三次元自動測定・加工システムに関する研究*

—コスメティックカバー製作への適用—

大 島 徹** 斎 藤 之 男***

A Study on the Three Dimensional Automatic
Measuring and Milling System
—Application to a Manufacture of
Cosmetic Cover—

Toru OSHIMA and Yukio SAITO

The present paper deals with a manufacturing method for a symmetric cosmetic cover to a natural residual hand of handicapped person. Recently, the automatic measuring technique with a three dimensional measuring machine is incorporated in the field of CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing). However, this technique is difficult to apply in the complicated object like a natural hand. This study is to measure

the residual hand of handicapped person automatically, secondly is to manage the measured numeric values, and finally is to mill a model of cosmetic cover for the affected hand with the same set up, a three dimensional drive machine, a host computer and a slave computer. The problems investigated involve the automatic measurement, the data management and the milling method for the complicated hand form. As the results, a symmetric cosmetic cover can be manufactured easily. The utility became possible in the medical and industrial fields.

Key words: three dimensional measuring machine, cosmetic cover, automatic measurement, CAD/CAM.

1. 緒 言

本研究の目的は、人体等の柔らかい有機体の形状測定とそのモデルの加工を同一システムで処理する方法について確立するものであり、具体的には、コスメティックカバー（義用手袋）の新しい製作法を確立することである。

最近の義手の利用率は障害者の増加にもかかわらず低く、10～15年前から伸び悩んでいる。その理由は、明確であり、外観的、機能的、材料的に満足いく義手が得られていないためである。本研究では、まず外観上の問題に着目し、片腕の障害者に対し、健手の外観形状を三次元自動測定機によって測定を行い、そして健手から患手へのデータ変換（いわゆるミラーイメージ）によって、外観形状の類似性と装飾の効果を得る新しい製作法のシステム化を進めたものである。その結果、個人個人の手形を再現した装飾用義手とか、能動義手への応用、さらに機能的な電動義手としてのコスメティックカバーの製

作が可能となった。

産業界における最近の三次元物体の自動測定技術¹⁾は、CAD/CAMの一分野として、生産技術の新しい測定手段に利用されてきているが、人間のように柔らかい有機体の測定とか、手部に見られる複雑な形状の測定には、これらの技術を応用することは困難である。そのために本研究は、新たに①人体測定用センサの開発、②三次元測定・加工機の開発、③自動測定ソフトウェアの開発、④測定データ処理ソフトウェアの開発、⑤加工ソフトウェアの開発、などに重点を置きシステム化を図ったものである。

その結果、健手の測定からコスメティックカバーの金型母型の製作まで、パーソナルコンピュータの利用とDDA (Digital Differential Analyzer) 方式による数値制御の結合により、一貫したシステムを簡易システムとして完成した。このシステムは、手部に限らず、障害者の断端部や足部の形状から躯幹形状にいたる測定を精度よく行うことが可能となり、リハビリテーション分野への応用が期待されている。

2. 健手の自動測定・加工システム

図1²⁾は、測定から加工までの工程を同一システムで行うために試作した測定・加工装置の全体図である。その構成は、ホストコンピュータ、スレーブコンピュータ、三軸駆動盤に大別され、これらの主な仕様を表1に示し

* 原稿受付 昭和58年7月11日。昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和56年11月5日）、昭和57年度精機学会春季大会学術講演会（昭和57年3月23日）、昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和57年10月18日）、昭和53年度精機学会春季大会学術講演会（昭和58年3月28日）にて発表。

** 学生会員 東京電機大学大学院（埼玉県比企郡鳩山町石坂）

*** 正会員 東京電機大学理工学部

Fig. 1 3 dimensional measuring and manufacturing set up

Table 1 Specifications of this system

Equipment	Specification
Host computer	PC-8801 ; 32 K-RAM PC-8031 ; 5" disk 1 W 2 D PC-8042; 12" color CRT I/O; μ PD 8255 $\times$ 2
Slave computer	Z-80, 2.5 MHz, 8 K-ROM, 4 K-RAM DDA; 16 bit 8 I/O; μ PD 8255 $\times$ 6
Drive machine	Stroke; X 450, Y 380, Z 150 (mm) Unit; 1/1 000 mm/pulse Velocity; 5-20 mm/s Accuracy; $\pm 1/100$ mm Drive ball screw by D. C. motor with encoder
Sensor	Capacitance type touch sensor Pressure $\approx$ 0 Response; 10 pF Response time; 10 ms Accuracy; $\pm 2/100$ mm
Cutter	Ball nose endmill; $\phi 3$ mm, $\phi 6$ mm Rotation; 2 000 rpm by D. C. motor Accuracy; $\pm 5/100$ mm

である。

ホストコンピュータとしては、パーソナルコンピュータ (NEC, PC-8000) を使い、スレーブコンピュータの制御、測定データの修正、補正、対象変換、補間等の測定から加工までのデータ処理を主に行っている。

スレーブコンピュータは、DDA 積分器 (16 ビット) を 8 台備え、ホストコンピュータからの命令による三軸駆動盤のパルス分配制御を行っている。

また、三軸駆動盤は、測定のみならず加工も行うため、剛性のある門型移動ブリッジタイプとし、エンコーダ付き直流モータを直結したボールねじ送りによるセミ

Table 2 Contents of measurement, interpolation and manufacturing

Process	Contents	Time min
1; Measurement	1; Measurement of upper side	15
	2; Measurement of down side	15
	3; Correction of down side	10
	4; Connection of upper & down	30
2; Interpolation	1; Standardization of meas-data	20
	2; Interpolation for cross section	20
	3; Interpolation in cross section	20
3; Manufacturing	1; Revise of cutter	20
	2; Separation of upper & down	20
	3; Manufacturing of upper side	600
	4; Manufacturing of down side	600

クロズドループを形成している。

データ処理の簡易化および処理時間の短縮のために、生体形状の測定には、静電容量型タッチセンサによる接触ポイント式を採用している。検出プローブは、指の間とか複雑な曲線形状へ対応できるように、長さ 50 mm、直径 $\phi 0.5$ mm の真ちゅう丸棒を用い、静電容量の変化 (10 pF 以上) を検知することによって、先端部のみならず、プローブの側面による測定も行っている。そのため、被測定者のかすかな触覚により、測定状態を常にフィードバックしながら測定するために、手の姿位を安定に保ちながら、柔らかい生体を変形させずに測定することが可能である。また、接触時における ON/OFF 信号によって、x, y, z 軸の現在値を読み込むために、再現性は ± 0.02 mm の精度で検出可能である。

3. 手形の自動測定・加工ソフトウェア

測定から加工までの全工程は、表 2 のように分類され³⁾、ホストコンピュータのプログラムにより、測定、補間を主としたデータ処理、加工と大別される。ここで各所要時間は、測定では約 1 000 ポイントの測定時間、データ処理は BASIC 言語での処理時間、加工は直方体被削材から削り出す切削時間を示してある。

3.1 手形の測定方法

一般に人の手部は、機械部品とは違い個人の形状差が大きく、共通的なプローブの経路モデルを詳細に作成することは困難である。そのために、図 2 に示すような必要最低限のプローブの移動経路モデルを各断面ごとに次

Fig. 2 Model data and meas-form

の項目順に作成する。

X_p : X 軸測定ピッチ (断面間ピッチ)

Z_s : 一測定断面内の Z 軸測定開始位置

Z_d : 一測定断面内の Z 軸測定終了位置

Y_d : 一測定断面内の Y 軸測定終了位置

Y_p : Y 軸測定ピッチ

Z_u : プローブ接触後の Z 軸逃げ量

経路モデルデータは, フロッピーディスクへファイルされ, 測定時にオペレータが選択する。また, モデルの変更はホストコンピュータのキーボードから簡単に指令され, 手形に限らず人体各部位の測定や産業用三次元自由形状物体の測定が可能である。

測定される手部には, 皮膚の表面インピーダンスを一樣にするために医用導電性クリームを塗布し, レスト上へ健手を固定する。オペレータはマニュアル駆動によりプローブを橈骨と尺骨を結ぶ線上へ移動し, 経路モデルデータを選択し測定を開始する。これで, 手首から指先までの測定が自動的に行われ, 同一手に対して背側, 掌側の 2 回測定を行うことによって, 手形を輪切りにした断面の輪郭形状データが得られる。

スレーブコンピュータでは, ホストコンピュータより一断面のモデルデータを得て三軸駆動盤を駆動する。測定値は測定プローブが被測定物に接触した時の座標値であり, 順次 RAM 領域へストアされる。そして, 一つの断面の測定が終了すると, データはホスト側へ転送され, 次の断面の測定へ移る。

タッチセンサを用いたポイント式測定法では, 各断面

Fig. 3 Difference of upper and down side

Fig. 4 Definition of φ_i , P_{di}

の側面 (測定始点, 終点) は, プローブの側面を利用した測定が行われる。そのため, Z 座標値を始点とそれに続く 2 点の値, あるいは終点とその前の 2 点の値により円弧近似を行い修正する。

各断面ごとに得られた輪郭形状データは, 背側, 掌側別々にフロッピーディスクへファイルされる。

3.2 測定データの補間方法

図 3 4) は得られた断面形状の一例である。背, 掌の始点, 終点を結ぶ線分が一致するか否かを条件とすると, その長さおよび傾き角に差が生じる。装飾的な効果を目的とするコスメティックカバーでは, 掌側より背側形状を維持することであり, したがって掌側を修正する。

今, 測定データを背側 $P_{u1}(y_{u1}, z_{u1})$ から $P_{um}(y_{um}, z_{um})$ までの m 点, 掌側を $P_{d1}(y_{d1}, z_{d1})$ から $P_{dn}(y_{dn}, z_{dn})$ までの n 点とする。掌側の拡大, 縮小は, 一つの測定断面の始点, 終点を結ぶ線分の長さの差 dL , 掌側の傾き角 θ_d を求める。次に図 4 に示すように, 掌側の始点, 終点を結ぶ線分を直径とする半円を決める。この円の中心 R と各測定点 $P_{di} (i=1, 2, \dots, n)$ とを結ぶ線と半円との交点を P'_{di} とし, さらに半円に対して⁵⁾円形はりのたわみ曲線式を適用し, 長さの差 dL を修正する。 u_i を変形による変位量とすると, その変位式は,

$$u_i = Q(4 - \pi\varphi_i \sin \varphi_i - \pi \cos \varphi_i) \quad (1)$$

となる。ここで, Q は変位量 dL によって決まる定数で,

$$Q = dL / (8 - 2\pi) \quad (2)$$

で与えられる。変位量 u_i を各測定値 P_{di} に加えることによって, 掌側の修正が行われ, その修正値は,

$$\left. \begin{aligned} y_{di} &= y_{di} + u_i \cos \varphi_i \\ z_{di} &= z_{di} + u_i \sin \varphi_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

で求めることができる。

Fig. 5 Result of measurement

このようにして掌側の修正が終了すると、次に背側の傾き角 θ_u による掌側の回転および平行移動によって、背側と掌側の始点、終点を一致させ結合が完了する。図5は、測定後の結合を行った手形形状である。

次に結合によって得られた手形形状より加工データを得るために、Bスプライン曲線⁶⁾⁷⁾による補間を行う。Bスプライン曲線は、生体形状をポイント式で測定したデータを補間することが容易であり、DDAによるパルス分配を行うのに適した方法である。手形の母型加工では、測定データを曲面まで拡張せずに、断面における曲線形状として取り扱っている。

測定、結合で得られた断面は、それぞれの断面でデータ数が異なり、指部のように複数の形状が存在すると、断面間を補間することは困難となる。そこで、各断面のデータ数を統一することでこの補間を容易にしている。

図6(a)に示す形状に対してデータ数の統一を行うと、図6(b)となる。ここで、断面間の補間は、点 P_1 から P_n の領域では $A \rightarrow B \rightarrow C$ と進み、 P_{n+1} では $A \rightarrow B$ 、 P_{n+1} から P_{2n+1} では $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ となる。 P_{n+1} によってC断面に存在する二つの形状を区別する。すなわち手形では、これが指の間を表す。このデータ数は、Bスプライン曲線補間を用いて等角ピッチでポイントを抽出する。背側データ P_{u1} から P_{um} (図3) までの m 個のデータより P_{u1}' から P_{un}' までの n 個のデータを得る方法は次の通りである。

P_{u1} と P_{um} を結ぶ線分の中点を $P_r(y_r, z_r)$ とし、図7に示すように各測定点の角度 $\varphi_i (i=1, 2, \dots, m)$ を求める。次に等角ピッチで求める角度 $\varphi_j' (j=1, 2, \dots, n)$ は、 $\varphi_j' = \pi j / (n+1)$ (3) で与えられる。ここで求める点 P_{uj}' は、角度 φ_j' で P_r より引いた直線と形状を表すBスプライン曲線との交点である。任意の φ_j' において、

Fig. 6 Standardization of meas-data

Fig. 7 Definition of P_j'

$$\varphi_i \leq \varphi_j' < \varphi_{i+1} \quad (4)$$

の範囲にあれば、

$$t_j = (\varphi_j' - \varphi_i) / (\varphi_{i+1} - \varphi_i) \quad (5)$$

とする。さらに P_{ui} と P_{ui+1} の間のBスプライン曲線の係数を求め曲線形状を、

$$C(t) = A_1 t^3 + A_2 t^2 + A_3 t + A_4 \quad (6)$$

で表す。ここで A_1, A_2, A_3, A_4 はBスプライン曲線の係数であり、ベクトルは y, z の成分を表す。これより求める点 P_{uj}' は、

$$P_{uj}' = C(t_j) \quad (7)$$

で与えられる。このようにして等角ピッチでデータ数を統一することで、断面間の補間が可能となる。

断面間の補間は図8に示すように、断面間を手首から指先にかけて行う。断面数を n とし、断面間を s 分割すると補間後のデータ数 m は、

$$m = s(n-1) + 1 \quad (8)$$

となる。これより各曲線上の点、すなわち補間断面を求める。ここで、断面間に対応する点 P_i と $P_{i+1} (i=1, 2, \dots, n)$ の間の点 $P_{sj}' (j=1, 2, \dots, m)$ を求める。ここで、求める点 P_{sj}' の x 座標値は一定となり、 $t=0, 1, \dots, s-1$ において、

$$t_x = t/s \quad (9)$$

Fig. 8 B-Spline and ellipse interpolation

Fig. 9 B-Spline and Ellipse for finger chip

Fig. 10 Result of interpolation

とおく。補間断面の y, z 座標値は、式 (6) より $C(t_x)$ で与えられる。

このようにして断面間の補間形状が背、掌個々に得られると、次に指間および指先の補間を行う。ここで B スプライン曲線を単に適用すると、図 9 (a) のように指先において不具合な形状となる場合があるために、指間および指先に対しては、楕円を用いて補間を行っている。楕円の大きさは、次の測定断面まで形状が及ばないことと、背、掌のそれぞれ対応する点の距離を条件として決定される。この楕円補間では、B スプライン曲線との接続点で 2 次の連続性を欠くことになるが、図 9 (b) に示すように指先の丸みを表現するには適した方法である。

図 10 は、図 5 の手形形状に対して補間を行った結果である。補間によって得られた手形形状はすべて断面形

状として表され、データファイル構造は測定ピッチを小さくして測定した場合とほとんど変わらない。

3.3 コスメティックカバー金型母型の加工

補間によって得られた手形形状⁸⁾より、加工に対するカットパスを生成する。

ここで、カット半径を r_c 、プローブ半径を r_p とし、これらの補正を行う。補正量 r は、

$$r = r_c - r_p \quad (10)$$

で与えられる。カット径の補正は一般には 2 次曲線近似が用いられるが、ここでは補間を B スプライン曲線によって進めてきたので、これを用いて補正する。各閉じた曲線形状において、与えられた曲線上の点を P_i とし、これに対応する B スプライン曲線のポリゴン頂点を V_i とすると、 P_i 点における 1 次導関数 $\dot{P}_i$ は、

$$\dot{P}_i = (V_{i+1} - V_{i-1})/2 \quad (11)$$

となる。これより P_i 点における接線の傾き m は、

$$m = \dot{z}_i / \dot{y}_i \quad (12)$$

であり、求める補正値はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} y_i &= y_i - r \sin(\tan^{-1} m) \\ z_i &= z_i + r \cos(\tan^{-1} m) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

によって求められる。

B スプライン曲線によるカット径の補正は、2 次曲線による補正よりも有効であり、補間途中にポリゴン頂点が求めれば即座に補正が可能である。

母型加工は、背、掌側全面の加工を行い手形を得ることとなる。加工順序は、手形の補間形状を背、掌へ分離し、直方体の被削材（ロストワックス、石膏等）へ直径 $\phi 3 \text{ mm}$ のボールノーズエンドミルによって切削する。

加工データは、ホストコンピュータから切込み量を与え、スレーブコンピュータへ転送する。ここで転送データの座標系は、左手系から右手系へ変換される。スレーブ側は測定と同様に、三軸駆動盤の数値制御駆動を行っている。ここでも、データ処理と切削が並行して進められ、効率よく切削を行うことができる。

さらに、手仕上によって爪、しわ等をつける。図 11 は得られたコスメティックカバーの母型である。この母型は、さらに電気鋳造により銅製金型を製作し、塩化ビニル系ゴムを流し込むことでコスメティックカバーとなる。図 12 は、製作されたコスメティックカバーである。

4. 結 言

コスメティックカバーの製作技術は、従来他人の手形を石膏でとり、義手の形に合わせて長さを補正していたが、極めて多く形状的不具合を生じていた。

本研究で得られるコスメティックカバーは、形状における健手との対称性に重点が置かれている。健手の測定、

Fig. 11 Result of manufacture (plaster)

Fig. 12 Cosmetic cover

補間，加工について以下の結論を得た。

- (1) 三軸駆動盤，ホストコンピュータ，スレーブコンピュータより成る安価なシステムで，全工程の処理が可能である。
- (2) 生体という被測定対象に対し，接触式は十分に有効であり，非接触式に比べ高精度 ($\pm 2/100$ mm)，高速 (平均 0.8 s/point) で測定できる。
- (3) 手形のような複雑な形状に対して，手首から指先まで自動測定が可能である。
- (4) B スプラインと楕円の組合せにより，人の手形に適した補間方法が得られた。

本システムは，手部に限らず足部や切断部位の測定，形状評価等リハビリテーション分野のほか，工業用金

型の安価な製作システム等への応用が考えられる。

本研究は，厚生省福祉機器開発センターの援助により進められたものである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，実施面で御協力を頂いた国立療養所リハビリテーション学院の矢谷令子教官，および被験者として御協力頂いた障害者の方々に厚く感謝致します。

文 献

- 1) 岩野秀夫：三次元測定機へのコンピュータの応用，精密機械，48，2 (1982) 252.
- 2) 大島 徹，斎藤之男：手形計測とその応用に関する研究 (第1報)，昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1981) 1047.
- 3) 大島 徹，斎藤之男：手形計測とその応用に関する研究 (第2報)，昭和57年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1982) 635.
- 4) 大島 徹，斎藤之男：手形計測とその応用に関する研究 (第3報)，昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1982) 81.
- 5) S. Timoshenko：材料力学 (上)，東京図書 (1957) 391.
- 6) 山口富士夫：コンピュータディスプレイによる自由曲面の一設計方式 (第1報)，精密機械，43，2 (1977) 168.
- 7) 山口富士夫：コンピュータディスプレイによる自由曲面の一設計方式 (第2報)，精密機械，43，9 (1977) 1005.
- 8) 大島 徹，斎藤之男：手形計測とその応用に関する研究 (第4報)，昭和58年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1983) 527.
- 9) 斎藤之男：義手用コスメティックカバーに関する研究，昭和56年度厚生省心身障害研究報告書 (1982) 67.
- 10) 斎藤之男：コスメティックカバーの母型製作に関する研究，昭和55年度厚生省心身障害研究報告書 (1981) 199.
- 11) 大島 徹，斎藤之男，矢谷令子：手形の3次元計測・加工システムの研究，1982医用精密工学シンポジウム論文集 (1982) 85.