光切断法を用いた陶磁器描画システムの開発*

白 仁 田 和 彦^{*1}Development of Sketching System of Porcelain
Using Slit-Light Method

Kazuhiko SHIRANITA

We have developed a system for automatically sketching patterns on the surface of porcelain using a Slit-light method which is one type of three-dimensional image measurement. This system has two parts. One is a measurement system of the three-dimensional shape of porcelain piece, and the other is an automatical sketching system of patterns by using the result of three-dimensional measurement. Since we classified porcelain pieces into two types according to their shape, two three-dimensional measurement systems were developed. In these measurement systems, we proposed a calibration method using bilinear interpolation in order to calculate values of three-dimensional coordinates simply and speedily. This calibration could absorb errors such as lens distortion and mechanical errors. The automatical sketching system was realized by linking three-dimensional measurement systems and a three-dimensional CAD system.

Key Words: Image Processing, Three-Dimensional Measurement, Slit-Light Method, Porcelain Sketching Machine, Three-Dimensional CAD, Numerical Control

1. ま え が き

機械産業、電気産業等のように工場自動化が飛躍的に進んでいる産業もあれば、陶磁器産業のように労働力に大きく依存する産業も多い。陶磁器産業は、伝統工芸色が強く、極めて付加価値性の高い産業であるため、これまで多くの労働力に依存してきた。しかしながら、最近の熟練労働者の不足、若年労働者の雇用難は陶磁器産業においても深刻な問題であり、質的な高度化も求められ、陶磁器製造における自動化技術の開発は急務な課題である。そのなかでも、特に陶磁器への線描き、絵付け作業の自動化技術が要望されている。現在、自動化に向けて森田らにより研究開発⁽¹⁾がなされているが、いまだ実用化には至っていない。森田らの方式は、複数個の光学式距離センサを用いて陶磁器曲面と描画ペンが一定距離を保ちながら描画する方式である。この方式は、壺形状の凸部に対しては描画可能であるが、壺や皿の凹部へは、そのシステムの構造上、正確な距離計測ができないため描画動作は不安定となる。また、陶磁器形状を数値化する方式では

ないため他作業への応用、例えば石膏形の NC 加工への応用などができない欠点をもつ。

そこで、ここではこれらの課題を解決し、さまざまな形状をもつ陶磁器へ自動的にデザインを描画する方法を提案する。ここでは、三次元画像計測法の一つである光切断法^{(2)~(4)}を適用し、陶磁器描画システムの開発を試みる。

本描画システムは、計測部と描画部により構成する。計測部では、描画対象である陶磁器形状を三次元座標値として求める。次に描画部では、その三次元計測データと三次元 CAD を用いて、CAD 画面上に陶磁器を復元し、その画面上で描画したいデザインの軌跡を NC(数値制御)データとして求め、その NC データを用いて、開発した四軸描画ロボットにより描画を行う方式である。また、計測部では、三次元座標計算の高速化、カメラ系とスリット系の間の位置校正および簡略なレンズひずみの補正を実現するために、新しく三次元座標算出アルゴリズムを提案する。さらに、死角が発生する場合の 2 台のカメラによる補完方法についても述べる。

2. 計測部の原理と構成

2-1 計測部のシステム構成 陶磁器は、その形

* 原稿受付 1994 年 9 月 19 日。

^{*1} 正員、佐賀県工業技術センター (☎ 849 佐賀市鍋島町大字八戸溝 114)。

状特徴により二つのタイプに分けられる。一つは、花瓶、壺のような回転体タイプ、もう一つは皿、陶板のような平板タイプである。そこで、図1(a), (b)に示すようにそれぞれの形状特徴に合せて二つの計測システムを開発した。

このシステムは、スリット光を照射するレーザ投光器と測定物に照射したスリット光の散乱光を読取る2台のカメラ、カメラの出力信号をデジタル化し画像信号に変換し記憶する画像メモリ、画像信号からスリット散乱光の中心位置を検出し、その位置より三次元座標値を演算する三次元座標演算部、全体の系を制御するパーソナルコンピュータから構成する。

図1(a)は回転体タイプ用(以下回転系)であり、図1(b)は平板タイプ用(以下直線系)である。回転系では、測定物を回転テーブル上に置き、スリット光を回転テーブルの回転軸に重ね合わせて照射し、回転テーブルを一回転させながら全体形状を計測する方式である。直線系では、XYテーブルのY軸に固定したスリット投光器からスリット光をY軸に平行に測定物に垂直落射し、このスリット光面をY軸に固定したカメラで撮像する。そして、このY軸がX軸に沿って動くことにより全体形状を計測する方式である。回転系も直線系も、カメラとスリット光の相対位置が変化せず、断面形状をカメラで測定しながら、カメラとスリット光源全体を走査したり、あるいは測定物を移動して走査して、三次元形状を測定している。パーソナルコンピュータは、この回転量、X軸移動量を指示し、これと同期して、レーザ投光器より照射されたス

リット光の反射光を2台のカメラで撮像し、測定物表面の凹凸を反映したスリット光を画像メモリに画像信号として一時的に記憶する。そこで、三次元座標演算部は、回転系では各水平走査ラインごとのスリット散乱光の中心位置を、直線系では各垂直走査ラインごとのスリット散乱光の中心位置を求め、2・2節で示す三次元座標演算法によりそれぞれ三次元座標値を計算する。

2・2 三次元座標演算部 図1(a), (b)に示した計測部の三次元座標系は図2(a), (b)に示すように回転系では (R, θ, Z) 、直線系では (X, Y, Z) で表現する。また、カメラのラスタ座標系を (U, V) とする。カメラは2台あり、それぞれの座標を (U_L, V_L) 、 (U_R, V_R) と表現する。ここでは、計測部のシステム構成上の三つの特徴を用いて簡便に座標値を計算する方法を提案する。まず特徴の一つめは、スリット光投光器とカメラとの相対的位置関係は常に一定であること。二つめは、回転系におけるスリット光は θZ 平面と平行な面に投影され、直線系におけるスリット光はYZ平面と平行に投影されること。三つめは、図1(a)の回転角 θ および図1(b)のXYテーブルのX軸の移動量はパーソナルコンピュータから指示するため、計測する必要がないことである。

そこで、以上の特徴をもとにして、ラスタ座標 (U, V) と図2(a)の (R, θ, Z) との関係、ラスタ座標 (U, V) と図2(b)の (X, Y, Z) との関係を式で表すと式(1), (2)のようになる。

図1 計測部のシステム構成

$$\left. \begin{array}{l} \theta = \text{constant} \\ R = f1(U, V) \\ Z = f2(U, V) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} X = \text{constant} \\ Y = f3(U, V) \\ Z = f4(U, V) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、カメラのレンズひずみがなければ関数 $f1$, $f2$, $f3$, $f4$ はスリット光とカメラの位置関係により決定される透視変換の線形方程式で表せる。しかしながら、実際にはレンズひずみがあるのでひずみ量を測定し補正する必要がある。

そこで、本計測部ではこれから示す方法により三次元座標値を求める。まず、回転系測定空間の RZ 平面、直線系測定空間の YZ 平面を図3に示す原点から縦横 10 mm ごとに格子状に刻む校正用板を用意し、2台のカメラで撮像する。ここで、値がわかっている (R, Z) あるいは (Y, Z) 座標がラスタ座標系 (U, V)

(a) 回転系

(b) 直線系

図2 絶対座標系とカメラ座標系との関係

のどの位置に写像されるかを実測する。そして、 (U, V) 座標と (R, Z) 座標、あるいは (U, V) 座標と (Y, Z) 座標を関連づけるテーブルを作成する。

ここで、図2(a)に示す点 P の (R, Z) 値を求める方法について述べる。点 P が図2(a)の左カメラに写像されたようすを図4に示す。左カメラに写像された点 P_L は格子点 $A_L B_L C_L D_L$ で囲まれている。カメラ原点から点 P_L 、格子点 $A_L B_L C_L D_L$ に向かうベクトルを $\vec{p}$, $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, $\vec{d}$ とすると、ベクトル $\vec{p}$ は式(3)で表すことができる。

$$\begin{aligned} \vec{p} = & (1-\alpha)(1-\beta)\vec{a} + (1-\alpha)\beta\vec{b} \\ & + \alpha(1-\beta)\vec{c} + \alpha\beta\vec{d} \dots\dots\dots (3) \\ & (0 \leq \alpha, \beta \leq 1) \end{aligned}$$

式(3)を解くと α, β が求められるので、この α, β を用いて式(4), (5)により R 値, Z 値が求められる。

$$R = A_x + 10 \times \alpha \dots\dots\dots (4)$$

$$Z = A_y - 10 \times \beta \dots\dots\dots (5)$$

したがって、このようにしてレンズひずみの補正を含んだ三次元座標への換算が高速に実現できる。

直線系においても、同様の方法により三次元座標値を求めることができる。

2.3 2台のカメラによる死角の改善 三次元計測を行う場合、常に問題となるのが死角問題である。図2(a)に示した回転系において、光切断面上の任意

図3 校正用板

図4 カメラ座標系のベクトル表現

表 1 2台のカメラによる死角改善テーブル

u_l	$v_l(\text{pixel})$	Y_l	$Z_l(\text{mm})$	Y_r	$Z_r(\text{mm})$	u_r	$v_r(\text{pixel})$
0	105.4	20.4	0.0	20.4	0.0	255	100.4
1	105.4	21.2	0.0	21.2	0.0	254	100.4
104	133.7	99.3	22.2	① 99.4	22.0	151	128.6
105	?	?	?	100.2	22.0	150	128.6
106	?	?	?	101.0	22.0	149	128.6
107	?	?	?	101.7	22.0	148	128.6
108	?	?	?	102.5	21.7	147	128.6
109	?	?	?	103.2	20.5	146	128.6
110	?	?	?	104.0	19.9	145	128.6
111	130.0	104.8	19.1	② 104.9	19.0	144	124.9
254	105.3	199.4	0.0	199.4	0.0	0	100.3
255	105.3	199.4	0.0	199.4	0.0	0	100.3

$$(Y_l = f_3(u_l, v_l), Z_l = f_4(u_l, v_l), Y_r = f_3(u_r, v_r), Z_r = f_4(u_r, v_r))$$

図 5 描画部の構成

の点をPとし、この点Pが左カメラ、右カメラに写像された点を $P_l(u_l, v_l)$, $P_r(u_r, v_r)$ とする。点Pは、校正用の正方格子点ABCDに囲まれた点である。この格子点列は、左カメラの撮像面では $A_l B_l C_l D_l$ に、右カメラの撮像面では $A_r B_r C_r D_r$ に写像されるため、点Pの座標値は式(4), (5)を用いて計算できる。ここでは、このように両方のカメラで視覚できる場合には、左カメラによる計算結果を採用する。

しかしながら、表1の?印のように左カメラにおいて死角が発生した場合には、次に示すように右カメラによる結果を用いて補完を行う。ただし、ここでいう死角とは、スリット光の座標、つまり v_l の値が求められない場合をいう。

まず、 $u_l=0$ から255に向けて死角があるかを探索し、死角が存在すれば、その直前と直後の u_l, v_l 値における三次元座標値 Y_l, Z_l を求める。表1の例では、

直前の値が $Y_l=99.3, Z_l=22.2$ であり、直後の値が $Y_l=104.8, Z_l=19.1$ である。ここで、この Y_l, Z_l 値とユークリッド距離が最小である右カメラの三次元座標値 Y_r, Z_r を求める。表1では①, ②である。そして、この①と②の間の三次元座標計算結果を左カメラの死角部分の補完値とする。本方式では、このようにして死角の補完を行う。また、図2(b)の直線系計測の場合においても、同様の方法により補完を行うことができる。

3. 描画部の原理と構成

本システムの描画部の構成を図5に示す。構成は、全体系の制御および三次元計測に用いたパーソナルコンピュータとLANにより接続された三次元CADシステム(TOSHIBA, ANVIL 5000)⁽⁵⁾および、四軸描画ロボット(X, Y, Z, θ 軸)、そしてこれら四軸を同時制御するNC制御プログラム(唐津鉄工所, NC-MATE 4)⁽⁶⁾およびZ軸に取付けた描画ペンである。陶磁器へのデザイン描画はNC(数値制御)で行う。そこで、デザイン画のNCデータを作成する。計測部では、スリット光上の数十点をあらかじめ計測点と決め、これを1ブロックとし測定物全体をスキャンした計測結果をパーソナルコンピュータ内に保持する。計測結果は、三次元CADシステムへLANを介して送られ、1ブロックごとの計測点を3Dスプライン曲線の制御点としてCAD画面上に曲線を描く。次に3Dスプライン曲線を基にしてCADの自由曲面作成機能によりCAD画面上に陶磁器の曲面を再構成する。ここで、陶磁器へ描画するデザイン画をCADへ入力する。入力の方法は、タブレット上にデザイン画を置き、作業者はデザインの各曲線を3Dスプライン曲線で表現し入力する。次に、このデザイン画をCAD画面上で陶磁器の曲面へ投影する。投影されたデザイン画の軌跡を機械加工の一方法であるミリング加工法に基づいてNCデータを作成する。出力されるNCデータは、図5に

示す描画部で動作する座標系への座標変換が必要である。そして、壺への描画動作は、Y 軸を固定し、X 軸、Z 軸および θ 軸により実現され、皿への描画動作は、X 軸、Y 軸、Z 軸により実現される。

4. 実験結果

4・1 三次元計測実験 開発した計測部の精度を評価するための実験を行った。測定物として、6 種類の円柱を用意し、その直径を回転系において計測した。その結果を表 2 に示す。レーザスリット光の中心線抽出法として輝度重心法⁽²⁾を用いた。これは、水平走査線(離散化されたディジタイザ)上の最大輝度値 V_i を示す X_i 座標値、およびその左右に隣接する画素の輝度値 V_{i-1} , V_{i+1} を示す座標値 X_{i-1} , X_{i+1} の 3 画素の情報を用いて、 $\sum V_i \cdot X_i / \sum V_i$ より X 座標値を求める方法である。視野約 300×300 mm に対して最大誤差は 0.6 mm 以内であり、0.2% 以内の相対誤差であった。

4・2 自動描画実験 開発した描画部により、陶磁器素焼きへのデザイン描画実験を行った。本システムの外観を図 6 に示す。そして、実験は図 7 に示す手順により進める。

表 2 円柱直径の三次元計測結果

Source (mm)	Experiment (mm)	Error (mm)
140.0	140.3	0.3
138.3	138.2	-0.1
137.6	137.3	-0.3
136.7	136.9	0.2
135.2	135.8	0.6
134.5	134.6	0.1

まずはじめに、図 8 に示す描画対象の壺、皿の描画領域の三次元計測を計測部で行う。壺は回転系により、皿は直線系により計測を行った。計測結果のパーソナルコンピュータ画面表示例を図 9 に示す。計測開始から CRT 表示までの時間は約 10 秒であった。ただし、この計測時間のほとんどは、対象物へのスリット光の照射時間であり、高速化が要求されるラスタ座標の三次元座標換算には 0.3 秒と極めて短い時間で処理を行った。また、計測に約 10 秒の時間を要したが、この時間は実用上差支えないと判断される。

次に陶磁器へのデザイン描画について、具体的に壺への描画実験を例にして述べる。実験は図 7 に示した手順により、壺へ描画するデザインの NC データ作成を三次元 CAD を用いて行った。その NC データ作成を図 10 に示し、以下に三次元 CAD を用いた描画デザインの NC データ作成までの流れを述べる。まず、計測された壺のデータを三次元 CAD へ渡し、各スリット光ごとの計測データをもとに数十本のスプライン曲線を作成した。次に、これらのスプライン曲線をもとに CAD の機能を用いて壺半周分の曲面形状を作成し

図 6 システムの外観

図 7 描画実験手順

図 8 描画対象陶磁器の写真

図 9 計測結果の CRT 表示の写真

図 10 三次元 CAD を用いた描画デザインの NC データ作成例

た、次に、描画するデザインをタブレット上に置き、デザインを構成する各曲線をスプライン曲線としてCADへ入力した。そこで、CAD画面上に再構成した壺データの上にデザインデータを重ね合せながら描画位置を決め、CADの機能を用いてデザインを壺曲面へ投影した。そして、この投影されたデザインの各曲線の軌跡をNCデータとしてCADより出力した。このNCデータは、図5に示した描画部の座標系と異なるため座標変換を行った。変換されたNCデータを用いて壺への描画実験を行ったところ、図11に示すように非常に再現性よくデザインを描画することができた。さらに、皿についても壺の場合と同様の手続きによりデザインを描画することができた。この描画結果より、描画を実現するのに十分な計測精度を計測部はもつと考えられる。また、表2に示したように0.6mm程度の計測誤差が生じるので、実際の描画では、その誤差補正を行い描画を行った。ここで用いた描画ペンはスプリング式であり、陶磁器曲面へ多少圧力をかけながら描画しても陶磁器曲面を傷つけることなく描画することができた。

5. む す び

本論文では、陶磁器への自動デザイン描画システムを提案した。このシステムの特徴をまとめると次のとおりである。

(1) 光切断法を基本とした三次元計測機能。ただし、線形補間法による三次元座標算出により処理の高速化、簡素化、および二カメラ方式による死角の軽減を実現。

(2) カメラ、スリット光投光器間の位置校正、レンズひずみ補正が不要。ただし、システム構築初期時にイニシャライズ作業が一度必要。

図 11 描画実験結果

(3) 回転系、直線系の計測部により異なったタイプの壺、皿が同時計測可能。

(4) 三次元CADシステムとの結合により、陶磁器の復元、デザイン描画のためのNC(数値制御)データの作成が可能。

(5) 数値制御データに基づくデザイン自動描画が可能。

最後に、本研究の遂行に当たり貴重なご助言、ご協力をいただいた長崎大学の石松隆和教授、田中鉄工所の方々に対して深く感謝の意を表す。また、本研究は通商産業省の地域システム技術開発事業の補助を受けて実施したものである。

文 献

- (1) 森田・渡辺, 陶磁器の絵付装置, 公開特許公報, (1989).
- (2) 井口・佐藤, 三次元画像計測, (1990), 36, 昭晃堂.
- (3) 五味・ほか4名, CAD用三次元形状入力装置, 信学技報, PRU 91-87 (1991), 71.
- (4) 石松・ほか3名, 三次元形状計測の高速化の一手法, 機論, 57-538, C (1991), 1969.
- (5) (株)東芝, ANVIL-5000 取扱説明書.
- (6) (株)唐津鉄工所, NC-MATE 4 取扱説明書.