

触感センサーにおける 3次元変形の取得

製織システムチーム 廣澤 覚, 小田 明佳

要 旨

人体の皮膚及び軟部組織は、常に物理的な力の作用による変形を繰り返している。物理的な力とは、姿勢や運動による人体そのもの、身にまとう衣服や靴、身をあずける椅子やマットレスなどあらゆるアイテムに由来する。それらの力による皮膚などの変形により、快・不快を感じ、また運動能力にも影響を及ぼす。これほど日常的な現象であるにも拘わらず、従来技術では皮膚に負荷される押込み圧の計測によってのみ評価されているのが殆どであり、皮膚などの変形挙動の詳細な精密計測手法は未確立である。そこで本研究では、皮膚などの3次元変形挙動が計測可能な触覚を具備した革新的人体ダミーの開発と普及を目的とする。今年度は、人間の皮膚を想定した透明弾性体と対象物が直接接触する上部表面を裏側からカメラで連写し、その撮影画像の連続変化から、画像相関法によりその表面の変位を数値化する触感センサーを、透明弾性体表面の3次元変位が取得可能な機構に発展させたので報告する。

1. はじめに

各種製品が、人の皮膚や軟部組織に対してどのような影響を及ぼすかの解析結果は、製品開発において性能もしくはその付加価値をアピールする際に非常に重要となる。このような人体の変形挙動評価に関して、本研究では人体を模擬した透明弾性体の内部から、皮膚表面に発生する変位分布を画像相関法によって取得し、3次元変形挙動の評価、さらには内部のひずみ分布の評価まで可能とすることを目的としている。また、近年発展してきた非接触で各種構造物のひずみを計測する画像相関法を、触覚センシング分野に利用することを目指している。すでに、著者らは実際の人の指の触動作に可能な限り近づけた、触感センシング技術の確立を目指し、接触子と対象物の相互変形を光学的な画像変化として捉えるとともに、これまでの材料工学における解析技術を盛り込み、その挙動を画像処理により数値データ化するという触感センシングの基礎技術の研究開発に取り組んで来た[1]。しかしながら、著者らの先行研究では、単一のカメラでの変形挙動評価であったため、カメラと垂直方向の変位が取得できず、3次元変位の取得が研究課題であった。そこで、透明弾性体表面の3次元変位を取得するため、触感センサーの改良に関する研究を進めたので報告する。

2. 原理と機構

透明弾性体表面の3次元変形挙動をその内部から記録し、変形履歴として解析するには、弾性体表面の時々刻々

変化する変位を計測する必要がある。そこで本研究では、変位分布算出に画像相関法を適用する。すなわち、図1に示すように透明弾性体の表面画像を弾性体内部から撮影し、得られた撮影画像をサブセットと呼ばれる複数の画素から成る領域に分け、連続する前後の画像においてテンプレートマッチングを行い、そのサブセットがどの位置になったのかを判定して変位を計測する。このとき、一様で変化のない画像においては位置の判定が困難になるため、弾性体の表層に染料を用いてランダムパターンを配し、特徴点を作り出す。さらに、撮影に用いるカメラモジュールには複眼方式を採用し、ステレオ法を適用することで、3次元の変位ベクトルを算出可能にする。

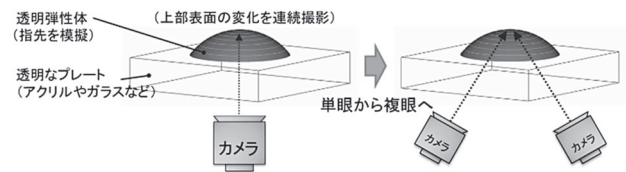


図1 センシング機構概念図

2.1 ステレオ法による3次元変位の取得

1台のカメラで撮影した画像からは2次元の位置特定しか行えない。3次元の位置情報を取得するには、2台以上のカメラを使用して同じ場所を違った角度で撮像することが必要である。これは人の眼が3次元空間を認識している方法と同様で、両眼立体視と呼ばれ、2つの眼で得られる像の視差から3次元空間上の位置を判断して

いる。人の目では精度良く計測することは不可能であるが、位置を固定した2台のカメラにより撮影し、その画像情報をコンピューター処理することによって3次元座標を精度よく計測することが可能である。

ステレオ法の原理は、3次元座標にある対象物とそのカメラ画像(2次元座標)との間の幾何学的な関係を数値モデル化するために、一般に同次座標を用いて式①のように表される。式①は対象物が存在する座標系であるワールド座標系での点Pとその投影である画像上のピクセルとして表される点との関係を表しており、式②で表される行列Aは3次元物理座標空間を2次元画像空間へ変換する行列で内部パラメータ行列と呼ばれる。また、式③で表される行列[R T]はワールド座標系とカメラ座標系の関係を表す行列で外部パラメータ行列と呼ばれている。すなわち、図2に示すように、内部パラメータがカメラの特性を表し、外部パラメータがカメラの位置関係を求めることになる。さらに、この外部パラメータ行列と内部パラメータ行列を求めることをカメラキャリブレーションという。

また、式①により画像上の座標からワールド座標系の座標を求めるには、未知数が3で方程式の数が2つであるため、1台のカメラで方程式を作っても、画像から3次元座標を求めることができないことがわかる。そのため、2台以上のカメラを用意し、方程式を増やすことが必要である。

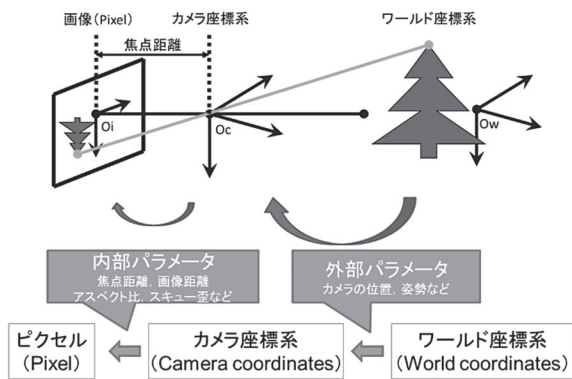


図2 内部パラメータおよび外部パラメータの概念

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim A [R T] \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \dots \textcircled{1}$$

$$A = \begin{bmatrix} f & s & c_x \\ 0 & af & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \textcircled{2}$$

$$[R T] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \end{bmatrix} \dots \textcircled{3}$$

(u, v 画像上の座標, f:焦点距離, s:スキュー, a:アスペクト比, cx, cy:光学中心, R:回転, t:平行移動, P:ワールド座標系における座標)

2.1.1 カメラキャリブレーション

上述のような内部パラメータ行列、外部パラメータ行列を求めるのがカメラキャリブレーションであるが、代表的な方法は3次元パターンの基準治具を用いる Tsai の方法、2次元パターンの基準治具を用いる Zhang の方法である [2]。

本研究では、基準治具の取扱が容易な Zhang の方法を採用することとした。基準治具は図3で示すようなパターンが印刷された平板である。図3のように、治具の位置・姿勢を変えながら、個々のカメラで撮像し、治具にプリントされたパターンの位置、間隔等から内部パラメータ及び外部パラメータを求める手法である。

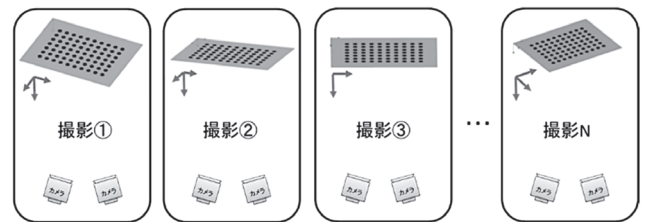


図3 カメラキャリブレーション

2.2 センサー機構の概要

構築したセンサー機構は、図4に示すような、人間の皮膚を想定した透明弾性体を裏側から2台のカメラで撮影する機構となっている。透明弾性体は透明なガラス板に配し、ガラス板はマイクロメータ式Xステージ(中央精機株式会社製)でカメラとの距離を調整できる機構とした。このカメラはシングルボードコンピュータの Raspberry Pi に接続して制御することとした。

透明弾性体については、皮膚を想定し、RTV シリコンゴム(信越化学工業株式会社製)を用いて作製した図5に示す板状の形状(厚さ4mm, 幅22mm, 長さ30mm)を有し、さらに弾性体表面は酸性染料を用いてランダムパターンを配した白色層を付与している。また、YAWASA MSES(株式会社テック技販製)によるヤン

グ率の測定結果は 232kPa である。

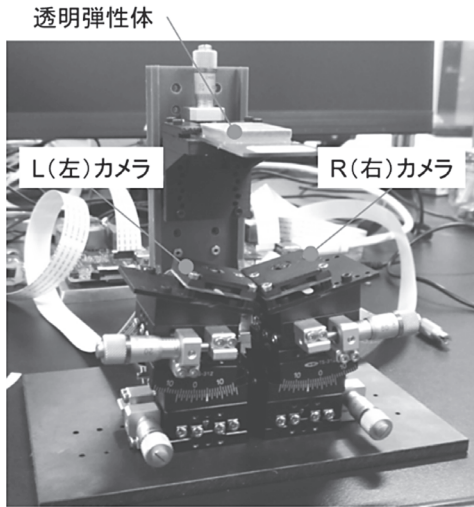


図 4 試作センサー機構

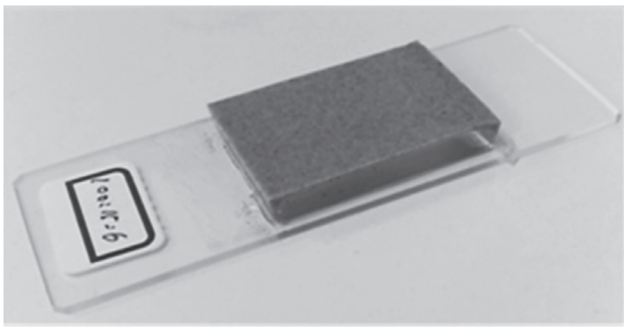


図 5 人間の皮膚を想定した透明弾性体

2.3 キャリブレーションおよび変位計測プログラム

撮影した画像より変位を求めるため、画像相関法による変位計測プログラムを作成した。プログラムは Microsoft visual studio 2010 を用いて開発し、開発言語は C++ とした。また、テンプレートマッチングの計算には、ライブラリとして OpenCV 3.2.0 を利用した。

図 6 に、作成したキャリブレーションおよび変位計測プログラムの実行例を示しており、2つのカメラで撮影した基準治具の画像を読み込み、カメラの内部パラメータ及び外部パラメータの計算が可能である。さらに、そのパラメータと画像相関法により、各サブセットの三次元空間における座標を計算することが可能である。画像相関法では、テンプレート画像と呼ばれる画像を対象となる画像上で走査させ、対象画像上の各位置における類似度を算出することで、最も類似している画像の位置を検出する。すなわち、このテンプレート画像をサブセッ

トとすることで、変形後のサブセットの位置が特定する。ここで、テンプレートマッチングにおける類似度の算出には、テンプレートや画像の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可能な次に示す式④の正規化相互相関係数 (ZNCC: Zero-mean Normalized Cross-Correlation) を用いることとした。

$$R_{ZNCC} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} ((I(i,j) - \bar{I})(T(i,j) - \bar{T}))}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - \bar{I})^2 \times \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (T(i,j) - \bar{T})^2}} \dots \textcircled{4}$$

$$\bar{T} = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} T(i,j), \quad \bar{I} = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I(i,j) \dots \textcircled{5}$$

ここで、テンプレートの大きさを $M \times N$ 、テンプレートの位置 (i, j) における画素値を $T(i, j)$ 、テンプレートと重ね合わせた対象画像の画素値を $I(i, j)$ とする。また、 \bar{T} と \bar{I} は式⑤に示す領域内の平均値である。この正規化相互相関係数は、テンプレートと画像が完全に一致した時に最大値 1 となる。

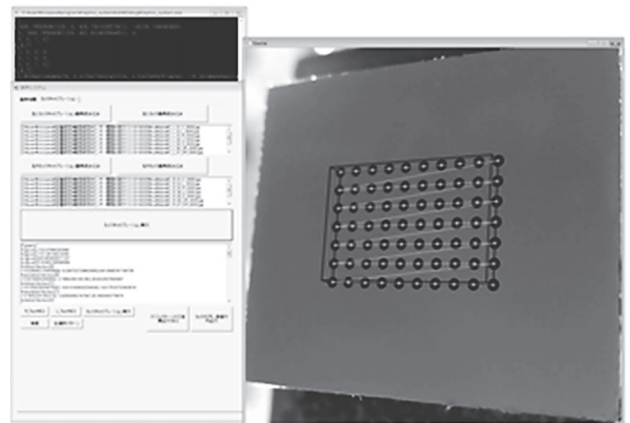


図 6 プログラム実行例

3. 動作確認

3.1 カメラキャリブレーション

図 4 における透明弾性体を図 7 に示す基準治具に置き換え、カメラキャリブレーションを実施した。

基準治具には、スクエアグリッドもしくはサークルグリッドがあるが、今回は特徴点の座標を精度良く求めることが可能で、基準治具の製作が容易であったサークルグリッドとした。特徴点は、1mm 間隔で縦 7 点、横 10 点並べ、各特徴点の大きさは直径 0.5mm とした。また、撮影条件は、解像度 1000 × 1000 ピクセルとした。

基準治具をカメラに対して異なる姿勢となるよう調整した9パターンの配置に対して、図8に示す18枚の画像を撮影した。また、これらの画像から算出したパラメータを式⑥から式⑨に示す。ここで、左カメラの座標系をワールド座標系としており、そのため、式⑧における回転行列 R は単位行列、並進行列 T は0となっている。

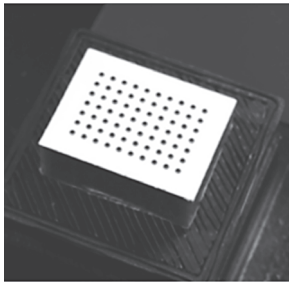
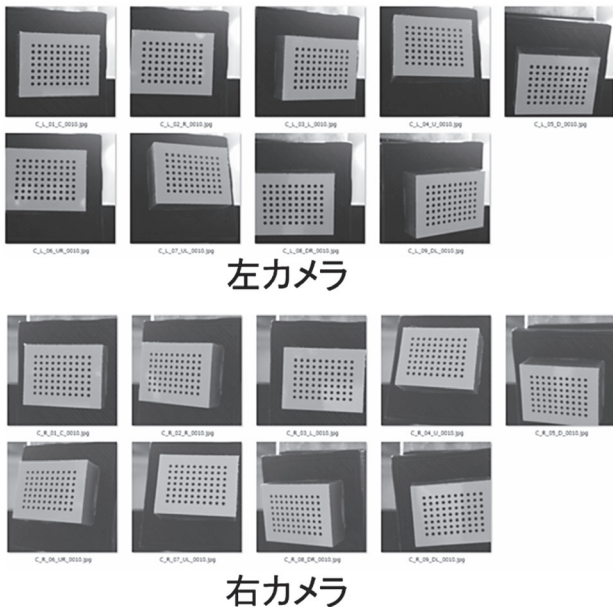


図7 基準治具



右カメラ

図8 キャリブレーションのための基準治具画像

$$A_L = \begin{bmatrix} 2889 & 0 & 614 \\ 0 & 2880 & 522 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \textcircled{6}$$

$$A_R = \begin{bmatrix} 2842 & 0 & 423 \\ 0 & 2830 & 461 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \textcircled{7}$$

$$[R_L \ T_L] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots \textcircled{8}$$

$$[R_R \ T_R] = \begin{bmatrix} 0.840 & -0.014 & 0.542 & -24.709 \\ 0.002 & 1.000 & 0.023 & 0.249 \\ -0.542 & -0.018 & 0.840 & 6.500 \end{bmatrix} \dots \textcircled{9}$$

3.2 一様な押し込み方向の変形による動作確認

動作確認のため、マイクロメータ式ステージを使い、透明弾性体を1mm 降下させ、一様な押し込み方向の変位が発生したこととし、プログラムにおいて変位図を求めた。カメラによる撮影は、解像度1000×1000ピクセルとし、変位計測プログラムにおいて、撮影画像を縦22分割、横22分割にすることで、解像度45×45ピクセルのサブセット作成し、変形図を求めた。

図9は得られた変形図であり、プログラムにより得られたサブセットの3次元空間における位置を表現したものである。L(左)カメラ基準面に対して、一定の距離で移動前の検出位置があり、その下のカメラ側に1mm 移動後の検出位置がある。押し込み方向に一樣に平行移動している様子が確認できた。また、変位量は、平均の変位量は1.003mm、最大変位量は1.05mm、及び最小変位量は0.958mmとなった。この結果は、単一カメラの場合の面内変位に比べて精度としては低い。しかしながら、サブピクセル処理等の精度向上処理は行っていないことから、今後、それらに対応したプログラム改良によって、変位量の検出精度の向上を図ることが可能であると考えられる。

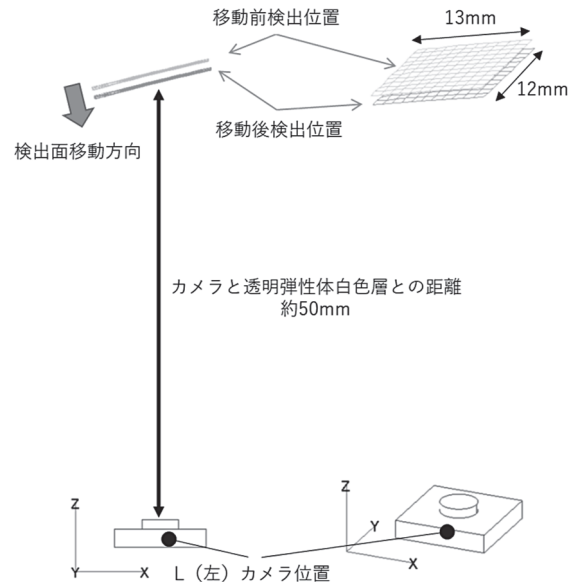


図9 平行移動(押し込み方向)における変形図

3.3 局所的な変形による動作確認

次に、局所的な変形とすべての方向の変位が検出できるか動作確認を行うため、半球形の端子を押し当ててその変形を確認した。図10の①に示す方向に半球形接触

端子を透明弾性体に対し垂直に 50gf の力で押し当てる。図 11 における上図は押し込み前、下図は押し込み後の変形図を示している。半球形の端子により、押し込まれ、さらに面内に広がっており、半球形に応じた 3 次元の変形が発生している様子が確認できた。次に半球形の端子を 50gf で押し込んだまま、図 10 の②に示す方向に平行移動させて変形状態を得られるか確認した。図 12 は得られた変形図である。図 12 の灰色で示す変形図が平行移動前、黒色で示す変形図が平行移動後である。これらの変形図より、端子が滑ることなく、押し込まれた状態で、透明弾性体が平行移動方向に引っ張られている様子が確認できた。これらの結果から、皮膚に負荷される押し込み力だけでなく、せん断変形のような皮膚面内の引張についても評価可能であることが示唆された。



図 10 半球形の接触子と測定の様子

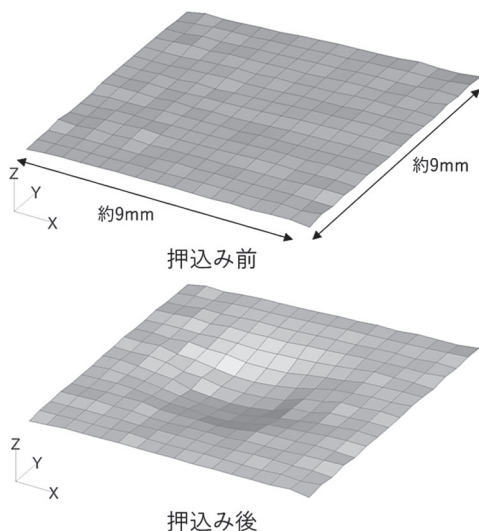


図 11 局所的な変形を与えた際の変形図

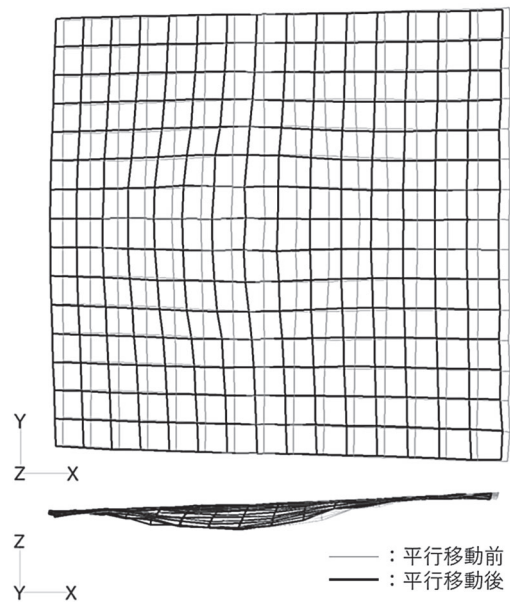


図 12 力で押し込み+平行移動させた際の変形図

4. まとめ

触感センサーは、人間の皮膚を想定した透明弾性体を対象物と接触させ、透明弾性体の表面を裏側からカメラで連続撮影し、その画像の変化を画像相関法により変位分布として数値化することができる。これまで 2 次元面内の変形について評価していた触感センサーを、押し込み等の 3 次元の変形を取得可能なシステムへ発展させた。具体的には 2 台のカメラを透明弾性体下部に設置し、ステレオ法を用いて 3 次元の変形を取得した。さらに、カメラキャリブレーション及び動作確認の結果、3 次元の変形が取得可能であることがわかった。これらの結果より、本研究で改良した触感センサーは、皮膚に負荷される押し込み力だけでなく、せん断変形のような皮膚面内の引張についても評価可能であることが示唆された。

今後は、精度向上処理等を検討するとともに、人体の部位を模擬した透明弾性体等の設計を行う予定である。

参考文献

- 1) 廣澤 覚, 小田 明佳, 画像相関法を用いた触感センシング手法の提案, 日本感性工学会論文誌 第 16 巻 3 号 p. 361-369
- 2) Zhengyou Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume:22, Issue:11, 2000