

# 三次元原型・加飾加工技術の開発 (第4報)

## —立体モデルの加工実験および評価・改善—

藤巻 誠・橘田鉄雄・平田俊也・藤原和徳・佐野照雄

### Development of Working Upon 3-Dimensional Model and Superficial Decoration (Part 4)

—Modeling, Appraisalment and Improvement—

Makoto FUJIMAKI, Tetsuo KITTA, Toshiya HIRATA, Kazunori FUJIHARA,  
and Teruo SANO

#### 要 約

前報に引き続き、貴金属製装身具の三次元原型・加飾加工技術について検討した。

1. 第2報で実施した、3つの三次元加工方法により、成形実験を行った。
2. 切削加工法については、第2報で決定したデータ構造に従って、具体的な形状を対象にして、CADデータに基づき加工実験を行った。データファイルの自動連続読み込みによって、長大なデータを扱うことが可能になり、精密な形状の三次元物体の加工が実現した。
3. 積層加工法については、CADとの接続により、複雑形状で小型な形状を主対象にして加工実験を行った。その結果、連続的に変化する幾何学的な立体形状物や、回転対象形状物が得られペンダント原型等への実用化をはかった。
4. 除去加工法については、YAGレーザを用いて、CADによる任意の平面形状物が得られた。複雑な形状を多数必要な部品成形への適用が可能になった。

#### 1. はじめに

切削除去法については、CADとの接続を主目的に、CADで作成するデータ形式を、球面スカラ型加工ロボットのデータ形式に適合させることにした。CADとしてセジュールⅢを使用して、形状データと模様(加飾)データを作成して、ロボットに与え、加工する実験を通して、CAD/CAMの統合を図った。

積層付加法については、ワックスの装身具原型を作成することを目的に、CADで複雑な形状を作成し、多層構造の中空三次元物体をえて、これを原型とした装身具を作成した。形状作成能力に関しては、さらに高機能のCADを使用することとして、対称、回転等の機能を利用して複雑な物体の形状データを作成して、装身具原型として使用することとした。

除去法については、YAGレーザを用いて、シートワックスの輪郭切り抜きを行った。輪郭はシャープな形状の実現と同時に切り抜き幅の極小化をも

目的とした。

それぞれの成形法に対して、業界への適用基準を作成し、実用化への評価基準(表1)とした。

#### 2. スカラロボットによる切削加工・積層加工

##### 2-1 経過および概要

複雑な三次元物体を切削により成形するために、第1報では対象物に対してすべての方向から加工具を向けることができる加工機構を提案した。第2報では多自由度の機構として、球面スカラ型ロボット(以後SSRと略記)を選択し、加工条件を解明して、運動制御方式の検討をした。加工を段階的に行う課程を、漸近方式と名付けて、基本形状の成形過程を検討した。

第3報では加工機に必要なデータ構造を制定して、SSRを用いて基礎的な動作を連続させて、形状の加工実験を行った。その中で、多自由度加工機をオーケストラ、加工データを楽譜に対応させ

表1 三次元原型・加飾加工評価基準

装置名	三次元原型・加飾加工装置					
支援ソフト	セジュールⅢ+(カスタマイズ)					
加工方法	切削加工			付加加工		除去加工
加工工具	回転工具 リュウター			定量供給デスペンサー		レーザ、熱風
加工形状	3次元	2.5次元	2次元	3次元	2次元	2次元
制御軸数	S.θ.X	X.Y.Z 直交	X.Y	X.Y.Z直交	X.Y	X.Y
素材	ワックス、ザマック、コルク	ワックス、電極材	ワックス、貴金属	ワックス	ワックス	ワックス
要素研究 試作形状例	①球体 ②球体の変形 ③加飾彫刻加工 写真2-1 	①加飾加工 ②放電電極 ③平面立体 	①スカン彫り ②加飾加工 	①中空円柱体 ②加飾加工 写真2-2,3-4 	①平面体 写真3-1,3-2 	①平面体 写真4-1 
製品化比率	70~90%	70~85%	80~90%	60~90%	60~95%	50~60%
後加工工程	電鍍、鋳造	①鋳造、電鍍 ②電極成形	①仕上げ加工 ②鋳造	仕上げ加工 鋳造、電鍍	仕上げ加工 鋳造、電鍍	仕上げ加工
WORLD GOLD91 カタログ掲載例						
掲載比率	2726/97 3.6%	4.5%	0.8%	1.2%	3.4%	2.8%

て考察した。

## 2-2 実験および結果

### (1) 形状データから加工データの作成

直交座票系で表した物体の表面データのファイルは、SSRで作動させるために、形式変換をしなければならない。

CADで加工対象物の形状データを作成すると同時にSSRの加工経路まで指定する場合は、CADを使用するデザイナーがSSRの動作と機能の限界を熟知していなければならない。この場合には、細かな動作と最適経路を指定することが可能であ

る。

一方、SSR側で経路を作成する場合は、形状データのファイルが、物体の表面を一筆描きで、表現していることが必要である。

本報では、CAD担当者に経路作成を委ねたが、一般的には一定の形式の形状データから特定の加工機に対して自動的に加工経路が得られることが必要である。

### (2) 形状データ及び加工データの細分、接続

1つの形状データファイルは、任意の長さのファイルに細分することが可能であると同時に、複数のデータファイルを、連続して読み込み、加工で

ることが必要である。

(3) 加工実験ソフト

SSRの加工ソフトには、以下の機能を持たせている。

①メニュー形式

加工条件設定、データ形式変換、加工方法等の機能選択、さらに各機能を細分化して、メニュー形式で、諸機能を選択できる。

②形式変換

形状データファイルから、SSRの旋盤モード、フライスモード、三次元モード等各動作モードに対応したデータ形式変換および、形状を画面に簡易表示するための変換等の機能を持つ。

③1シーン加工

これは、ENCの型で表現したデータファイルを読み込んで加工する場合で、CRT画像表現に例えれば、1画面を、任意数の走査線で表示することに相当する。おもに、旋盤モードでは、走査線1本が1螺旋に相当し、明暗色調が凹凸に相当する。1画面の走査線数を増すことによって画像が鮮明になると同様、螺旋数が増加することによって、形状が精密に表現できる。

④1モーション加工

これは複数の、ENC型ファイル名を、CON型のファイルに記述しておき、逐次、1シーン加工を連続して行うものである。

わずかに異なる静止画像を連続して与えることによって、動きのあるように見せることが可能であると同様に、任意形状の素材を目的形状に加工する過程を滑らかに実現することができる。

⑤ズームアップ加工

静止画像の特定部分だけを拡大すると同様に、1走査線の中で、指定区間のデータを補間する事によって見かけ上の精度を増すことができる。各走査線の間補助走査線を補間する事は困難であるので、当初に走査線数を必要な精度まで確保しておく。

(4) 切削加工実験

SSRの動作禁止領域をあらかじめ除外した形状データを、セジュールⅢで作成した。

可動領域では連続して定速でPTP移動する、禁止領域を跨ぐ場合は禁止領域の周辺を周回する、という制約をにおいて加工データを作成することをセジュールⅢに要求して、得られたデータファイ

ルで加工実験した。

(5) 成形例および所用時間

写真2-1に示すスカラベ形の形状についてデータファイルと加工所用時間の関係を表2-1に示す。

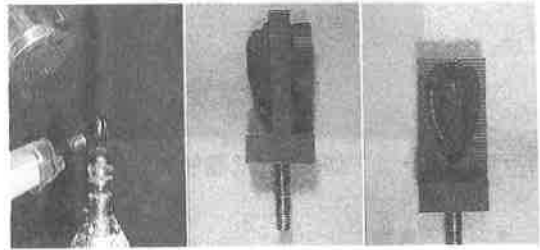


写真2-1 スカラベ形加工例

表2-1 スカラベ形加工時間

ファイル名	データ長 (300*11)	移動点数 (点)	所要時間 (時間 分 秒)
PA1	215.5	3421	36 44
PA2	23.5	373	7 30
PA3	33.2	528	8 23
PA4	46.8	744	10 0
PA5A	126.1	2002	24 15
PA5B	126.1	2002	24 3
<hr/>			
PP1	93.4	1484	23 57
PP2	69.8	1109	10 16
PP3	51.2	813	7 3
PP4	62.4	991	31 6
PP5	50.3	799	7 2
PP6	69.4	1103	10 25
PP7	93.5	1485	24 7
PP8	37.6	597	44 20
<hr/>			
PF1	497.2	7893	3 26 52
PF2	497.2	7893	3 27 45
<hr/>			
合計	2099.2	30160	11 23 48

注1 形状名 スカラベ

注2 形状作成：セジュールⅢ

PAは外形、PPは模様、PFは微細模様である。

(6) 積層形加工実験

切削した半球面の上に、その半球形状データを利用して、積層付加の実験を行った。半球データを変換ソフトを介してフライスモードに転換し、上部からワックスを供給した。

球面上に数層の四角柱が形成できた。

その様子を写真2-2に示す。

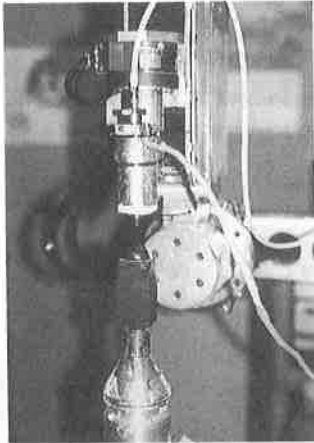


写真 2-2 切削加工と積層加工の複合

### 2-3 考察

#### (1) データ構造と加工所用時間

表 2-1 の所用時間は前報のデータ形式 1 によるものである。形式 2 では、ファイルが大きくなると同時に、変換ソフトを作成しなければならないからである。表 2-1 では、データ点数と所用時間の間に有意の関係はない。これは、実加工移動と空送りとが同一速度であるためである。

#### (2) 高速化の方法

空送りデータの速度指定を最高速度に指定することと禁止領域の周回経路を短縮することが大きな課題である。

#### (3) 形状データから加工データへの変換方法

加工対象形状のデータから、加工点が常に SSR の原点に移動する変換と、加工点近傍の点データから微小加工面を自動作成すること、およびその自動継続機能が必要である。このためには、加工点データをすべて含むマトリックスを用いて、加工点の相互関係を常時計算する能力が必要であると思われる。

#### (4) 加工精度

球、円環の加工において、 $\theta 1$  軸を負から正に変化させるとき  $+45$  度で（正からでは  $-45$  度）で  $\theta 2$  を反転させなければならないが、図 2-1 の段差  $d$  が現れた。半径の変化に対して  $d$  は変化しないことから  $\theta 1$  軸と  $\theta 2$  軸が直交していないことが推定できる。角度誤差を  $\epsilon$  とすると、 $d$  の実測値から、 $d = 2L / \sin \epsilon$  であり、 $\epsilon$  を計算で得た。誤差  $\epsilon$  を補正したデータでは段差が無くなった。

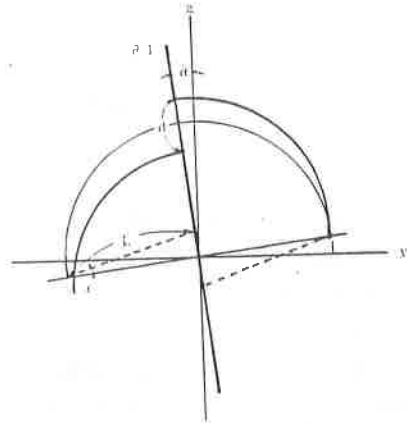


図 2-1 加工誤差解析例

#### (5) 三次元ヒステリシス

図 2-2 によれば、大きな速度フラグでは速度が飽和していないことがわかる。フラグ値に比例して、移動量に関わらず速度一定であることが望ましい。このためには、各軸の自重が零、駆動力が無量大でなければならないが実機では不可能である。各軸速度を個別に与える形式 2 は、ソフト上でこの条件に近づけることに相当する。速度フラグが 2~4 では 20mm 程度で速度が飽和するため、移動量に対応した速度フラグを与えて、直線の軌跡を得ることが期待できる。しかし、各軸の加減速時間と速度不飽和の影響で三次元のヒステリシス曲線を描く。

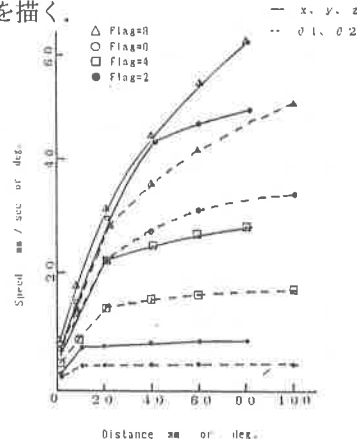


図 2-2 加工機の移動距離、速度特性

形式 1 では、図 2-3 のように角型のヒステリシスを描くことになる。ヒステリシスは加工誤差があることを示すので少ないことが望ましいが、20mm, 20度以下では無視することができない。したがって、指定点間を直線補完し、最高速度で移

動することが現実的な対応策である。移動量が1mm、1度以下ではフラグ値の差による実効速度の差が無視できるので、最大このくらいのピッチで表現すればよい。なお、目的形状と切削刃の寸法、指定点間隔と形状表現能力の関係はすでに検討してある。

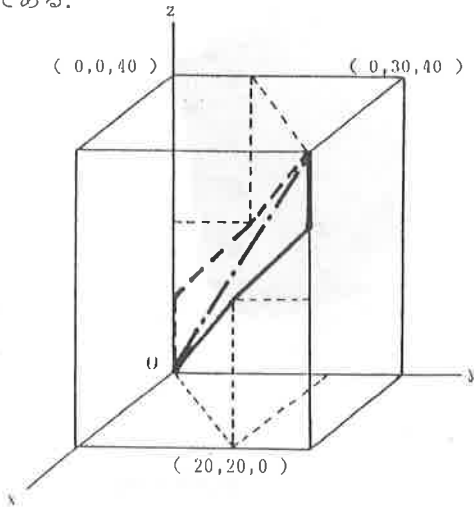


図2-3 ヒステリシス軌跡

#### 2-4 まとめ

以上によって、予め機能限界の判明している切削加工装置に対して、それらの制約を織り込んだデータを作成して与えることによって、長時間にわたる自動加工が実現した。

成成品の検討の結果では、微細形状での不一致が認められた。これは、装置自体の校正が不十分であるためである。したがって加工精度はやや不足している。その原因としては、各軸の原点位置、軸相互の関係、重力の影響、サーボ保持能力の不足等がある。

しかし、この点に関しては、多自由度の加工機の校正手法自体が確立していないために、校正手法の開発も含めて今後の課題である。

具体的には、データに基づく加工と成成品の評価、不調整部分の解析及び修正の試行を繰り返すことになる。

SSRを実用加工機とする場合は、小型化（機構部の軽量化、駆動力の増加、剛性の強化）と高速化（分解能の向上、マトリックス機能付加、並列計算処理）が必要であろう。

また、切削加工面に積層する事も基本的には実現できた。実用化のためには、吐出装置および加

熱吐出制御装置の小型化と、ロボットハンドへの移載が必要である。吐出装置がロボットハンドに装着できれば、任意曲面への積層が可能になる。

### 3. ワックス材の積層固化加工

#### 3-1 経過および概要

前年度の実験結果から、積層付加加工条件及び制御方法が明確になっているので、本実験ではそのデータを基に、装身具原型の形状を分類し、形状にあわせた3種類の加工方法を用いて、実用化実験を行った。

#### 3-2 実験および結果

##### (1) 単層加工（加飾加工）

単層加工は一層で形状を表現するので、入力は2次元図形データをNCコードに変換し、簡易積層装置を駆動させて行った。（平面付加）

単層加工では、ワックス形状の縮小微細化を進めて、前回の研究報告で報告した形状の面積比で1/4程度まで縮小化し、微細表示することができた。

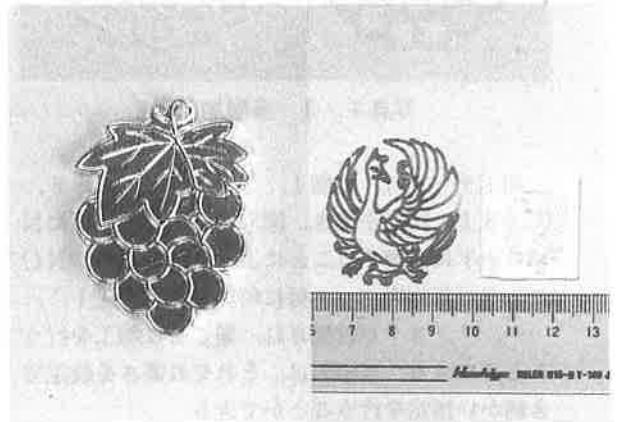


写真3-1 加飾加工例

ただし、縮小化を進めると線径が細くなり加工物の剥離が難しくまた、鑄造可能な最小線径(>0.3mm)を満たしていないことから、単層のワックス原型としての利用は難しいと思われる。しかし、シートワックス上に付加加工することにより、浮き彫り状態となり、加飾加工が施される。これは手加工では規則正しく加工できなかったことから、この技術を応用することにより、新しい装身具デザインに十分利用できることが分かった。

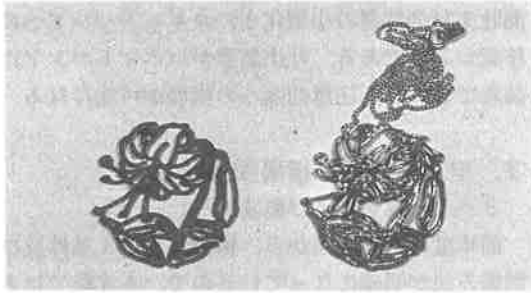


写真3-2 単層加工例

## (2) 多層加工

多層加工は層ごとに全く異なる図形を描き、単層ごとに部品としてワックス型を生成し、それをアセンブリーすることにより、ブローチ状等の立体感のあるワックス型を生成するものである。

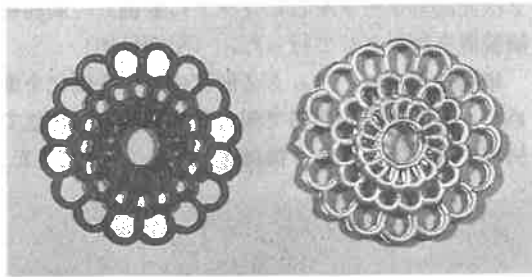


写真3-3 多層加工例

加工データは、画層1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8上に図形を描き、図形データを画層順にNCコードに変換することによって得られる。NCコードは各画層データ毎に句切り記号“/1”, ……,”/8”が付加され、層ごとに加工を行うことができる。各画層は、それぞれ高さを設定でき細かい指定を行うことができる。

CAD上で3次的に図形を描けるため、実際のワックス型に近いイメージで加工データを生成することができた。

## (3) 積層加工

積層加工は、2次元図形から2.5次元図形群を生成し、NCコードを生成する。

2.5次元図形群は、2次元図形を高さの変更、相対位置の移動、縮尺、回転などの操作を行い図形を生成した。

生成した図形は、高さの低い図形から高い図形へとNCデータに変換した。

この手法を用いることによって、中空の立体ワッ

クス型を生成することが可能となった。とくに、ねじり形状は、切削加工法では難しい形状のワックス型の生成に有効であることがわかった。



写真3-4 積層加工例

## 3-3 実験および結果

単層加工の場合、微細形状をシートワックスに付加加工することにより浮き彫り形状のワックス原型が可能となり、多層加工の場合、CADの画面を数段階に区切り、各画層ごとに図形を入力することにより形状の異なった図形をCAD上に入力でき装身具原型に応用が可能になった。

## 4. 除去法による成形実験

### 4-1 経過及び概要

今年度は、YAGレーザーによるシートワックスの加工条件を確立した。その結果、シートワックスを宝飾品の原型状に輪郭切断することにより、透かし彫り製品への適用が可能となった。

### 4-2 実験及び結果

レーザー加工のワックス材への適用の際の問題点として、低融点ワックスの特性から熱に非常に弱く、加工雰囲気温度が上昇すると柔らかくなり変形してしまうことがあげられる。このため、雰囲気温度上昇を防ぐためシートワックスの下の空間を大きくとり、上部からエアを送り、暖かい空気を排除するようにした。この結果、ワックス材の変形を防ぐことができ、板厚0.6mmで線間

1mmのスリット除去加工が可能となった。

今回は、YAGレーザを簡易付加工実験装置と結合させて、同一テーブル面上で積層付加工とレーザ加工を行えるようにした。

加工データも付加工用NCデータと整合性をもたせることができ、同一のNCコードで付加工と除去加工が行えるようになった。

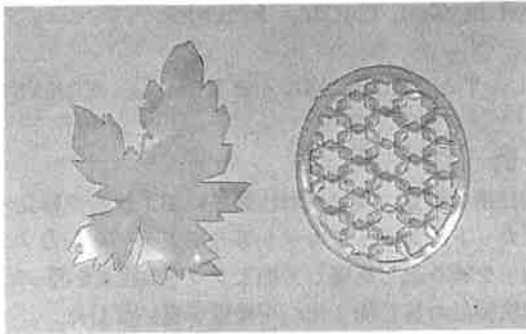


写真4-1 YAGレーザによる除去加工例

#### 4-3 まとめ

実験装置の駆動ソフトの改良及び加工実験の結果、各種立体の成形が実現できた。現段階では手造りのデータによる加工のため、成形品の形状については立体と見なしがたいものもあるが、均整のとれた製品の形状データが与えられれば、作動範囲の検証の後に自動成形できる見通しが得られた。

### 5. 結 論

#### 5-1 切削除去法

多自由度の加工機を用いることによって、ワークを持ち替えることなく加工でき、CADと接続して自動成形が実現した。

#### 5-2 積層付加法

中空状態が特徴である立体物が成形でき、ワックス原型として実用化した。

#### 5-3 溶融除去法

薄いシートワックスの輪郭切り抜き、透かし彫りが実現し原型の微細化が可能になった。

#### 5-4 3つの成形法の統合

個々の成形法の複合から、3つの成形法の統合の見通しが得られた。

#### 5-5 幾何学的形状物への適用

コンピュータの特徴である繰り返し、定率変化を効果的に利用するために、各成形法とも幾何学的な形状への適用が現実的である。

感性を強調した自由曲面への適用は、数値化、加工能力の観点から当分の間は困難であろう。

### 6. おわりに

過去4年にわたり、三次元加工の検討をしてきた。装身具という精度を必要としないように思われるが、デザイナーの意図する形状・曲面を数値化することは困難なことであり、光沢まで考慮して実現することは不可能に近いことである。しかし、当初設定した3つの三次元加工方法については、個々にほぼ実用化の見通しが得られたことは大きな収穫である。3つの三次元加工方法を統合するまでにはいたっていないが、個別には複合させることができた。さらに、多自由度の加工機を用いて実現できる見通しが得られたことは、複雑な三次元物体の成形技術の実現への大きな前進であると思われる。

以上において、三次元加工の要素技術開発はほぼ終了したと思われる。次年度は、個々の成形法の完成、統合化、CADとの接続によるシステム化を目指す。

#### 文 献

- 1) 藤巻, 橋田, 大柴, 藤原, 佐野: 山梨県工業技術センター研究報告4 (1990) P8~P15
- 2) 藤巻, 橋田, 大柴, 藤原, 佐野: 山梨県工業技術センター研究報告3 (1989) P6~P18
- 3) 藤巻, 橋田, 中山: 山梨県工業技術センター研究報告2 (1988) P32~P37