

三色光源下における動物体の高精度かつ詳細な三次元形状再現

種田 大地[†] 須田 洋文 前島 謙宣 森島 繁生

早稲田大学 理工学術院 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

E-mail: [†]aim-to-novel@akane.waseda.jp

あらまし 近年、人物など動く物体の三次元形状復元の研究が盛んである。しかし物体が動くことによって生じる皺などの細部を、全周囲に渡って動的に復元することは現状困難である。そこで本研究では、人物が動いた際の衣服の動的な三次元形状変化を 360 度全周囲で高精度に再現する手法を提案する。まず、対象物体の基本となる概形を得るため、初期状態の姿勢におけるレンジスキャンデータを取得し、これを基本形状とする。次に、動画像のフレームごとに、被写体の形状に合わせて基本形状を変形させる。さらに、三色光の照射により作成した反射モデルを用いて対象物体の法線ベクトルを推定することで、変形された概形に皺などの微細な形状を法線変化として付け加え、物体全周囲の動的立体形状を細部まで高精度に再現することを実現した。

キーワード 三次元形状復元, Shape From Shading, 色光源, レンジスキャンデータ, 形状変形, 多視点画像

1. はじめに

CG コンテンツ制作におけるキャラクタ生成や伝統芸能等のデジタルアーカイビングを目的として、物体の動的な三次元形状を計測し、CG で忠実に再現できる技術が求められている。この解決策の一つとして、カメラを用いて対象物体を撮影し、その画像解析によって対象の三次元形状を復元するビジョンベースの三次元復元手法が数々提案されている([1], [2], [3], [4], [5], [6], [10], [11])。これらの手法は、対象物体の形状や動作をそのまま取得することができるという長所がある。しかしながら、計測ノイズが多く、コンテンツ制作に利用できるほど再現精度は高くないのが現状である。一方、光学モーションキャプチャシステムは映画制作現場などで一般的に用いられているが、マーカの高精度な追跡と、キャラクタのボーンおよび関節位置の推定が主体であり、物体の動作によって生じる皺など、物体表面の微細な構造再現は原理的に不可能である。そこで、本研究では両者の要素を生かし、動物体の高精細な三次元モデリング手法として、人物が動いた際の衣服の動的な三次元形状変化を 360 度全周囲で高精度に再現する手法を提案する。

1.1. 関連研究

動物体の三次元形状復元手法は、様々なアプローチが提案されている。Aguilar ら[1]や、Vlasic ら[2]は、撮影対象である人間を複数台のカメラで多方向から同時に撮影した画像と、あらかじめレンジスキャナを用い用意した被写体の三次元形状テンプレートを用いて、被写体の動的な三次元形状の復元を行っている。これらは、撮影画像の被写体部分を背景差分法でシルエット化し、各フレームについてそのシルエットの輪郭に一致するようにテンプレートを変形させていくという手法であるが、撮影画像に対してシルエットの輪郭部分の情報しか用いておらず、対象の概形の再現は実現しているが、服などに生じる皺などの細部構造までは再現出来ていな

い。Bradley ら[3]、Popa ら[4]は衣服に着目した動的な三次元形状の再現を実現している。画像から復元した衣服の概形に、画像処理で抽出した皺の形状を後処理で加えているが、抽出した皺の形状への適用が経験則となっており、実際の形状を復元できていない。Kawasaki ら[5]や、Narasimhan ら[6]は、プロジェクタを用いて対象にパターン光を投影することにより能動的に特徴点を与え、三角測量の原理を用いて動物体の三次元形状を復元している。これらの手法は、テクスチャのない物体に対して特に有効である。しかし、縞と縞の間など、特徴点を与えられなかった部分に関しては奥行き情報が得られないため、皺など微細形状まで再現することはできない。また、ノイズやオクルージョンに対しても非常に弱いという欠点が挙げられる。

他方で、精細な三次元形状を復元するために、陰影情報を用いた復元手法(Shape From Shading[7])が提案されている。なかでも、代表的な手法は照度差ステレオ法(Photometric Stereo)[8]である。この手法は、設定した照明環境とそれに対する対象物体の陰影情報から物体表面の法線ベクトルを推定することで、対象の微細な形状までを復元することが出来る。これを応用した手法として、Yu ら[9]は複数台のカメラを用い対象を多方向から撮影し、各カメラから得られた陰影情報を用いることで、対象の全体像を細部まで復元している。しかし、復元には様々な陰影からなる物体の撮影画像が必要なため、対象物体を固定した状態でカメラごとに照明を切り替えながら撮影を行わねばならず、連続的な撮影を行うことはできない。したがって陰影情報を用いる手法で動的な形状変化を伴う物体の全体像を再現することは困難である。

Hernández ら[10]は照度差ステレオ法による動物体の復元を可能にするため、波長の異なる 3 色(赤・青・緑)の照明を用いている。これによって、反射特性が一樣である物体に撮影対象が限られてはしまうが、それぞれの光

源色に対応した陰影情報を独立して取得することを可能とし、照度差ステレオ法の動物体への適応を実現している。しかし、この手法では再現領域が被写体の前面に限られてしまっている。それに対し、小林ら[11]は複数台のカメラと三色光の照明を用いた環境において対象物体の反射モデルを作成することにより、物体全周囲の形状再現を実現している。しかし、ベースとなる形状を視体積交差法によって求めているため、凹型の形状を再現するのは原理的に困難である。

Vlasic ら[12]はカメラのフレームレートに対応させ、照明を切り替えるという手法を提案している。しかし、高価な装置を必要とし、また、照明を高速かつ連続的に切り替える必要があることから、被験者に負担がかかることが推察される。

1.2. 提案手法

本研究では、人体が動作する際の、衣服の動的三次元形状変化を 360 度全周囲に渡って高精度に再現することを目的とする。そこで、再現対象の低周波成分を高精度な概形モデルの変形により取得し、高周波成分を[10]、[11]の様に三色光照射による陰影情報を用いて再現する。ただし、本研究は[10]と異なり物体全周囲を計測しており、また、[11]よりも高精度な再現を可能としている。

以下に本研究の概要を述べる。まず、対象物体の正確な概形を得るため、基本となる姿勢におけるレンジスキャンデータを取得し、これを基本形状とする。次に、動画の各フレームにおけるマーカの位置座標に基づき、

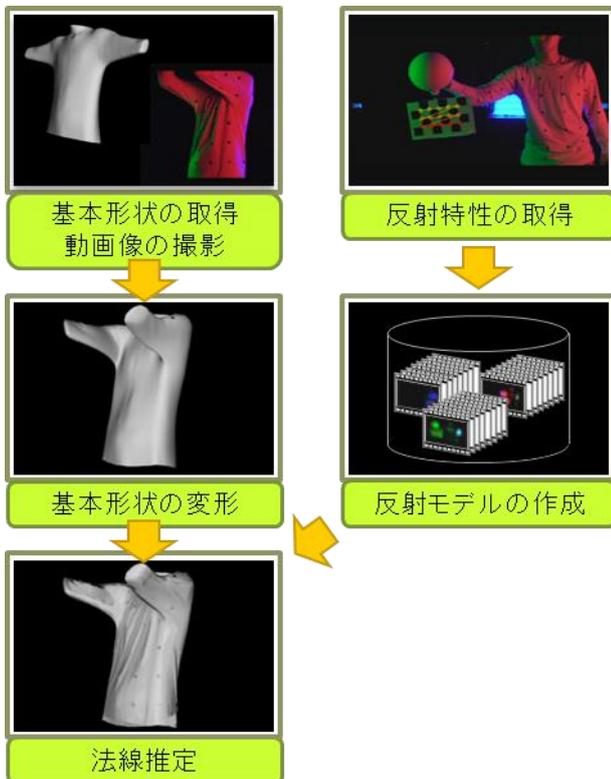


図1 フローチャート

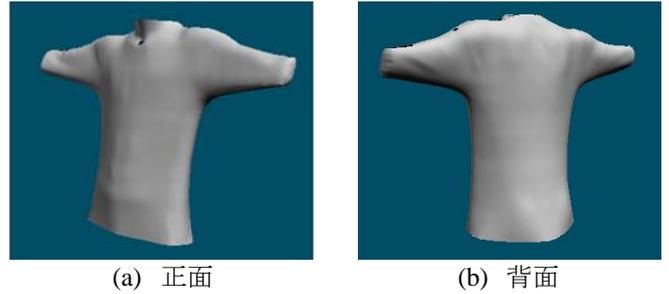


図2 レンジスキャナにより取得した基本形状

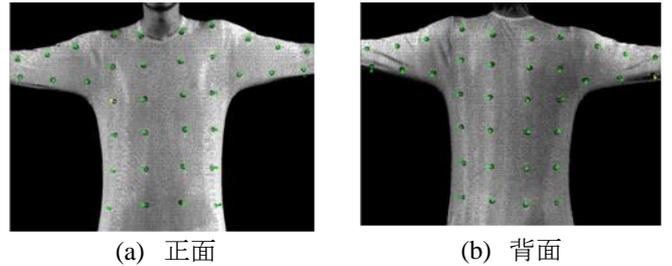


図3 マーカの貼付位置



図4 三色光源下における撮影画像

被写体の形状に合わせて基本形状を変形させる。さらに、作成した三色光反射モデルを用いて対象物体の法線ベクトルを推定することで、変形された概形に皺などの微細な形状を法線変化として付け加え、被写体全周囲の動的立体形状を細部まで高精度に再現する。図1に本研究のフローチャートを示す。

2. 対象の撮影

本手法の被写体は、キャリブレーション(4章で詳しく述べる)の半球に巻き付け可能な材質であり、三色光を反射する白色に近く、なおかつ反射特性が一樣である物体であれば特に種類を問わない。そこで、本実験の被写体には、特に形状変化が表れやすい白色のTシャツを採用する。

2.1. 基本形状の取得

まず、被写体の精細な概形を取得するため、Tシャツを着衣した状態をレーザーレンジスキャナにより撮影する。計測は浜松ホトニクス社製 C9036 Body Line Scanner を用いて行った。この時、5章で述べる法線推定において初期法線が誤差として影響しないように、できるだけ皺が付かないように注意して撮影を行う。初期法線とは、基本形状あるいは変形された基本形状の各頂点における

法線のことである。これにより取得した三次元形状を、本手法における基本形状(図2)と呼ぶ。ただし、多視点動画画像との対応を取るために、被写体の全周囲には直径1cm程度の円状のマーカを事前に貼付しておいた。撮影によって得たマーカの位置座標を図3に示す。

2.2. 動画像の撮影

次に、動画像の撮影を行う。以下、撮影環境について述べる。被写体の全周囲を撮影するために、被写体を囲むよう円周上にカメラを8台設置する。ここで撮影に用いたカメラは、SONY製HDR-SR12であり、画像サイズは720×420 pixel、フレームレートは29.97fpsである。また、カメラ間の時間的同期は、外部から信号を与えて設定することで、約1/30秒以下の精度で同期をとっている。カメラパラメータは、Zhang[13]の手法によりあらかじめ内部パラメータを求め、さらに構造が既知である物体を撮影することでワールド座標とイメージ座標の対応点を取り、外部パラメータを求めた。照明には赤、青、緑の3色の色光源を用いる。これにより複数照明の環境下において、撮影画像から各照明に対応した陰影情報をそれぞれ分離して取得することができる。照明はおおよそ等間隔に設置し、被写体に向けて照射する。また、外部光の入射や照明光の二次反射を極力避けるために、暗幕で撮影環境全体を覆った。以上の環境で撮影を行う。図4に撮影した動画像の1フレームを例として示す。

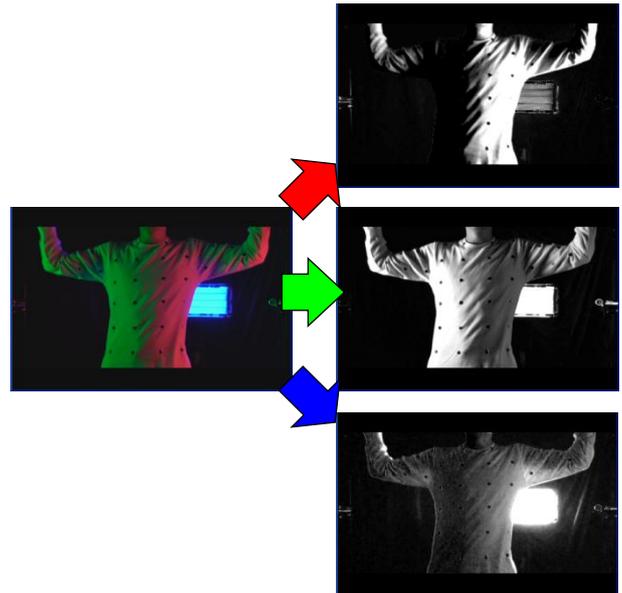


図6 RGB成分ごとに輝度値を分離し、コントラストと明度を上げた撮影画像

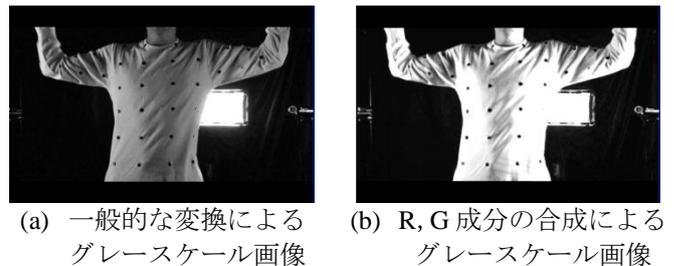


図7 グレースケール画像の比較

3. 基本形状の変形

基本形状を動画像に対応させ、各フレームにおける被写体の形状に合わせて基本形状を変形させる。各フレームの撮影画像からマーカを検出、さらに位置座標を推定し、その位置座標に基づき、基本形状を変形させていく。図5に各フレームにおける基本形状変形の流れを示す。

3.1. マーカの検出

3.1.1. グレースケール変換とノイズ除去

まず、マーカと被写体の領域の区別を明確にするために、撮影画像から輝度値をRGB成分ごとに分離した画像をグレースケールで表示し、それぞれの画像について明

度とコントラストを上げる(図6)。このように撮影画像の陰影を際立たせることで、3.1.2項で述べる輪郭検出において皺などの輪郭が検出されることが減少し、マーカの検出精度が向上する。

次に、分離した各成分のグレースケール画像を合成することで、後の二値化処理に用いるグレースケール画像を得る。この時、合成に用いる成分の画像をカメラによって選択する。本研究の撮影環境下において、任意のカメラから被写体を観測したとき、カメラから見える被写体の表面に当たっている光はおおよそ1色か2色であるため、RGB各成分のうち輝度値が大きい画像を利用する。これによって、一般的な変換によるグレースケール画像より、マーカと被写体の領域の区別が明確になる(図7)。

この時点で、背景差分法により事前に取得しておいた対象のシルエット画像を用いて、撮影画像のノイズを除去する。対象のシルエット領域より外にあるピクセルは全て背景と見なし、処理対象から除外する。

3.1.2. 二値化と輪郭検出

その後、グレースケール画像を二値化画像に変換する。この際、二値化の閾値はマーカの検出数が最大の時とし

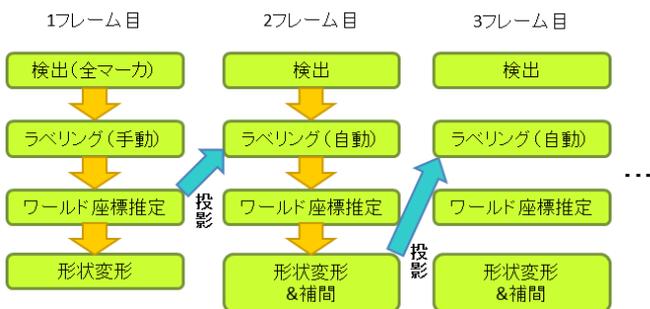


図5 基本形状変形の流れ

た. マーカの検出は, 二値化画像から輪郭を検出し, そのうち 2 つの制約を満たした輪郭について最小二乗推定によって楕円をフィッティングし, マーカとみなす. これを二値化閾値の値を変化させながら行い, 最もマーカの検出数が多いときの閾値を採用する. 輪郭に関する制約は以下の 2 つである.

- ① 輪郭を構成する総ピクセル数が一定の範囲に収まっているか
- ② 輪郭の円形度が一定値以上か

①については, 既知であるマーカの大きさから, 撮影画像上における輪郭の取りうる大きさの範囲を決定する. ②については, 輪郭の円形度の閾値を任意に指定する. 円形度 C は, 検出された輪郭の面積 S と周囲長 L を用いて式(1)で表され, 真円のときに最大値 1 をとる.

$$C = \frac{2\pi S}{L^2} \quad (1)$$

この 2 つの制約によって, 被写体の皺や撮影時のノイズをマーカとして誤検出することを軽減できる. そして, フィッティングした楕円の中心をマーカの位置座標とみなし, 検出されたマーカから, 画像上におけるマーカの二次元座標を得る. これらをマーカ候補とする.

3.2. マーカのラベリング

3.1 節で検出したマーカ候補にラベリングを行う. まず, 1 フレーム目のラベリングについて述べる. 各カメラにおける撮影画像上のマーカ候補を参照し, 全てのマーカについて手動で名前を与える. ここで, 3.3 節で述べるマーカの位置推定を行い, 1 フレーム目における全マーカのワールド座標を求め, 3.4 節で述べる形状変形によって基本形状を変形させておく. 次に, 2 フレーム目以降のラベリングについて述べる. まず, 前フレームのマーカのワールド座標を各カメラの画像上に投影する. このとき, カメラから見えるマーカのみを投影するため, カメラからマーカに向けた視線ベクトルとマーカ位置の形状表面の法線ベクトルの内積を取り, マーカがカメラから視認できるか判定する. 投影された前フレームのマーカの位置座標と, 3.1 節で検出した現フレームのマーカ候補の位置座標が最も近いものを同一マーカとみなす. この方法を用いて, 2 フレーム目以降は自動でマーカのラベリングを行う.

3.3. マーカの位置推定

画像上におけるマーカの位置座標から, ワールド座標における位置座標を推定する. 推定には三角測量の原理を用いる. 三角測量とは, 人間の目の様に, 二つの視点から見た画像上の物体の位置のずれ(視差)により, 物体の奥行きを求める方法である. これを 2 つのカメラから検出された同一マーカについて行うことにより, マーカ

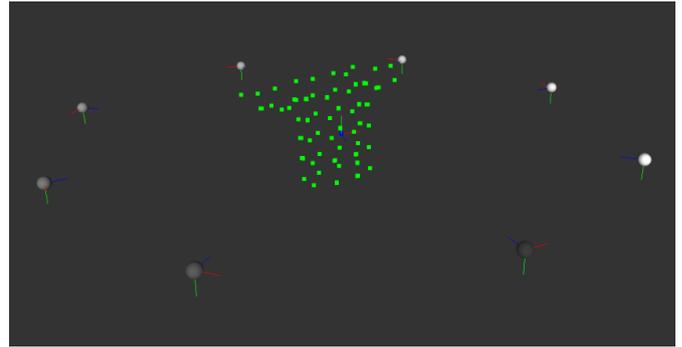


図 8 推定されたマーカのワールド座標

の三次元座標が求まる. ただし, ひとつのマーカが 3 台以上のカメラにおいて検出された場合は, 全てのカメラの組み合わせにおいて三角測量を行い, その結果の座標平均をとる. これを検出された全てのマーカについて行う. 求められたマーカのワールド座標を図 8 に示す.

3.4. RBF による形状変形

基本形状のマーカ座標と 3.3 節で求めた動作する撮影対象のマーカ座標の対応を基に, 基本形状を動画像の各フレームについて変形する. 変形には RBF 補間[14]を用いる.

RBF(Radial Basis Function, 放射基底関数)とは, 局在化した基底関数の線形和により表現される関数群のことで, 任意の関数を近似する手法として広く使用される. 例えば, N 個の入力データ $X_i (i = 0, 1, \dots, N)$ に対して, 出力 Y_i (がわかっている時に, $f(X_i) = Y_i$ をみたすような関数を求める際などに用いられる. 一般に RBF は以下のように表すことができる.

$$y_i = f(x_i) = \sum_{k=1}^N \{W_k \times \phi_{ik}(\|x_k - x_i\|)\} \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

W_k は各基底関数 ϕ の重みである. 本研究では基底関数 ϕ には Tri-Harmonic を用いた. この場合, 基底関数 ϕ は入力データの頂点座標 x を用いて以下のように表される.

$$\phi(x) = x^3 \quad (3)$$

また,

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} \quad \phi = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \dots & \phi_{NN} \end{pmatrix} \quad W = \begin{pmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} \quad (4)$$

を用いると基底関数の重み W は

$$W = \phi^{-1}Y \quad (5)$$

となる. 式(5)より重み W は一意に定まり, 関数 f が決ま

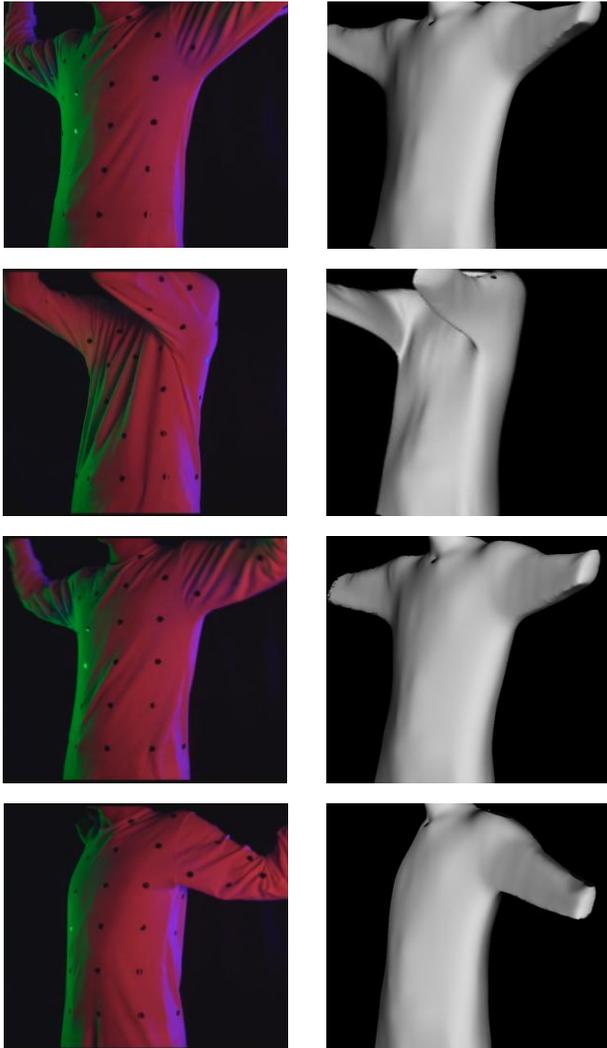


図9 各フレームに対応した変形形状

る。つまり、任意の入力に対し、近似関数 f を用いて出力を得ることが可能となる。ここで、任意の入力 x の値が近似関数決定時の入力 X_i に近いほど、 $f(x)$ と $f(X_i)$ の値の差は小さくなるように計算される。

以上の関係を用いて、基本形状を各フレームのマーク位置座標に基づいて変形する。本研究では、変形後の形状を変形形状と呼ぶことにする。撮影画像に対応した変形形状の一例を図9に示す。このとき、3.1節において、遮蔽などの原因で検出されなかったマークについては、検出不能のマークの前フレームにおけるワールド座標と、RBF補間により変形されたメッシュの対応を取り、最もマークの位置に近いメッシュの頂点を現フレームにおけるマーク座標として補間した。

4. 反射モデルの作成

3章で取得した各フレームにおける変形形状全頂点の法線ベクトルの再計算を、同一フレームの陰影情報に基づき行う。撮影対象の法線ベクトルを撮影画像の輝度値から推定する手法は多くの論文で行われている([8], [9],

[10])。それらの中でもっとも一般的に用いられるモデルとしてランバートの余弦則を用いた拡散反射モデル(式6)がある。

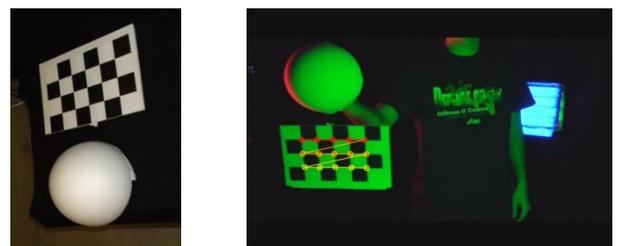
$$I = Lk_d(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}) \quad (6)$$

I が撮影画像での輝度値、 L が光源のパラメータ、 k_d が反射パラメータ、 \mathbf{l} が光源ベクトル、 \mathbf{n} が法線ベクトルである。このモデルはあくまで理想的な平行光源を仮定している。しかしながら、実際の撮影環境では十分な光量を持つ理想的な平行光源を作成することは困難である。また、輝度値の表現に法線ベクトルと光源ベクトルの内積を用いているが、事象を完全にモデル化している訳ではない。そこで、それらを考慮に入れた法線推定手法を提案する。

既知の理想的な平行光源下において、ランバート反射モデルでは、頂点法線ベクトルが求まれば、式(6)より撮影画像での輝度値を求めることができる。逆に、一つの頂点に対して複数の輝度値と法線の対応を取得し式(6)を解くことで、輝度値から法線を推定することができる。ただし、理想的な平行光源下でない場合、同じ法線でもその存在する座標により、輝度値は変化する。このとき、法線とその存在する座標の対応関係が分かれば、その点の撮影画像での輝度値を定めることができる。そこで、従来の法線、輝度値の対応関係のみで表されていたモデルに、法線存在座標を加えた関係を持つ反射モデルを作成する。

4.1. 対応データ収集

まず、座標、法線、輝度値を1組とするデータ群を取得するため、図10(a)のようなキャリブレーションプレートを作成した。本研究におけるキャリブレーションプレートは、上部の市松模様を張り付けたボード部分と、下部の半球の部分からなる。市松模様の間隔と半球の幾何学構造が既知であれば、撮影画像から市松模様の交点の座標を検出することにより、半球上における点の三次元座標、およびその座標における法線ベクトルを求めることができる。これにより、キャリブレーションプレートの半球部分に対象物体と同じ反射特性を持つ物体を巻き付けて三色光源下で撮影を行うことによって、対象物体の座標、法線、輝度値を一組とする対応関



(a) キャリブレーションプレート

(b) データ収集の様子

図10 反射モデルの作成

係のデータを取得することができる。図 10(b)が実際の撮影環境でデータを収集するために、撮影環境にキャリブレーションを置き撮影を行っている様子である。対応データは 1 フレームごとに約 10000 組、撮影領域を満遍なく覆い尽くすように各カメラで約 600 フレーム分収集した。

4.2. 線形重回帰によるモデル作成

収集したデータ群を法線ごとに、輝度値を目的変数、座標を説明変数とし、線形重回帰を行う。それらを統合することにより、輝度値を法線、座標の関数として表す反射モデルを作成する(式(7))。ここで、 I_{calc} は回帰によって求まる輝度値であり、 \mathbf{v} は座標、 \mathbf{n} は法線を表す。

$$I_{calc} = f(\mathbf{v}, \mathbf{n}) \quad (7)$$

5. 陰影情報を用いた法線推定

作成した反射モデルを用いて撮影画像から法線ベクトルを推定するために、以下のような評価関数 E_i を設定した。第一項は反射モデルから得られる輝度値と撮影画像から得られる輝度値の差分であり、第二項に拘束条件として、初期法線を保存する項と、注目頂点と近隣頂点における法線同士の連続性を保つ項を追加した。これを用いて、各フレームにおける変形形状の全頂点 $\{\mathbf{v}_i\}_{i=1}^N$ に対して、それぞれ評価関数 E_i を最小にするような法線 \mathbf{n}_i を探索する。

$$E_i = (I_{calc}(\mathbf{v}_i, \mathbf{n}_i) - I_{image})^2 + \lambda \left\{ (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_i^{init})^2 + \frac{1}{N^{neigh}} \sum (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_i^{neigh})^2 \right\} \quad (8)$$

ここで、 $I_{calc}(\mathbf{v}, \mathbf{n})$ は反射モデルより得られる輝度値、 I_{image} は撮影画像の輝度値、 \mathbf{n} は推定される法線、 \mathbf{n}^{init} は変形形状の初期法線、 \mathbf{n}^{neigh} は近接頂点の法線、 N^{neigh} は近隣頂点の個数、 λ は法線の変化幅を抑える第二項の重みを表す。ただし、 λ の値の決定には、撮影画像のエッジを用いる。エッジがより抽出される領域ほど皺が強く出ている領域だと判断し、 λ の値を低く設定する。逆にエッジが抽出されない領域は平坦な部分と見なし、初期法線からあまり変化しないように λ の値を高く設定する。図 10 に撮影画像とエッジ抽出画像を示す。この拘束条件の下、評価関数(8)の値が最小になった時の \mathbf{n} を新法線とする。

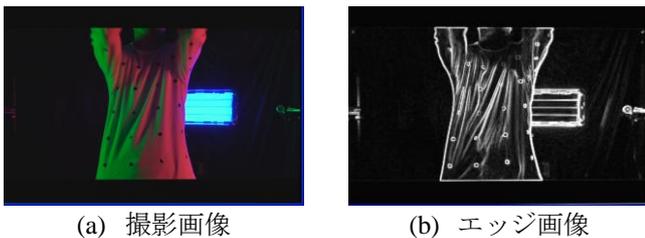


図 11 重みの自動決定に用いるエッジ抽出画像

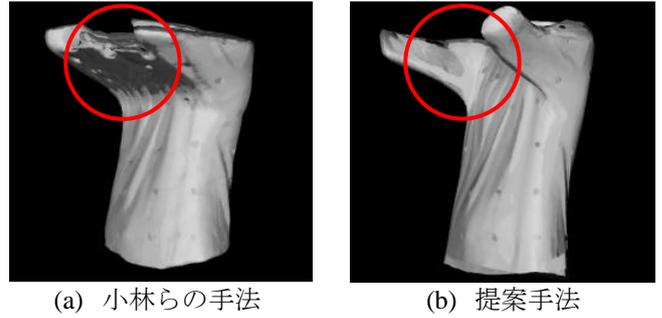


図 12 再現結果の比較

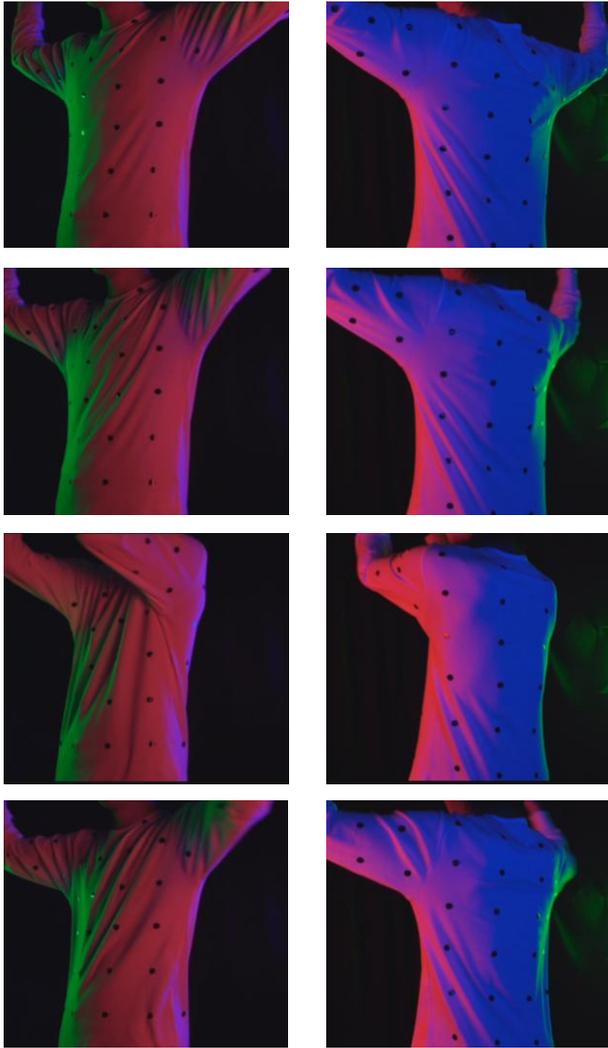
6. 再現結果と考察

以上の手順で、変形形状に対して、同一フレームの撮影画像の陰影情報を基に法線推定した結果を図 11 に示す。本研究と同様の撮影環境下において、変形形状の取得に視体積交差法を用いた小林らの手法[11]による再現結果は図 12(a)であり、提案手法による再現結果は図 12(b)である。提案手法は既存手法と比較して精細な変形形状を得ているため、撮影対象の概形および細部の再現精度が高いことが分かる。特に、基本形状の生成に視体積交差法を用いていた小林らの手法の問題を克服し、凹領域に対する形状復元を可能にした。また、変形形状がより実際の形状に近いことで、5 章で行った法線推定の精度が高くなったため、提案手法の方がより忠実に皺が再現されている。提案手法により動物体の三次元形状を再現した例として、撮影した動画像列を図 13 に示し、それに対応した三次元形状の再現結果を図 14 に示す。

7. 結論と課題

本研究では、レンジスキャナで計測された基本形状の変形により動画像の各フレームに対応した変形形状を作り出し、さらに事前に作成した反射モデルに基づき陰影情報から法線の推定を行うことによって、皺などの細部を含む動物体の三次元形状変形を再現する手法を提案した。

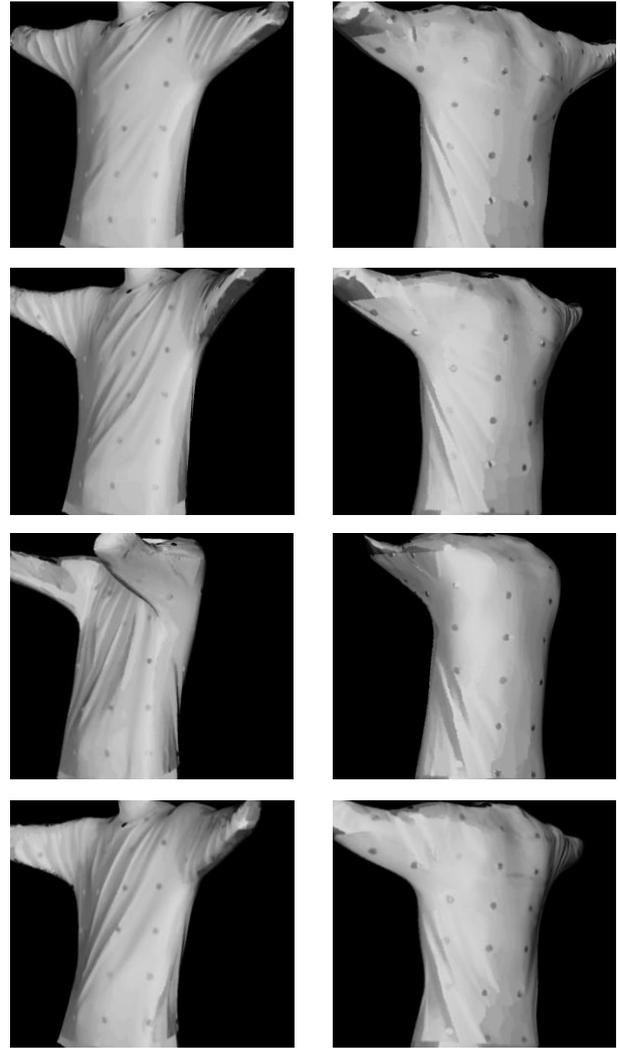
今後の課題として、まず、システムの汎用化が挙げられる。具体的には、本研究ではマーカの位置座標に基づいて基本形状をフレームごとに変形していたが、より汎用性を高めるため、マーカを用いない形状推定法を考案する必要がある。また、もうひとつの課題として、反射特性の多様性への対応が挙げられる。そのため、反射モデル構築法の再考などによって、複数の反射特性を持つ物体への適応、鏡面反射成分を持つ対象物体に対する適応を実現していきたい。



(a) 正面

(b) 背面

図 13 各フレームにおける撮影画像



(a) 正面

(b) 背面

図 14 撮影画像に対する再現結果

文 献

- [1] E. Aguiar, C. Stoll, C. Theobalt, N. Ahmed, H. Seidel, S. Thrun, "Performance capture from sparse multi-view video" ACM SIGGRAPH 2008 papers, Article No. 98, August 2008
- [2] D. Vlasic, I. Baran, W. Matusik, J. Popović, "Articulated mesh animation from multi-view silhouettes", ACM SIGGRAPH 2008 papers, Article No. 97, August 2008
- [3] D. Bradley, T. Popa, A. Sheffer, W. Heidrich, T. Boubekeur, "Markerless garment capture", ACM SIGGRAPH 2008 papers, Article No. 99, August 2008
- [4] T. Popa, Q. Zhou, D. Bradley, V. Kraevoy, H. Fu, A. Sheffer, W. Heidrich, "Wrinkling Captured Garments Using Space-Time Data-Driven Deformation", Computer Graphics Forum, Volume 28, Number 2, pp. 427-435, April 2009
- [5] S. Narasimhan, S. Koppal, and S. Yamazaki, "Temporal Dithering of Illumination for Fast Active Vision", In European Conference on Computer Vision, volume 4, pages 830-844, October 2008.
- [6] Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Yuya Ohta, Kazuhiro Sakashita, Ryota Zushi, Yasushi Yagi, ki Asada, "Linear solution for oneshot active 3D reconstruction using two projectors", In In Proc. Fifth International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, Paris, May, 2010.
- [7] B. K. P. Horn, M. J. Brooks (Eds.), "Shape from Shading", MIT Press, 1989.
- [8] R. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", In Optical Eng., number 1, pages 139-144, 1980.
- [9] T. Yu, N. Xu, N. Ahuja, "Recovering Shape and Reflectance Model of Non-Lambertian Objects from Multiple Views", IEEE CVPR, Volume 2, pp.226-233, 2004
- [10] C. Hernández, G. Vogiatzis, G. J. Brostow, B. Stenger, R. Cipolla, "Non-Rigid Photometric Stereo with Colored Lights", IEEE ICCV 2007
- [11] 小林昭太, 前島謙宣, 森島繁生, "3種類の異なる色光源を用いた多視点動画からの動的立体形状再現", 画像の認識・理解シンポジウム, Poster, IS1-44, July 2010.
- [12] D. Vlasic, P. Peers, I. Baran, P. Debevec, J. Popović, S. Rusinkiewicz, W. Matusik, "Dynamic shape capture using multi-view photometric stereo", ACM SIGGRAPH Asia 2009 papers, Article No. 174, July 2009
- [13] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Trans. on PAMI, Vol 22, Issue 11, pp.1330-1334, July 2000
- [14] J.C. Carr, R.K. Beatson, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, T.R. Evans, "Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions", ACM SIGGRAPH 2001, pp.67-76, August 2001.