

プロジェクタ・カメラシステムによるワンショット計測に 最適なモノクロパターンに関する検討

森永 寛紀^{1,a)} 川崎 洋² 益山 仁² 小野 智司² 古川 亮³

概要：近年、移動物体の3次元形状情報を取得するために、プロジェクタ-カメラシステムによるワンショット計測手法が用いられている。特に、計測対象物や計測環境、光源などへの柔軟性の高さから、モノクロパターンを用いたステレオマッチングによる3次元形状計測手法が注目されている。しかし、計測対象物に投影されたパターンは、物体表面の傾斜により変形してしまうため、ステレオマッチングの際に正しい対応が見つけれられないという問題が発生する。そこで、本研究では、パターンの変形に対してアフィンユニークな構造を持つモノクロパターンを遺伝的アルゴリズムを用いて作成した。また、作成したモノクロパターンと従来の代表的な手法とを実験により比較評価した。

キーワード：3次元形状復元, ワンショットスキャン, 受動ステレオ, 遺伝的アルゴリズム

1. はじめに

近年、動的な3次元シーンに関する注目が集まっている。その代表的な例である、ゲーム用のデバイスとして開発されたMicrosoft社のKinect [1] は、ゲームプレイヤーを計測し動きを解析することで、プレイヤーの動きをゲームに反映させることを目的としたデバイスである。さらに、容易に3次元の情報を取得できるという点から、現在では様々な研究分野で利用され始めている。例えば、複数視点から取得した3次元情報を複合し全周形状を生成する自動3次元モデリングツールとしての利用や、マーカレスモーションキャプチャ、さらには自律移動するロボットの目として利用する研究も進められており、キャプチャデバイスの性能向上に対する期待がますます高まってきている。

動物体計測にはTime-of-Flight(TOF)とステレオの2方式があるが、いずれの方式でも静的なシーンで用いる3次元スキャナほど高精度かつ高密度で、安定して計測することができない。もしこれが可能になれば、先に述べた利用例の性能向上とともに、医療応用や流体、爆発シーンの解

析など、3次元形状データの応用範囲が格段に広がる。このため、今までに数多くの研究が行われているが、未だ十分な性能は実現できていない。

そこで、本論文では、動的シーンを計測可能な単一画像による、高精度かつ高密度で安定した3次元形状復元を行う計測システムを実現するため、ステレオ方式を対象とし、その最適なパターンについて検討する。検討する対象は、

- (1) ランダムドット
 - (2) ペンローズタイリング
 - (3) 今回提案する遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)
- とした。また、3のGAについては、メタヒューリスティックな最適化手法である遺伝的アルゴリズムを用いてステレオ計測に最適なプロジェクタ用パターンの設計を行う手法を用いた。

2. 関連研究

アクティブ計測手法としては、TOFやステレオなどが一般に良く知られている。動物体のアクティブ計測手法も、それぞれによる手法が研究されている。

TOFは一般に、計測したい対象に向けてレーザなどを発射し、それが検出器に戻るまでの時間で距離を計測する。このため、通常ポイント単位での計測であり、広い範囲を短時間で計測することには向いていない。そこで、動物体などを計測するために、広い範囲に対して変調をかけた光源を照射し、一方で検出側で、多数の検出器を2次的に配置することでエリアでの計測を実現した装置も提案、商

¹ 鹿児島大学 工学部 情報生体システム工学科 Faculty of Engineering, Kagoshima University, Kagoshima, Japan

² 鹿児島大学大学院 理工学研究科 情報生体システム工学専攻 Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Kagoshima, Japan

³ 広島市立大学大学院 情報科学研究科 知能工学専攻 Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University, Hiroshima, Japan

a) sc110080@ibe.kagoshima-u.ac.jp

品化されている [2], [3]. しかし, 現状では他の光源による外乱に弱く, 解像度もあまり高くない. さらに, 変調の周期性によるあいまいさの問題もある.

一方, ステレオベースのアクティブ計測手法も, これまではポイントやラインレーザを照射し, これをスイープしながら対象を計測する手法が多く実用化されてきた. このため, スイープする必要性から動物体の計測には不向きであった. 動物体を計測するには短時間で広い範囲を計測しなければならないため, エリア照射によるステレオ復元の必要がある. しかし, エリアベースの手法ではポイントやラインの場合には無かった対応点問題を解決しなければならない. その解決方法としては, 典型的には2つの手法, すなわち時間エンコード方式と空間エンコード方式が知られている [4].

時間エンコード方式では, 複数のパターンを投影し時間変化の中に情報をエンコードする. このため, 動物体計測には本質的に向いていないと言えるが, 高速化の取り組みとして, パターンの高速切り替え [5] や, フェーズパターンを用いることで必要な枚数の削減 [6], DMD パターンの利用 [7] などの手法が提案されている.

一方で, 空間エンコード方式では静的なパターンを用いて, 1枚のみの入力画像から形状復元を行うため (ワンショットスキャン), 動物体計測に適している. しかし, 空間的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, 対応関係が安定的に決定されない. これを解決するために多くの手法が提案されているが, 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手法 [8], [9] では, 色情報を陽に使うため, 物体のテクスチャや形状, 光源環境に容易に影響されてしまうという問題がある. 色情報を用いない他の手法においても, ユニークな点線による手法 [10], [11] や2次元的にパターンを配置する手法 [1], [12] では, 対象物体表面のテクスチャや形状, 高精度化のためのワイドベースライン構成下ではパターンが歪むため, パターンの特徴を失ってしまう, という共通する問題がある. パターンの特徴が残りやすいグラフ構造を用いるアプローチとして, グリッドの接続性の中にエンコードする手法 [13], [14], [15] などもあるが, 色情報を用いないためパターンが疎になりがちな上に, 計測物体の境界付近では頻繁に対応を間違える, という問題がある. いずれも, 精度・密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.

提案手法は上記の問題について, モノクロパターンを用いたワンショットスキャンシステムで, 高精度かつ高密度で動く物体の3次元形状を復元するために, 最適なパターンを検討する.

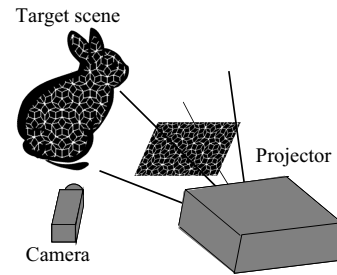


図 1 システム構成

3. 手法の概要

3.1 システム構成

本研究の提案するシステムは, 単一のプロジェクタとカメラから構成される. 図1に示すように, プロジェクタは静的なモノクロパターンを投影する. パターンは静的であるため同期は必要なく, 高速に移動する物体の計測に適している.

本手法において, 3次元形状の取得に至るまでの工程は, 主に2つに分けられる. 1つ目はパターンマッチ工程, 2つ目は3次元形状復元工程である.

3.2 形状復元

本研究で用いる3次元形状復元手法は, 以下を満たす必要がある.

- 領域ベースのモノクロパターン用ワンショット形状計測手法
- パッシブステレオの手法であるステレオマッチングをベースとし, 安定した高い密度の復元
- ワイドベースライン環境や物体形状によるパターンの変形にも対応可能

上記を満たす形状復元処理全体のアルゴリズムを, 図2に示す. この処理の工程は主に2つの処理に分けられる. 1つ目はマッチングコストの計算 (図の橙色部分) であり,

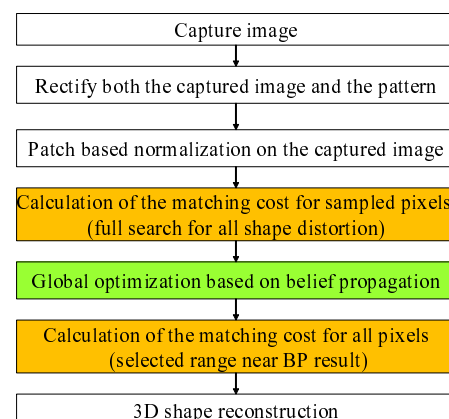


図 2 復元アルゴリズムのフローチャート図

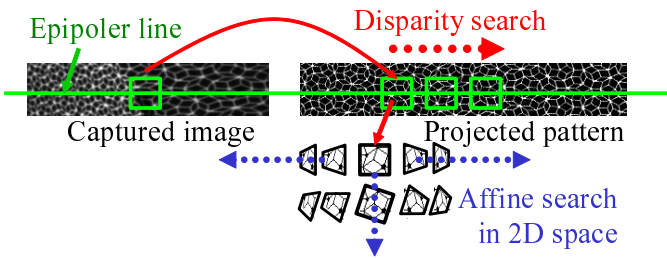


図3 アフィン変換を考慮したマッチング処理

2つ目は全体最適化(図の黄緑色部分)である。ただし、コスト計算処理を水平線に沿って行うことができるように、形状復元工程の入力として、あらかじめ計測画像と投影パターンの両方を平行化しておく必要がある。

まず、全域に渡ってマッチングコストの計算を行う。このとき、入力画像の環境照明条件やテクスチャは均一でないため、アダプティブな正規化を行う。正規化の方法としてはパッチベースの正規化を行っており、各注目ピクセルに対して定義されたウィンドウ毎に次式を適用する。

$$I_{new}(x) = (I_{org}(x) - I_{low}) \frac{255}{I_{high} - I_{low}}. \quad (1)$$

ここで、 I_{low} と I_{high} は各ウィンドウ内の最小値と最大値を表す。ウィンドウサイズはマッチングコスト計算用のウィンドウサイズの2倍までと定義している。

式(1)を用いて正規化を行ったピクセルに対して、アフィン変換も考慮したマッチングコストを求めるために、次式を適用する(図3)。

$$SSD(x, d) = \arg \min_{\mathbf{a}} \sum_{x' \in W(x+d)} (I_c(x') - I_p(H_{\mathbf{a}}(x')))^2, \quad (2)$$

ここで、 d は視差、 $W(x)$ は x 周りの長方形のパッチであり、 $H_{\mathbf{a}}(x')$ はパラメータ $\mathbf{a}$ を用いたアフィン変換である。 $I_c(\cdot)$ と $I_p(\cdot)$ はカメラ画像とプロジェクタ画像のそれぞれの輝度値を表している。こうして、アフィン変換を考慮したステレオマッチングを行うことで、ワイドベースライン環境や計測物体の傾斜により投影したパターンが変形してしまっている、正しい対応を得ることができるようになり、ロバストかつ高精度な形状復元を行うことができる。

最後に、マッチングコストの計算を終えた後、ノイズ等の削減のために Belief Propagation [16] を用いて全体最適化を行う。全ての画素について BP により伝播すると見なされた領域とのみマッチングコストの再計算を行い、得られた視差値を用いて深度を復元する。

4. パターン生成手法

4.1 概要

本論文では、ランダムドット(図4(a))、ペンローズタイリング(図4(b))、GAによるパターンの3つを比較する。

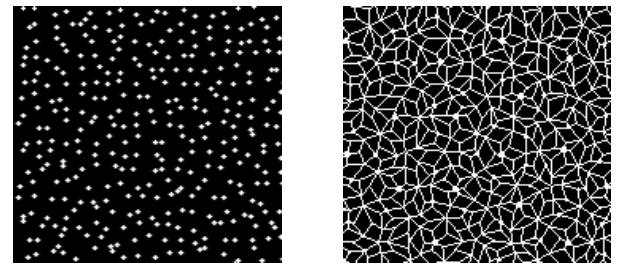


図4 (a) ランダムドット (b) ペンローズタイリング

パターン投影を用いたステレオマッチングによる3次元形状計測手法では、多くの場合ランダムドットなどのドットパターンが用いられているが、このパターンは点数が等しい状態では、線がない分グラフ構造のパターンより暗く、特徴も物体形状などによって容易に潰れてしまう。これに対し、ペンローズパターンのような、エッジとノードによるグラフ構造をベースにしたパターンであれば、交点同士を結ぶ線により全体の輝度値を増加させられる。さらに、ベースラインの広さや物体形状によってパターンが変化しても、パターンの持つトポロジーは変化しない。また、ペンローズタイリングパターンは平面充填でありながら非周期パターンであるため、繰り返しのパターンが発生しないという特徴を有する。これにより、ステレオマッチングによる形状復元に用いても誤対応が起こりづらい。これらの特徴を有するためにより、先行研究で示されている結果でも、ペンローズパターンは良好な結果を示している[17]。

本章では、このペンローズパターンの特性を継承しつつ、3.2に示した復元手法に対して最適化した投影パターンを作成する手法について述べる。

4.2 パターン要件

本研究は、グラフ構造を持つ静的なモノクロパターンを作成することが目的となる。そのため、パターンはグラフを作るライン(エッジ)と交点(ノード)で構成される。本手法では、パターン中の交点の座標を変数とし、交点間を結ぶラインは、パターン作成モデル(詳細は4.2.1節)を定義し生成する。こうして表現されるパターンを、遺伝的アルゴリズムの各個体とすることで、最適なパターンを探索する。

ここで、パターンの分解能を高めるためにはパターンを密にする必要があるが、プロジェクタ全体に対してパターンを作成すると、遺伝的アルゴリズムの設計変数の解空間が広くなりすぎるため実現が難しい。そこで、ステレオマッチングに用いることが前提であることを踏まえエッジの制約を用いると、エッジ線上でのみユニークであればよいと考えられるため、パターン生成の範囲を限定することができる。これにより、遺伝的アルゴリズムを用いて作成すべきパターンのサイズが限定される。本研究では、 200×20 のサイズのパターンを遺伝的アルゴリズムに

より作成し、そのパターンを格子状に敷き詰めることで、プロジェクト全体の大きさの投影パターンを作成する。

さらに、作成するパターンはアフィン変換に対してロバストなものとするため、遺伝的アルゴリズムにおいて最適化するパターンのサイズを、 200×20 から横方向に 0.5 倍～2.0 倍に伸縮して探索する。

本研究では、この 200×20 のパターン中における各点の座標値を、遺伝的アルゴリズムで扱うことのできるバイナリ値にするために、グレイコードで表現している。このため、1つの点を表すために必要なビット数は横 8bit×縦 5bit で、合計 13bit となる。

4.2.1 投影パターンの作成モデル

4.2 節でも述べたように、本研究ではパターン中の交点の座標を最適化すべき変数としている。そのため、ラインによる交点同士の結び方は、採用したパターン作成モデルに依存する。本研究では、交点 (図 5(a)) を用いてドロネー図 (図 5(b)) を作成することで、投影パターンとしている。

また、4.2 節で述べたように、小さいスケールで作成したパターンをグリッド状に敷き詰めて高い解像度のパターンを作成するため (図 6)、パターンの縁にある点同士も接続されるように、ドロネー図を作成する。

4.2.2 個体の初期化

本手法では遺伝的アルゴリズムにおいて、初期の個体の性質が残りやすいような世代交代モデルを利用しているため、最終的な出力結果が初期の個体の分布に大きく依存する。そのため、なるべく広い解空間を偏りなく探索するためには、初期個体の生成方法が非常に重要となる。これを踏まえ、初期化工程において、我々は集団を 3 等分して 3 つの小集団を作り、以下の 3 通りの手法をそれぞれに適用している。

正規乱数を用いた初期化: この初期化手法では、パターン中に均等に点を配置し、正規乱数によって少しずつ位置を移動させる。これによって、水平線方向に多少の一意性を持ちつつも、全体に渡って均一に点が散った個体を生成することができる。

一様乱数を用いた初期化: この初期化手法では、解空間全体を範囲として一様乱数で交点をばらまくように配置している。これによって、均一な配置では得ることのできない構造を持ったパターンを得ることができる。これは、後に



図 5 (a) 交点 (b)(a) から生成されたドロネー図

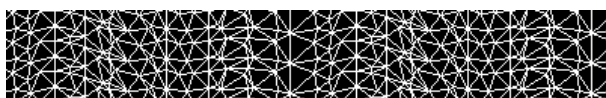


図 6 グリッド状に並べたドロネー図

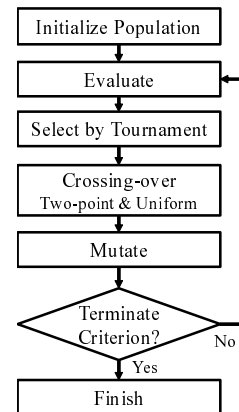


図 7 本手法の GA フローチャート

述べる交叉処理において有効となる。

ペンローズタイリングパターンを用いた初期化: この初期化手法では、先行研究で用いていたペンローズタイリングの投影パターンの点の配置に従って点を配置している。これは、このパターンがノードとエッジにより構成されるグラフ構造パターンであり、かつ非周期パターンであるため、グラフを構成する点が非周期パターンとして機能的に並んでいると考えられるからである。作成するパターンは一意性が高く、点や線もなるべく均一である方が望ましいため、こういった特徴を持った初期個体は探索の収束を早めるために有効である。

4.2.3 世代交代モデル

本研究では、世代交代モデルに Simple GA を用いた。このモデルは一般的な遺伝的アルゴリズムであり、図 7 のフローチャートに示す手順で最適化処理を行っている。

本手法における各遺伝的オペレータの実装について述べる。まず、個体の初期化には 4.2.2 項、適応度評価には 4.2.4 項に示すような処理を用いている。

交叉させる個体を集団から選択する選択処理では、サイズ 2 のトーナメント選択を用いている。 この手法では、集団からランダムに複数選抜した個体を用いてトーナメントを作成し、適応度の比較によりトーナメントを勝ち上がった上位 2 個体を、次世代の個体生成のための親個体とする。

親個体の遺伝子を交叉させる交叉処理には 2 種類の手法を用いており、確率によって適用する手法を選択している。一方は二点交叉であり、個体の持つ全ての点が収められたリストの中から二ヶ所の位置をランダムで指定し、その間の点の座標を入れ替えている。他方は一様交叉であり、個体の持つ全ての点をランダムに入れ替えている。このため、現在利用している交叉方法では、どの個体も持たない点の座標を得ることができないため、解空間の中で特定の領域しか探索できない。

このため、突然変異処理では個体の持つ染色体中の各遺伝子を、ある確率で反転させている。

以上に述べた処理を各世代の個体群に適用し、子個体を再び評価する。この処理を規定回数だけ行い、最終的に最も適応度の高い個体を最良パターンとすることで、パターンの最適化を行っている。

4.2.4 適応度評価

遺伝的アルゴリズムにより毎世代生成される各個体を評価する方法として、簡易的なステレオマッチングを行っている。その具体的な方法は、生成された個体から作成したパターンを 3×2 のグリッド状に並べた画像をプロジェクタ画像、プロジェクタ画像から 1 度のマッチングで探索する範囲分切り取りアフィン変換を加えた画像をカメラ画像とし、両者の SSD (Sum of Squared Difference) 値を先行研究の手法である式 (2) を用いて計算している。これにより、それぞれの個体の 3.2 節に示す復元手法に対する適応度を測ることができる。

5. 実験

我々は、3つの手法を用いて性能を評価検証した。そのために、最初に 4 章にて示した、遺伝的アルゴリズムを用いたパターン作成実験を行った。次に、3つのパターンを外乱の無い理想環境で評価するために、レイトレーシングソフト [18] を用いたシミュレーション実験を行った。最後に、実用性を評価するために実環境実験を行った。

なお、通常ドットベースのパターンはラインベースのパターンに対して、パターン全体の輝度値が低く、そのためにパターンの密度も低くなる傾向があるため、本論文ではランダムドットパターン全体の輝度値をペンローズと同程度になるような調整を行った (図 8(a))。さらに、1つのドットの輝度値が高く、なおかつグラフのような構造を持たない形状として、ドットの各点は図 8(b) に示すような形状とした。

また、3次元形状復元実験の Ground Truth としては、時間エンコード方式であるグレイコード法を用いて取得した形状データを使用した。

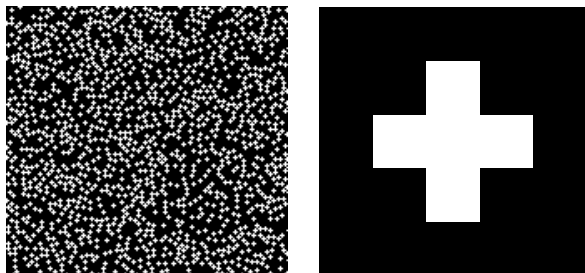


図 8 (a) ランダムドットパターン (b) パターン中のドットの表現

表 1 パラメータ構成

Population size	102
Generation limit	1,500
Number of elites	3
Crossover method	Two-point 90% / Uniform 10%
Crossover rate	$\frac{100-3}{100}$
Mutation method	Bit flip mutation
Mutation rate	0.01
Resolution	100×20
Number of points	40

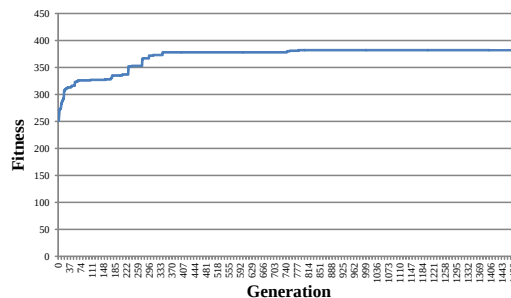


図 9 評価値の推移グラフ

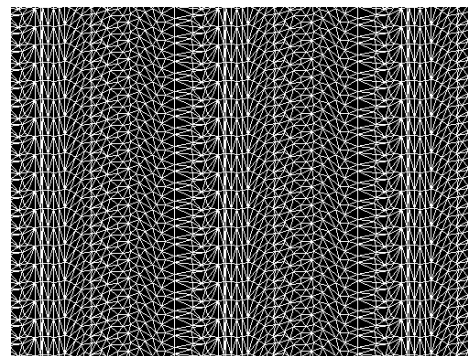


図 10 出力されたパターン

5.1 パターン作成

4.2 節にて示したように、遺伝的アルゴリズムを用いて投影パターンの作成を行った。このとき、遺伝的アルゴリズムに与えるパラメータとして、表 1 に示す値を用いた。そのときの結果となる評価値の推移グラフを図 9、生成した投影パターン画像を図 10 に示す。

5.2 シミュレーション実験

シミュレーション実験では、パターン作成実験で取得したパターン画像をプロジェクタ画像、レイトレーシングソフト [18] 上でパターンを投影したときので生成された画像をカメラ画像としている。また、実験では Stanford 大学の形状データ集 [19] の bunny データを 3 次元形状として利用した。なお、カメラと物体重心との距離は 1 としている。

作成したパターン画像を用いてレンダリングした結果の画像形に対し、形状復元を行った結果を示す。なおこの際、様々なシーンの復元結果を比較するために、目標形状を 0

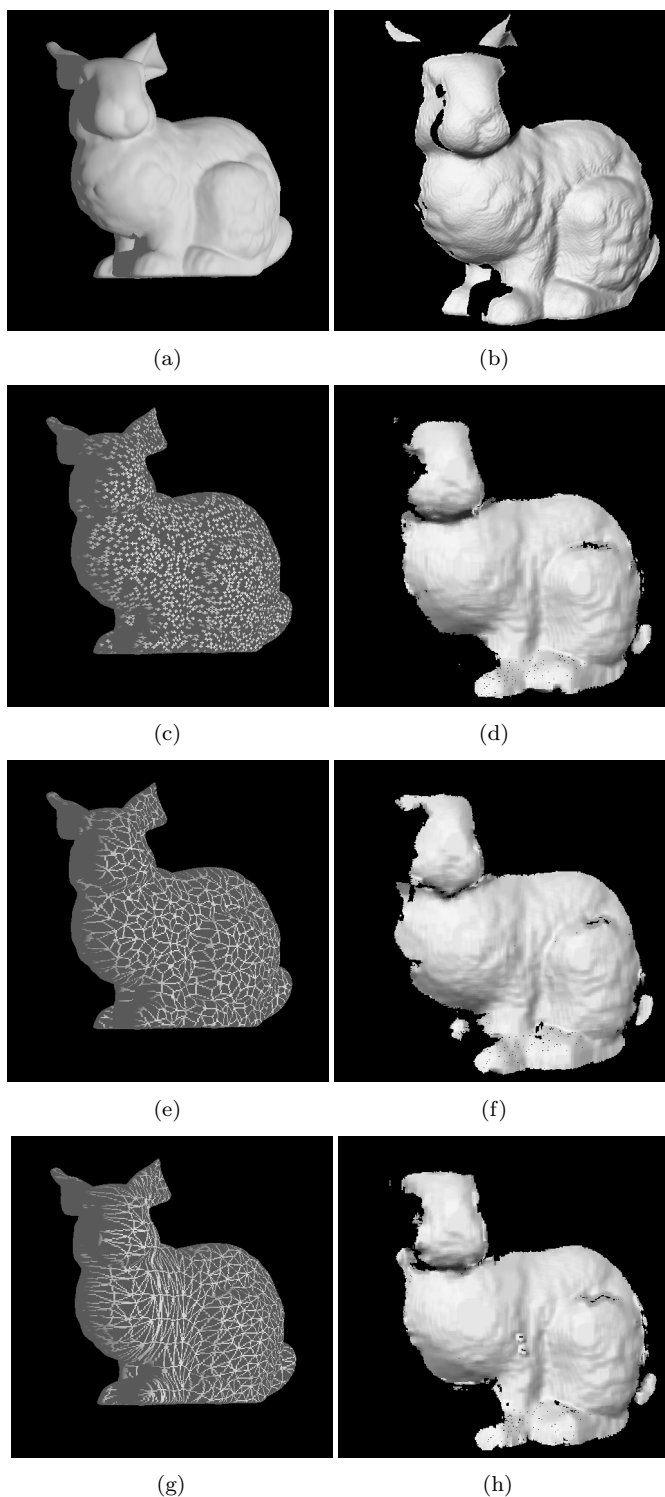


図 11 シミュレーション実験の形状復元結果:左の列は入力画像 ((a) はその中の一枚), 右の列は復元結果. (a) と (b) は Ground Truth, (c) と (d) は Random Dot, (e) と (f) は Penrose, (g) と (h) は GA による結果となる.

度から 90 度まで回転させながら, 5 度刻みで計測を行っている (図 11 はその 1 シーン). そのときの, 復元点数の推移グラフを図 12 に, Ground Truth との二乗誤差の平方根 (RMSE) の推移グラフを図 13 に, 全角度における RMSE の平均値と標準偏差の値を表 2 に示す. この結果において, ランダムドットは精度が悪い場合が多く, ペンローズ

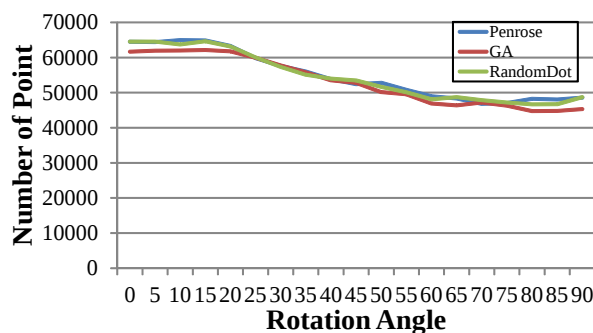


図 12 シミュレーション実験の点数比較

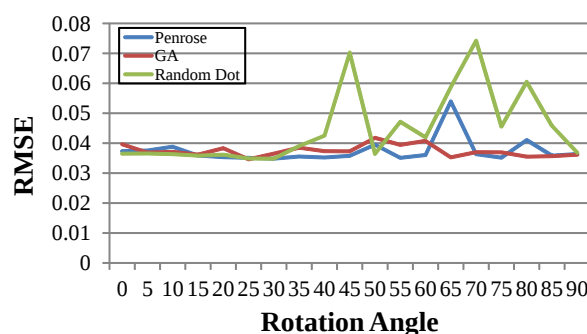


図 13 シミュレーション実験の精度比較

表 2 シミュレーション実験の平均・標準偏差による精度比較

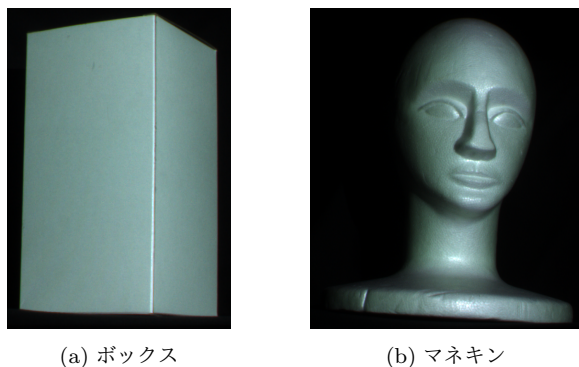
	RandomDot	Penrose	GA
Mean	0.04474	0.03740	0.03742
SD	0.01225	0.00434	0.00191

は平均的に精度が高いが, 一部の角度では精度を悪化させる, という性質があることがわかる. 一方, GA は精度の平均ではペンローズに劣るが, 大きく悪化することが無いという点で安定しているといえる. また, 図 12 より, 復元点数には大きな差がないが, GA パターンの点数が少なめであることが確認できる.

5.3 実環境実験

シミュレーション実験の結果を踏まえ, 実環境での実験を行った. 実環境実験では, PointGrey 社製 1600×1200 画素のカメラと, EPSON 社製 1024×768 画素の液晶ビデオプロジェクタを使用した. また, 計測対象物として, ボックスとマネキンを使用した (図 14). ここで, ボックスは物体の傾斜が変化したときの結果を比較するために, 2 種類の角度から計測した結果を比較した. また, マネキンは実環境で様々な傾斜を含む形状を持った計測対象として選択した.

このとき, ボックスの復元点数は表 3, 復元精度は表 4 のようになった. この結果から, ランダムドットが最も密であり精度も良いことがわかる. また, 復元点数は GA よりペンローズの方が多いが, 復元精度は GA の方が良い.



(a) ボックス (b) マネキン

図 14 実環境実験の計測対象オブジェクト

表 3 実環境実験:点数比較 (ボックス)

	RandomDot	Penrose	GA
Box 01	52136	51251	50525
Box 02	47470	46665	41623

表 4 実環境実験:精度比較 (ボックス)

	RandomDot	Penrose	GA
Box 01	1.0500	1.0980	1.0833
Box 02	0.8569	0.8663	0.8325

表 5 実環境実験:復元点数・精度比較 (マネキン)

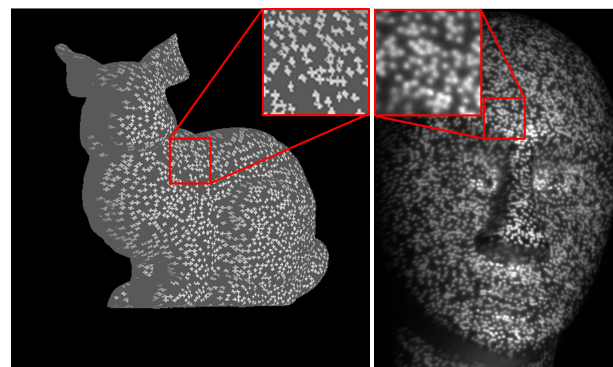
	RandomDot	Penrose	GA
Number of Points	59603	53845	45741
RMSE(mm)	1.0471	1.0808	1.0728

同様に、マネキンの復元点数・精度は表5のようになった。

この結果から、マネキンのような曲面を持つ形状に対しても、ランダムドットが有効であることがわかった。また、この結果でもボックスと同様に、GAの方がペンローズより復元点数は少ないが精度は高かったということがわかる。

5.4 考察

シミュレーション実験においては、GAパターンがもっとも良い結果であったが、実環境実験においてはランダムドットパターンが最良であった。図15はいずれもランダムドットパターンを投影した画像である。(a)はシミュレーションであり、(b)が実画像である。これらを比較すると、図15(a)では物体形状の傾斜によって図8(b)のパターン同士が重なるとそのまま大きなパターンになっているが、図15(b)では、お互いの点で間が補間されつつも点自体が明るいため、点であるという特徴を失っていないことがわかる。これは、図8(b)で示したような形でドットを表現したため、十文字のパターン中の線同士の干渉によって中央の点が明るくなり、ドットとしての特徴を保持できていると考えられる。そのため、こういったパターン同士の干渉により現れる特徴も、評価関数やシミュレーション



(a) シミュレーション実験時 (b) 実環境実験時

図 15 ランダムパターン投影結果の比較

実験で想定しておかなければならないといえる。

また、GAパターンとペンローズパターンにおいて、シミュレーション実験では、平均的に誤差が少なかったパターンはペンローズパターンであったが、GAは標準偏差が低く、精度の大きな悪化が起きづらいパターンであることがわかる。これは、GAが物体形状の傾斜の変化に対してロバストになるように設計されたパターンだからと考えられ、パターン作成の当初目的を達成できたとも言える。実際、実環境実験ではGAパターンの方がペンローズ・パターンより常に精度が良く、より高精度で安定性の高い復元を実現できている。ただし、復元点数では大きくペンローズに及んでいないため、パターンの密度を高める必要性がある。

6. 結論

本論文では、動物体の3次元形状が取得可能な、モノクロパターンを用いたワンショットスキュンシステムにおいて、高精度かつ高密度で安定した形状取得の手法を提案し、そのために必要な最適なパターンについて検討した。検討の対象としては、ランダムドット、ペンローズ、GAの3つとした。GAに関しては、アフィン変換に対してロバストな性質を持つグラフ構造を持ったパターンを、遺伝的アルゴリズムで最適化可能な、グレイコーディングされた点の座標の集合とドロネー手法によるエッジ生成により定義した。

作成した各パターンをプロジェクタ画像に用いたときの、本手法における形状計測システム上での性能を、定量的に評価可能なシステムを作成した。さらに実データによる実験を行った。シミュレーション環境と実環境における、作成したパターンとペンローズパターンとの比較により、作成した評価システムを用いることで、シミュレーションにおける問題点が明らかとなった。これは、パターン投影とその撮影という2つの光学系をシミュレートする困難さに起因するものであり、最適パターンを推定する際にはこの問題を解消する必要があると考えられる。

今後の課題としては、今回の実験で明らかとなった、シミュレーション環境と実環境の違いを考慮した、新しいシミュレーション手法の確立が挙げられる。また、まず現在のパターン作成に関する計算の軽量化が挙げられる。さらに、本研究で用いた評価関数により、アフィンユニークという特徴に特化した投影パターンの作成を行ったが、オクルージョンやノイズに対するロバスト性などを評価する関数を加えて適用することで、様々な外乱に強いパターンも作成していきたい。

謝辞 本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) ICT イノベーション創出型研究開発 (101710002)、文部科学省科学研究費補助金 (21200002) および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030) の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Microsoft: Xbox 360 Kinect (2010) <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [2] Canesta, Inc.: CanestaVision EP Development Kit (2010) <http://www.canesta.com/devkit.htm>.
- [3] Mesa Imaging AG.: SwissRanger SR-4000 (2011) <http://www.swissranger.ch/index.php>.
- [4] Salvi, J., Batlle, J., Mouaddib, E.M.: A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement. *Pattern Recognition* **19** (1998) 1055–1065
- [5] Rusinkiewicz, S., Hall-Holt, O., Levoy, M.: Real-time 3D model acquisition. In: *Proc. SIGGRAPH*. (2002) 438–446
- [6] Weise, T., Leibe, B., Gool, L.V.: Fast 3D scanning with automatic motion compensation. In: *CVPR*. (2007)
- [7] Narasimhan, S.G., Koppal, S.J., Yamazaki, S.: Temporal dithering of illumination for fast active vision. In: *Proc. European Conference on Computer Vision*. (2008) 830–844
- [8] Tajima, J., Iwakawa, M.: 3-D data acquisition by rainbow range finder. In: *ICPR*. (1990) 309–313
- [9] Zhang, S., Huang, P.: High-resolution, real-time 3D shape acquisition. In: *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*. (2004) 28
- [10] Maruyama, M., Abe, S.: Range sensing by projecting multiple slits with random cuts. In: *SPIE Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision IV*. Volume 1194. (1989) 216–224
- [11] Artec: United States Patent Application 2009005924 (2007j)
- [12] Vuytsteke, P., Oosterlinck, A.: Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern. *IEEE Trans. on PAMI* **12** (1990) 148–164
- [13] Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R., Yagi, Y.: Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern. In: *CVPR*. (2008) 1–8
- [14] Sagawa, R., Ota, Y., Yagi, Y., Furukawa, R., Asada, N., Kawasaki, H.: Dense 3d reconstruction method using a single pattern for fast moving object. In: *ICCV*. (2009)
- [15] Ulusoy, A.O., Calakli, F., Taubin, G.: One-shot scanning using de bruijn spaced grids. In: *The 7th IEEE Conf. 3DIM*. (2009) 1786–1792
- [16] Felzenszwalb, P., Huttenlocher, D.: Efficient belief propagation for early vision. *IJCV* **70** (2006) 41–54
- [17] Kawasaki, H., Masuyama, H., Sagawa, R., Furukawa, R.: Single colour one-shot scan using modified penrose tiling pattern. *Computer Vision, IET* **7** (2013) 293–301
- [18] Persistence of Vision Pty. Ltd.: POV-Ray (2004)
- [19] : The Stanford 3D Scanning Repository. <http://www-graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/> (2012)