

足形状に最適な測定ヘッドの移動軌跡を実現した三次元足型自動計測機

藤田 日出人†、蚊野 浩†、吉田 博明†、福本 晋平†、楠見 浩行‡、篠原 浩徳‡

†三洋電機(株) メカトロニクス研究所、‡(株)アシックス スポーツ工学研究所

足の周りを囲むように配置した長円形のレーン上を3Dセンサーが自走することで、足首から下を約13秒で測定する三次元足型自動計測機を開発した。この装置は、組立・校正時に、装置上方に設置したステレオカメラを用いて、予め3Dセンサーの3次元軌跡を求めておく。測定時には、3Dセンサーから直接得られる測定点の3次元座標と3Dセンサーの位置・姿勢から、被測定物の3次元点群データを再構成する。この構成により、測定対象の形状に応じた自由なレーン設計が可能となり、足に最適な3Dセンサーの軌道を実現することができた。本装置の精度は足長で±1.0mm、足囲で±1.5mm(最低保証精度)である。

A 3D Foot Scanning System with a Sensor Head Guided around the Foot

A 3D foot scanning system with a sensor head guided around the foot has been developed. This system measures all of the foot parts below the ankle in 13 seconds. A 3-dimensional path for the sensor head is achieved by using a stereo camera above the sensor head in an off-line process. The shape of the foot obtained from the sensor head and the 3D path of the sensor head are merged, and the entire shape of the foot is reconstructed in an on-line process. These processes make it possible to freely design the path of the sensor head and the optimized path for the foot shape. The accuracy of the foot scanning system is ±1.0 mm for the foot length and ±1.5 mm for the foot perimeter.

Hideto Fujita†, Hiroshi Kano†, Hiroaki Yoshida†, Shinpei Fukumoto†,
Hiroyuki Kusumi†, Hironori Shinohara†

†Sanyo Electric Co., Ltd., Mechatronics Research Center,

‡ASICS Corporation Research and Development Department

1 はじめに

靴や服飾、めがねなどファッション分野におけるパーソナルフィットへの要求、人間工学分野でのデータ取得、あるいはゲームなどの3次元CGデータ作成など、全身あるいは手足などの身体パーツの形状計測に対するニーズが高まっている[1][2]。中でも靴は、老若男女を問わず万人が利用するものであること、外反母趾に代表される足の病気の増加、腰痛などの病気の原因として指摘されていることなどから[3]、パーソナルフィットへの要求が強く、一般の靴店舗でも使用可能な足形状計測機器が必要となっている。



図1 三次元足型自動計測機の外観

これらの要求に呼応し、全身・身体パーツの立体形状をコンピュータに入力する 3 次元形状測定装置の開発も盛んである。これらの装置は、測定物の全体形状を測定するために、複数の 3 D センサを有しており、大型・高価格になっているのが現状である。

筆者らは、2 段階の能動ステレオを用い、測定ヘッドを手持ちで操作することで自由な位置から被測定物を観察するハンドヘルド型 3 次元形状計測機を開発を行ってきた[4][5]。この計測機を用いれば、1 台の 3 D センサにより、測定物の全体形状を計測することが可能である。この 3 D センサを、足の周りを囲むように配置した長円形のレール上で自走させることで、足首から下を約 1 3 秒で測定する三次元足型自動計測機を開発した。図 1 にシステムの全体写真を示す。以下、2 章で従来技術について述べ、3 章で本装置の測定原理を説明する。4 章で鏡による足裏計測を説明し、5 章で本装置による測定例と本装置の長所を示す。6 章で測定精度に関する実験データを示し、7 章では足長・足囲以外の計測機能を紹介する。8 章でまとめを行う。

2 従来技術

人間の身体のように凹凸のある複雑な形状に対して、十分な測定精度や価格、操作性、測定時間の短さを実現することが身体形状スキャナには要求される。現在の技術で、これらの要求に答えることができる方式として、特定の光パターンを照射し、被測定物上の光像を画像センサーで観察する能動ステレオ法が有望であり、多くの報告が為されている。

例えば、福岡[6]は、能動ステレオレーザ距離計を使用し、足の立体形状を約 1 5 秒で測定する装置を開発した。この装置では、足裏を含む足の全体形状を計測するために 1 2 個の 3 D センサを使用しており、装置が大型化している。山崎ら[7]は、赤外レーザ光の回折により多数のスポット光を物体表面に投光するファイバグレイ

ティング形状センサを用いた足部形状計測装置を開発した。ファイバグレイティング形状センサにより、短焦点で広範囲の計測が可能になっているが、足全体の形状を得るために、3 台の 3 D センサと、2 方向からの足の輪郭線を得るための 2 台の CCD カメラを必要としている。長谷川ら[8]は、レーザスキャンによる時系列空間コード化法に基づく顔形状計測装置を開発している。この装置では、CCD カメラの左右に 2 台のレーザスキャナを配置することで、鼻等の凹凸による欠損を最小にしながら顔全面の形状計測を行っている。この装置でも頭部全体を計測しようとするシステムが複雑化することは明らかである。

3 システム構成と測定原理

3. 1 システム構成

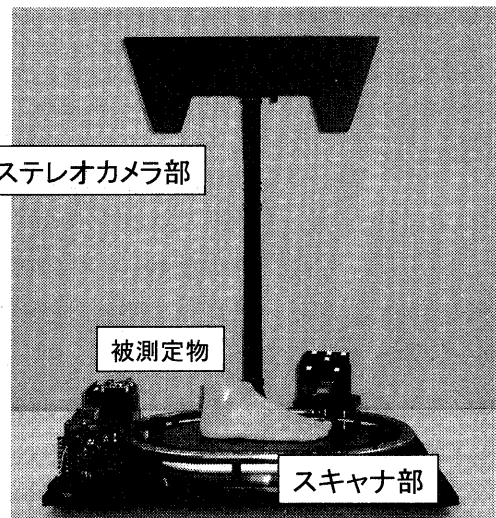


図 2 システム構成

本装置は図 2 ならびに図 3 に示すように、被測定物の周りを囲むように配置されたレールと測定ヘッドを有するスキャナ部、測定ヘッドの位置決めを行うステレオカメラ部、及び図には示されない演算処理部で構成される。

スキャナ部のレールは、足の形状に合わせ半径 175mm の半円と直線を組み合わせた小判状

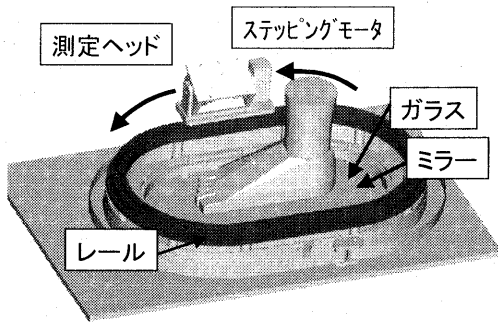


図3 スキャナ部の構成

になっている。測定ヘッドはステッピングモータによりレール上を自走する構造になっている。足裏部の形状を同時に計測するため、鏡を設置し、鏡の上 34mm の位置に設置したガラスの上に足を置く構造になっている。

演算処理部は、イメージキャプチャボードをアドオンしたパソコンであり、全ての処理はソフトウェアで実行される。

CPU	Celeron633MHz
Main Memory	128MB
OS	Windows98SE

表1 演算処理部仕様

3.2 測定ヘッド

測定ヘッドは、図3に示すように、スリット光を照射するレーザー光源とビデオカメラを内蔵し、筐体上面に6個のLEDマーカーを配置した。スリット光の抽出を容易にするため、カメラレンズ前面にフィルタを取付けた。

測定ヘッド内のカメラは Tsai の方法で校正した[9]。測定ヘッド中心の座標系におけるLEDマーカーの座標は、校正時の校正パターンと測定ヘッドの位置関係、カメラ校正で得られる外部パラメータ（基準となる座標系でのカメラの位置と姿勢）、及び測定ヘッドの設計値などから算出した。

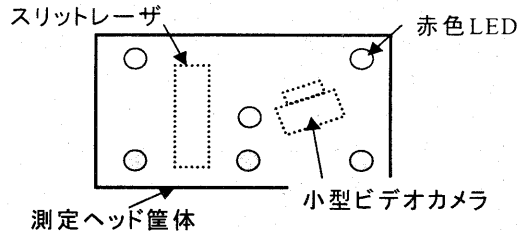


図4 測定ヘッド

3.3 ステレオカメラ

ステレオカメラ部は2台のビデオカメラから構成される。カメラレンズ前面に、LEDマーカーを安定に抽出するためのフィルタを取り付けた。ステレオカメラの校正は、Tsaiの方法で2台のカメラを同時に校正することで行う。

3.4 測定原理

測定ヘッド中心の3次元座標系で、図5のM点の座標が $Mc = [x_c, y_c, z_c]^T$ と計測されたとする

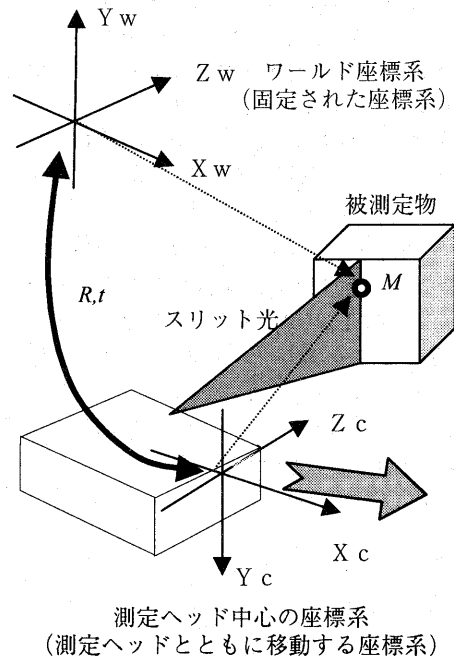


図5 測定ヘッド中心の座標系とワールド座標系

($[\]'$ は転置を表す)。ここで、測定ヘッド中心の座標系とは、測定ヘッドに内蔵されたカメラの光学中心を原点とし、その光軸方向を z 軸、撮像素子の水平方向を x 軸、垂直方向を y 軸とする座標系である。一方、被測定物に固定されたワールド座標系として、ステレオカメラの片方のカメラを中心とする 3 次元座標系を採用する。

測定ヘッド中心の座標系とワールド座標系の位置関係が回転行列 R と並進ベクトル t であるとき、 M 点のワールド座標 $M_w = [x_w, y_w, z_w]'$ は式 (1) によって記述することができる。

$$M_w = R \cdot M_c + t \quad (1)$$

従って、測定が行われるつど、式 (1) の回転行列 R と並進ベクトル t を求め、座標変換を行うことで被測定物の形状がワールド座標系で統合される。

式 1 の回転行列 R 、並進行列 t を求めるため、測定ヘッド筐体上面に配置された 6 個の LED をステレオカメラにより観察し、3 次元的位置を計測する。しかし、この状態では足を計測する際には、被計測者の身体が影となって、測定ヘッドの LED を観察することができない。そこで本装置では、前処理として、レール上の各ポジションにおける測定ヘッドの 3 次元位置情報をステレオカメラにより計測し、 R_n 、 t_n をテーブルデータとして格納する。レール上の移動はステップモータを利用しており、 n はホームポジションからのステップ数を表す。

R_n 、 t_n を求める手順をさらに詳しく説明する。測定ヘッドの位置と姿勢を求めるために、筐体上面の 6 個の LED の位置をステレオ計測する。第 i 番目の LED のワールド座標系における座標値を $L_{wi} = [x_{Lwi}, y_{Lwi}, z_{Lwi}]'$ とする。一対のステレオカメラで観察した LED の、画像面での座標を $\tilde{m}_r = [u_r, v_r, 1]'$ 、 $\tilde{m}_l = [u_l, v_l, 1]'$ とすると、 L_{wi} は式 (2) から求められる。

$$\begin{aligned} s_r \cdot \tilde{m}_r &= P_r \cdot \tilde{L}_{wi} \\ s_l \cdot \tilde{m}_l &= P_l \cdot \tilde{L}_{wi} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし s_r 、 s_l は任意の定数、 P_r 、 P_l は各カメラのパラメータで決まる 3×4 の透視投影行列、 \tilde{L}_{wi} は L_{wi} の同次座標表現である。一方、各 LED

の測定ヘッド中心の座標系における座標値を $L_{ci} = [x_{Lci}, y_{Lci}, z_{Lci}]'$ とする。この値は、測定ヘッドを校正する段階で、測定ヘッドの寸法や筐体内のカメラの取付け位置などから得ることができる。

2 つの 3 次元座標系において、3 組以上の対応する座標値の組から、式 (3) を最小化する回転行列 R と並進ベクトル t として、2 つの座標系の位置関係を得ることができる [10]。

$$\sum_i \{ \text{distance}(L_{wi}, R_n \cdot L_{ci} + t_n) \}^2 \quad (3)$$

ここで、 $\text{distance}()$ は 2 点間のユークリッド距離を意味する。

測定ヘッド部は、光切断法を用いて 3 次元計測を行う。測定ヘッド部のカメラの特性を 3×3 行列 A で表し、スリット光が表す平面を測定ヘッド中心の座標系で $a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0$ とする。

被測定物に照射するスリット光をビデオカメラで撮影すると、画像上に明確な輝線が観察される。輝線上のある 1 点の画像座標を $\tilde{m} = [u, v, 1]'$ と同次座標で表すと、これに対応する 3 次元座標 M_c は式 (4) から得ることができる。

$$\begin{aligned} s \cdot \tilde{m} &= A \cdot M_c \\ a \cdot x_c + b \cdot y_c + c \cdot z_c + d &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで s は任意の定数、 A は内部パラメータ行列と呼ばれ、式 (5) のように記述される。

$$A = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式 (5) で α は画像座標の水平方向のスケール因子、 β は垂直方向のスケール因子、 γ は画像座標の 2 軸のなす角度に関係した因子、 $[u_0, v_0]$ は画像中心である。

被測定物を計測する際には以下の処理を、測定ヘッドがレール上を一周する間、繰り返し実行している。

- ① 測定ヘッド部での光切断法 (4) による形状計測。
- ② 測定ヘッド位置の読み出し (ステップ数 n)
- ③ テーブルより、測定ヘッドの回転行列 R_n と並進ベクトル t_n を参照。

④測定ヘッド座標系からワールド座標系への座標変換。

4 鏡による足裏計測

鏡を用いることにより、図6に示すように、被測定物の上面と底面が同時に計測される。底面側の形状を、鏡面に面対称に折り返すことで、全体の形状が得られる。鏡面のワールド座標系での位置を求めるため、鏡の位置に鏡と同じ厚みの白板を置き、本システムで計測することで平面方程式を算出している。ガラスによる屈折は、測定ヘッドの2次元 CCD 座標内での、ガラス有りとなしの場合のスリット光のズレを実験的に求めて補正している。

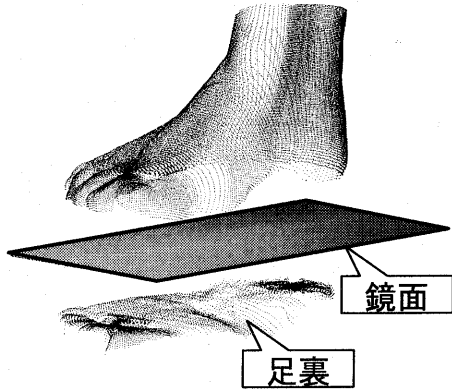


図6 鏡による足裏計測

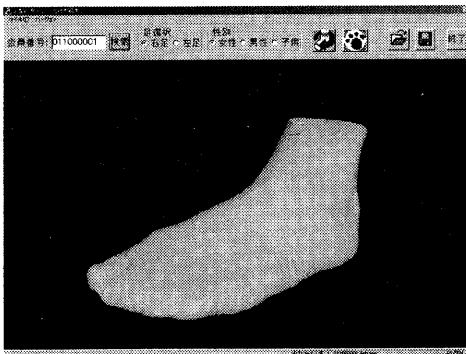


図7 計測データの一部

5. 提案手法のメリット

図7に、本計測機で測定した足の一例を示す。通常、ステレオ画像計測では被測定物表面の法線とカメラ光軸の角度が直角に近づくとき、データの密度、精度ともに低下する。我々の装置では、図8に示すように、測定ヘッドを小判状に動作させているため、被測定物の全周にわたってほぼ正面から計測可能である。また、測定ヘッドが円弧上を移動する際、レーザが回転中心に向かって集中するようにレーザ配置を決定している。このため、この部位のデータ密度は自然に向上する。つま先とかかとの内側が回転中心となるように足位置を設計することによって、靴のフィッティングに重要な、つま先形状とかかと形状を高解像度、高精度で計測できるようになっている。図9に、足側面の直線部からの計測データだけを利用したときとの比較を示す。指一本一本までの細かい形状を計測できていることがわかる。

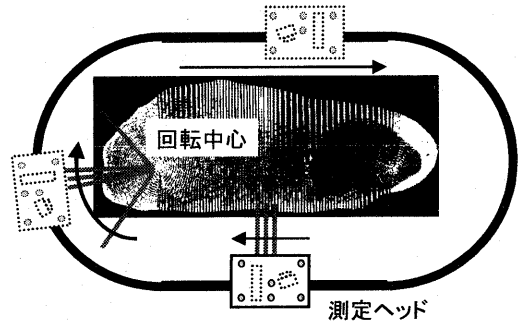
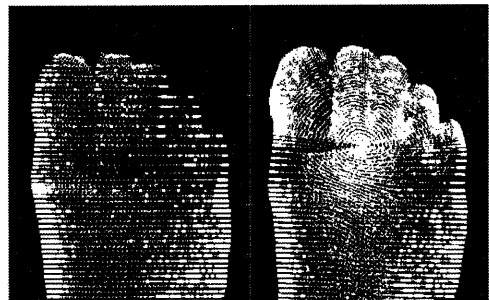


図8 測定ヘッドの移動軌跡と計測データ



(a)側面から計測 (b)本装置

図9 計測データの比較

測定ヘッドが足の周りを周回する間、30フレーム/秒の計測を行う。本装置では、測定ヘッドの移動速度を変化させることで計測の解像度を可変することが可能になる。靴のフィッティングを考えたとき、足のアーチ部、第1趾、第5趾付け根部の形状も重要であるため、これら部位の回転速度を遅く設定し、密な形状が得られるようにしている。片足の形状計測に必要な時間は13秒である。

我々の装置では、スキャナ部の機構を組立・動作確認後、ステレオカメラで測定ヘッドの移動パスを校正している。このため、測定ヘッドの移動軌跡は、直線や円といった単純な形状に限られることなく、測定対象の形状に合わせて自由な形状に設計できる。また、機構製作時に設計値通りとするために高い工作精度を要求する必要が無く、コストの低減に有利である。

6 計測精度と計測例

6.1 Box計測精度

本システムの精度を確認するために、長さが既知の白色立方体を計測した。測定データに平面フィッティングを行い、平面間の距離と長辺の長さとを比較した。この結果、220mm~280mmの白色立方体に対し、-0.6~+0.4mmの精度範囲で計測できていることが確認できた。

	220mm白Box	250mm白Box	280mm白Box
測定結果	219.4	249.7	280.4
誤差	-0.6	-0.3	0.4

表2 白色立方体計測時の精度

6.2 足計測精度

本システムにより、足を計測した場合の計測精度を検証した。しかし、実際の足では、荷重状態の変化などによる形状の変化があり、繰り返し精度を検証することが出来ない。そこで、型どりにより採取した石膏足を使って、計測精度の確認を行った。基準となる石膏足の足長と足囲は、手計測用の治具を使って計測した。

		基準値	計測平均	標準偏差	誤差
小	足長	218.2mm	217.93	0.75	-0.27
	足囲	220.8mm	221.31	0.41	0.51
中	足長	253.0mm	253.06	0.34	0.06
	足囲	247.2mm	247.76	0.54	0.56
大	足長	281.7mm	282.06	0.31	0.36
	足囲	272.5mm	273.72	0.36	1.22

表3 石膏足計測時の精度

大中小3種類の石膏足を用い、石膏足の置き位置を前後±10mm、左右±5mmの範囲内で毎回移動させながら10回の計測を行った。この結果、

- ①足長の誤差は-0.27~+0.36mm
- ②足長の標準偏差は0.31~0.75
- ③足囲の誤差は+0.51~+1.22mm
- ④足囲の標準偏差は0.36~0.54

我々は、本システムの計測精度として、足長±1.0mm、足囲±1.5mmを最低精度として保証している。8店舗において納入時に同様の検査を行ったが、足長の誤差平均は0.068mm、標準偏差0.37mm、足囲の誤差平均は、0.44mm、標準偏差は0.63mmとなっている。

7. その他の足特徴量計測機能

足長、足囲以外にも靴のフィッティングに必要な足の特徴量を計測できる。足の骨格ポイントにマーカを貼り付け、分析画面上でマーカを

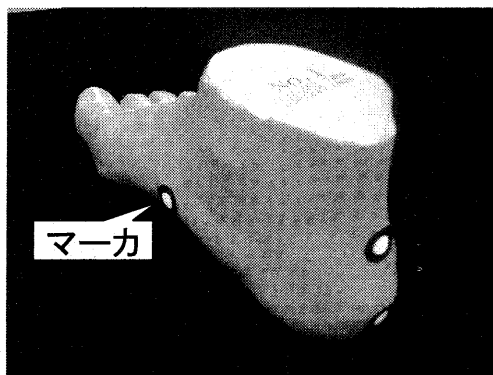


図10 計測マーカの貼付

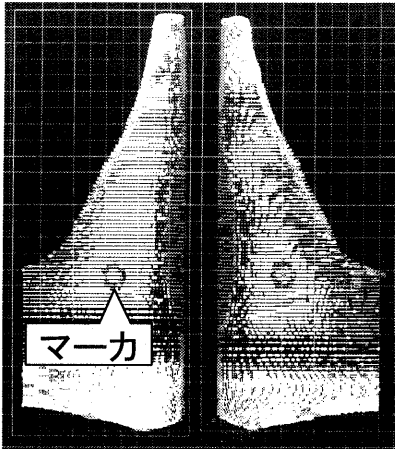


図1.1 アーチ高計測機能

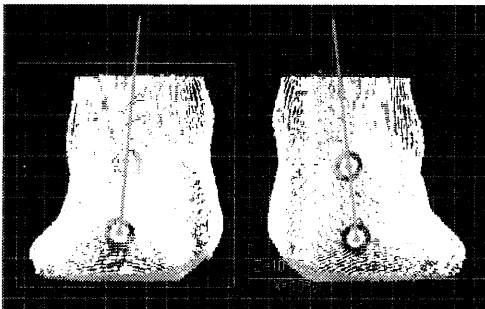


図1.2 かかと角度計測機能

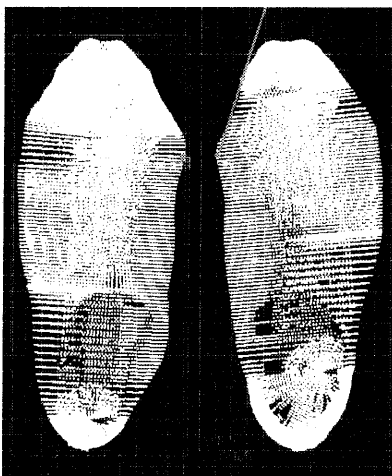


図1.3 第1趾側角度計測機能

確認して位置をマウス指定することで、アーチの高さと、かかと角度が計測できる。また、外

反母趾の程度を知ることができる第1趾側角度も計測できる。

8. まとめ

自走式測定ヘッド移動機構を持ち、2段階の能動ステレオ法を応用した新しい3次元形状測定装置を開発した。

測定ヘッド上方に設置したステレオカメラを用い、測定ヘッド位置の3次元情報を製造時に取得する構成により、

- ①測定ヘッドの移動軌跡を、測定対象に合わせて自由に設計できる
- ②移動機構の製造に高い精度を要求しないという特徴を実現した。また、足型計測機として、

- ① つま先、かかと部が高解像、高精度
- ② くるぶしから下の足裏を含む足全体形状を13秒で高速計測
- ③ 小型・低価格

本装置は、全国のアシックス直営靴小売店100店にて、稼働中であり、お客様の靴選び、足データの収集に役立っている。

今後は、足計測機としての機能向上を図るとともに、手、顔等のボディパーツへの応用開発を行いたい。

文献

- [1] 堤 江美子、“人体の3次元形状解析と被服設計”、計測と制御、Vol136、No2、1997
- [2] 河内まき子、持丸正明、“足型分析とその応用”、計測と制御、Vol136、No2、1997
- [3] 石塚 忠雄、“新しい足と靴の医学”、金原出版
- [4] 藤田 日出人、蚊野 浩、吉田 博明、安田 昌司、“2段階の能動ステレオ画像計測法を用いたハンドヘルド型3次元形状計測システム”、第1

6回センシングフォーラム資料、1999

- [5] 蚊野 浩、藤田 日出人、吉田 博明、安田 昌司、“2段階の能動ステレオ画像計測法を用いたハンドヘルド型3Dスキャナ”、第6回画像センシングシンポジウム講演論文集、2000
- [6] 福岡 正信、“スポーツ用具開発における計測システム”、計測と制御、Vol138、No4、1999
- [7] 山崎 信寿、佐藤 拓史、田中 大輔、中澤 和夫、持丸 正明、“ファイバークレーティングを用いた三次元足部形状計測装置の開発”、計測自動制御学会論文集、Vol134、No2、1998
- [8] 長谷川 一英、服部 数幸、佐藤 幸男、“顔の3次元形状とカラーテクスチャ計測システム” 映像情報メディア学会誌 Vol153、No3 1999.
- [9] R.Y.Tsai, “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses,” IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3, 4, pp.323-344, August, 1987.
- [10] 杉本 茂樹、奥富 正敏, “時空間画像を用いた回転物体の形状復元,” 情報論文誌, vol.40, no.6, pp.2717-2724, 1999.