

弾性ストッキング設計のための非接触形状計測技術の開発

Development of Noncontact Shape Instrumentation Technology for Elasticity Stockings Design

香川敏昌*, 三好英円*, 大恵俊一郎**

Toshiaki Kagawa, Hidekazu Miyoshi and Shunichiro Oe

抄 録

リンパ浮腫の圧迫治療に有効なオーダーメイド弾性ストッキングの設計には、足首から太腿にかけての断面形状の計測が必要である。現在、メジャーを使った手作業で行っている形状計測を自動化するため、レーザー光とカメラを利用した非接触形状計測技術の開発に取り組んだ。その結果、両脚の断面形状を同時に計測できる可動型光切断方式と、ボタン1つで計測装置を校正できる自動キャリブレーション機能を開発した。

1 はじめに

子宮ガンや前立腺ガンの手術の際、転移防止のために周囲のリンパ節を取り除く。その後遺症としてリンパ液の循環不良が発生し、脚にリンパ液が溜まって激しく腫れ上がることがある。この病気をリンパ浮腫と言い、患者の数は全国に約6万人と言われている。リンパ浮腫の治療には、弾性ストッキングの着用による圧迫療法が最も効果的である。足首から太腿に向かって着圧を段階的に小さくすることによって、脚に溜まったリンパ液を押し上げて腫れを抑える。特に重症患者の場合は、個々の症状に合わせたオーダーメイド弾性ストッキングを必要とするが、大部分を輸入品に頼っているため入手に時間がかかり、高価である。国内では唯一、徳島県のストッキング・メーカーがオーダーメイド弾性ストッキングの製造・販売に取り組んでいるが、医療現場でのメジャーによる手採寸を必要とするため、ごく一部の需要にしか応えることができない。そこで、全国各地の治療施設へ非接触形状計測装置を設置し、採寸作業を自動化するための技術開発を行った。

2 方 法

2・1 可動型光切断方式

オーダーメイド弾性ストッキングを設計するためには、足首から太腿にかけて20ヶ所の断面形状の計測が必要である。そこで、断面形状を自動計測するための原理として、可動型光切断方式を考案した。

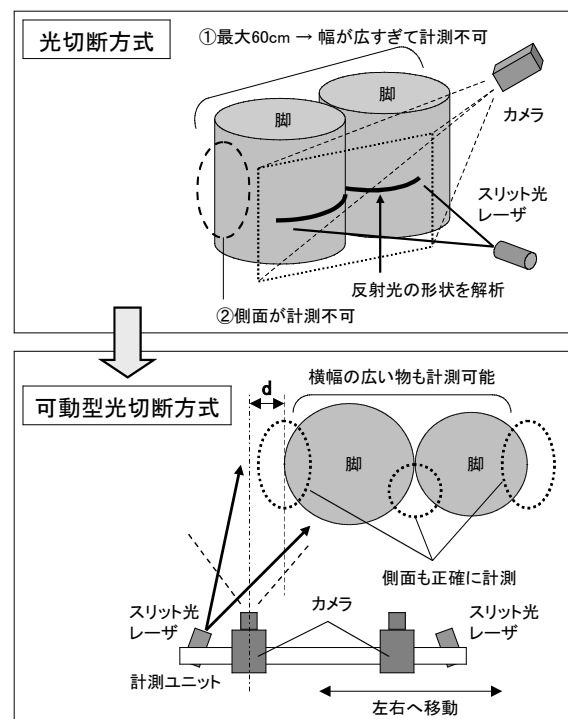


図1 「可動型光切断方式」の特徴

図1に可動型光切断方式の特徴を示す。可動型光切断方式は、従来の光切断方式の計測原理を応用してその問題点を解決し、脚の断面形状を計測するという目的に合わせてカスタマイズした方式である。被計測物にスリット光レーザーを照射して斜め上からカメラで撮影し、反射光の形状をコンピュータで解析することによって断面の形状を計測する。この方式は、様々な三次元形状計測手法の中でも構造が比較的シンプルで、特殊な部品を必要としないため、計測装置を安価に構築できる。しかし、光切断方式を本研究に应用するためには2つの問題がある。

*企画情報課, **徳島大学高度情報化基盤センター

まず、図中①に示すように、重症患者の場合、脚の直径が 30cm にまで腫れ上がることがあり、両脚を同時に計測するためには横幅 60cm の範囲を計測しなければならない。ところが、光切断方式ではスリット光の広がりやカメラの視野に限界があるため、幅の広い物を計測することができない。撮影距離を長くすれば全体を撮影することはできるが、計測精度が低下し、広い場所が必要になる。また、図中②に示すように、脚の側面がカメラの視野から外れてしまい、形状を計測することができない。カメラとレーザを側面付近まで移動させても、計測面が光軸に対して平行に近いため、レーザ光を照射してカメラで撮影することができない。撮影方向を増やせば計測することはできるが、カメラやレーザの台数が増えて装置が複雑になり、コスト面での問題も発生する。

これら 2 つの問題点を解決するため、図 1 に示すようにカメラとスリット光レーザを一体化(以下、計測ユニット)して左右に移動できるようにした。対象物の横幅に合わせて移動距離を設定すれば、幅の広い物でも形状を計測することができる。また、カメラの光軸を脚の側面よりも距離 d (約 15cm) だけ外側へ移動させ、側面を横目で見ると同じ状態を作り出す。さらに、スリット光レーザをカメラよりも外側から約 20 度の角度で照射することにより、側面にも十分な光量でスリット光を照射することができる。

可動型光切断方式で箱を撮影した画像を図 2 に示す。レーザの反射光がはっきりと映っており、立方体でも側面の形状を正確に計測できることがわかる。画像の背景部分が暗いのは、レーザ光に赤外線を使用し、カメラには赤外透過フィルタを内蔵して可視光を遮断したためである。蛍光灯や電球の光に含まれる赤外光よりもレーザ光を十分に強くすれば、レンズの明るさを絞ることによって、強度の弱い背景部分は暗くなる。この結果、暗室の中に設置しなくても、直射日光さえ遮っておけば計測が可能であり、設置場所の自由度が大きくなる。また、レンズの明るさを絞ったことによって被写界深度が深くなり、本研究のように奥行き深い対象物を正確に計測するためには有利である。

この計測ユニット 2 個を使って前後から形状を計

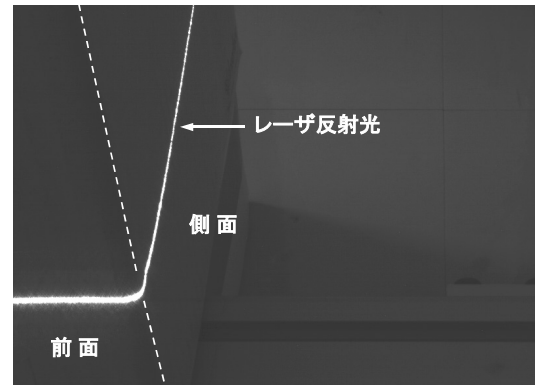


図2 「可動型光切断法」で撮影した画像

測して合成すれば、両脚の断面形状を求めることができる。また、2 個の計測ユニットを足首から太腿まで移動させることにより、オーダーメイド弾性ストッキングの設計に必要な 20 ヶ所の断面形状を計測することができる。可動型光切断方式は、前後からの計測のみで断面形状を計測することができ、暗室や特殊な部品を必要としないため、計測装置の小型化やコストダウンを図ることができる。

2・2 自動キャリブレーション

2・2・1 キャリブレーションの必要性

可動型光切断方式で断面の形状を計測するためには、画像上の任意の座標を実空間上での座標(以下、グローバル座標)へ変換する必要がある。例えば、2 つの点の画像上での距離が 100 画素であるとわかっていても、実際に何 mm 離れているのかはわからない。しかし、2 点の座標をグローバル座標に変換できれば、実際の距離を計算することができる。また、レンズの歪みや装置の組み立て精度が計測精度に影響を及ぼすため、これらすべての要因を含めて規定の計測精度が得られるように調整しなければならない。この作業を「キャリブレーション」と言う。

本研究で開発する計測装置は、全国各地のリンパ浮腫治療施設に設置する。ところが、計測装置の性能は周囲の環境や経年変化、突然の外乱などによって変化する。従って、メーカーの担当者は適宜、現場へ出かけてキャリブレーションを実施する必要がある。この作業はメーカーにとって負担であり、その間、計測装置を使えない治療施設にとっても迷惑である。そこで、誰でもボタン 1 つで調整できる「自動キャリブレーション」を考案した。この機能があれば、専門的な知識を持っていなくても簡単にキャリ

ブレーションできるため、故障さえ発生しなければ、メーカーの担当者が現場へ行かなくても常に計測誤差を最小に保つことができる。また、計測装置を組み立てる際も、座標変換に必要な装置各部の寸法を精密に測定する必要はなく、ボタン1つで計測可能な状態に仕上げることができる。

2・2・2 座標相関データベースの自動作成

光切断方式における座標変換の手法は数多く考案されている。例えば、様々な寸法の基準物体を基準面の上に置いてカメラで撮影し、実際の寸法と画像上での寸法の相関関係を求める。この作業をできるだけ簡単にするため、様々な形状の基準物体が考案されている。また、変換精度に影響を及ぼすレンズの歪みを補正するために、正確な格子パターンを撮影して画像各部における変形具合を解析する方法もある。このように、従来の座標変換手法では特殊な道具や専門知識を必要とするため、計測装置メーカーしか実施することができない。そこで、画像全体の座標とグローバル座標との相関関係を表す「座標相関データベース」を自動作成する方法を考案した。

図3に座標相関データベースの作成方法を示す。計測装置に予め反射板とスポット光レーザを一体化（以下、校正ユニット）して組み込んでおく。校正ユニットは電動スライダに取り付け、Y軸方向に自由に移動することができる。まず、カメラを X_3 へ移動し、反射板上でのスポット光レーザの反射光が画像の中央に来るように位置を微調整する。次に、スポット光レーザとスリット光レーザの反射光が画像上で完全に重なるように、計測ユニットの高さを調整する。以上の操作で、スリット光レーザとスポット光レーザの高さが同じになる。

次に、スリット光を消灯してカメラを X_1 、校正ユニットを Y_1 へ移動させてカメラで撮影する。撮影した画像から反射光の中心座標 (XP_1, YP_1) を計算し、その時の反射板のグローバル座標 (X_1, Y_1) と合わせてコンピュータに保存する。更に、校正ユニットを $Y_2 \rightarrow Y_3 \rightarrow \dots \rightarrow Y_n$ と移動させ、各位置における $(XP_1, YP_1) \sim (XP_n, YP_n)$ と、その時のグローバル座標 $(X_1, Y_2) \sim (X_1, Y_n)$ を保存する。以降、カメラを $X_2, X_3, \dots, X_m$ へ順番に移動させて同じ操作を繰り返し、合計 $m \times n$ 個の座標の組み合わせを保存する。これが座標相関データベースで

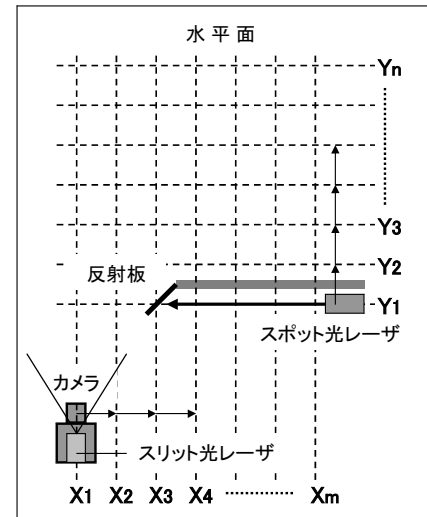


図3 「座標相関データベース」の作成方法

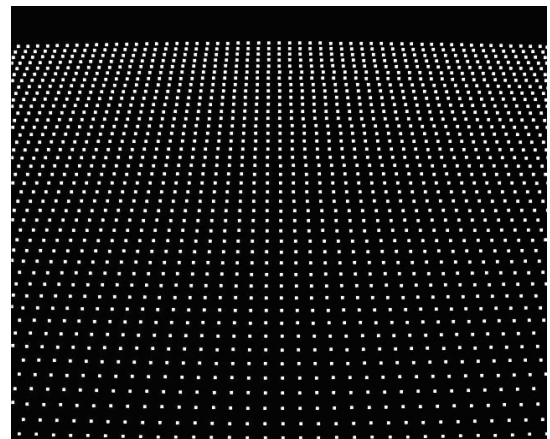


図4 全反射光の合成画像

ある。カメラと校正ユニットを 10mm ピッチで移動させながら画像を撮影し、すべて重ね合わせた画像を図4に示す。水平面上を 10mm ピッチで移動する反射光を斜め上からカメラで撮影するため、遠くなるほど間隔が狭くなる。また、レンズの歪みが原因で、画像の端へ行くほど反射光の並び方が湾曲していることが分かる。つまり、座標相関データベースはレンズの歪み情報も含めて相関関係を表していると言える。変換は、対象とする点を取り囲む複数の相関データを座標相関データベースから検索して取り出し、それらを基にグローバル座標を近似計算することによって行う。

座標相関データベースは、4台のカメラそれぞれに対して作成する。すべてのカメラの取り付け角度やズーム倍率を全く同じにすることは困難であるため、共通の座標相関データベースを使用することは

できない。反射板は、レーザ光が裏側へも透過するように半透明の樹脂で作ったため、すべてのカメラから反射位置を撮影することができる。断面形状計測の際には邪魔になるので取り外しておく。

2・2・3 計測装置の自動補正

断面形状の計測は、患者の前後に配置した2個の計測ユニットで行う。計測ユニットには合計4組のカメラとスリット光レーザ(以下、計測系)が取り付けられており、これらの計測系で部分的に計測した4種類の形状を合成して断面形状とする。合成する際に必要となるのが、4組の計測系の水平方向の相対位置である。計測装置を組み立てた時や保守を行う際に距離計などを使って測定すればよいが、手動で相対位置を正確に計測することは困難である。そこで、座標相関データベースの自動作成に使った校正ユニットを利用し、4組の計測系の相対位置を自動計測する方法を考案した。

図5に自動計測の方法を示す。まず、反射板上のスポット光の中心がカメラ1の画面の中央になるように、計測ユニットの水平位置 X_1 と垂直位置 Z_1 を調整し、その時の位置 (X_1, Z_1) を記録する。次に、校正ユニットを固定した状態でカメラ2に対しても同様の操作を行い、位置 (X_2, Z_2) を記録する。これら2つの位置情報から、カメラ1と2の水平方向の相対距離 $(X_2 - X_1)$ と、垂直方向の相対距離 $(Z_2 - Z_1)$ を計算することができる。もう1つの計測ユニットのカメラ3と4に対しても同様の操作を行って (X_3, Y_3) (X_4, Y_4) を求めれば、カメラ4台の相対位置を計算することができる。もし垂直方向の相対距離が0でない場合、計測ユニットを水平に動かしただけではレーザ光の照射位置に違いが生じて計測誤差の要因となる。そこで、相対距離の分だけ計測ユニットを上下に動かし、常にスリット光の照射位置を同じ高さにして画像を撮影する。

2・3 断面形状の求め方

図6に、計測ユニットで撮影した画像から断面形状を求める方法を示す。スリット光レーザの反射光の形状を、実空間上での形状に変換したものが断面形状である。そこで、最初に反射光上の強度分布を利用して中心線を抽出する。次に、中心線上の点を取り囲む4つの相関データを座標相関データベースから検索して取り出し、近似計算によってグローバ

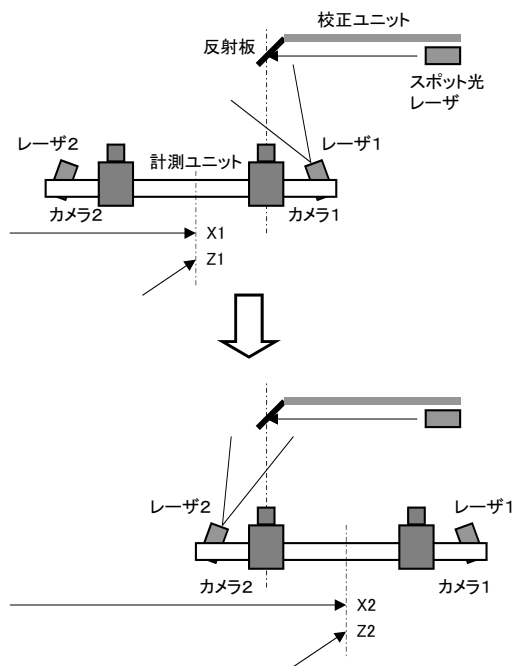


図5 相対位置の自動計測

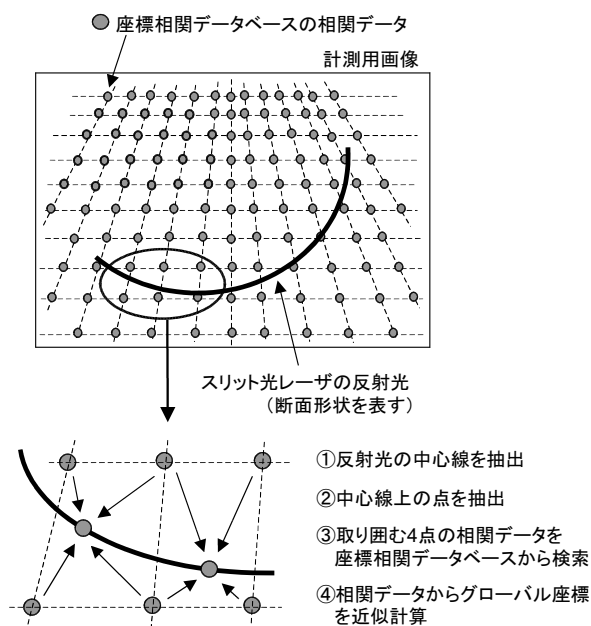


図6 断面形状の求め方

ル座標に変換する。中心線から数多くの点を取り出してこの処理を繰り返せば、空間上での中心線の形状、つまり断面形状を求めることができる。

3 結果と考察

3・1 非接触断面形状計測装置の試作

試作した非接触断面形状計測装置の外観を図7に示す。2個の向かい合う計測ユニットの距離は約70cmで、電動スライダによって上下左右に移動す

ることができる。計測装置の骨組みには市販のアルミ・フレームを使用し、底面が $140 \times 110\text{cm}$ 、高さが 165cm 、重さが約 200kg である。

図 8 に計測ユニットの構造を示す。スリット光レーザは波長 780nm の赤外光で、カメラは解像度 $1,280 \times 1,024$ 画素、赤外画像専用の CMOS タイプである。カメラは水平面に対して 45 度下を向けて取り付けられた。2 台のカメラの間隔は 40cm で、計測ユニットを左右に 40cm 移動できるため、2 台のカメラで 80cm の範囲をカバーできる。脚の側面よりも 10cm 外側までカメラを移動させるとすると、 $80\text{cm} - (2 \times 10\text{cm}) = 60\text{cm}$ の横幅の物まで計測することができる。また、スリット光レーザが標準的な日本人の脚首から太腿まで移動できるように、計測ユニットの垂直方向の移動距離を 90cm とした。

図 9 に非接触断面形状計測装置の構成を示す。計測装置の制御はすべてコンピュータで行い、カメラからの画像は USB2.0 通信によって入力される。レーザは安全性を確保するため、コンピュータからの指令によって計測時のみ ON にする。

3・2 断面形状の計測実験

試作した非接触断面形状計測装置を使って実際に断面形状を計測した。まず、自動キャリブレーション機能を使って座標相関データベースを自動作成し、次に計測精度を検証するため、人間の脚ではなく塩ビパイプの断面形状を計測した。



図7 非接触断面形状計測装置の外観

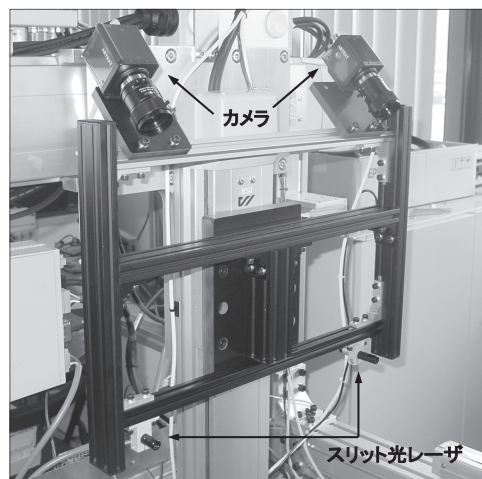


図8 「計測ユニット」の構造

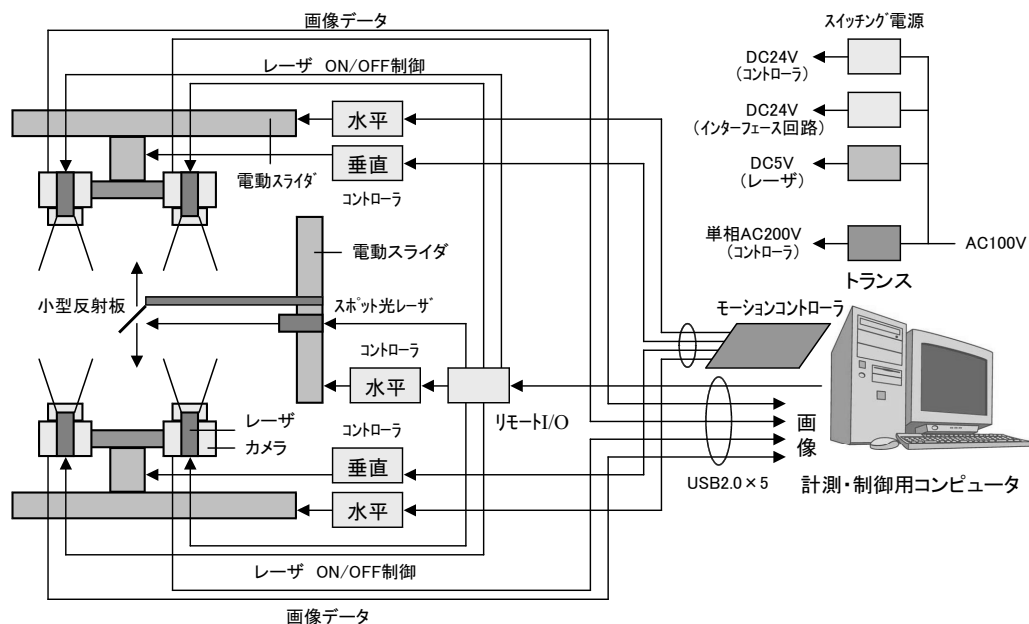


図9 非接触断面形状計測装置の構成

図 10 に、直径 165mm の塩ビパイプを計測した結果を示す。計測ユニットを 10cm ずつ横に移動させて 5 枚の画像を撮影した。図中、反射光が映っていなかった 2 枚の画像は省略している。下側の図は、パイプの外形を表す円と、すべての計測点とを重ね合わせたものである。約 1,000 個の計測点がほぼ 180 度の範囲全体に分布しており、「側面の形状も計測可能」という可動型光切断方式の効果が表れている。

パイプの中心から各計測点までの距離 D と、ノギスで計測したパイプの半径との誤差を計算したところ、プラス側の平均誤差は 0.33%、マイナス側は 0.62%であった。同様に、直径の異なる 3 種類のパイプの断面形状を計測したところ、プラス側の最大平均誤差は 0.69%、マイナス側は 0.64%であった。塩ビパイプの断面形状が真円とは限らないため、あくまでも目安ではあるが、目標とした計測精度（ $\pm 0.5\%$ 以内）に近い性能を達成できたと推測できる。誤差の要因としては、スリット光の中心線の抽出方法や、中心線のグローバル座標への変換精度などが考えられる。また、向かい合う 2 個の計測ユニットを使って前後から形状を計測して合成したところ、最大で 1%程度の誤差が発生した。これは、電動スライダの僅かな傾きが原因であり、自動キャリブレーションによって自動補正する方法を考える必要がある。

断面形状の計測は、最初に足首から太腿までの全画像を撮影し、その後でまとめて解析作業を行う。試作した計測装置の撮影時間は約 260 秒、画像の解析時間は約 300 秒であった。患者は、画像を撮影している 260 秒(4 分 20 秒)の間、静止していなければならない。自動キャリブレーションに要する時間はカメラ 1 台につき約 15 分、4 台で約 60 分である。これは決して短い時間とは言えないが、ボタン 1 つで自動実行できるため、診察終了後や休診日に行えば問題はない。

4 ま と め

自動キャリブレーションと可動型光切断方式を開発して非接触断面形状計測装置の試作を行った結果、両技術の効果によって断面形状を良好に計測できることがわかった。計測精度については目標値をクリアすることができなかったが、自動キャリブ

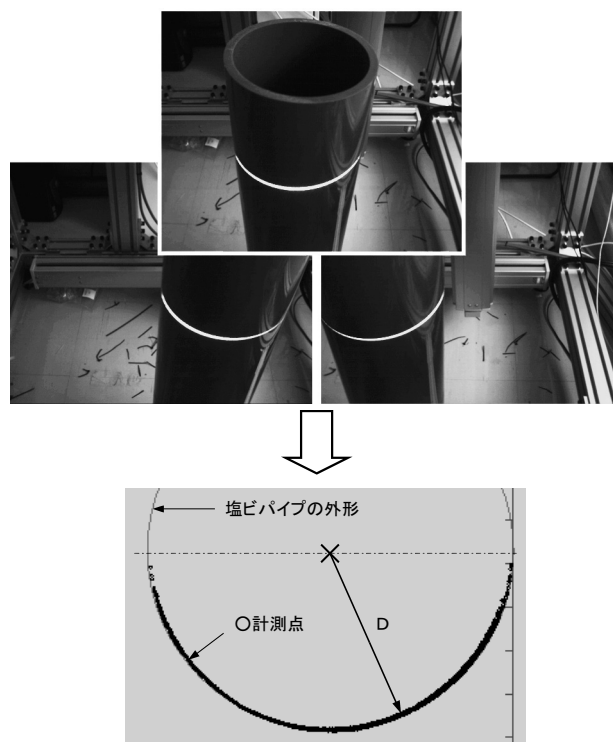


図10 塩ビパイプの計測結果（ $\phi=165\text{mm}$ ）

レーションと可動型光切断方式に関わる要素技術をレベルアップすることにより、装置全体としての計測精度を大幅に改善できると考える。

計測時間については当面の目標であった 5 分(300 秒)以内を達成することができた。しかし、患者が立った状態で 5 分間静止することは困難であり、今後は 1 分以内を目標として研究を継続する。

非接触断面形状計測装置を実用化するためには、本研究の結果以外に装置の小型化やコストダウン、信頼性の確保など、様々な課題が残されている。今後、産学官の連携により、さらにレベルアップした研究開発に取り組んで実用化を目指す。

謝 辞

本研究課題の提案者であり、研究を進めるに当たって様々な形でご協力下さいました東光株式会社の皆様に深く御礼申し上げます。また、技術面で貴重なアドバイスを下さいました独立行政法人産業技術総合研究所四国センターの小川洋司主任研究員に深く御礼申し上げます。