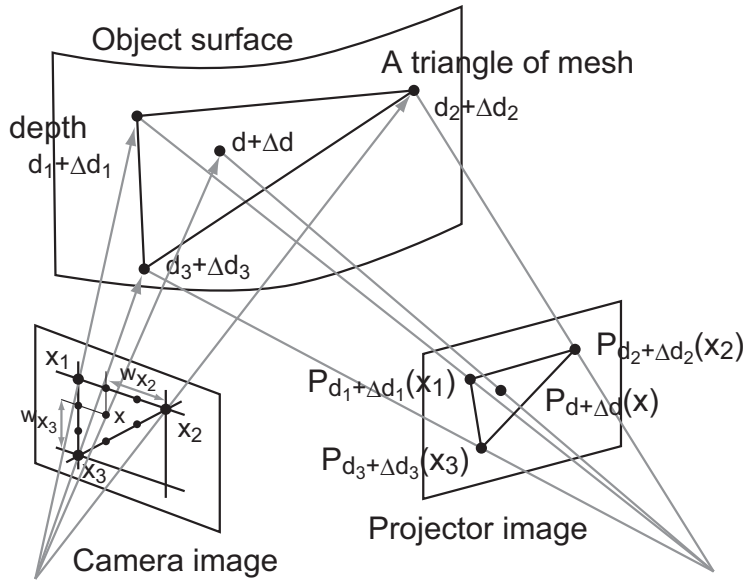


図 5.5: x_1, x_2, x_3 は再標本化された標本画素である．全画素の奥行きは標本画素の補間によって求められる．各画素は奥行き情報を利用してプロジェクタ画像面に再投影される．再投影は，$P_{D+\Delta D}(x)$ で表される．各画素の再投影には $D+\Delta D$ の部分ベクトルが利用される．

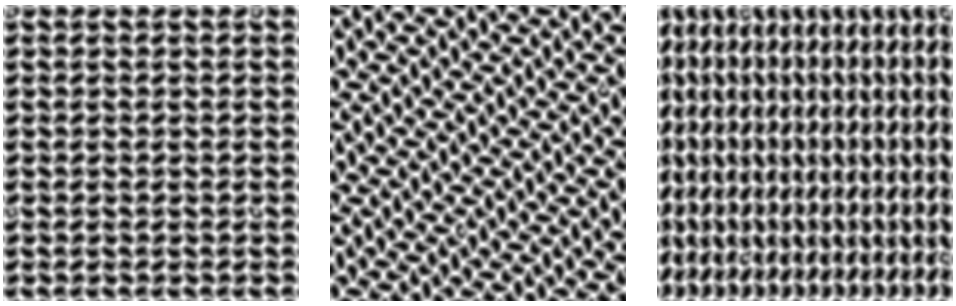
いて以下の式で求められる．

$$E(\Delta D) = \sum_{x} (I_c(x) - I_p(P_{D+\Delta D}(x))^2 + \gamma \sum_{x,x'} (\Delta d_x - \Delta d_{x'})^2. \tag{5.8}$$

ここで $P_{D+\Delta D}(x)$ はプロジェクタ画像への再投影位置を表す．各画素の再投影には，$D+\Delta D$ の一部が利用される．x と x' は隣接する頂点である．γ は利用者が決める正規化パラメータである．パラメータ ΔD は上記誤差を最小化するように決定される．再投影と最小化を，解の収束まで交互に繰り返すことで，D を決定する．

5.5 最適なパターン選択のための評価手法

本研究で用いる波線パターンは縦線と横線の線同士の間隔の変えて交点位置での波長をずらすだけの単純な構造であるため，エピポーラ線上が通る点を候補点としてカメラ・プロジェクタの配置により対応点の候補を減らしても周期的な同一の特徴や非常に似た特徴が選ばれ，誤対応が生じる可能性がある．そこで，本節では装置の配置ではなく投影するパターンを変えることにより対応点探索の安定性向上を測ることを目指す．しかし，これまでの先行研究 [81] においてもどのようなパターンを用いれば誤対応が発生しにくく，安定した形状



0 ° 45 ° 90 °

図 5.6: 0 °のパターンを基に回転した波線パターン．

計測が可能であるかは検証されていない．そこで本研究では，エピポーラ線上から選ばれる候補点に誤対応を引き起こす原因となる点が含まれないようなパターンを選択する手法を提案する．

今回提案する手法では，図 5.6 のようにパターンそのものは変えずに，プロジェクタ画像中で回転させたものの中から最適なパターンを選ぶことを考える．波線パターンの候補点を変更するためのパラメータとして線の間隔や波の周期，位相なども考えられるが，候補点がエピポーラ線上から選ばれることから回転によるパターンの変化が候補点に密接に影響していると考えたため，回転パターンを用いることにする．

波線グリッド形状計測では，格子点に対応するエピポーラ線上の交点を候補点とする．エピポーラ線は装置の配置から決まるため，図 5.7 のような交点が他のどの交点と共に候補点となるかを予め求めることができる．さらに交点間の接続は既知であるため，形状計測と同様に交点の局所特徴と隣接点からマッチングコストを計算し，エピポーラ線上の交点の判別し易さを推定することができる．

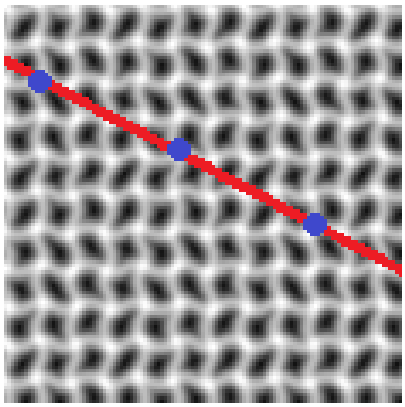
式 (5.3) と同様に，グリッドは，プロジェクタ画像の交点から成るノード $p' \in V'$ と，交点の接続を表すエッジ $(p', q') \in U'$ から成るグラフを考える．ただし p',q' はプロジェクタ画像の交点，V' はその交点の集合であり，U' はプロジェクタ画像のグリッドグラフのエッジ集合である．交点 p' は，交点 p' を通るエピポーラ線上の対応点の候補 $t_{p'} \in T_{p'}$ を持つ．ここで $T_{p'}$ は交点 p' の対応点候補の集合である．プロジェクタ画像の交点の対応点をその交点自身とした場合，以下のように評価値を定義する．

$$S(\theta, i) = \sum_{p' \in V'} (\min_{t_{p'} \neq p'} Q(t_{p'}) - Q(p')) \tag{5.9}$$

$$Q(a) = D_{p'}(a) + \sum_{q'} W_{p'q'}(a, t_{q'})$$

$D_{p'}(t_{p'})$ は p' の対応点を t'_p に割り当てる場合のデータ項である．$W_{p'q'}(t_{p'}, t_{q'})$ は $t_{p'}$ と $t_{q'}$

画像処理で検出された交点



交点に対応する候補点

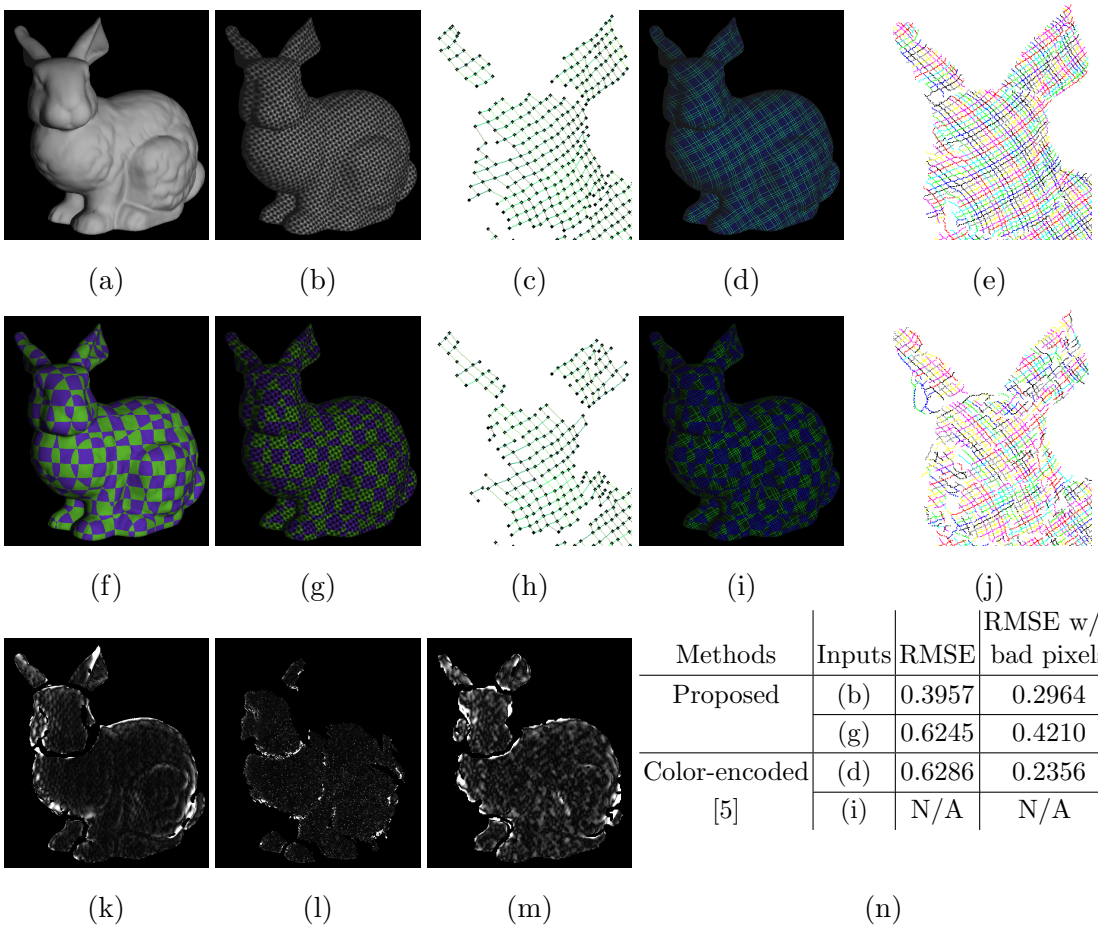
図 5.7: 候補点選択.

を隣り合う格子点に割り当てるための正規化項である．θ は回転パターンの回転角であり，i は BP の繰り返し回数である．この評価値では，BP によって計算される正規化項に基づく隣りあう格子点の対応を含むエネルギーに関して正解の対応と，誤対応の中で最もエネルギーが小さいものを比較する．誤対応の発生しにくいパターンでは，その差が大きくなる．評価値を BP の繰り返し回数毎に求めることにより，交点の接続数に対する誤対応の発生しにくさを評価することができる．

最適なパターンを選択するためには，上記評価値から 1 つのパターンを選択するための単一の基準が必要となる．しかし評価値は BP の回数毎に値を算出しているため，そのままの値では 1 つに決定する基準にはならない．そこで以下のような BP10 回までの繰り返し回数での評価値をまとめたパターン選択基準を定義する．

$$P(\theta) = \sum_{i=0}^{10} \frac{S(\theta, i)}{i+1}. \tag{5.10}$$

評価値で BP 繰り返しの繰り返し回数が少ない時は交点に接続が少なくても正しくマッチングできることを示しているため，BP 繰り返しによる計算時間を低減できることや，小領域に復元も安定的に行えることから選択基準は BP の繰り返し回数を分母にして和をとることによりそのことが高く評価されるように設定した．パターンの回転角を 180 度の範囲で 1 度毎に計算し，全探索した中から評価が最も良くなる回転角を最適なパターンとして選択した．



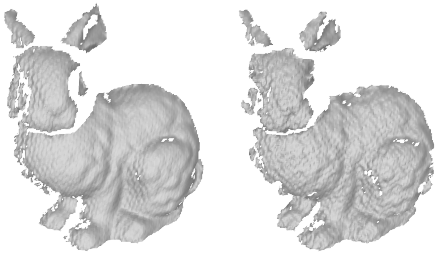
Methods	Inputs	RMSE	RMSE w/o bad pixels
Proposed	(b)	0.3957	0.2964
	(g)	0.6245	0.4210
Color-encoded [5]	(d)	0.6286	0.2356
	(i)	N/A	N/A

図 5.8: 提案手法と色符号化による方法 [5] の比較.

5.6 実験

5.6.1 シミュレーションデータによる評価

我々は，提案手法をシミュレーションデータによって評価し，色を 2 色用いる手法 [5] と比較した，結果を図 5.8 に示す．実験では，Stanford 大学の形状データ集の bunny データを目標形状として利用した．目標形状には，上列 (a) ではテクスチャが無く，中列 (f) では格子模様がマッピングされている．提案手法への入力画像を，レイトレーシングソフトで生成したものを (b)(g) に示す．図 5.8(c),(h) は，頭部における，提案手法のグリッド検出結果を示す．頭部，耳，胴体の境界において，グリッドの接続性が誤って検出された所があるが，これらはステレオマッチングの処理において正しく切断されている．図 5.8(d)(i) は 2 色を利用する手法 [5] の入力画像であり，2 色の線を 3 本用いて 8 周期の局所的 ID 情報が符号化されている．この手法は，目標物体にテクスチャが無い場合には (e) に示すように成功するが，(j) に示すようにテクスチャがある場合には，パターンの色情報が乱され，ID 情報の復



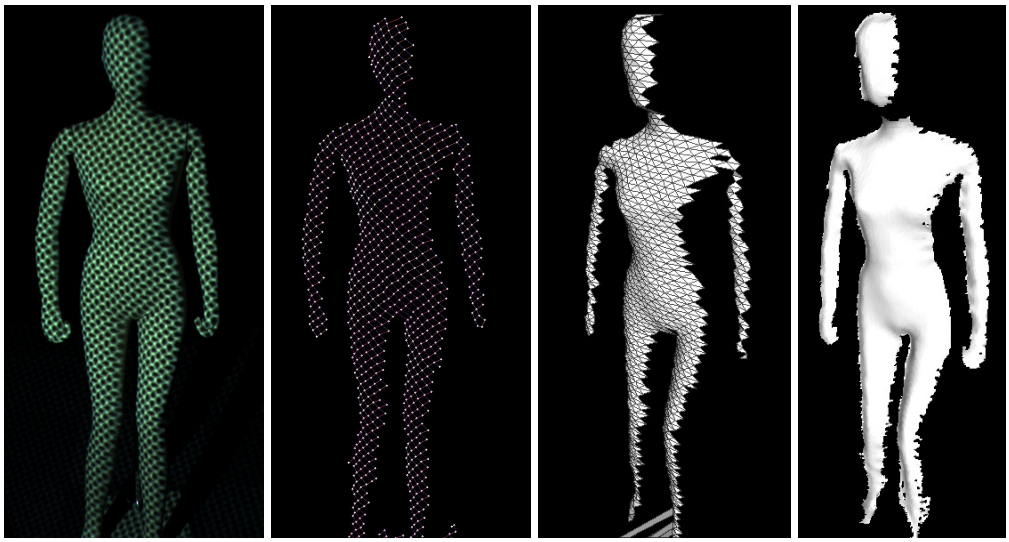
(a) (b)

図 5.9: グリッドベースステレオで再構成されたメッシュと補間によって高精度化されたメッシュ．図 5.8(b) は (a) の入力画像であり，図 5.8(g) は (b) の入力画像である．

号化と 3 次元復元に失敗した．

上記実験の定量的な評価を行うために，(b),(d),(g) の対応の誤差を計算した．カメラ画像の各画素に対応するプロジェクタ画像の座標は既知であるので，復元結果において推定された対応点と正解の対応点との誤差を画像面上での距離で算出した．図 5.8(k), (l), (m) に (b), (d), (g) の誤差をそれぞれ画像化したものであり，明るい画素は誤差が大きいことを示す．同図 (n) に示された表に，画素を単位とした二乗誤差の平方根 (RMSE) を示す．RMSE の値は，復元された全ての対応点について計算されたものと 1 画素を超える外れ値を除いた対応点について計算されたものである．この表から，テクスチャが無い場合，全ての画素についての RMSE では，提案手法が色を利用する手法 [5] よりも良いのに対し，外れ値を除いた RMSE では色を利用する手法 [5] が提案手法よりも良かったことがわかる．この理由は以下のように考えられる．色を利用する手法では，周期的に現れる線パターンの局所 ID(位相) から対応を求めるので，局所 ID 情報が正確に計算されれば精度が高い．しかし，局所 ID の復号に失敗すると，大きな誤差が生じる．このような誤差は図 5.8(l) のごま塩状の雑音として観測される．また，格子模様がマッピングされている場合，色を利用する手法では復元そのものが失敗したのに対し，提案手法では誤差が少し大きくなったものの形状復元に成功した．したがって，提案手法は，特にテクスチャがある場合，色を利用した方法よりも頑健で精度が高いと言える．

図 5.9 に，提案手法によって復元されたポリゴンメッシュを示す．入力画像は図 5.8(b),(g) である．図 5.9 の形状は補間による密な復元の結果である．本実験の条件ではカメラ，プロジェクタ間のベースラインが大きく，例えば 100 画素程度の視差が存在するが，ステレオ復元では探索範囲を指定することなく正しく対応が得られた．さらに，補間と最適化により密な対応点を得ることができた．



(a) (b) (c) (d)

図 5.10: 提案された波パターンによる 3 次元再構成 : (a) 入力画像，(b) ステレオマッチング後の検出グリッド ，(c) グリッドの再構成結果，(d) 補間後の再構成結果.

5.6.2 静止物体に対する形状計測実験

実験では，1600 × 1200 画素のカメラと 1024 × 768 画素のプロジェクタを使用した．画像系列は 30FPS で撮影され，Intel Core i7 2.93GHz と NVIDIA GeForce 580GTX を備えた PC を利用した．5.3 章および 5.4 章で述べたアルゴリズムは CUDA を用いて実装した．キャリブレーションについては，計測に用いる物と同一のパターン投影を利用したカメラ・プロジェクタ間の対応付けにより Structure from motion [80] の手法を用いてカメラ・プロジェクタのレンズ歪みと相対位置のパラメータを推定した．

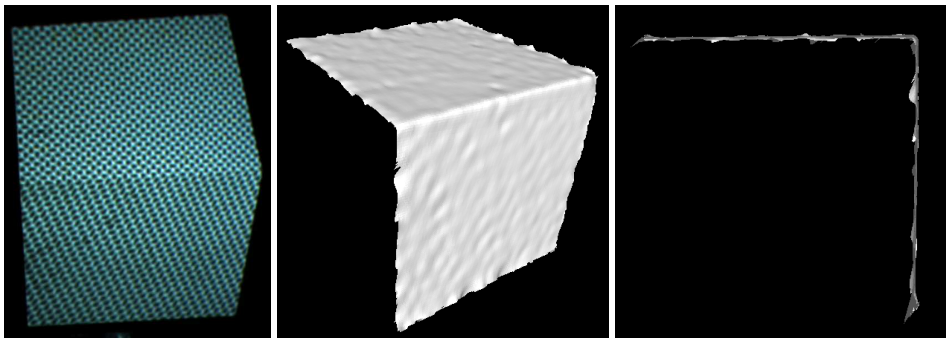
まず，提案された波状パターンの効果を示すために，波状パターンと直線パターンを比較し，波状パターンを用いた場合の形状推定精度が直線パターンよりも高精度であり，特にテクスチャがある場合には顕著な差があることを確認した [82].

提案された波状パターン (図 5.2(b)) で復元された 3 次元再構成結果を図 5.10 に示す．図 5.10(a) に入力画像を，(b) に，5.3 章のプロジェクタ・カメラ系ステレオ法による復元結果を示す．物体の不連続部分 (マネキンの頭部と首の境界) におけるグリッド線は，ステレオ処理の過程において正しく切断された．図 5.10(c) に提案手法による 3 次元復元の結果を示す．

グリッド点の数は 943 であり，各グリッド点における対応点候補数の平均値は 41 であった．探索範囲は画像全体に設定したにも関わらず，グリッドパターンが画素数と比べて疎であることにより，計算コストは小さかった．さらに，5.4 章の補間手法により，図 5.10(d) に示すような密な形状が生成された．3 次元モデルの頂点数は 25,938 であった．最適化におけ

表 5.1: 本システムの計算時間

	ステレオ処理	補間処理	総計算時間
処理時間	0.22 秒	0.14 秒	0.61 秒



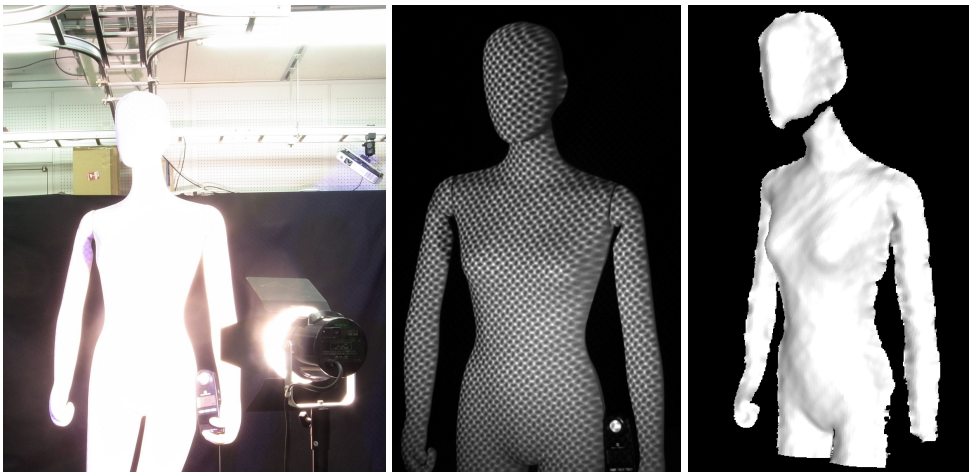
(a) (b) (c)

図 5.11: 立方体形状の再構成結果：(a) 入力画像，(b) 3 次元再構成結果，(c) 他方向から見た形状.

る繰り返し回数は 5 である．ここで，本システムの計算時間を表 5.1 に示す.

次に，図 5.11 に示すマッチングコストに線の距離を用いた立方体形状の計測により，提案手法の精度を評価した．立方体の大きさは一辺 0.2m であり，カメラからの距離は 1m であった．補間処理により密に復元された立方体の各面に平面を当てはめ，各平面からの誤差を RMSE で算出した．2 個の面の RMSE の平均値は 0.36mm であり，面の間の角度は 88.8 度 (正解は 90.0 度) であった．この誤差はカメラとプロジェクタとレンズ歪み，及び相対位置のキャリブレーションを同時に行う際に計測誤差が生じてしまったことが原因だと考えられる．同様の条件で Kinect による計測 [81] の場合，RMSE は 1.78mm であり，また，空間コード化法による計測 [81] との誤差は 0.60mm であることから，誤差は実用的な大きさに収まっていると考えられる.

単色の静的パターンの重要な利点として，パターンを照射するデバイス選択の幅が広がることが挙げられる．そこで，単一波長の光を投影するレーザプロジェクタを利用した復元実験を行った．投影される光のエネルギーが狭帯域に集中しているので，適当なバンドパスフィルタを用いることで，環境光の影響下においても，投影パターンを観測できる．図 5.12 に，実験結果を示す．(a) は実験環境であり，目標が外部光源から強く照らされていたことがわかる．しかし，(b) に示すように，バンドパスフィルタにより，照射されたパターンが明確にされ，(c) に示すように，3 次元復元を正しく行うことができた.



(a) (b) (c)

図 5.12: 環境光の影響下における再構成結果.

5.6.3 SSD と線の距離での比較実験

カメラ画像中の点とプロジェクタ画像中の点を対応付けるアルゴリズムとして，一般的なマッチングアルゴリズムである SSD とグリッドのマッチングに特化したアルゴリズムである線の距離を用いた場合の比較実験を行った（図 5.13）.

SSD と線の距離についてそれぞれ 9 pixel, 17 pixel, 25 pixel のパッチサイズで比較したところ，17 pixel の場合は両手法とも正解となる対応が得られている．一方，9 pixel, 25 pixel の場合には，SSD は誤対応が発生してしまい正しい形状が獲得できていないのに対して，線の距離は正しい形状を復元したことから，線の距離は SSD を用いる場合に比べてパッチサイズの変化にも頑強で，安定した手法であると考えられる.

25pixel において SSD 特徴量として復元し誤対応が発生した小指の 19 点のグリッドに対して，特徴量を SSD と線の距離とした場合の特徴量の値を図 5.14 に示す．SSD では正しい対応点と誤った対応点との特徴量の差がほとんど見られないが，線の距離を用いた場合には十分な差を得ることができた．これは，指先や投影範囲の端のような領域において，パッチサイズ内で線が検出が行われない部分が存在する場合，SSD ではその部分が大きな誤差として計算されてしまうが，線の距離では線が検出されない部分は除いて計算されるため，特徴量に十分な差が表れたと考えられる.

5.6.4 最適なパターン選択実験

5.5 章の評価値と選択基準に基づく実験を行った．各回転角の評価値を図 5.16 に示す．横軸は回転角，縦軸は評価値，各線分は BP の繰り返し回数での結果である．(5.10) 式を図 5.16

9 pixel　　17 pixel　　25 pixel

SSD

9 pixel　　17 pixel　　25 pixel

線の距離

図 5.13: 手の形状計測実験．上：SSD による復元結果．下：線の距離による復元結果．

に適用した選択基準を図 5.17 に示す．この選択基準のグラフにおいて最高値となる角度が 45 度であることから，今回の条件では 45 度の時が最適なパターンであると判断できる．

次に選択基準で最適としたパターンが実際の形状計測においても最適であるかを調べる．エピポーラ線上に正しい対応点と似た特徴を持つ候補点がある場合，格子点の接続数が十分にあるグリッドでは BP による周りの接続情報により正しい対応点を選び出すことができる．しかし，格子点の接続数が少ないグリッドしか持たない小領域の形状では BP で周りの接続情報により区別することが難しく誤対応が発生しやすくなる．そこで，格子点の接続数が少なくても最適なパターン選択により候補点中に似た候補点を除外し，正しく交点のマッチングが行い形状計測できているかを評価するために，図 5.15(a),(b) のような正方グリッドで分割されたパターンを平面に投影し，図 5.15(c) のように復元された点のうち形状計測で正しく復元できた割合を調べる実験を行った．この時，カメラとプロジェクタは図 5.15(c) のように配置され，その間の距離は 124.8mm, カメラから計測平面までの距離は 627.1mm である．

結果を図 5.18 に示す．横軸は回転角，縦軸は平面への復元率，各線は異なる正方グリッ

表 5.2: 最適パターンの選択基準と正方グリッドの正しい復元割合との相関係数

グリッドサイズ	ピアソンの積率相関係数
2×2 点	0.174
3×3 点	0.827
4×4 点	0.872
5×5 点	0.861
6×6 点	0.859
7×7 点	0.843

ドの大きさの結果である．0,90 度付近は，パターンとエピポーラ線が平行になる場合であり，これらの場合は，接続性の情報が有効でないため，提案手法がうまく働かない．それ以外に，いくつかの谷がグラフに存在する．これらは，似た特徴がエピポーラ線上に存在する場合であり，このような角度を避ける事が，最適パターン選択の目的である．図 5.17 においても同じ位置に谷があるため，選択基準が最適なパターンの予測に有効であると考えられる．また，図 5.15(c) の配置から，本手法はカメラと正対もしくはそれに近い対象に対して有効である．

図 5.17 に示した結果が，計測結果の予測に有効であることを調べるために，最適パターンの選択基準（図 5.17）と正方グリッドの復元割合（図 5.18）との相関係数を求めた（表 5.2）．相関係数にはピアソンの積率相関係数を各正方グリッドに対して求め，相関関係を調査した．また，実際に 4×4 の正方グリッドと最適パターンの選択基準がどれほど相関を持つのか調べるために散布図を図 5.19 に示す．散布図からも 2 つの値が相関を持っていることが分かる．接続が少ない 2×2 点のグリッドではあまり相関係数は高くないが，3×3 点以上においては十分に高い相関係数であることから今回の評価基準では 3×3 以上のグリッドにおいて最適なパターン選択のための基準として利用できると考えられる．また，この実験結果から提案手法には 3×3 点以上のグリッドの接続が必要であり，カメラ画像中で非常に細く撮影される物体に対しては安定した計測が困難であることが考えられる．

5.6.5 動物体に対する形状計測実験

最後に，運動する物体の計測結果を示す．図 5.20 と 図 5.21 は，手の開閉の運動と，パンチ動作中の人体の動きを計測したものである．提案手法はワンショット復元であるため，対象物体が高速に動いていても，フレームごとに独立して 3 次元復元を行うことができた．

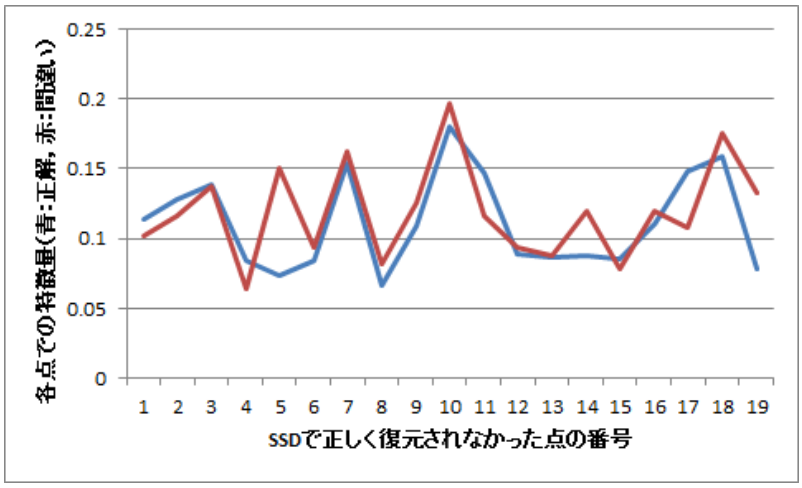
5.6.6　近赤外波線グリッドパターンによる形状計測

波線グリッドにより，計測に必要な波長が 1 波長だけとなるため，4 章の近赤外システムを大幅に簡易化できる．そこで図 5.22（左）の赤丸で囲った近赤外波線グリッドのレーザー投影機を作成した．これは，1 セットの光源・マスク・レンズで構成されており，図 4.5 のプロジェクタと比べると大幅な簡略化を実現している．この投光器と近赤外カメラを用いて図 5.22（右）のような環境で，1 波長の近赤外光によるテクスチャ付きワンショット形状計測を行った．このシステムでは，形状計測に近赤外光を使うことにより，テクスチャ計測のための可視光が分離できる．また，形状計測に単色パターンを用いることにより，プロジェクタを簡単化できるためこのようなシンプルなパターン光源を用いても物体のテクスチャを喪失せず形状計測ができる．

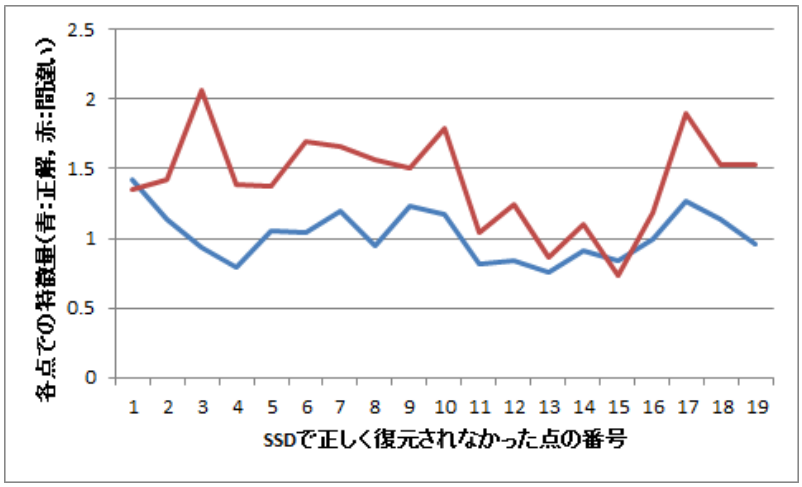
実験では図 5.23 のような動物体の形状計測を行った．原理的には 5.6.5 節と同様のワンショット復元であるため，対象物体が高速に動いていても，フレームごとに独立して 3 次元復元を行うことができた．

5.7　まとめ

本章では，動物体の形状を高精度・高密度に計測することを目的に，単色の波線グリッドを用いた三次元形状計測手法を提案した．提案手法は単一の静的パターンをプロジェクタから投影するため，動物体の形状計測も可能である．波線グリッドを用いることで，波線の交点周りに局所的特徴を付与し，パターンの暗黙的な符号化を行った．この局所特徴と，グリッドの接続情報を Belief Propagation を用いて最適化することで，安定した形状計測を実現し，さらに，交点以外の画素において，補間と画像マッチングによって対応を密に取得することで，画素単位の形状計測を実現した．実験では，計測精度の評価を行い，時間コード化法に近い精度で計測できることを確認し，最適なパターン選択により安定性が向上することを示した．また，波線グリッドによる単波長計測の利点として，1 波長の近赤外光でワンショット計測が可能であり，近赤外計測システムの簡略化に貢献できることを確認した．

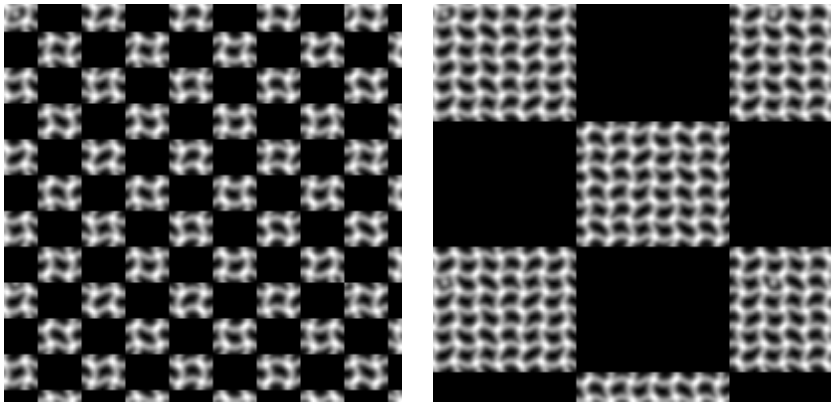


SSD

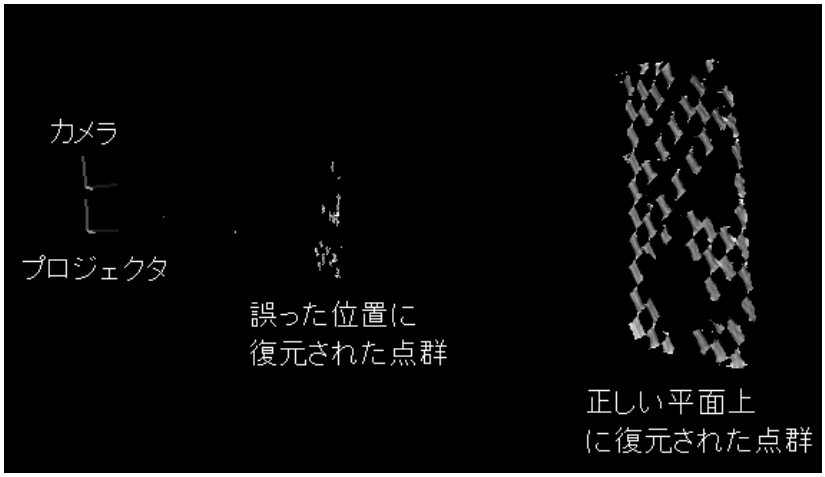


線の距離

図 5.14: 各特徴量基準を用いた場合の正しい対応点に対する値と誤対応する点に対する値. 上：SSD を特徴量とした場合の値. 下：線の距離を特徴量とした場合の値.



(a) (b)



(c)

図 5.15: 正方グリッドで分割された評価用パターン実験．(a)2 × 2 点のグリッドパターン．(b)7 × 7 点のグリッドパターン．(c) 平面上に復元された点と外れて復元された点．

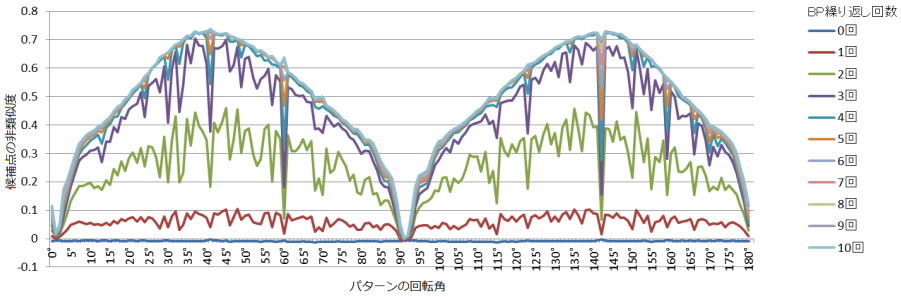


図 5.16: 候補点同士の非類似度．正しい候補点とそれを除いた候補点中で最も相関が高い点との相関の差分値．

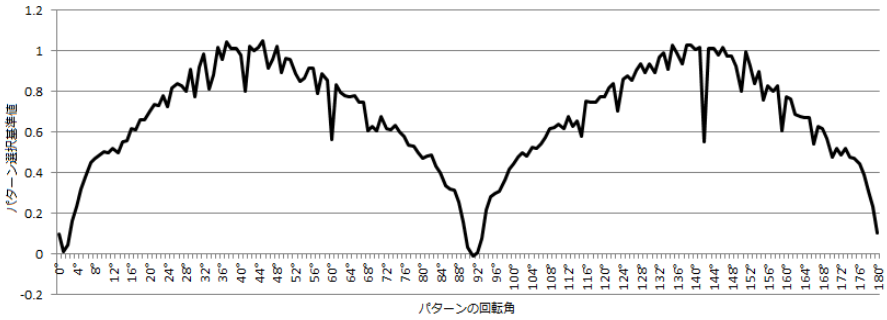


図 5.17: 図 5.16 を (5.10) 式で評価した最適パターンの選択基準.

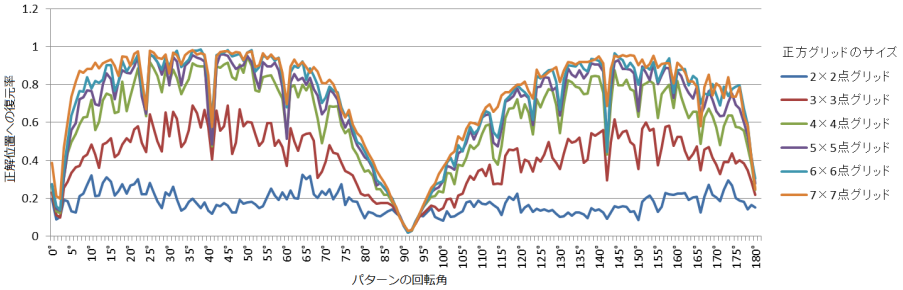


図 5.18: 平面に正方のグリッドで分割したパターンを投影した時，正しく復元された点の割合.

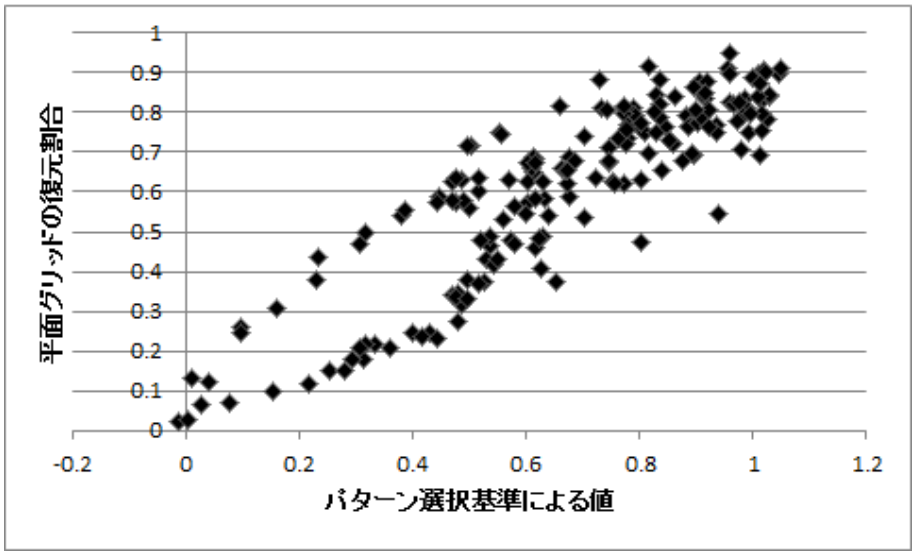


図 5.19: 最適パターンの選択と正方グリッドの復元割合との間の散布図.

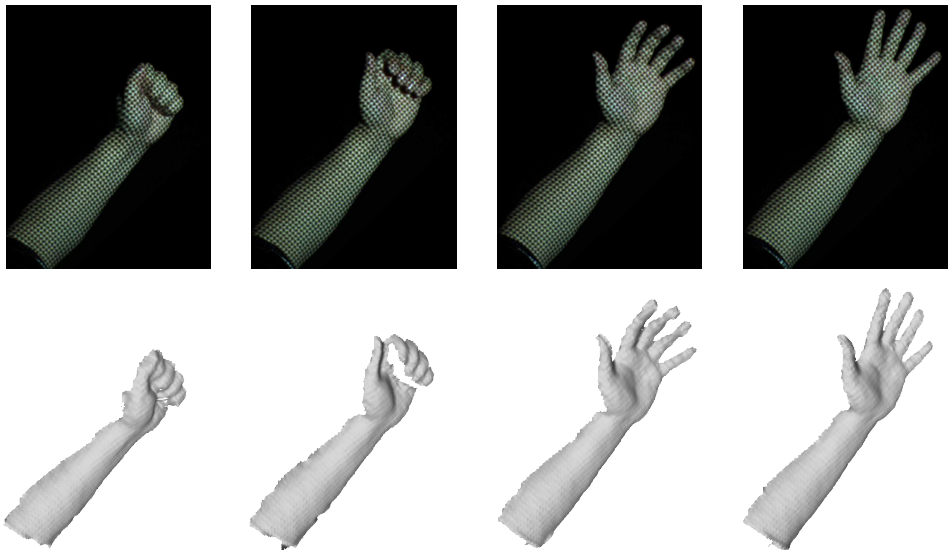


図 5.20: 指を開く動作を再構成した手の 3 次元形状.

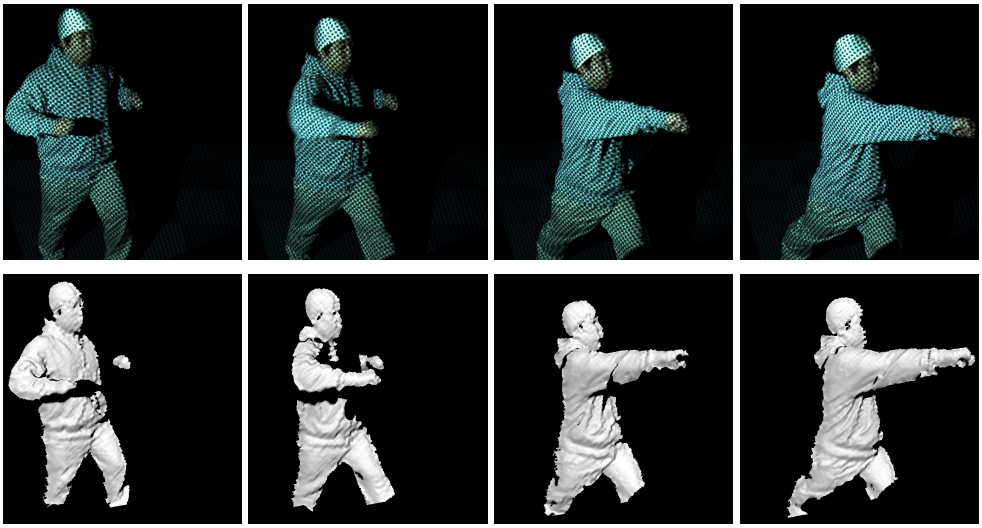


図 5.21: パンチ動作を再構成した人体の 3 次元形状．服の詳細形状が計測されている.

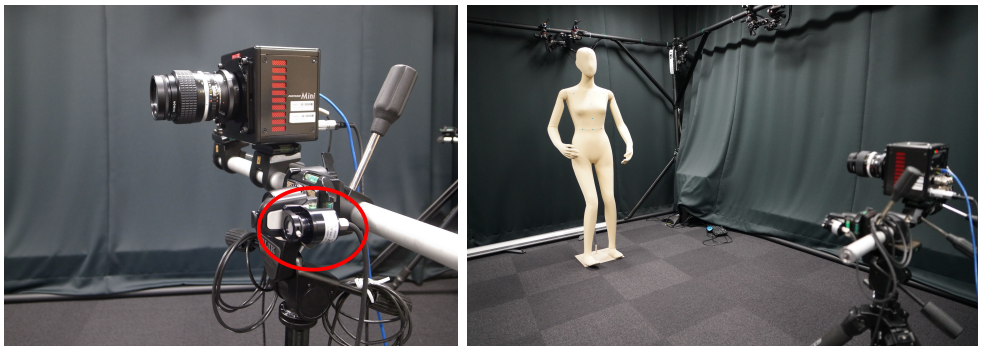


図 5.22: 近赤外波線グリッド計測の実験環境.

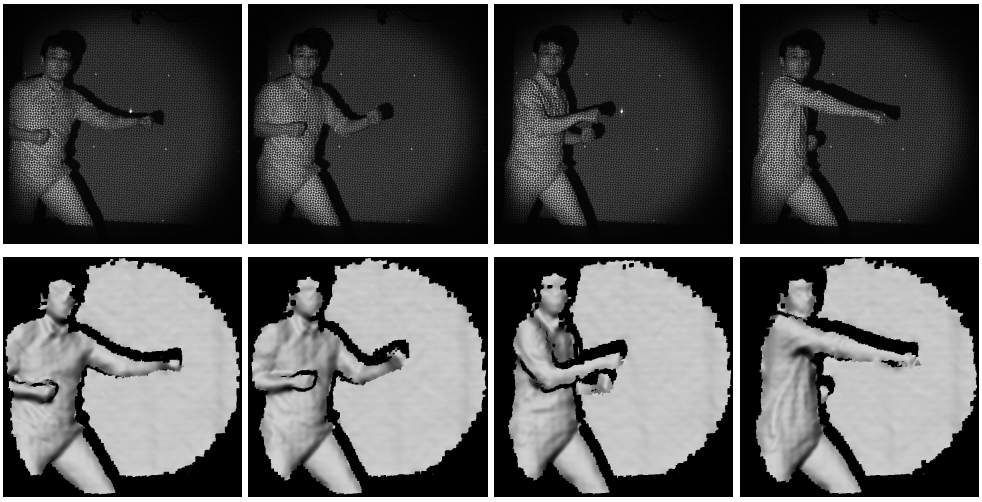


図 5.23: 近赤外波線グリッドによるパンチ動作を再構成した人体の 3 次元形状.

第6章
結論

本論文では，グリッドベースワンショット形状計測法における以下の2つの課題についてその解決手法を提案した．

- 課題1：物体表面のテクスチャの計測
- 課題2：形状計測システムの簡易化

課題1に対しては，4章にてワンショット形状計測に基づいた，テクスチャ付きの3次元形状を計測するためのプロジェクタ・カメラシステムを提案した．提案手法では，形状とテクスチャを同時に取得するため，動物体のテクスチャ付きの形状を計測できる．同時に形状とテクスチャを計測するために，近赤外構造化光プロジェクタとマルチバンドカメラを開発した．マルチバンドカメラは同じ視点から可視光と近赤外光を撮影できるので，3次元形状復元の形状誤差に影響を受けることなく，テクスチャマッピングが可能となる．提案したプロジェクタは，2種類の近赤外の波長を用いてコード化された構造化光を投影できる．パターンはお互いに垂直な単純なラインのみで構成されることから，パターンは複数のレンズを持つプロジェクタのシステムで実現できるため，プリズムを用いた合成に伴う光の減衰を起こすことなく投影できた．さらに，ワンショット3次元形状復元の固定パターンを用いることで，プロジェクタ・カメラシステムの効率的な校正方法を提案した．提案した校正方法では，若干手作業が必要となるが，これによりシステムを簡素化が可能である．実験では，提案したシステムの精度を評価し，動物体のテクスチャ付き3次元形状が計測できることを示した．

課題2及び，複数波長パターンを用いたテクスチャ付きの3次元形状計測はシステムが非常に大掛かりになることから，5章にて単色かつ静的なパターンの照射による，単一画像からの3次元形状復元 (ワンショット復元) 方法を提案した．先行手法と異なり，提案手法で

は，波線のグリッドパターンにおける各交点のパターンの違いにより対応情報を暗黙的に表現する．そこで，パターンの規則性を乱すことにより，パターンの特異性が大きくなり，安定した解が得られる．また，本論文ではステレオ法による形状復元を，グリッドの接続性を考慮しながらプロジェクタ・カメラ系に拡張する方法を提案した．復元の最終段階では，グリッドによる復元を補間して，画素単位の奥行き推定が行われる．実験では，計測精度の評価を行い，時間コード化法に近い精度で計測できることを確認し，最適なパターン選択により安定性が向上することを示した．また，動物体の計測が効果的に行われることを示した．さらに波線パターンを用いることで 1 波長の近赤外光でも高速に動く動物体の形状計測ができることを確認し，4 章のシステムに対して大きく簡略化された近赤外グリッド計測システムを実現した．今後の課題として，今回の手法では，3×3 点以上のグリッドが繋がっていることが安定した計測に必要であったが，回転だけでなく他のパラメータも考慮した最適なパターンの生成により，より少ない点の接続でも計測可能となるような計測の安定性を目指す．また，今回開発した計測手法について，マルチメディア，医療，スポーツ，材料解析など，従来手法では計測が十分に行われなかった分野への応用を進めるなど，本手法の応用範囲を広げていく予定である． また，カメラ・プロジェクタの台数を増やすことで全周の形状計測へ拡大も目指す．

謝辞

御多忙な中，終始熱心な御指導を賜りました大阪大学産業科学研究所 八木康史教授に篤く御礼申し上げます.

常日頃から本研究に対して数多くの御指導・御指摘・御助言を頂きました，産業技術総合研究所 佐川立昌様に心から感謝致します.

論文を御精読いただきました，大阪大学情報科学研究科 井上克郎教授，松下康之教授に感謝致します.

本研究について常日頃からの熱心な御指摘，御助言を頂きました，鹿児島大学工学部 川崎洋教授に深く感謝申し上げます.

本研究に対して，多岐に渡って多くの御助言，御指摘を頂きました，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 向川康博教授に深く感謝申し上げます.

本研究において御協力と数多くの助言・指摘をいただきました，大阪大学産業科学研究所 槇原靖准教授に深く感謝致します.

本研究に際して，様々なご指導を頂きました，大阪大学産業科学研究所 村松大吾准教授に深く感謝致します.

本研究に対して，常日頃から的確な指摘・助言をいただきました，広島市立大学情報科学研究科 古川亮講師に深く感謝致します.

本研究において貴重な御助言，御指導を賜りました，大阪大学産業科学研究所 満上育久助教に，心から感謝致します.

本論文を作成するに辺り，丁寧かつ熱心な指導を賜りました，大阪大学産業科学研究所 大倉史生助教に，深謝致します.

本研究に対して終始熱心なご指導を頂いた，産業技術総合研究所 松本吉央様に心から感謝致します.

産業技術総合研究所 サービスロボティクス研究部門の皆様方には常に刺激的な議論を頂き，感謝致します.

最後に，日頃から様々な諸事においてお世話になりました八木研究室の皆様方に心より感謝申し上げます.

参考文献

[1] B. Carrihill and R. Hummel, "Experiments with the intensity ratio depth sensor," *Computer vision, graphics, and image processing*, vol. 32, no. 3, pp. 337–358, 1985.

[2] J. Tajima and M. Iwakawa, "3-D data acquisition by rainbow range finder," *International Conference on Pattern Recognition*, 1990, pp. 309–313.

[3] M. Maruyama and S. Abe, "Range sensing by projecting multiple slits with random cuts," *Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision VI*, vol. 1194, pp. 216–224, 4 1989.

[4] N. G. Durdle, J. Thayyoor, and V. J. Raso, "An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, May 1998, pp. 874–877 vol.2.

[5] R. Sagawa, H. Kawasaki, R. Furukawa, and S. Kiyota, "Dense one-shot 3d reconstruction by detecting continuous regions with parallel line projection," *International Conference on Computer Vision*, 2011.

[6] 辻野和広 and 盧存偉, "リユース自動車車体部品の微小凹み自動検出のための画像計測システム," 電気学会論文誌 *D (*産業応用部門誌*)*, vol. 133, no. 12, pp. 1112–1119, 2013.

[7] S. Se, D. Lowe, and J. Little, "Vision-based mobile robot localization and mapping using scale-invariant features," *International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, 2001, pp. 2051–2058.

[8] K. Ikeuchi, T. Oishi, J. Takamatsu, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume, K. Nishino, M. Kamakura, and Y. Okamoto, "The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects," *International Journal of Computer Vision*, vol. 75, no. 1, pp. 189–208, 2007.

[9] Y. Baba and K. Nobeoka, "Towards knowledge-based product development: the 3-d cad model of knowledge creation," *Research Policy*, vol. 26, no. 6, pp. 643–659, 1998.

[10] S. Tuominen and A. Pekkarinen, "Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multi-source forest inventory," *Remote sensing of Environment*, vol. 94, no. 2, pp. 256–268, 2005.

[11] G. Neukum, R. Jaumann, H. Hoffmann, E. Hauber, J. Head, A. Basilevsky, B. Ivanov, S. Werner, S. Van Gasselt, J. Murray *et al.*, "Recent and episodic volcanic and glacial activity on mars revealed by the high resolution stereo camera," *Nature*, vol. 432, no. 7020, pp. 971–979, 2004.

[12] M. Subbarao, "Parallel depth recovery by changing camera parameters." *International Conference on Computer Vision*, 1988, pp. 149–155.

[13] T. Darrell and K. Wohn, "Pyramid based depth from focus," *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1988, pp. 504–509.

[14] S. K. Nayar and Y. Nakagawa, "Shape from focus," *IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence*, vol. 16, no. 8, pp. 824–831, 1994.

[15] Y. Oike, H. Shintaku, S. Takayama, M. Ikeda, and K. Asada, "Real-time and high-resolution 3d imaging system using light-section method and smart cmos sensor," *IEEE International Conference on Sensors*, vol. 1, 2003, pp. 502–507.

[16] Canesta, Inc., "CanestaVision EP Development Kit," http://www.canesta.com/devkit.htm.

[17] Mesa Imaging AG., "SwissRanger SR-4000," http://www.swissranger .ch/index.php.

[18] Microsoft, "Xbox 360 Kinect," http://www.xbox.com/en-US/kinect.

[19] A. O. Ulusoy, F. Calakli, and G. Taubin, "One-shot scanning using de bruijn spaced grids," *The 7th international conference on 3-D digital imaging and modeling*, 2009.

[20] G. Sansoni, M. Carocci, and R. Rodella, "Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors," *Applied Optics*, vol. 38, no. 31, pp. 6565–6573, 1999.

[21] H. Pei-Yu and G. S.-Y. Da Fei-Peng, "Color structured light technology for high-speed 3d shape measurement based on gray code method," *Journal of Optoelectronics. Laser*, vol. 9, p. 023, 2010.

[22] H. Kawasaki, R. Furukawa, , R. Sagawa, and Y. Yagi, "Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern," *CVPR*, June 23-28 2008, pp. 1–8.

[23] R. Sagawa, Y. Ota, Y. Yagi, R. Furukawa, N. Asada, and H. Kawasaki, "Dense 3d reconstruction method using a single pattern for fast moving object," *ICCV*, 2009.

[24] R. J. Hocken and P. H. Pereira, *Coordinate measuring machines and systems.* CRC Press, 2011.

[25] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, "Geometric error measurement and compensation of machines—an update," *College International pour la Recherche en Productique Annals-Manufacturing Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 660–675, 2008.

[26] 吉澤徹, **光三次元計測〔第 *2* 版〕*: 三次元工学 1.*** アドコム・メディア, 1998.

[27] 井口征士 and 佐藤宏介, **三次元画像計測.** 昭晃堂, 1990.

[28] 吉澤徹, **最新光三次元計測.** 朝倉書店, 2006.

[29] P. Narayanan, P. Rander, and T. Kanade, "Constructing virtual worlds using dense stereo," *International Conference on Computer Vision*, January 1998, pp. 3–10.

[30] C. Tomasi and T. Kanade, ""shape and motion from image streams under orthgraphy: a factorization method," *International Journal of Computer Vision*, vol. 9, no. 2, pp. 137–154, 1992.

[31] B. D. Lucas, T. Kanade *et al.*, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," 1981.

[32] 徐剛, *3* **次元ビジョン.** 共立出版, 1998.

[33] T.Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and T. Wada, "Real-time dynamic 3d object shape reconstruction and high-fidelity texture mapping for 3d video," *Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 357–369, 3 2004.

[34] S. Moezzi, L.-C. Tai, and P. Gerard, "Virtual view generation for 3d digital video," *IEEE Multimedia*, vol. 4, no. 1, pp. 18–26, 1997.

[35] T. Kanade, P. Rander, and P. Narayanan, "Virtualized reality: Constructing virtual worlds from real scenes," *IEEE Multimedia*, vol. 4, no. 1, pp. 34–47, 1997.

[36] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method," *International Journal of Computer Vision*, vol. 9, no. 2, pp. 137–154, 1992.

[37] P. Sturm and B. Triggs, "A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion," *European conference on computer vision*, 1996, pp. 709–720.

[38] E. Prados and O. Faugeras, "Shape from shading," *Handbook of mathematical models in computer vision.* Springer, 2006, pp. 375–388.

[39] V. S. Ramachandran, "Perceiving shape from shading," *Scientific American*, vol. 259, no. 2, pp. 76–83, 1988.

[40] H. G. Barrow and J. M. Tenenbaum, "Interpreting line drawings as three-dimensional surfaces," *Artificial intelligence*, vol. 17, no. 1-3, pp. 75–116, 1981.

[41] T. Sawatari and R. B. Zipin, "Optical profile transducer," *Optical Engineering*, vol. 18, no. 2, 1979.

[42] H. Takasaki, "Moiré topography," *Applied optics*, vol. 9, no. 6, pp. 1467–1472, 1970.

[43] D. Meadows, W. Johnson, and J. Allen, "Generation of surface contours by moiré patterns," *Applied Optics*, vol. 9, no. 4, pp. 942–947, 1970.

[44] R. Baribeau, M. Rioux, and G. Godin, "Color reflectance modeling using a polychromatic laser range sensor," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 263–269, 1992.

[45] D. Bergmann, "New approach for automatic surface reconstruction with coded light," *SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, 1995, pp. 2–9.

[46] R. G. Dorsch, G. Häusler, and J. M. Herrmann, "Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement," *Applied Optics*, vol. 33, no. 7, pp. 1306–1314, 1994.

[47] M. Merchant and S. R. Weinberger, "Recent advancements in surface-enhanced laser desorption/ionization-time of flight-mass spectrometry," *Electrophoresis*, vol. 21, no. 6, pp. 1164–1177, 2000.

[48] D. Nitzan, A. E. Brain, and R. O. Duda, "The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis," *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, no. 2, pp. 206–220, 1977.

[49] 八木康史, 斎藤英雄, 松下康之, 古川泰隆, 川崎洋, 古川亮, and 佐川立昌, Eds., *CVIM チュートリアルシリーズコンピュータビジョン最先端ガイド 5.* アドコム・メディア株式会社, 12 月 5 日 2012.

[50] S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, and M. Levoy, "Real-time 3d model acquisition," *Proc. SIGGRAPH*, 2002, pp. 438–446.

[51] T. Koninckx and L. V. Gool, "Real-time range acquisition by adaptive structured light," *IEEE Transaction Pattern Analysis Machine Intelligence*, vol. 28, no. 3, pp. 432–445, 2006.

[52] 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*, 2002, pp. 24–36.

[53] C. Je, S. Lee, and R. Park, "High-contrast color stripe pattern for rapid structured-light range imaging," *Proc. Eighth European Conference Computer Vision*, 2004, pp. 95–107.

[54] M. Waschbusch, S. Wurmlin, D. Cotting, F. Sadlo, and M. Gross, "Scalable 3d video of dynamic scenes," *The Visual Computer*, 2005.

[55] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, and H. Fuchs, "The office of the future : A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays," *the Association for Computing Machinery's Special Interest Group on Computer GRAPHics*, 1998.

[56] T. Weise, B. Leibe, and L. V. Gool, "Fast 3d scanning with automatic motion compensation," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007, pp. 1–8.

[57] Z. Zhang, D. Zhang, X. Peng, and X. Hu, "Color texture extraction from fringe image based on full-field projection," *Optical Engineering*, vol. 42, pp. 1935–1939, Jul. 2003.

[58] J. Pan, P. S. Huang, and F.-P. Chiang, "Color-coded binary fringe projection technique for 3-D shape measurement," *Optical Engineering*, vol. 44, pp. 3606–+, Feb. 2005.

[59] S. Zhang and P. Huang, "High-resolution, real-time 3d shape acquisition," *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, 2004, p. 28.

[60] 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*, 2005, pp. 318–325.

[61] S. Hiura, A. Yamaguchi, K. Sato, and S. Inokuchi, "Real-time object tracking by rotating range sensor," *Proc. 13th International Conference on Pattern Recognition*, vol. 1, 1996, pp. 825–829.

[62] H. S. Abdul-Rahman, M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor, F. Lilley, and C. J. Moore, "Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm," *Applied optics*, vol. 46, no. 26, pp. 6623–6635, 2007.

[63] K. L. Boyer and A. C. Kak, "Color-encoded structured light for rapid active ranging," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 1, pp. 14–28, 1987.

[64] D. Caspi, N. Kiryati, and J. Shamir, "Range imaging with adaptive color structured light," *IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence*, vol. 20, no. 5, pp. 470–480, 1998.

[65] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, "Two-dimensional phase unwrapping," *Theory, Algorithms, and Software*, 1998.

[66] J. Gühring, "Dense 3d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components," *Photonics West 2001-Electronic Imaging*, 2000, pp. 220–231.

[67] H. Zhao, W. Chen, and Y. Tan, "Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes," *Applied optics*, vol. 33, no. 20, pp. 4497–4500, 1994.

[68] S. G. Narasimhan, S. J. Koppal, , and S. Yamazaki, "Temporal dithering of illumination for fast active vision," *Proc. European Conference on Computer Vision*, October 2008, pp. 830–844.

[69] L. Zhang, B. Curless, and S. M. Seitz, "Spacetime stereo: Shape recovery for dynamic scenes," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 2003, pp. 367–374.

[70] T. P. Koninckx and L. Van Gool, "Real-time range acquisition by adaptive structured light," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 28, no. 3, pp. 432–445, 2006.

[71] K. Sato and S. Inokuchi, "Range imaging system utilizing nematic liquid crystal mask," *International Conference on Computer Vision*, pp. 657–661, 1987.

[72] United States Patent Application 2009005924, 2007j.

[73] M. Kimura, M. Mochimaru, and T. Kanade, "Measurement of 3d foot shape deformation in motion," *The 5th International Workshop on Projector camera systems*, 2008, p. 10.

[74] R. A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, and J. Nissanov, "Structured light using pseudorandom codes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 3, pp. 322–327, 1998.

[75] P. Vuylsteke and A. Oosterlinck, "Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 2, pp. 148–164, 1 1990.

[76] P. Felzenszwalb and D. Huttenlocher, "Efficient belief propagation for early vision," *International Journal of Computer Vision*, vol. 70, pp. 41–54, 2006.

[77] J. Salvi, J. Batlle, and E. M. Mouaddib, "A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement," *Pattern Recognition Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1055–1065, 1998.

[78] K. Akasaka, R. Sagawa, and Y. Yagi, "A sensor for simultaneously capturing texture and shape by projecting structured infrared light," *Proc. The 6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, Montreal, Canada, August 21-23 2007, pp. 375–381.

[79] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intellgence*, vol. 22, no. 11, 2000, pp. 1330–1334.

[80] N. Snavely, S. M. Seitz, and R. Szeliski, "Photo tourism: Exploring image collections in 3d," *The Association for Computing Machinery's Special Interest Group on Computer GRAPHics*, 2006.

[81] R. Sagawa, K. Sakashita, N. Kasuya, H. Kawasaki, R. Furukawa, and Y. Yagi, "Grid-based active stereo with single-colored wave pattern for dense one-shot 3d scan," *In Proc. 2012 Second Joint 3DIM/3DPVT Conference*, 2012.

[82] 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, and 八木康史, "高密度 3 次元形状復元のための単色波線パターンを用いたグリッド能動ステレオ," 第 *15* 回画像の認識・理解シンポジウム予稿集, 2012.