

## 非接触人体形状計測装置の開発

## The Development of The Noncontacting Human Body Shape Measurement System

香川敏昌\*, 細束正一\*<sup>2</sup>, 松浦良彦\*<sup>3</sup>, 大恵俊一郎\*<sup>4</sup>, 小川洋司\*<sup>5</sup>

Toshiaki Kagawa, Masakazu Hosozuka, Yoshihiko Matsuura, Syunichiro Oe and Yoji Ogawa

## 抄 録

光切断法を応用し、腰からつま先にかけての形状を非接触で自動計測する装置を開発した。被験者にスリット光を照射し、スリット面に対して  $45^\circ$  の角度からカメラで撮影する。撮影した画像から反射光を抽出し、中心線上の画素の座標を空間座標へ変換することによって形状を求めた。被験者の周囲に 6 組の水平スリット光源とカメラを配置し、上下に移動させて腰からかかとにかけての形状を計測した。また、床付近に配置した垂直スリット光源を左右へ移動させ、足の甲からつま先にかけての形状を計測した。この方法で計測装置を試作した結果、撮影時間 1 分 40 秒、処理時間 5 分、誤差 1.8mm 以内で形状を計測することができた。

## 1 はじめに

本研究は、リンパ浮腫患者用弾性ストッキング製造システム開発の一環として行った。リンパ浮腫の圧迫治療には、症状に合わせたオーダーメイド弾性ストッキングが必要である。しかし、メジャーを使って患者個々の採寸を行うため手間がかかり、正確な計測が困難である。そこで、採寸作業を自動化し、生産効率の向上と品質の安定化を図る必要がある。オーダーメイド弾性ストッキングの設計には、腰からつま先にかけての形状が必要である。市販の汎用的な形状計測装置では、足の甲や両脚の間が不正確であったり、専門知識や広い設置スペースを必要とするなどの問題があり、実用に供する製品は無い。また、ストッキング専用の海外製品は計測精度が不十分であったり、大腿から下しか計測できないもので、国内での導入実績は無い。そこで、光切断法を応用し、人体の形状を非接触で自動計測する装置の開発に取り組んだ。

## 2 方法

## 2・1 形状計測の方法

形状計測の方法を図 1 に示す。図中①に示すように、被計測物にスリット光を照射し、スリット面に対して  $45^\circ$  の方向からカメラで撮影する。画像に写った反射光は表面の形状に沿って折れ曲がるため、

その形をコンピュータで解析すれば、形状を求めることができる(光切断法)。図中②に示すように、撮影した画像から反射光を抽出し、その中心線上の点群(画像上の座標)を抽出する。スリット面に対して  $45^\circ$  の方向から撮影しているため、抽出した点群は、実際の形状よりも歪んでいる。そこで、図中③に示

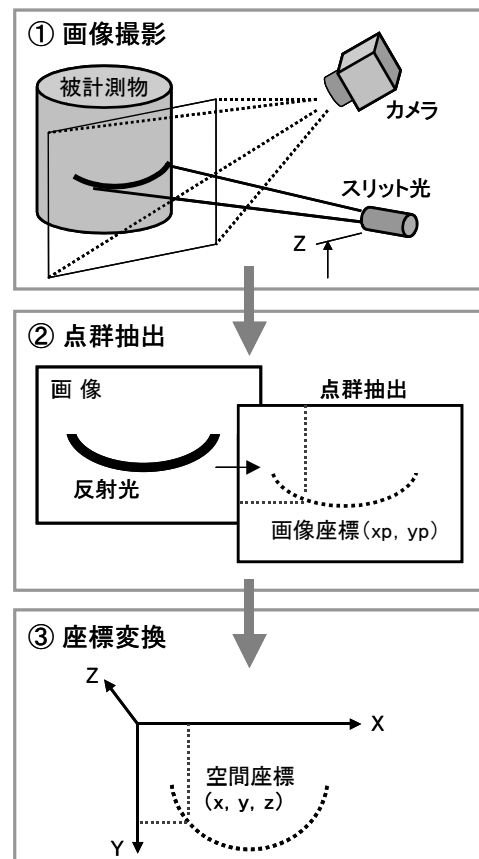


図 1 形状計測の方法

\*企画情報課, \*<sup>2</sup>東光株, \*<sup>3</sup>株松浦浦機械製作所\*<sup>4</sup>徳島大学, \*<sup>5</sup>産業技術総合研究所四国センター

すように、抽出した点群の画像座標  $(x_p, y_p)$  を空間座標  $(x, y, z)$  に変換することにより、実際の形状を求めることができる。

## 2・2 反射光画像の撮影

スリット光の照射には、波長 780nm、光源出力 30mW の赤外レーザ投光器を使用した。また、画像の撮影には解像度 1,024×768 のプログレッシブスキャン CCD カメラを使用し、赤外光のみを透過するフィルタを装着した。

図 2 に計測画像の撮影方法を示す。被験者の周囲に 6 個の計測ユニット (カメラ+水平スリット光レーザ) を配置し、スリット面を腰の高さから床面まで移動させながら画像を撮影する。各レーザ投光器の Z 軸方向の取り付け位置が僅かに異なるため、すべて同時に照射すると、1 枚の画像にスリット面の異なるレーザ反射光が写り、以後の処理が複雑になる。そこで、向かい合う 2 個の計測ユニットで同時に照射して順番に撮影した。足の甲からつま先にかけては、水平スリット光の入射角度が小さいため反射光が広がってしまい、正確に中心線を求めることができない。そこで、床面より 15cm 上から垂直スリット光を照射しながら水平に移動させ、計測ユニット 1 と 3 のカメラで斜め上から撮影した。

水平スリット光は 2mm 毎、垂直スリット光は 1mm 毎に撮影し、合計約 1,000 枚の画像を撮影する。側面と背面には遮光壁を設け、前面には暗幕を設けて出入りできるようにした。画像を撮影する間、被験者はできるだけ静止している必要がある。そこで、両手で掴まることのできる手摺を設け、体の揺動を小さくした。図 3-(a) に水平スリット光で撮影した画像を、図 3-(b) に垂直スリット光で撮影した画像を示す。外来光に含まれる赤外成分よりも赤外レーザ光が十分に強いため、この図よりも更にレンズを絞ることができ、レーザ反射光以外の不要な背景を暗くすることができる。

## 2・3 レーザ反射光の抽出

赤外光を利用したことにより、レーザ反射光以外の不要な情報を削減することができた。しかし、装置の小型化と簡素化のため、天井部分には遮光壁を設けていない。そのため設置場所によっては蛍光灯

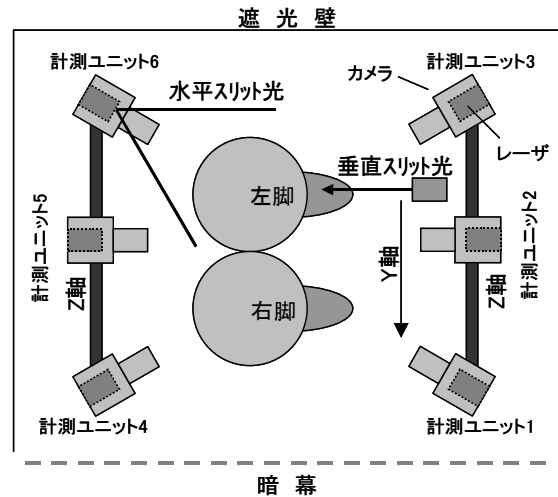
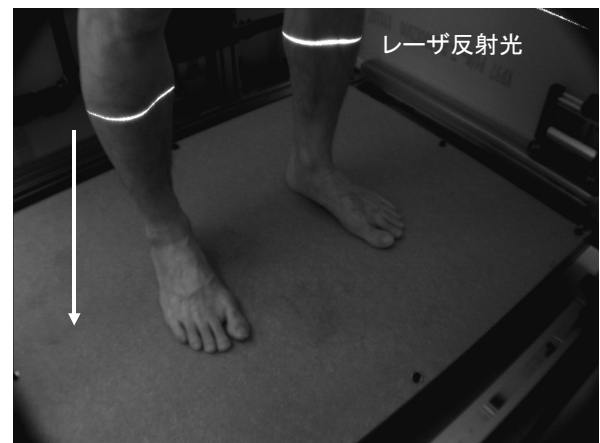
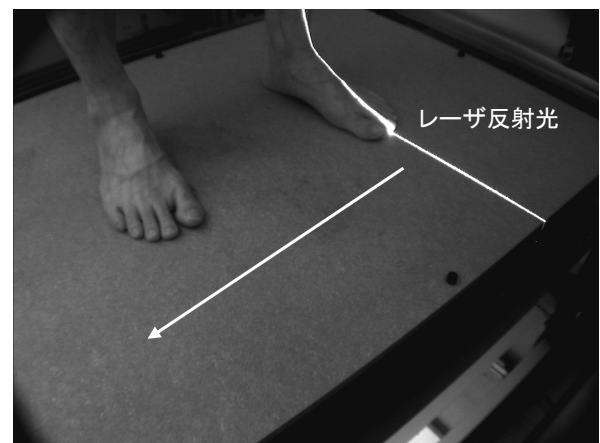


図 2 計測画像の撮影方法



(a) 水平スリット光



(b) 垂直スリット光

図 3 計測画像の一例

や窓からの光が入射し、不要な反射光が写る可能性がある。また、垂直スリット光画像 (図 3-(b)) には床面での反射光も写っている。そこで、背景画像を利用し、形状計測に必要な被写体上でのレーザ反射

光だけを抽出する方法を考案した。

装置を起動した直後、何もない状態で計測し、得られた約 1,000 枚の画像を背景画像として保存する。これらの背景画像と、同じ位置で撮影した計測画像（被写体あり）とを使い、被写体上でのレーザ反射光だけを抽出した。図 4 に、垂直スリット光で足首からつま先を撮影した計測画像から、被写体上でのレーザ反射光だけを抽出した例を示す。計測画像には被写体上での反射光の他に、床面での反射光も写っている。この部分は被写体上での反射光と明るさが変わらないため、濃度閾値で区別することはできない。また、カメラとレーザを移動させながら撮影するため、計測画像と背景画像の撮影位置が完全に一致しない場合がある。そこで、二値化画像や差分画像を作成するのではなく、図 5 に示すルールに従って、被写体上でのレーザ反射光を抽出した。計測画像（被写体あり）に対してラスタスキャンを行い、注目画素の濃度が予め設定した閾値よりも小さければ、背景と見なして画素濃度を 0 に変換する。閾値よりも大きければ、背景画像上の注目画素と同じ位置を囲む探索領域内に、（注目画素濃度 $\pm 20\%$ ）の画素が存在するかどうかを探索する。もし存在する場合は、両方の画像に写った被写体以外での反射光と見なし、画素濃度を 0 に変換する。存在しなければ、計測画像のみに写った被写体上での反射光と見なし、計測画像の濃度値をそのまま書き込む。実験では探索領域を  $7 \times 7$  に設定することにより、不要反射光の残留は殆ど発生しなかった。以上の方法により、不要な背景や反射光をキャンセルし、被写体上での反射光だけを抽出することができた。この方法を用いると、計測装置の内壁に反射率の低い材質や色を使用する必要がないため、デザイン面での自由度が大きくなる。また、直射日光さえ避ければ、設置場所を制限されることはない。

## 2・4 点群抽出

本研究は、形状を表すデータとして被写体表面の点  $(x, y, z)$  の集合を求めることを目的とした。そこで、約 1,000 枚の反射光画像から、反射光の中心線を抽出した。次ページの図 6 に中心線抽出の手順を示す。

まず、反射光画像に対してラベリングを行い、各反射光を囲む最小領域（以下、ラベル領域）と、反射

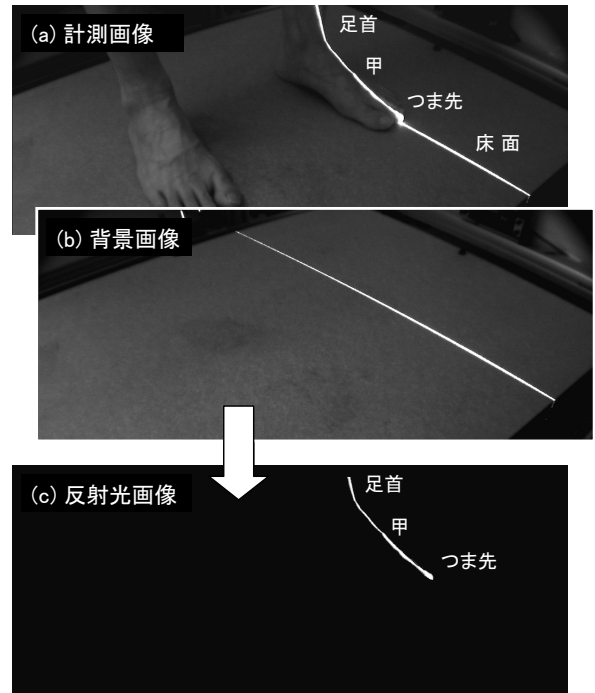


図 4 レーザ反射光の抽出例

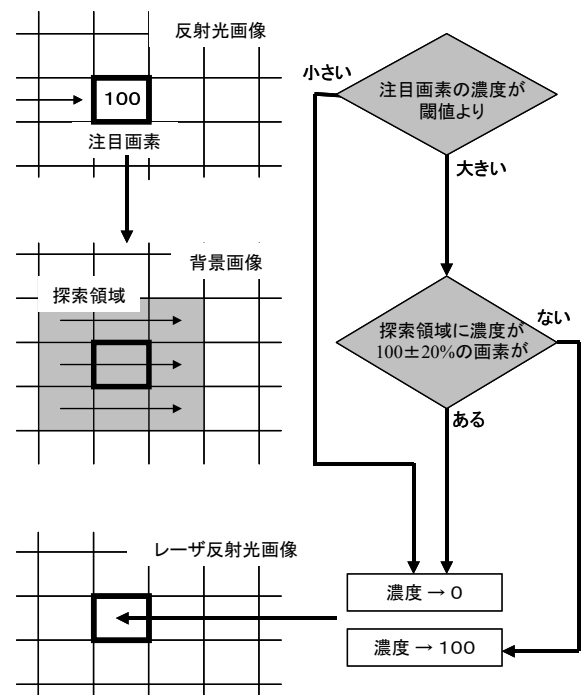


図 5 レーザ反射光抽出のルール

光部分の面積（濃度が 0 でない画素の総和）を計算する（図 6-①）。画像の枚数が多いため、以後の処理は各ラベル領域に対してのみ行う。ここで、全ラベル領域の面積の総和が、画像全体の面積  $(1,024 \times 768)$  の 2% を超える場合は、レーザ反射光の抽出に失敗したとして、処理対象から除外した。

次に、前項の方法で取り除けなかった残留反射光を除去する(図6-②)。各ラベル領域の中で、面積が閾値(実験では100)よりも小さいラベルは、細かい残留ノイズであるとして除外する。次に、水平スリット光が床面に接近した時の乱反射を消去する。図7-(a)に示すように、水平スリット光が床面に接近すると、被写体表面での反射光が床面で乱反射を起こす。また、垂直スリット光の場合も、床面に照射した部分が乱反射を起こし、中心線を正確に抽出することができない。そこで、水平スリット面が床~15mmの範囲の画像と、垂直スリット光による全画像に対し、負のオフセットを加えて乱反射に多く含まれる小~中濃度成分をカットした後、平滑化処理を行った。一般的な平滑化は、注目画素濃度を近傍画素の平均濃度に置き換えるが、本研究では注目画素の濃度が8近傍画素の平均濃度よりも小さい場合、置き換えずに元の濃度値を採用した。この方法により、細かく変化する乱反射部分の濃度を一様に平坦化することができる。さらに、各ラベル内に存在する濃度0以外の画素の平均値を閾値とし、閾値を下回る画素を消去することにより、図7-(b)のように乱反射を除去することができた。

次に、細線化処理によって反射光の中心線を抽出する(図6-③)。反射光の内部に穴(画素濃度0)があると、細線化の際に枝分かれやノイズが発生するため、各ラベル領域に膨張処理を行って穴を塞いだ。細線化は、注目画素の8近傍の画素パターンと、予め用意した論理フィルタとを比較する方法で行った。右上と左下からラスタスキャンを行い、それぞれ専用用意した消去パターンと一致する画素を0にすることで細線化した。図7-(b)の画像を細線化した結果を図8-(a)に示す。中心線は一本の線でなければならないが、多数のスパイク(ヒゲ状のノイズ)が発生している。これらはノイズ点群の原因となるため、取り除く必要がある(図6-④)。そこで、図8-(a)の中心線からすべての特徴点(端点、分岐点、孤立点)を探し出し、端点から分岐点までの距離がスリット反射光の幅よりも短い場合はスパイクと見なして消去した。また、孤立点は小さなノイズと見なして消去した。その結果を図8-(b)に示す。多数のスパイクが除去され、1本の線になったことが分かる。特徴点の抽出は、ラベル領域内をラスタスキャンし、

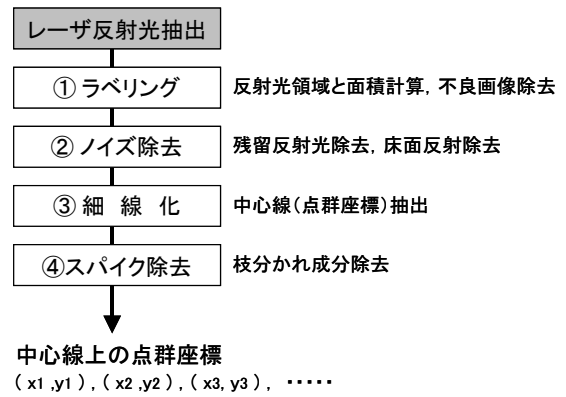


図6 中心線抽出の手順

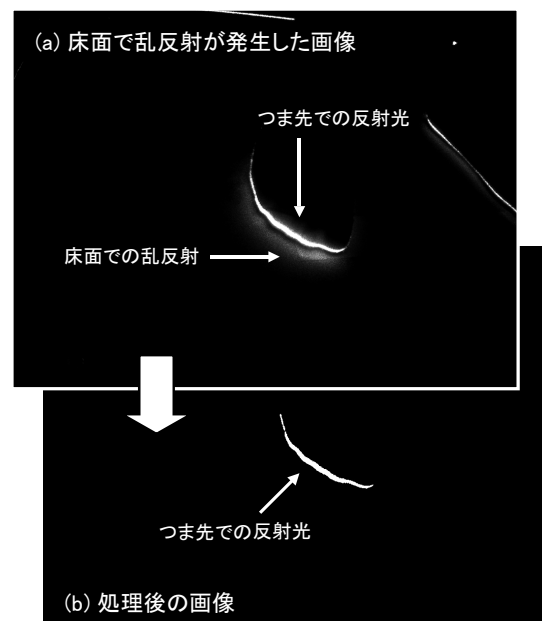


図7 床面での反射光除去

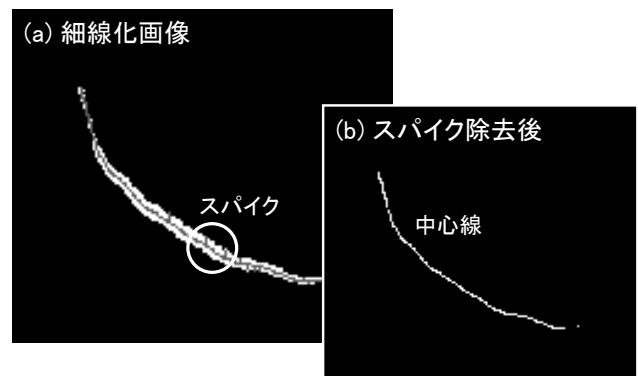


図8 細線化とスパイク除去

予め用意した論理フィルタ(「端点」「分岐点」「孤立点」合計19種類)と、注目画素の8近傍の画素パターンとを比較して抽出した。以上の方法で得られた中心線を構成する画素の座標を点群として保存する。

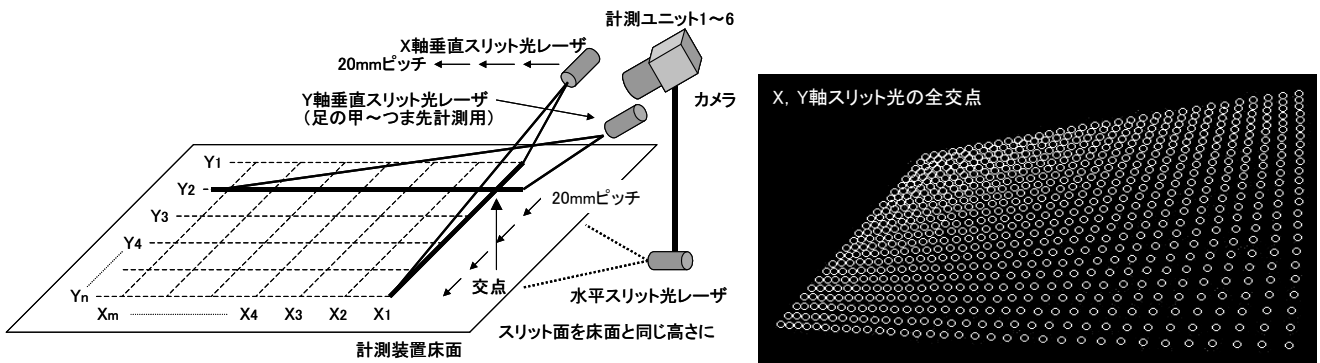
## 2・5 座標変換

反射光画像から抽出した点群は、カメラを通して見た形をそのまま表しているだけで、実際の形状を表しているわけではない。そこで、すべての点の画像上での座標を、空間座標  $(x, y, z)$  へ変換することにより、被写体の形状を求めた。画像上の任意の座標を空間座標に変換するためには、画像座標と空間座標との相関関係が必要である。そこで、座標相関データベースの作成を考案した。

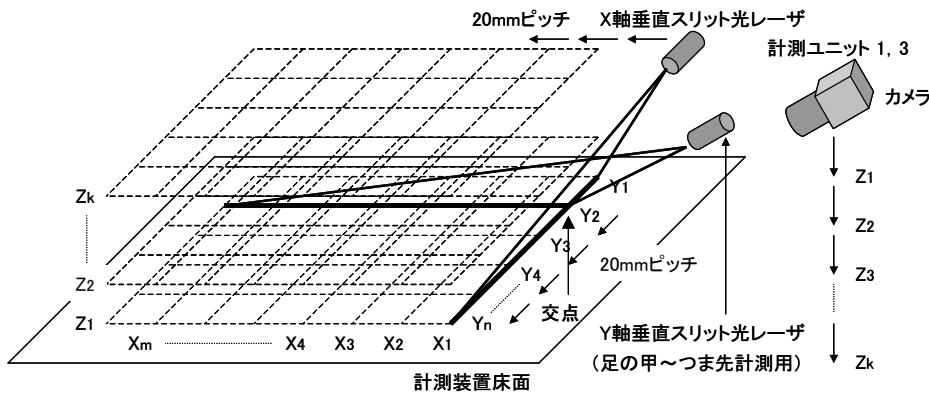
図 9-(a)に、水平スリット光用の座標相関データベースの作成方法を示す。スリット面を計測装置の床面と同じ高さに合わせ、X 軸の垂直スリット光を床面に照射しながら  $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow \dots \rightarrow X_m$  と等間隔で移動させ、 $m$  枚の画像を撮影する。同様に、Y 軸の垂直スリット光を  $Y_1 \rightarrow Y_2 \rightarrow Y_3 \dots \rightarrow Y_n$  と移動させ、 $n$  枚の画像を撮影する。 $m \times n$  すべての組み合わせに対して画像上でのレーザ反射光の交点座標を探索し、各交点に対応する空間座標 (X 軸および Y 軸の電動スライダの位置) と組み合わせることにより、スリット面

上の  $m \times n$  個の相関データを得ることができる。Z 座標は、撮影時の水平スリット面の高さ (Z 軸電動スライダの位置) を用いた。この方法で、6 個それぞれの計測ユニットに対して相関関係を求め、水平スリット光用の座標相関データベースとしてファイルに保存した。図 9-(a)の右側に、画像上の全交点を重ね合わせた画像を示す。変換対象点と、これらの点との相対位置を基に、画像座標を空間座標に変換することができる。

図 9-(b)に、垂直スリット光用の座標相関データベースの作成方法を示す。水平スリット光と同様に床面を利用するが、垂直スリット光を Y 軸方向に移動させながら X-Z 面の形状を計測するため、Z 軸方向の相関関係も必要である。そこで、カメラの位置を  $Z_1$  から  $Z_2 \rightarrow Z_3 \rightarrow \dots \rightarrow Z_k$  と順番に低くし、水平スリット光の場合と同じように、それぞれの高さで  $m \times n$  個の相関関係を求めた。この方法で得られた  $m \times n \times k$  個の相関データを垂直スリット光用座標相関データベースとしてファイルに保存した。



(a) 水平スリット光用



(b) 垂直スリット光用

図 9 座標相関データベースの作成

### 3 結果と考察

#### 3・1 計測装置の試作

第2項で説明した方法について検討を重ね、図10に示す非接触自動形状計測装置を試作した。計測装置は、被験者が中に入る画像撮影装置と、装置を制御し、点群を抽出するためのコンピュータとで構成される(図10-(a))。被験者はつま先を所定の位置に合わせて立ち、両手で手摺りに掴まって体が動かないようにする(図10-(b))。6個の計測ユニットが上から下に向かって移動しながら腰からかかとを撮影し、床面付近に設置した垂直スリット光レーザが水平に移動して足の甲からつま先を撮影する(図10-(c))。

図11に、人体を計測した結果を示す。(a)は、抽出したすべての点群(約65,000個)をプロットしたものである。(b)は、面貼りの精度を悪化させないように、(a)の点群からノイズと重複点を除去した結果(約25,000個)である。空間を2cm角の小空間に分割し、測定点の存在する空間が近くに無ければ、孤立したノイズであるとして除去した。更に、2mm角の小空間に分割し、各領域内の点群数が同じになるように調整して重複点を除去した。計測装置の主な仕様は次の通りである。

- ・計測範囲：幅60×奥行40×高さ95cm
- ・撮影時間：1分40秒 処理時間：5分
- ・撮影装置の外形：幅100×奥行94×高さ160cm

#### 3・2 実用試験と今後の課題

試作した計測装置を東光㈱の計測室へ設置し、同社の社員やリンパ浮腫患者を実測して評価を行った。その結果明らかになった主な課題は次の通りである。

- ①計測精度：最大誤差1.8mm → 1mmに改善  
オーバーハング部(股間)の点不足解消
- ②足裏の形状：類似サンプルを変形・貼付 → 実測
- ③計測時間：撮影時間1分40秒 → 80秒に短縮  
処理時間5分 → 3分に短縮

#### 謝辞

本研究は、平成18～19年度地域新生コンソーシアム研究開発事業の一環として実施しました。四国経済産業局、(財)とくしま産業振興機構、(独)産業技術総合研究所を始めとする支援機関の皆様に深く御



図10 非接触自動形状計測装置

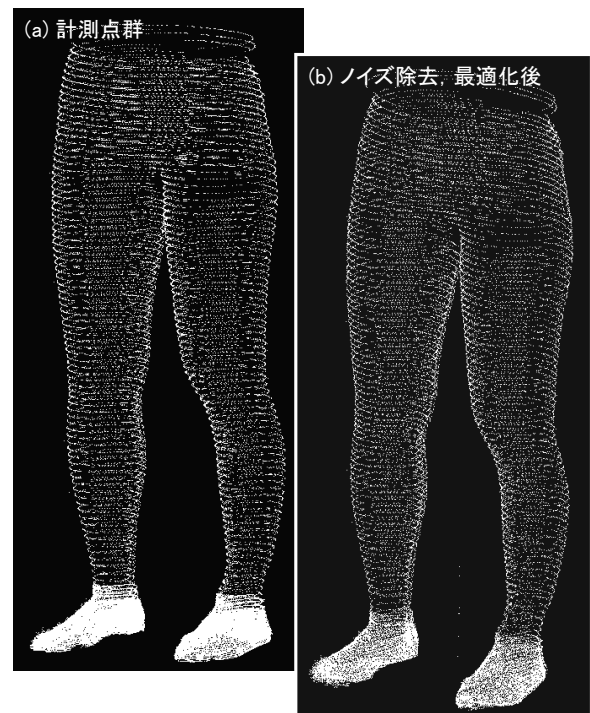


図11 形状計測の結果

礼申し上げます。また、リンパ浮腫に関する情報や、開発の方向性について貴重な助言をいただきました、リムズ徳島クリニックの小川佳宏院長を始めとするアドバイザーの皆様には深く御礼申し上げます。