

ネットワーク対応型 3 次元計測・加工装置の開発*

長谷川 辰雄**、中村 吉信***、
大崎 満弘****、土井 章男*****

機械部品や電子機器の製造では、複雑形状の加工、高品質・低コスト化が求められている。本研究では、計測・加工・分析の各装置をネットワークで接続し、各種情報の共有化で、効率的な「ものづくりシステム」の構築を目標とする。本システムの主な装置は、3次元形状スキャナー装置と3次元切削加工装置である。3次元形状スキャナー装置は、オーダーメイド靴製造のための足形状専用計測装置として、メッシュ・ネットを用いたステレオ計測により、足全体の計測が可能である。3次元切削加工装置は、PCからの動作命令が、加工ロボットと同期するように設計され、ネットワークによる遠隔加工が特徴となっている。

キーワード：ネットワーク、3次元計測、3次元加工

Development of 3D measurement and Processing device with adaptive network

HASEGAWA Tatsuo, NAKAMURA Yoshinobu,
OOSAKI Mitsuhiro and DOI Akio

Manufacturing industries of electronic or machine parts demand processing complex shape, quality products and cost-reduction. Our goal is the efficient manufacturing system that consisted of measurement, processing device and analysis. The devices can be able to communicate each other by the Network. This paper presents the 3D measurement and 3D processing device. The 3D measurement was developed for Tailor-made shoes and is able to measure the whole of foot with stereophonic measurement using mesh net. The 3D processing device can be controlled with synchronous from PC.

key words: Distributed Network, 3D measurement, 3D processing

1 緒 言

本報告では、効果的な「ものづくり」を実現するために、IT(Information Technology)を活用した「次世代のものづくり」の基礎技術について述べる。本研究の全体構成を図1に示す。「ものづくり」の基本である「設計技術」、「加工技術」、「計測技術」を、分散ネットワークで必要情報を共有し、効果的な「ものづくり」を目標とする。設計工程では、C A E(Computer Aided Engineering)を中心とした要素分割の検討・開発、加工工程では、円筒座標系ロボットを利用した加工装置の開発、計測工程では、メッシュ・ネットを利用した簡易型3次元形状スキャナー装置の開発を行った。本報告では、主に開発した2つの装置について述べる。3次元形状スキャナー装置は、ステレオ画像計測により、デジタルカメラの2次元画像から3次元座標を計算する。鏡を効果的に使って足全体の計測を可能としている。3次元切削加工装置は、インテリジェント・サーバを介して、PCからの同期制御が可能である。

加工データをファイル転送することで、遠隔からの加工が可能となっている。インテリジェント・サーバは、外部からのアクセスを制限するセキュリティ機能を備えている。

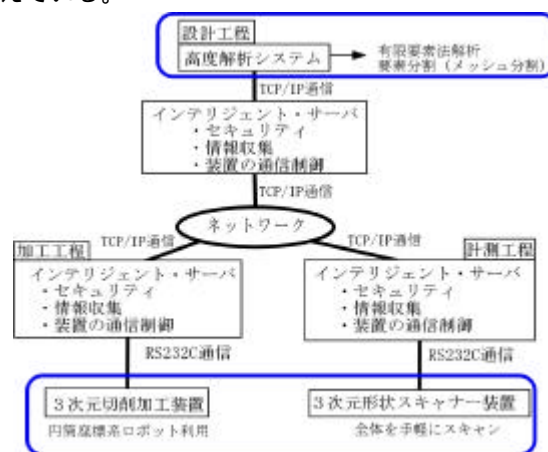


図1 全体構成図

- * 次世代クリエイティブソリューションシステムの開発（中小企業技術開発産学官連携促進事業）
** 電子機械部
*** (株)でん
**** (有)ヒロ
***** 岩手県立大

2 実験方法

2-1 メッシュ交差点抽出

現状の人体計測用の3次元形状スキャナー装置は、高額なレーザ装置と高速画像処理装置で構成され、一般ユーザは、全体の形状を手軽に求めることが困難である。そこで、我々は、オーダーメイド靴の製作のために、足全体を効率的に計測可能な簡易型の3次元形状スキャナー装置を開発した。この装置は、メッシュ・ネットで覆った足を8台のデジタルカメラで撮影し、ステレオ計測によって3次元座標を計算する。メッシュ・ネットには配列計算に必要なマーカが付与されており、ステレオ計測の計算基準点となっている。全体の処理の流れを図2画像処理フローに示す。デジタルカメラで撮影した8方向の画像に対し、2値化、細線化、メッシュフィルタの順番に処理を行う。



図2 画像処理フロー

2値化処理は、画像の前処理として、ノイズ除去や領域抽出の手法として用いられる。ここでは、RGBの閾値により2値化を行った。閾値の決定は式(1)により行われる。

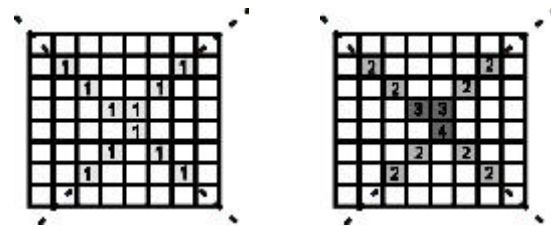
$$f(i, j) = \begin{cases} 1 & f(i, j) \geq t \\ 2 & a \leq f(i, j) \leq b \quad \dots (1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで t はメッシュの画素値を意味するRGB値を示し、範囲 $[a, b]$ はマーカを抽出するためのRGB値を示す。

細線化¹⁾は、2値化により抽出されたメッシュ・ネット部分の画像に対し、線幅が1画素で連結された線画情報を計算する。この線画情報は、メッシュ・ネットの骨格画像を意味しており、特定領域を追跡するための貴重な情報源となる。ステレオ計測は、線画情報で表されたメッシュ・ネット交差点を、左右画像のマッチング点として計算する。この左右画像のマッチング点を、自動的に対応させるために、2次元配列に格納する。この画像処理では、格子構造のメッシュ・ネットを前提としているため、2次元の配列化は容易である。このとき、メッシュ・ネットの交差点を順番に追跡し、その座標点を特定する必要がある。そのために、式(2)で示されるメッシュ・フィルタを設計した。

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x, y) \text{ is a mesh intersection point} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots (2)$$

関数 $g(x, y)$ は、8近傍に存在する画素数を出力する。このフィルタ処理によって、細線化画像に重み付けを行ったことになる。つまり、フィルタ処理された画像は、この重み情報によってメッシュ交差点を特定することが可能となる。図3にフィルタ処理の結果を示す。図3(a)の細線化画像に対して、フィルタ処理を行うと図3(b)のような画像となる。この画像によって、表1に示すように、メッシュ・ネットの種別の特定が可能となる。



(a)細線化画像 (b)フィルタ画像

図3 フィルタ処理

表1 メッシュネットの種別

種別	フィルタ値
終点	$g(x, y) \geq 1$
線分	$g(x, y) \geq 2$
交差点	$g(x, y) \geq 2$

2-2 2次元配列作成

ステレオ計測では、左右の対応点を自動的に一致させる必要がある。このために、交差点座標を構造化した2次元配列としてデータ設計を行った。交差点のデータは、上下左右のリンク情報、幹線・支線情報、メッシュ種別などの構造データとして構築した。設計した2次元配列を有向グラフで記述したものが図4である。

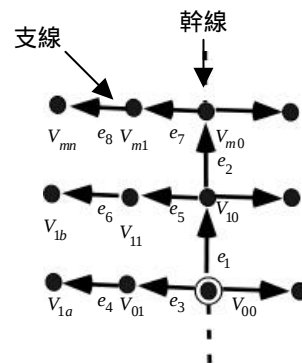


図4 2次元配列の有向グラフ

有向グラフは、左右の交差点を順番に一致させるために使用し、 V が頂点、 e が辺(エッジ)を意味しており、矢印は方向の情報を示している。図4の二重丸はマーカを意味しており、この点を基準に、最初に幹線上の交差点の追跡を行い、次に支線上の交差点の追跡を行う。この追跡には、8連結のチェーン・コード追

跡法を用い、追跡と同時に、交差点の判別を行い、2 次元配列へ格納する。

2 - 3 射影行列による 3 次元座標計算

3 次元座標計算に必要なカメラの数値モデルをピンホールカメラで定義²⁾した。このモデルはデジタルカメラに使用されている CCD を正確に記述している。3 次元空間の点 $\tilde{M} \begin{bmatrix} x, y, z, 1 \end{bmatrix}^T$ が、射影行列 P によって、ピンホールカメラの投影平面上の点 $\tilde{m} \begin{bmatrix} u, v, 1 \end{bmatrix}^T$ へ投影された場合、式 (3) で記述できる。

$$\tilde{m} \approx P \tilde{M} \quad \cdots \text{式 (3)}$$

射影行列 P は、ランク 3 の 3×4 行列で式 (4) で表される。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^T \\ p_2^T \\ p_3^T \end{bmatrix} \quad \cdots \text{式 (4)}$$

ここで、 P_{34} は物体の拡大・縮小を示すスケールファクターであり、ここでは等倍の 1 で計算を行った。射影行列は左右 2 つの画像で存在するため、式 (5) で記述できる。

$$\begin{bmatrix} p_1^T M_i \\ p_2^T M_i \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{31}^T & p_{32}^T & p_{33}^T & p_{34}^T \end{bmatrix} \quad \cdots \text{式 (5)}$$

射影行列 P の自由度は 11 であるから、6 箇所の位置関係が既知であれば、式 (5) は次式で表される。

$$Bp \approx 0 \quad \cdots \text{式 (6)}$$

したがって、射影行列 P は $B^T B$ の最小の固有値に対応する固有値ベクトルとして求めることができる。射影行列 P が求まると、式 (3) は式 (7) で記述できる。

$$\begin{bmatrix} p_{31}^T & p_{32}^T & p_{33}^T & p_{34}^T \\ p_{31}^T & p_{32}^T & p_{33}^T & p_{34}^T \\ p_{31}^T & p_{32}^T & p_{33}^T & p_{34}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad \cdots \text{式 (7)}$$

$b \begin{bmatrix} p_{14} \\ p_{24} \\ p_{34} \end{bmatrix}$ とおくと、3 次元空間点は式 (8) のように求めることができる。

$$\tilde{M} \approx B^+ b \quad \cdots \text{式 (8)}$$

ここで B^+ は一般化逆行列を意味する。

2 - 4 3 次元切削加工装置

3 次元切削加工装置は、円筒座標系ロボットをベースにして開発し、(有) ヒロが開発した 1 軸で 2 つのアームを制御し、直線運動を可能とする技術が特徴である。従来のアームロボットは、2 つのアームのそれぞれに駆動軸が必要であり、それぞれがリンク機構で接続されているため、位置決めには、複雑な計算式が必要であった。従来のスカラーロボットの複雑さを図 5、式 (9) 及び式 (10) で示す。

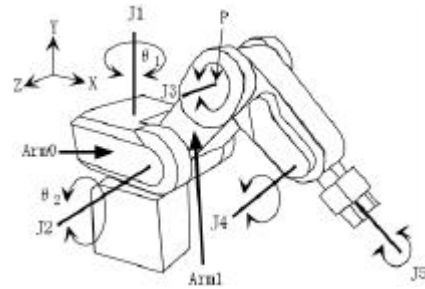


図5 スカラーロボットモデル

$$A_1 \approx f(\theta_1) \quad A_2 \approx g(A_1, \theta_2) \quad \cdots \text{式 (9)}$$

$$T_0 \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_{J2} \approx \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_1 \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(a)原点移動 (b)回転行列 (c)新位置移動
式 (10) 先端位置決め行列

2 - 5 円筒座標系ロボットモデル

一方、開発した 3 次元切削加工装置は、アームの軸が個々に独立して回転する機構で、ハーモニックドライブと呼ばれる減速機で、それぞれの回転数を調整して位置決めを行っている。2 つのアームはパンタグラフ機構によって円筒座標系で構成され、アームの回転速度は 1 : 2 となっている。直線運動 (R 軸) の場合、図 6 の概略図をもとに、その制御計算式は式 (11) で示される。

$$R = 2 L \cos \alpha \quad \cdots \text{式 (11)}$$

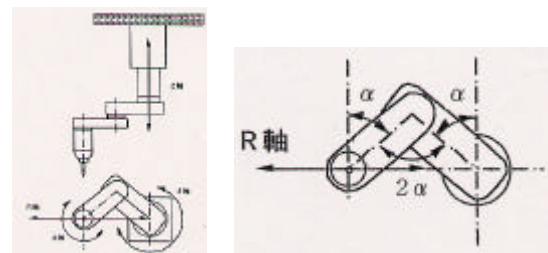


図6 3次元切削加工装置概略図

3 実験結果及び考察

3 - 1 3 次元形状スキャナー装置の実験結果

本装置のデジタルカメラは、低価格性、高解像度、コンパクト性、PC プログラム制御などを検討し、Cannon 社製の IXY 200 を採用した。本装置の外観図を図 7 に示す。8 台のデジタルカメラは、パン・チルトが可能なアタッチメント台により、任意に配置できるように工夫されている。また、足裏の撮影は、鏡を利用して撮影できるような台を試作した。デジタルカメラは、USB HUB を経由して PC に接続され、PC からのプログラム命令で撮影を行う。足の撮影時の考慮点は、できる

だけすばやく撮影しなければならない点である。人は、数秒間でさえも静止することが難しく、その撮影には高速化が要求される。しかし、PCプログラムによる8台のカメラシャッター制御は、同時シャッターが不可能な仕様であった。そのため、カメラを切り替えながらシャッター制御する必要があった。1台当たり1～2秒程度を要するため、8台すべての撮影には約16秒程度と長時間となっている。



(a)全体像 (b)足裏撮影用台
図7 3次元形状スキャナー装置外観図

本装置によって撮影された8枚の画像は、開発した3次元計測ソフトウェアによって計測が行われる。図8に実験結果を示す。図8(a)は撮影画像の背景を除去し、必要領域のみを抽出した画像である。図8(a)の画像に、2値化処理を行った画像が図8(b)である。図8(c)は、細線化、メッシュフィルタ及び、交差点抽出アルゴリズムを適用して、交差点を抽出した結果である。図8(d)は、原画像と抽出した交差点を重ね合わせて表示した図である。

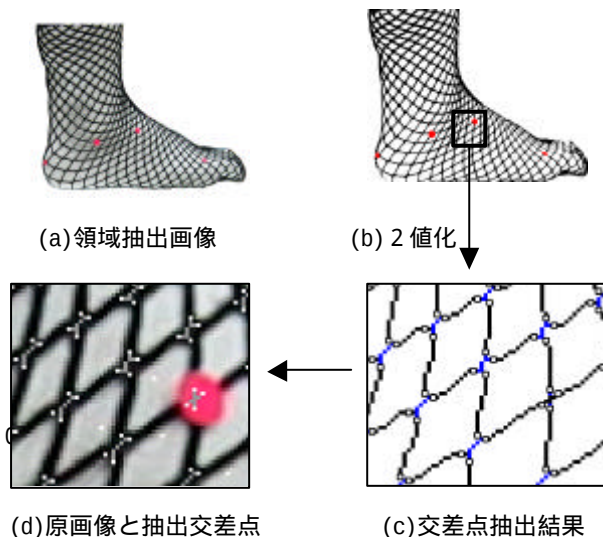
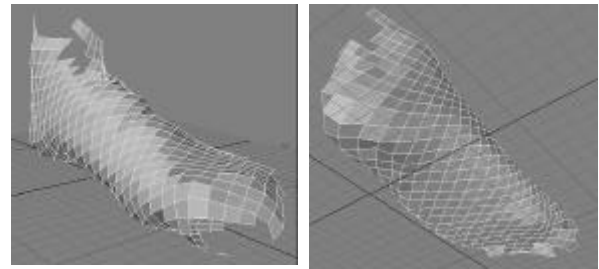


図8 3次元計測ソフトウェア実験結果

8枚の画像に対して交差点を抽出し、3次元座標計算を行った後、CGによるシェーディング表示した結果を図9に示す。開発した3次元計測ソフトウェアはOpenGLでの3次元表示の他に、デザイン用CADであるLightWave3D用のデータを出力することが可能である。3次元計測の精度は、ノギスや市販の3次元計測器を使いその比較で誤差を求めた。10箇所の計測地点で



(a)側面 (b)足裏
図9 3次元表示(LightWave3D)

空間距離を実測し、計算でもとめた値との比較を行った。その結果、最小:0.02mm、最大:1.7mm、平均:0.76mmとなった。目標値である2.0mm以下を達成した。

3-2 3次元切削加工装置の実験結果

本装置は、円筒座標系ロボット部と動作制御を行うPCで構成されている。ロボットの先端にエンドミルが装着され、対象物を切削する。本装置の外観図を図10に示す。動作実験では、繰り返し実験によって、位置決め精度: $\pm 40 \mu\text{m}$ となり、目標値の $\pm 100 \mu\text{m}$ を達成した。切削実験では、直線・曲線の単純な形状切削を行い、良好な結果を得た。この結果、ロボットの同期制御、ネットワーク制御プログラムの基礎的動作確認ができた。



図10 3次元切削加工装置外観図

4 結 言

3次元形状スキャナー装置及び3次元切削加工装置の開発では、それぞれの仕様を満たし、目標値を達成できた。しかし、これらは基礎的な目標値であり、実用化にはまだ不十分である。今回の開発・実験結果から、改良すべき問題点が明確化になった。スキャナー装置では、高速撮影、メッシュ無し計測が改良点であるが、既に対応・検討を行っている。加工装置では、DXFなどの一般的なCADデータ形式の取り扱いなど、ソフトウェア面の充実が問題である。今後は、これらの問題点を整理し、企業が開発した装置を実施化できるように対応する予定である。

文 献

- 1) 鈴木 智: 細線化アルゴリズムの高速化に関する考察, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 10, pp.925-932 (1988).
- 2) 徐 剛, 辻 三郎: 3次元ビジョン, 共立出版, 1999.