

テクスチャの影響の軽減によるロバストな 多視点プロジェクタ・カメラを用いた全周形状計測システム

沖 佳憲¹ THIBAUT Yohan¹ 赤木 康宏¹ 古川 亮² 佐川 立昌³ 川崎 洋¹

概要：近年、物体の全周 3 次元形状を取得するための研究が数多く行われている。その中でも、プロジェクタ・カメラシステムを用いたワンショット計測が、人間などの動く物体を高精度に計測できることから注目されている。しかし、ワンショット方式では、投影パターンが計測対象のテクスチャや環境光の影響を受けやすいため、結果が不安定になるという問題がある。そこで我々は、パターンが投影された画像からテクスチャを推定する手法を用いて、その影響を除去する手法を提案する。同時に、全周計測の際に必須となる、背景領域の検出を高精度に実現する手法も提案する。多視点のカメラ・プロジェクタシステムを用いた 3 次元計測手法に提案手法を適用することで、テクスチャや環境光の影響を受けにくいロバストな動物体の全周形状の取得が実現できる。

キーワード：アクティブ形状計測，プロジェクタ・カメラ系，全周形状計測，多視点画像再構成

1. はじめに

近年、テレビや映画、ゲームなど様々なコンテンツにおいて 3 次元情報が利用されている。それに伴い、物体の全周 3 次元形状の取得技術への関心が高まっており、これまでに多くの研究が行われている。

代表的な方法としては、動的な物体の形状に適した Shape from Silhouette[2] や、静的シーンでの復元に対し非常に有効な Multi-View Stereo(MVS) 法 [1] がある。これらパッシブ手法に対して、安定性や精度の点からレーザやプロジェクタを用いて構造化光を投影し、この構造化光(パターン)をカメラで撮影することで 3 次元形状計測を行う、アクティブ計測手法が実用性の点から注目されている [10]。しかしアクティブ計測手法は、全周形状取得のため、対象物体を多くの光源で照らすため、光源どうしの干渉や、計測対象物の色や材質(テクスチャ)による投影光の吸収や反射が発生するという問題がある。

そこで本研究では、計測対象物からテクスチャ情報を取得することで、この問題を緩和する方法を提案する。具体的には、計測対象物に構造化光を投影した画像からテクス

チャを推定する手法 [7] を用いてテクスチャ情報を取得し、このテクスチャ情報を用いて構造化光の減衰などを補正することにより、上記問題を解消する。

また、構造化光を投影する方法の別の問題点として、撮影対象物以外に投影される光が、復元の際に悪影響を及ぼすことがある。例えば、シルエットを用いた形状復元においては、背景領域を正確に検出する必要があるが、パターンで投影されているとこれが困難になる。この問題を解決するため、構造化光の投影されている背景データベースを用意することで、高精度な分離を実現する手法を提案する。

上記提案手法を組み合わせると、従来手法では環境光の影響により計測対象物に投影されたパターン検出が不安定になることから、暗室でしか行えなかった計測が、環境光(例えば蛍光灯など)のある環境下でも行えるようになり、計測の利便性が格段に向上する。本研究では、実際に 6 台のカメラと 6 台のプロジェクタを用いて、明るい室内で計測実験を行い、良好な結果を得た。

2. 関連研究

3 次元形状を計測する代表的な手法として、アクティブ計測手法および、カメラ間の画像のみを用いたパッシブ計測手法がある。パッシブ計測手法の代表としては、シルエットを用いる Shape from Silhouette[2] や MVS 法 [1] がある。これらの手法では、同期させた複数台のカメラのみで計測が行えるためテクスチャの取得は容易であり、また、

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科
Kagoshima University

² 広島市立大学大学院 情報科学研究科
Hiroshima City University

³ 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

計測対象物の全周形状の取得が可能であるという利点がある。しかし、パッシブ計測手法は一般的に、形状計測の密度や安定性においてアクティブ計測手法に劣るという問題がある。

一方、アクティブ計測手法では、Time of flight(TOF) 計測、時間的コード化法 [9] や空間的コード化法 [8] などがある。TOF 計測手法は高精度であり 3 次元形状の取得にしばしば用いられる。しかし、この手法は各画素ごとに発射したレーザー光が帰ってくるまでの時間を計測することで 3 次元計測を行うため、計測に時間がかかるという問題があり、動的物体の形状計測には不向きである。時間的コード化法も複数の投影パターンを順次投影し撮影する必要性があるためレンジセンサと同様に動的物体の計測には向かない。

一方で、空間的コード化法は静的な一つのパターンのみの投影で形状の計測が可能であり、動物体の計測に適している。そこで、Kinect[3] のようにリアルタイムに 3 次元形状計測を行うことの出来る装置などが開発されている。Kinect はパターンの投影に赤外光源を用いているので、対象物体のテクスチャの影響を受けにくい、赤外光源の波長を複数用いることが容易ではないために、複数台での撮影時に干渉が発生するという問題があり、全周形状のリアルタイム撮影は実現が難しい。

動的物体の全周 3 次元計測を可能にする手法としては、複数台のカメラ・プロジェクタを用いてグリッド状のパターンを投影する手法が提案されている [10]。この手法を用いることで動的物体の全周の 3 次元形状を取得することが可能である。しかし、計測対象物のテクスチャに色がある場合、投影パターンの反射光の色に影響を及ぼすため、撮影した画像から投影パターンが認識できないという問題が発生する。そこで本研究では、このようにパターンの色を用いて形状復元する手法における課題である、計測対象物のテクスチャに起因するパターン光の変化を、物体表面テクスチャを用いて補正する手法を提案する。

物体表面テクスチャの取得手法としては、時間的コード化法を用いる方法や、赤外などの光源を用いる手法などがある。時間的コード化法は計測に時間がかかることや、複数台のカメラ・プロジェクタシステムの同期をとることの困難さから実用は難しい。これに対して、近赤外光を用いて可視光カメラでテクスチャを撮影し、近赤外カメラで構造化光パターンを計測する手法がある。阪下らは、近赤外カメラ・プロジェクタを用いたグリッドパターンの投影によるアクティブ計測を行っている [5]。Kinect も同様に近赤外を用いて形状計測とテクスチャ取得を同時に実現している [3]。この手法を用いればテクスチャが容易に撮影可能であるものの、光源として固定パターンを使用しているためキャリブレーションが難しいという問題がある。また、複数台での使用を考えると、使用する全てのプロジェ

クタの波長を全て変えなくてはならないなどシステムの現実的な構築に課題がある。一方で、可視光パターンを使って計測し、後処理で対象物のテクスチャを復元する手法がある [7]。この手法では、あらかじめ撮影したデータベース画像を用いて、対象物テクスチャの推定を行うため、特別な計測機器等が必要なく、既存手法でもすぐに利用可能である。そこで、本研究ではこの手法を使って物体表面テクスチャを取得する。

3. 提案手法の概要

カメラ・プロジェクタシステムによる 3 次元形状計測は、(1) システムの校正、(2) パターン投影画像の撮影、(3) 撮影画像からのパターン認識による復元、の 3 段階の処理により実現される。提案手法は、(2) の後に撮影画像の品質を向上させることで、計測精度を向上させる手法である。

提案手法ではまず、入力として (a) パターン投影前の対象物の画像、(b) パターン投影後の画像、および (c) 対象物の無い状態で計測環境にパターンを投影した背景画像の 3 種の画像を撮影する (図 1(a)(b)(c))。このうち (a) および (b) を用いて、Yohan らが提案する対象物のテクスチャを推定する手法 [7] を適用することで、対象物のテクスチャを取得する。提案手法では、このテクスチャ情報を用いて (b) の画像中のパターンに対するテクスチャの影響を軽減することで、パターンの情報を強調した画像 (d) を生成する (第 4 節)。

また、動物体の撮影時の問題点である、動的に変化する背景領域を効率よく高精度に除去する手法を提案する (第 5 節)。この手法では、テクスチャ復元と同様に、撮影画像中にある投影パターンをデータベース化することで、背景に映り込んだパターンを発見し、背景領域と前景領域を分離する手法である (図 1(e))。

以上の処理により、撮影画像中のパターンを強調し、かつ不要な背景領域を除去した画像を生成することができる (図 1(f))。提案手法を計測システムに組み込むことで、蛍光灯下のような明るい室内での安定した計測が実現できる。

3.1 複数台のカメラ・プロジェクタシステムによる 3 次元形状取得システム

本節では、3 次元形状計測システムの構成について、その概要を説明する。

本論文では清田らが提案している複数台のカメラ・プロジェクタを用いた 3 次元形状取得システム [10] を用いて動的物体の計測を行う。この手法では、カメラとプロジェクタを 6 台ずつ、約 30 度ずつ交互に計測対象物を 360 度囲むように配置する。システムの外観を図 2(a) に示す。計測システムでは、複数のプロジェクタからは図 2(b) のような平行な直線状のパターンが投影される。計測対象物に投

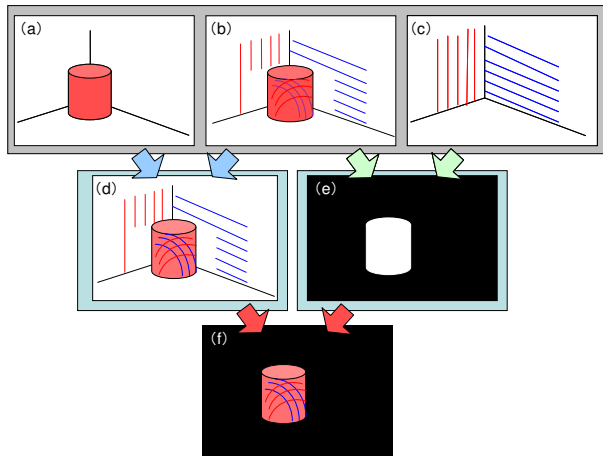


図 1 提案手法概要

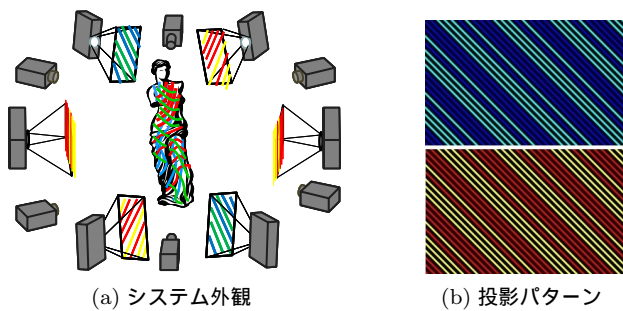


図 2 全周囲計測システム.

影された直線パターンはカメラ画像では曲線として観測される(図 3)．観測される曲線から 3 次元形状を復元するには，画像中の各曲線がどのプロジェクタから投影された，どのパターンであるかという情報が必要になる．本計測システムでは観測された曲線と投影パターンの対応付けのために曲線同士が作り出す交点から拘束式を導き出し，拘束式を満たす対応について計算を行う．従って，撮影画像中から投影されたパターンをいかに正確に検出できるかが，復元精度および復元領域の大きさを左右する．

また，投影するパターン(図 2(b))には色を用いたダブルラインによる周期的な ID が振られており，線の誤検出が起こりにくいようなパターン検出アルゴリズムとなっているが，逆にテクスチャの色の影響を受けやすいという問題が生じる [11]．提案手法による色の補正により，この問題を解消することができる．

3.2 テクスチャ画像の取得

本節では，計測対象物のテクスチャの取得手法として用いている Yohan らの提案している，物体表面のテクスチャ推定手法について，図 4 を用いてその概要を説明する [7]．まず，初めにアクティブ計測用の構造化パターンを投影した計測対象物を撮影し(パターン投影画像)，同姿勢状態の計測対象物を構造化パターンを投影せずに計測対象物のテクスチャを撮影する(テクスチャ画像)．次にこれらの画像

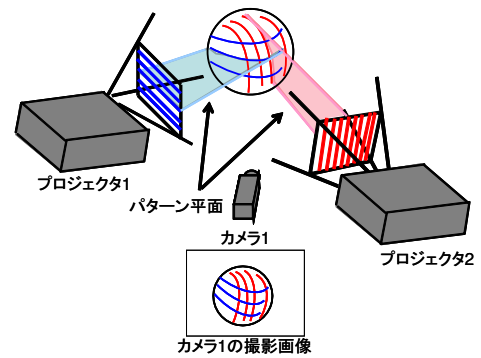


図 3 カメラで観測される曲面とパターン平面

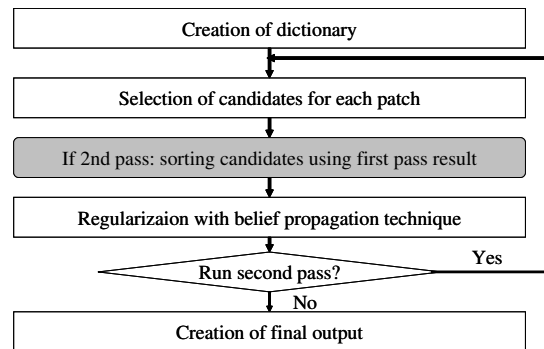


図 4 テクスチャリカバリ手法の流れ

のペアを用いてデータベースの構築を行う．計測した画像を，指定したパッチサイズ毎のパッチに切り分け，パターン投影画像とテクスチャ画像間を対応させてデータベースとして蓄積していく．この時，暗いパッチを除去などの処理を行いデータベースを補正・高精度化する．テクスチャ復元の際は，入力画像をパッチに分割し，データベース中のパターン投影画像とマッチングを行い，類似度の高いパッチを複数，テクスチャ候補として取得する．その候補の中から最も適したパッチを選択する．具体的には，候補パッチとその周辺パッチとの類似度を計算し，これをレギュラリゼーション項として，Belief Propagation(BP)により最良パッチを推定する．テクスチャ推定の高速化と精度を向上のために，coarse to fine で異なるパッチサイズでの階層的処理を行っている．

4. テクスチャを用いた撮影画像の補正

本節では，計測対象物に対して投影する構造化光パターン(以下，パターン)が，計測対象物のテクスチャから受ける影響を軽減する手法を提案する．対象物のテクスチャによりパターンが影響を受けた画像例，およびその状況で 3 次元復元を行った例を図 5 および図 6 に示す．このように，パターンがテクスチャの影響を受けた結果，形状が復元される領域が大幅に減少する(図 6 赤丸)．そこで，3.2 節で述べた手法により取得したテクスチャ情報を用いて，撮影画像中のパターンの補正を行う．

具体的には，3.2 節で述べた手法で復元した計測対象物

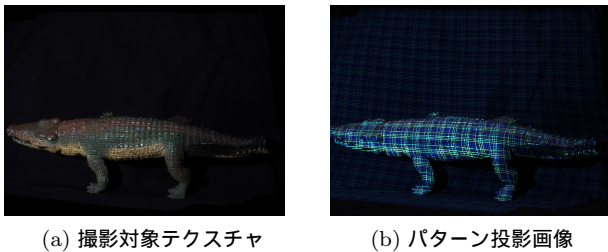


図 5 撮影画像.

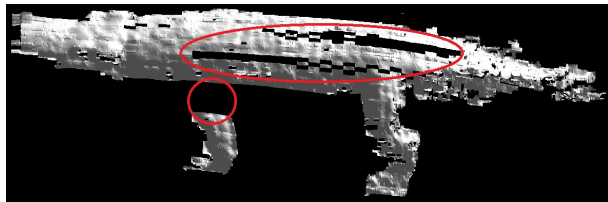


図 6 パターン投影画像の復元結果.

のテクスチャ情報を用いて、計測時に取得した撮影画像の各ピクセルの補正を次の式により行う。

$$O(i, j) = \frac{P}{T(i, j)} C(i, j) \quad (1)$$

ここで、 $O(i, j)$ は補正後の RGB 値、 P はテクスチャリカバリ手法時にテクスチャ画像を撮るときに投影したパターンの RGB 値、 $T(i, j)$ は推定されたテクスチャの RGB 値、 $C(i, j)$ は撮影画像の RGB 値、 i, j は画像中の各ピクセルを表す。提案手法は線形変換のため、SN 比自体は改善されないが、以下の 2 つの理由より検出精度の向上が期待できる。

まず 1 つ目は、投影パターンの線の検出精度の向上が期待できる。本手法で用いるパターン検出アルゴリズムは、撮影画像の全てのピクセルを輝度値の導関数に基づき、ポジティブ (P)、ネガティブ (N)、変化なし (0) の 3 つのラベルに区別し、P から N もしくは N から P の変化をするところをサブピクセル精度で、線として検出する [11]。従来手法ではテクスチャの暗い領域では、十分な輝度値が得られないため、本来、P か N に分類されるべきピクセルが、0 にラベリングされてしまい、線が検出されないことがあった。これに対して、提案手法ではテクスチャによる補正により、本来のパターン輝度に定数倍されるため、十分な輝度値の変化が観測され、線の検出が可能となる。ただし、これにより、ノイズが増幅されるという副作用も生じるが、後段の最適化処理によりノイズによる影響はある程度解消される。

2 つ目は、検出したラインの ID づけの精度向上が期待できる。本手法では、ラインの誤検出などを防ぐため、投影パターンの各線にデブルーイン系列に基づく ID を割り振る [11]。これを実現するため、パターンに色数 2、ウィンドウサイズ 3 のデブルーイン系列を使用している。このため、計測対象にテクスチャがある場合、計測対象表面に投影したパターンの色情報が誤って観測されることが起き、

ID のデコードに失敗することがある。提案手法では色の補正により正しいデコードが可能となるため、従来手法では失敗していたようなシーンでも、正しい ID 割り当てが可能となる。

5. 高精度なシルエット作成

シルエット作成の一般的な方法として背景画像のみをあらかじめ撮影しておき、計測対象物がある状態の画像と差分を取る方法がある。本研究では 6 台のプロジェクタから同時にパターンを投影し、動物体を計測しているため、単純な背景画像のみでは、計測対象物によって作られる影が時間と共に変化し、正しいシルエットが取得できない (図 7)。この問題を解決するために、新たなシルエット作成手法の提案を行う。提案するシルエット作成のアルゴリズムは図 8 に示す 5 つの工程からなる。

まず初めに各プロジェクタ 1 台ずつからパターンを投影した画像を撮影しておく。本システムの場合、6 台のプロジェクタを使用するので 6 枚の画像を撮影する (図 9)。次に、撮影した画像 6 枚を全ての組み合わせで加算合成した画像を生成する (6! 通りの組み合わせがあるので 63 枚の背景画像候補を生成する)。合成した画像の例を図 10 に示す。その後、入力画像と先ほど作成した背景画像 63 枚に対し、パッチ領域ごとに ZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) による類似度を計算する。

このパッチサイズは撮影画像上で観測される投影しているパターン 1 本分の幅とほぼ一致させる。これは、パッチサイズがこれより小さいとパッチ中で十分な特徴が得られにくい一方で、パッチサイズが大きすぎるとオクルージョン部分で適切な処理がされないためである。実験では 5×5 のパッチサイズを用いた。ZNCC を用いた理由は、テンプレート及び画像の輝度値に明るさの変動があっても安定的に類似度を計算することができるためである。ZNCC の計算式を (2) に示す。

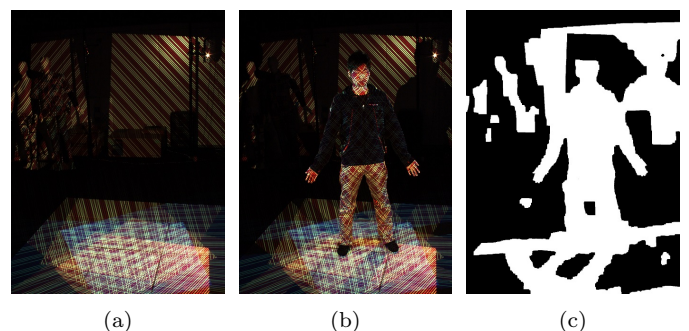


図 7 シルエット生成に失敗する例

(a) 背景画像, (b) 入力画像, (c) 生成シルエット

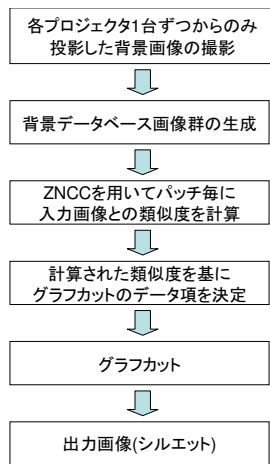


図 8 シルエット作成アルゴリズム

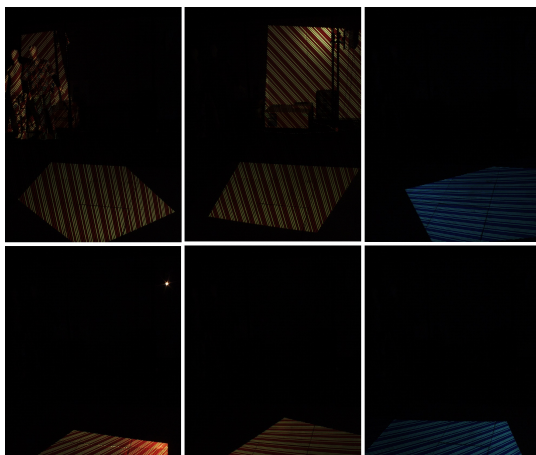


図 9 初期背景画像

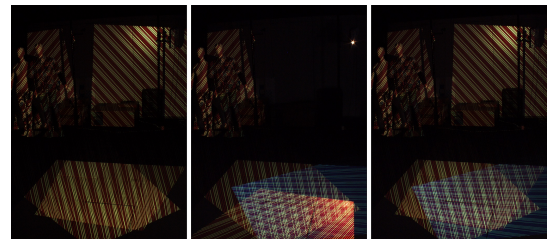
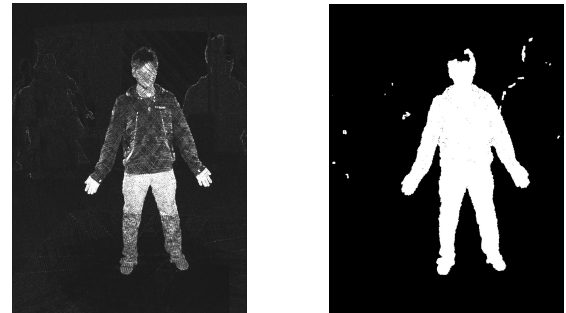


図 10 作成した背景画像例



(a) ZNCC の結果のデータ項 (b) 作成したシルエット

図 11 提案手法のシルエット画像

6. 実験

6.1 シミュレーション実験

テクスチャ復元結果を用いたパターン補正の有効性の検証のため POV-ray(Persistence of Vision Ray-Tracer)[4]を使ってシミュレーションデータを作り、予備実験を行った。その結果を図 12 に示す。この結果から、計測対象上のパターンの強調に成功していることが検証できた。しかし、補正が必要ない領域(主に背景にあたる領域)でも補正が行われてしまい、従来では背景として計測できなかった領域にノイズ状の形状を復元してしまうという問題が生じた。実際の計測においては、この背景部分の問題は、効率

$$R_{ZNCC} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} ((I(i,j) - \bar{I})(T(i,j) - \bar{T}))}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - \bar{I})^2 \times \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (T(i,j) - \bar{T})^2}} \quad (2)$$

式(2)で得られる、背景画像との類似度が高い領域は、背景画像のどこかに似た領域が存在したということを示している。よって、この類似度をグラフカットのデータ項として使用することで、背景領域と前景領域を分離する。以上の手法で作成したシルエット画像例を図 11 に示す。

提案手法のシルエット作成法を用いることで、計測対象の足元や壁に映った影の影響による前景推定の失敗が減っているのを確認できる。しかし、壁面などにおいて一部、誤検出が発生した。これは影の境界部分等において ZNCC が低い値をとるためと考えられる。これはウィンドウベースのステレオマッチにおけるオクルージョン部分で発生する問題と同等であり、今後アダプティブウィンドウの利用など、アルゴリズムの改良が必要と考えられる。

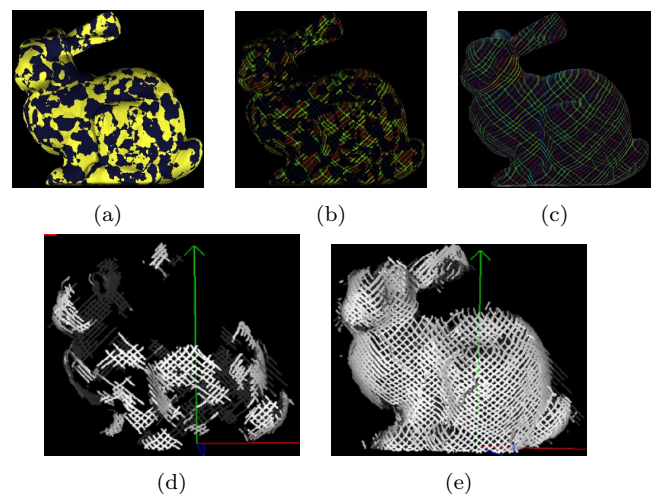


図 12 テクスチャの色情報を用いた補正結果 (a) テクスチャ画像, (b) 構造化光パターン投影後, (c) 補正後, (d)(b) の復元結果, (e)(c) の復元結果

的な背景作成手法により解消される。

6.2 実環境実験環境

本論文では6台のカメラと6台のプロジェクタを使用して実験を行った。カメラはPoint Grey社製1600×1200ピクセル解像度のものを使用し、プロジェクタはEPSON社製のWXGA解像度の液晶ビデオプロジェクタを用いた。6台のカメラは全て同期しており、20fpsで撮影を行った。

キャリブレーションは、複数のカメラ、プロジェクタのパラメータを同時に推定するために、バンドル調整法Bundler[6]に基づいて行った。

本実験に使用したカメラはRawデータで保存することにより、10ビットまで実用的な情報を取得できる。よって撮影画像に対して使用する8ビットの位置を変えることで露光の異なる画像の取得が可能である。作成した異なる露光の画像からHDR画像を作成し、その画像を用いて復元を行った。HDR画像を使用することで、画像中でのダイナミックレンジが広がり、暗い領域と明るい領域の両方が含まれる計測対象物体の計測を可能にする。

復元結果の精度評価には各プロジェクタからグレイコードを投影することで得られる形状を正解形状として、RMSEと復元された点群数を用いる。実験に使用した計測対象物体を図13に示す。使用する計測対象物体には、パッチワーク状の様々な色のついたテクスチャを用いる。



図13 計測対象物体

6.3 背景除去実験

本実験で使用した計測対象物体や人物に対し、我々が提案するシルエット作成手法を適応した結果を図14に示す。提案手法により、壁面や床などに多くのパターンや、対象物体による影がある複雑なシーンにも関わらず、それらほとんどが正しく背景として認識・除去されていることが確認できる。ただし、頭部の領域で失敗しているのが確認された(図14(3)(4)(5))。これはパターン投影をしていない壁と頭髪がどちらも暗かったため、ZNCCによる類似度が



(a) 入力画像



(b) 作成したシルエット画像

(1) 例1



(a) 入力画像

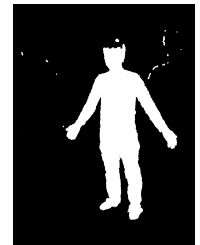


(b) 作成したシルエット画像

(2) 例2



(a) 入力画像



(b) 作成したシルエット画像

(3) 例3



(a) 入力画像



(b) 作成したシルエット画像

(4) 例4



(a) 入力画像



(b) 作成したシルエット画像

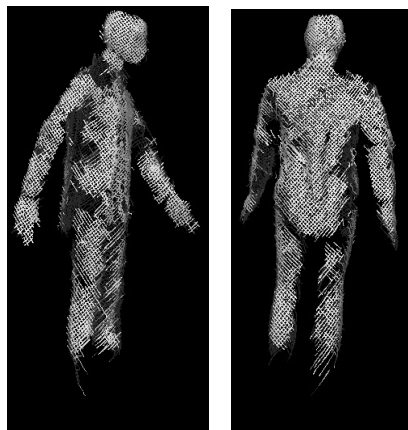
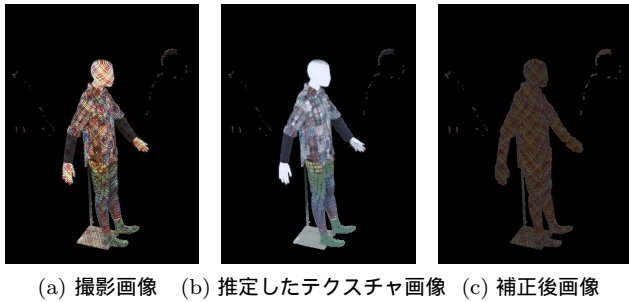
(5) 例5

図14 提案手法のシルエット画像

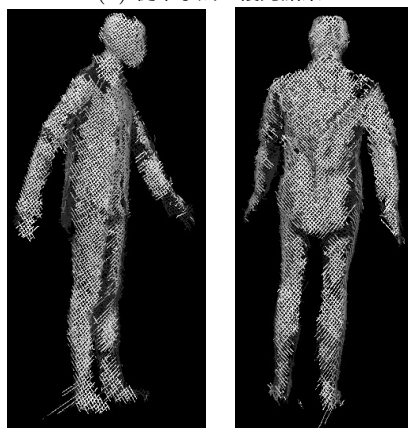
高くなったことが原因と考えられる。このような暗い表面テクスチャを持つ対象については、よりレンジの広いHDR画像を使うなどの対策を行う予定である。

6.4 照明消灯時の復元

まず、環境光の影響を受けないように照明の電源を落とした状態で実験を行った。撮影画像、テクスチャ復元手法で推定したテクスチャ画像、提案手法の用いて補正を行った後の画像、それぞれの画像に対して3次元形状復元を行った結果を図15に示す。また、グレイコードで計測した正解形状とのRMSE、復元された点群数を表に示す。実験結果より、提案手法により復元領域が大幅に回復したことが確認できる。



(d) 従来手法の復元結果



(e) 提案手法の復元結果

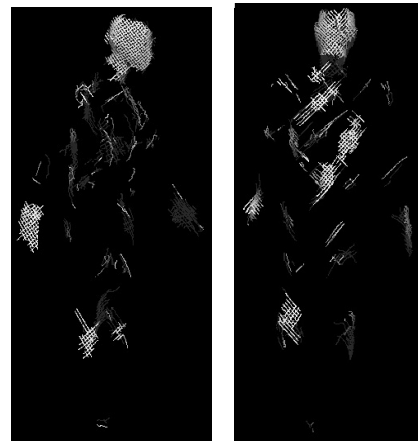
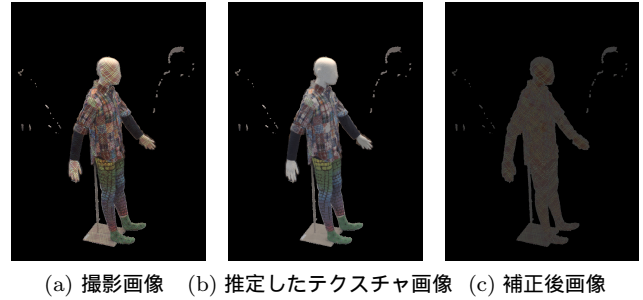
図15 消灯時復元結果

表1 消灯時復元評価

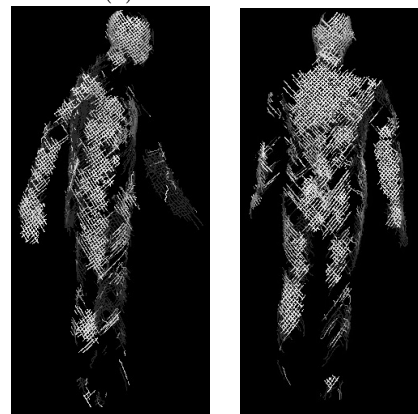
	$RMSE(m)$	$Number\ of\ points$
従来手法	0.002738	136,871
提案手法	0.002747	176,406

6.5 照明点灯時の復元

最後に、本手法の有効性を検証するため、照明が点灯した状態での計測を行った。照明点灯時は照明の影響により、プロジェクタからの投影パターンの観測が難しくなる。その状態でテクスチャを用いた補正を行うことで投影パターンの強調を行い、3次元形状の復元を行った。その結果の3次元形状の様子を図16に、精度評価の数値結果を表2に示す。実験結果より、提案手法により復元領域が大幅に回復し、精度も向上していることが分かる。



(d) 従来手法の復元結果



(e) 提案手法の復元結果

図16 点灯時復元結果

表2 点灯時復元評価

	$RMSE(m)$	$Number\ of\ points$
従来手法	0.005399	30,225
提案手法	0.003337	81,209

6.6 考察

実験結果より、テクスチャ情報を用いて撮影画像の補正を行うことで復元される点群数が照明の消灯時、点灯時どちらにおいても増えていることを確認した。しかし、消灯時においてはRMSEに関しては単純に向上しているとは言えない。これは、画像の補正方法が単純な線形補正であることから、ライン検出時に逆に細かいノイズが発生してしまっていることが理由として考えられる。このようなノイズの影響を受けにくい補正アルゴリズムを今後検討する必要がある。また、照明の点灯時の復元結果で復元に失敗している領域が多々見られた。この原因として以下の2つが考えられる。1つ目は、テクスチャの色情報に対し線形変換を行っているため、消灯時と同様、ノイズの影響を受けたためと考えられる。2つ目は、テクスチャ推定の精度が挙げられる。本手法で用いたテクスチャ復元手法は完全なテクスチャ画像が得られるわけではない。このため、デプスIDの推定も不安定となる。より高精度なテクスチャ復元が今後の課題である。

7. おわりに

本論文では、計測対象物のテクスチャ情報を用いることで、テクスチャや環境光の影響を受けにくいロバストな動物体の全周形状の取得手法の提案を行った。この手法を用いることで構造化光パターンがテクスチャから受ける影響を軽減することができ、形状の復元領域を拡大することができる。また、照明など環境光があり投影パターンの観測が難しいシーンにおいても復元領域を拡大が可能である。さらに、プロジェクタ・カメラを用いた全周形状計測時に使用するシルエット画像を作成するための手法の提案をした。これにより、プロジェクタを使用することによって発生する計測対象物の影などにロバストなシルエットを作成することができるようになった。今後の課題としては、シルエット生成の高精度化や、ノイズの影響の除去、高精度なテクスチャ復元などが挙げられる。

8. 謝辞

本研究の一部は、内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム(LR030)、および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)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] Furukawa, Y. and Ponce, J.: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, *CVPR* (2007).
- [2] Laurentini, A.: The visual hull concept for silhouette-based image understanding, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 16, No. 2, pp. 150–162 (1994).

- [3] Microsoft: Xbox 360 Kinect (2010). <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [4] Persistence of Vision Pty. Ltd.: POV-Ray (2004).
- [5] Sakashita, K., Sagawa, R., Furukawa, R., Kawasaki, H. and Yagi, Y.: A System for Capturing Textured 3D Shapes based on One-shot Grid Pattern with Multi-band Camera and Infrared Projector, *International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT)* (2011).
- [6] Snavely, N., Seitz, S. M. and Szeliski, R.: Photo Tourism: Exploring image collections in 3D, *ACM SIGGRAPH* (2006).
- [7] Thibault, Y., Kawasaki, H., Sagawa, R. and and, R. F.: Exemplar based texture recovery technique for active one shot scan, *Proceedings of MVA2013, The 13th IAPR Conference on Machine Vision Applications*, pp. 331–334 (2013).
- [8] Vuytsteke, P. and Oosterlinck, A.: Range Image Acquisition with a Single Binary-Encoded Light Pattern, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 12, No. 2, pp. 148–164 (1990).
- [9] Young, M., Beeson, E., Davis, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R.: Viewpoint-Coded Structured Light, *CVPR* (2007).
- [10] 清田祥太, 川崎 洋, 古川 亮, 佐川立昌: 多視点プロジェクタ・カメラシステムによる動的シーンの再構成手法, 第14回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011), pp. 488–495 (2011).
- [11] 大田雄也, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, 八木康史, 浅田尚紀: Belief-Propagationによる高密度なグリッドパターン検出およびデプスID系列を用いた高速動物体のロバストな3次元計測手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J93-D, No. 8, pp. 1544–1554 (2010).