

〔非公開〕

TR-C-0005

光切断法による  
3次元立体形状自動入力

西野 治彦

秋山 健二

小林 幸雄

HARUHIKO NISHINO

KENJI AKIYAMA

YUKIO KOBAYASHI

1987. 8. 12

A T R 通信システム研究所

## 1. まえがき

(株)ATR通信システム研究所では、臨場感豊かな3次元画像通信の基礎的研究の一環として、3次元立体形状の自動入力について研究を行っている。3次元コンピュータグラフィクスやCADにおいては、3次元立体形状の入力が必須であるが、現在のところ、作業者がディスプレイ上の一点一点を会話的に指定しながら手作業で入力を行っており、多大な労力と時間を費やしているのが現状である。このため、人手に頼らずに、非接触で、かつ高速、正確に入力できる技術の確立が望まれているが、現段階では、実用的に満足できるレベルでの自動入力は、実現されていない。

ここでは、画像処理技術を応用して奥行き情報を抽出する一手法である光切断法を用いて、3次元立体形状の自動入力について研究を行っている。今回、立体形状入力システムのプロトタイプが完成したので、その概要、及び計測結果について紹介する。

## 2. 3次元奥行き情報の計測方法〔1〕〔2〕

3次元奥行き情報の計測は、知能ロボットの視覚機能として必要であり、以前から盛んに研究されている。各種提案されている手法の中で、主なものを次に紹介する。このうち、(1)は、受動的な手法で、人間と同様にあるがままの状況を画像として入力し、処理する方式である。その他の方法は、能動的な手法で、対象物に光等を発射し、その反応を観測する方式である。

### (1) ステレオ画像

左右2台のカメラで撮影した画像をもとに、三角測量の原理を用いて奥行き情報を求める方法であるが、左右の画像の対応点の決定に決め手となる方法がなく、現在のところは、実用的にはいま一步である。

### (2) 三角測量法

スポット光、あるいは、スリット光を対象物体に投影し、ななめ方向から投影像を観測すると、物体の外形形状により像の位置が変化することを利用して、奥行き情報を抽出する方法で、三角測量の原理を用いたものである。ステレオ画像のように画素間の対応づけが不要であるが、物体の形状により死角が発生して計測不能となる場合がある。スリット光を用いる方法は、光切断法と呼ばれる。

### (3) 光レーダ法

対象物体に光パルス、あるいは、変調レーザービームを照射して、その反射時間、あるいは、反射光の位相の変化を計測して、物体までの距離を計測する方法である。精度の点で問題があるが、最近のレーザー技術、エレクトロニクス技術の進歩により、今後有望な方式である。

### (4) モアレ法

格子パターンを対象物体に照射し、表面形状により変形されたパターンを原格子パターンと重ね合わせるとモアレ縞が生成される。モアレ縞は、対象物体方面の等高線情報を表しており、縞の次数を決定すれば、対象物体までの距離を求めることができる。当研究所では、モアレ法を用いた立体形状入力についても併せて研究を行っている。

## 3. 計測システムの構成

### 3-1 計測原理

本システムの計測原理は、図1に示すように、スリット光を対象物体に照射し、TVカメラで入力したスリット像画像（図3(a)参照）から、三角測量の原理に基づき、対象物体表面のスリット光投影部分の3次元座標を求めるものである。対象物体は、回転ステージの上に置かれており、ステージを微小角度回転させるごとに、この操作を実行し、ステージが1回転した時点で、対象物体の全体形状が入力できるようになっている。通常の3次元計測では、スリット光を横方向に走査させる必要があるが、本システムでは、スリット光を固定し、代わりに回転ステージを回転させることで同等の効果を得ている。

今回のシステムでは、スリット光平面は、必ず回転ステージの回転軸を通るものとし、また、カメラは、回転軸に垂直な平面上で回転軸の方向を向いているとした。この結果、4.で述べるように、カメラ入力画像上のスリット像が中心から横方向に何ピクセル離れているかを求めれば、簡単な変換式により、スリット光投影部分の回転軸を中心とした半径を直接求めることができる。（縦方向の座標値には依存しない。）

### 3-2 システム構成

図2に本システムの構成図を示す。スリット光の発生は、輝度などを考えれば、レーザーとシリンドリカルレンズを利用するのが望ましいが、今回は、高出力スライドプロジェクタを使用している。また、TVカメラは、撮像管方式のもの、画像処理は、汎用画像処理装置を使用して、縦476×横512のサイズで行っている。画像処理装置では、画像入力（入力画像を8ビットで量子化）、スリット像

抽出（二値化、細線化）、及び、各横ラインにおけるスリット像座標値の検出を行っている。汎用スーパーミニコンピュータでは、ステージ回転の制御、3次元座標値への座標変換、ステージ回転分の座標データの補正、ワイヤフレームモデルのデータ作成等を行っている。

グラフィックワークステーションでは、市販の3次元コンピュータグラフィックス作成用ソフトウェア（米国 Wave Front社 製）を用いて、ワイヤフレームモデルでの表示、及び、入力データに対してスムージング、レイ・トレーシング、マッピングなどの各種レンダリング処理を行うことができる。

計測パラメータを予め登録しておけば、汎用スーパーミニコンピュータからの制御により、3次元形状入力、及び、ワイヤフレームモデルデータの作成が、すべて自動的に実行され、ワイヤフレームモデルのデータファイルがグラフィックワークステーション上に生成される。

#### 4. 座標変換

##### 4-1 3次元座標値の計算

ここでは、カメラ入力画像上に生成されたスリット像の座標値から3次元座標値の求め方、及び、その座標変換式の導出について説明する。

カメラは、3次元空間から2次元空間への写像であり、カメラ入力画像上の1点に対しては、その線上の点は、すべてこの1点に投影されるという直線が存在する。たとえば、図4で、カメラ結像面の点Pに対しては、点Pとカメラのレンズ中心Oを結ぶ直線POが対応し、この直線上の点は、すべて点Pに投影される。したがって、カメラ結像面上のスリット像が点Pに生成されたとき、それに対応する3次元座標値を求めるには、直線POとスリット光平面との交点Qの座標値を求めればよいことがわかる。

座標系は、図4に示すように設定する。つまり、3次元座標系の原点を回転ステージの回転軸上にとり、回転軸とY軸を一致させる。また、カメラをZ軸上に置き、そのレンズ中心Oの座標値を(0, 0, L)、カメラの光軸をZ軸に一致させる。また、スリット光平面は、Y軸を含む平面であり、Y-Z平面に対し、 $\theta$  [deg] の角度を持っているとする。以後、この角度をスリット光角度ということにする。

いま、カメラ結像面でのスリット像座標値をP ( $X_p, Y_p, Z_p$ ) としたとき、対応する対象物体表面上の3次元座標値 Q ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) を求める。直線POの方程式は、(1)式で、また、スリット光平面の方程式は、(2)式で表される。

$$\frac{X}{X_p} = \frac{Y}{Y_p} = \frac{Z-L}{Z_p-L} \quad (1)$$

$$\cos \theta \cdot X + \sin \theta \cdot Z = 0 \quad (2)$$

(1)式、(2)式より、点Qの座標値 ( $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ ) を  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  を用いて表現すれば、(3)式が得られる。

$$\begin{aligned} X_o &= \frac{-L \cdot X_p \cdot \sin \theta}{(Z_p - L) \cdot \sin \theta + X_p \cdot \cos \theta} \\ Y_o &= \frac{-L \cdot Y_p \cdot \sin \theta}{(Z_p - L) \cdot \sin \theta + X_p \cdot \cos \theta} \\ Z_o &= \frac{L \cdot X_p \cdot \cos \theta}{(Z_p - L) \cdot \sin \theta + X_p \cdot \cos \theta} \end{aligned} \quad (3)$$

しかし、実際には、デジタル画像処理で取扱う座標系を ( $U$ ,  $V$ ) とし、この座標系での点Pの座標値 ( $U_o$ ,  $V_o$ ) に対応する点Qの座標値を求めなければならない。デジタル画像の画素数を横方向に  $X_{size}$ 、縦方向に  $Y_{size}$  とし、 $U$  のとりうる範囲を  $0 \sim X_{size} - 1$ 、 $V$  のとりうる範囲を  $0 \sim Y_{size} - 1$  とする。また、カメラに投影される  $X-Y$  平面上での領域をカメラ視野と呼ぶこととし、その値を  $X$  軸方向に対して  $X_m$  [m]、 $Y$  軸方向に対して  $Y_m$  [m] とする。カメラ視野に対応するカメラ結像面上での像の大きさを  $X$  方向に  $X_c$  [m]、 $Y$  方向に  $Y_c$  [m] とする。このとき、カメラの倍率を  $M$  とすると、(4)式の関係が成立する。また、点Pの座標値を ( $U$ ,  $V$ ) 座標系で ( $U_o$ ,  $V_o$ ) とした場合、( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) 座標系での対応する座標値 ( $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$ ) は、(5)式で表される。

$$M = \frac{X_m}{X_c} = \frac{Y_m}{Y_c} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X_p &= \frac{X_c}{2} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot U_o}{X_{size} - 1} \right) \\ Y_p &= \frac{Y_c}{2} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot V_o}{Y_{size} - 1} \right) \\ Z_p &= L + \frac{L}{M} \end{aligned} \quad (5)$$

(4)式、(5)式から(6)式が得られ、それを(3)式に代入すれば、デジタル画像上の点Pの座標値 ( $U_o$ ,  $V_o$ ) から、点Qの3次元座標値 ( $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ ) を

求める(7)式が得られる。

$$\begin{aligned} X_p &= \frac{X_m}{2M} \left(1 - \frac{2U_0}{X_{size}-1}\right) \\ Y_p &= \frac{Y_m}{2M} \left(1 - \frac{2V_0}{Y_{size}-1}\right) \\ Z_p - L &= \frac{L}{M} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{2 \cdot X_m \cdot L \cdot \sin \theta \cdot U_0 - (X_{size}-1) \cdot X_m \cdot L \cdot \sin \theta}{-2 \cdot X_m \cdot \cos \theta \cdot U_0 + 2 \cdot (X_{size}-1) \cdot L \cdot \sin \theta + (X_{size}-1) \cdot X_m \cdot \cos \theta} \\ Y_0 &= \frac{2 \cdot Y_m \cdot L \cdot \sin \theta \cdot V_0 - (Y_{size}-1) \cdot Y_m \cdot L \cdot \sin \theta}{-2 \cdot X_m \cdot \cos \theta \cdot U_0 + 2 \cdot (X_{size}-1) \cdot L \cdot \sin \theta + (X_{size}-1) \cdot X_m \cdot \cos \theta} \cdot \frac{X_{size}-1}{Y_{size}-1} \\ Z_0 &= \frac{-2 \cdot X_m \cdot L \cdot \cos \theta \cdot U_0 + (X_{size}-1) \cdot X_m \cdot L \cdot \cos \theta}{-2 \cdot X_m \cdot \cos \theta \cdot U_0 + 2 \cdot (X_{size}-1) \cdot L \cdot \sin \theta + (X_{size}-1) \cdot X_m \cdot \cos \theta} \end{aligned} \quad (7)$$

このように、スリット光角度 ( $\theta$ )、カメラ視野 ( $X_m$  と  $Y_m$ )、カメラのレンズ中心 ( $L$ ) の各計測パラメータを予め測定しておけば、( $U$ ,  $V$ ) 座標系でのスリット像座標値 ( $U_0$ ,  $V_0$ ) から、(7)式により対応する3次元座標値を求めることができる。

また、ステージ回転軸を中心としたスリット光方向の半径  $R_0$  は、スリット光の光源方向を正として、(8)式で表される。このように、計測半径は、 $V_0$  の値に依存せず、 $U_0$  の値によって決定される。

$$R_0 = \frac{Z_0}{\cos \theta} = \frac{-2 \cdot X_m \cdot L \cdot U_0 + (X_{size}-1) \cdot X_m \cdot L}{-2 \cdot X_m \cdot \cos \theta \cdot U_0 + 2 \cdot (X_{size}-1) \cdot L \cdot \sin \theta + (X_{size}-1) \cdot X_m \cdot \cos \theta} \quad (8)$$

#### 4-2 回転ステージ回転分の補正

本システムでは、立体の全体形状を入力するため、回転ステージを、微小角度回転させるごとにスリット光投影部分の座標値を計測する。この1回の回転角度を  $\Delta \phi$  [deg] とし、左回りに回転させるものとする。

立体の全体形状の座標値を求めるためには、このようにステージを回転させたときの座標値と回転させる前の座標値の関係を求める必要がある。計測開始時から回転ステージを  $\phi$  [deg] 回転させたときの計測座標値  $Q$  ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ) を、ステージ回転前の原座標系 ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) での座標値 ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ) に変換する式は、(9)式で表される。

$$\begin{aligned} x_0 &= X_0 \cdot \cos \phi + Z_0 \cdot \sin \phi \\ y_0 &= Y_0 \\ z_0 &= -X_0 \cdot \sin \phi + Z_0 \cdot \cos \phi \end{aligned} \quad (9)$$

回転ステージの各回転角で計測した3次元座標値を(9)式で変換することにより、対象物体全体の形状入力を行うことができる。

#### 5. 計測パラメータの測定とキャリブレーション

4. で述べた計算式により3次元座標値を計算するには、スリット光角度、カメラ視野、及び、カメラレンズ中心の座標値の各計測パラメータを測定する必要がある。現在採用しているキャリブレーションの方法を述べる。(図6参照)

##### (1) スライドプロジェクタの位置の決定

スリット光平面が回転ステージの回転軸を通るように、プロジェクタ位置を決定する。

##### (2) カメラ位置の決定

回転ステージ上に平面状の物体をスリット光平面と一致するように垂直に立てたのち、回転ステージを設定したいスリット光角度分だけ回転させる。カメラのファインダをのぞいて、平面状の物体がカメラ入力画像の中央部で垂直な線状に見えるように、かつ、回転ステージとの距離(L)、前後方向の傾き(pitching)も調整して、カメラ位置を決定する。

##### (3) 基準座標の決定

スリット像が回転ステージの回転軸上に生成されるように、平面状の物体を回転ステージ中央に置く。カメラ入力画像上でスリット像がちょうど垂直な直線になるようにカメラの左右方向の傾き(rolling)を再調整する。また、その画像でスリット像の横方向の座標(U座標)の値を読み取り、それを基準座標と呼ぶことにする。つまり、スリット像が、基準座標に生成されれば、それは、回転軸上にあることを意味している。計算式上は、基準座標をカメラ入力画像中央に設定して、光軸を回転軸方向に向けなければならないが、ピクセル単位で合わせるのは困難であり、この方法で近似している。

##### (4) カメラ視野の測定

回転ステージ中央にカメラの光軸と垂直になるように大きさの分かった平面状の物体を置き、その物体が(U, V)座標系で縦横何ピクセルに相当するかを求め、その結果から縦横各方向のカメラ視野( $X_m$ と $Y_m$ )を計算する。

##### (5) スリット光角度の再設定

以上により計測パラメータを決定できるが、スリット光角度( $\theta$ )の測定誤差は、結果に大きく影響するので、次の方法により再設定する。すなわち、回転軸からスリット光方向に一定距離離れた位置に垂直方向に物体を置き、そのときのスリット像のU座標値を求める。その計算座標値が実際の物体位置と一致するようにスリット光角度の値を再設定する。実際の座標計算においては、ここで求め

たスリット光角度の値を使用する。

現在、スライドプロジェクタ、回転ステージ、カメラを一体化した精密測定用ステージを製作中であり、これが完成すれば、計測パラメータは、より正確に測定できるようになる。

## 6. 計測結果

### 6-1 計測誤差の評価

図7に示すように、ななめ方向に置かれた平面状の物体を測定し、各計測点から最小2乗法により近似直線を求めることにより、本システムの計測誤差の評価を行った。<sup>[3]</sup> ななめの平面を採用したのは、もし、垂直な平面で行えば、カメラ入力画像でのスリット像は、垂直な直線となり、計測の分解能、誤差に対して十分な評価ができないためである。

平面状の物体を、図7に示すようにスリット光平面に対して垂直で、かつ、水平面と60[deg]の角度をなすように、回転ステージ上で固定した。細線化されたスリット像に対して、縦(V座標)方向に均一なピッチ(5ピクセル間隔)でサンプリングを行い、これらのサンプル点の(U, V)座標値から、対応する3次元座標値(スリット光方向の半径RとY座標値)を求めた。それらの計測点の集合{(R<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>), i = 1 ~ n}から最小2乗法により近似直線の方程式を推定し(Y = a · R + b)、(10)式で定義される平方根平均2乗偏差(D)、最大残差(G)により計測誤差の評価を行った。

$$D = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - (a \cdot R_i + b))^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$G = \max_{i=1}^n |Y_i - (a \cdot R_i + b)|$$

平方根平均2乗偏差の測定結果を図8(a)に、最大残差の測定結果を図8(b)に示す。また、この測定条件でU座標方向の1ピクセルが、3次元座標の半径Rのいくらの値に相当するか、つまり、1ピクセル当りの分解能を計算した(基準座標における計算値)ので、結果を図8(c)に示す。このように、スリット光角度を大きくすれば、1ピクセルの分解能が小さくなり、計測精度が向上する。この結果を見てわかるように、平方根平均2乗偏差、最大残差の測定値は、いずれも分解能の計算値と同様にスリット光角度が増加するほど減少しており、理論的な計測精度が、実験的に確かめられた。また、60[deg]の平面を使用しているので、半径方向の長さの $\sqrt{3}$ 倍が、残差方向の長さに相当し、最大残差の値は、ほぼ分解能の値に等しいことがわかる。



## 6-2 立方体の計測結果

一辺 150 [mm] の立方体に対して形状入力を行い ( $\theta = 30$  [deg]、 $\Delta \phi = 10$  [deg])、その入力結果を水平な平面で切ったときの断面形状を図 9 (a) に示す。また、この測定条件での分解能の計算結果を図 9 (b) に示す。この結果を見ると断面の各直線が、U座標の 1 ピクセル相当の誤差以内で再構成されているのがわかる。また、一辺の長さの測定も、1 % 程度の誤差で測定された。

## 6-3 立体形状入力例

現システムでは、次の方法により計測データから立体のワイヤフレームモデルを再構成している。カメラ入力画像上の細線化されたスリット像に対して、V座標方向に均等なピッチでサンプリングを行い、これらのサンプル点を 3 次元座標値に変換して計測点とする。回転ステージを  $\Delta \phi$  [deg] 回転させるごとにこれらの計測点を求め、こうして求めた計測点を図 10 に示すとおり各面が三角形となるように結び合わせて、ワイヤフレームモデルを構成する。

出力は、グラフィックワークステーション上で稼働するコンピュータグラフィクス作成用ソフトウェアで取扱い可能なファイルである。このファイルは、テキストファイル形式で、立体図形の頂点座標リスト、及び、3 頂点で表現される三角形のリストとから構成される。

ボトルの立体形状を本システムを使って入力し、結果をグラフィックワークステーション上でワイヤフレームモデルとして再構成した結果を図 11 に示す。V座標方向のサンプリングピッチは、10 ピクセルである。また、この入力結果に対してスムージング処理を施し、ソリッドモデルとして表現した結果を図 12 に示す。

## 7. 検討

以上の入力結果を見ると、回転軸回りの半径の計測では、カメラ入力画像の U 座標 1 ピクセル相当分の誤差で計測ができた。この誤差の原因としては、入力画像をデジタルサンプリングしたことにより発生する誤差、カメラレンズ系の歪み、各計測パラメータの測定誤差などが考えられる。

また、高さ方向の計測については実物より小さく計測される傾向にあり、原因として、スリット像の細線化を行う過程で線が短くなること、及び、V座標方向のサンプリングを 10 ピクセルの均等間隔で行ったことが考えられる。細線化処理は、現在、汎用画像処理装置のコマンドをそのまま利用しており、そのため、横幅と同時に長さ方向にもドットが削られてしまうためである。サンプリングについては、均等間隔でなく、端点は、必ず計測点とするように改良する予定である。

6-1で述べたように、スリット光角度については、大きくとるほど、分解能が小さくなり、計測精度がよくなる。しかし、立体の形状によって、スリット光投影部分がカメラから死角になり、観測できなくなる場合が発生する。実際、フロッピイの箱を縦に置いた場合、スリット光角度 20[deg]でも死角が発生する。このように、スリット光角度と死角は、相殺する関係にあり、最適なスリット光の角度は、入力物体の形状に依存するようである。

現在、画像処理部分では、単純に二値化処理を行うことによりスリット像を抽出している。このため、物体表面の勾配のきついところでは、スリット光の当り方が弱いため、スリット像をうまく抽出できない場合が発生している。つまり、立体の上から見た形状を現在の方法で入力するのは、実際には無理がある。今後、前処理フィルタを工夫してスリット像の抽出効率を高めたり、スリット光源を別の位置にも設けるなどして、入力効率を高めて行きたい。

また、現在は、スリット画像を縦方向に均等間隔でサンプリングした計測点をもとに立体形状を再構成している。今後は、立体の表面形状に応じて、複雑に変化しているところはきめ細かく計測点を取り、逆に滑らかなところは、間隔をあけて、荒くするようにして、出力データ量をできる限り圧縮し、かつ原形状を忠実に再現するような工夫をしていきたい。さらに、対象物体が平面を含むような場合は、その平面を直接抽出できれば、この目的にかなうところが大きいので、その方法についても検討していく予定である。

## 8. むすび

本稿では、光切断法を用いた3次元立体形状の自動入力システムについて報告した。現システムでは、簡単な形状の立体に対しては、ほぼ満足のできる入力結果が得られたが、現実世界の複雑な立体形状の入力に対しては、まだまだ問題となる点も多い。今後、現入力システムを改良して、より実用的なシステムへ発展させて行きたいと考えている。

### 参考文献

- [1] 井口：「三次元計測研究 最近の動向と展望」 映像情報 Vol.18 No.11 (1986)
- [2] 山本、田宗、田村：「距離画像の入力と処理」 信学技報 Vol.86 No.382 PRU 86-129 pp.49-59 (1987)
- [3] 林、安井、高橋：「数値計算〈第2版〉」 森北出版 (1984)

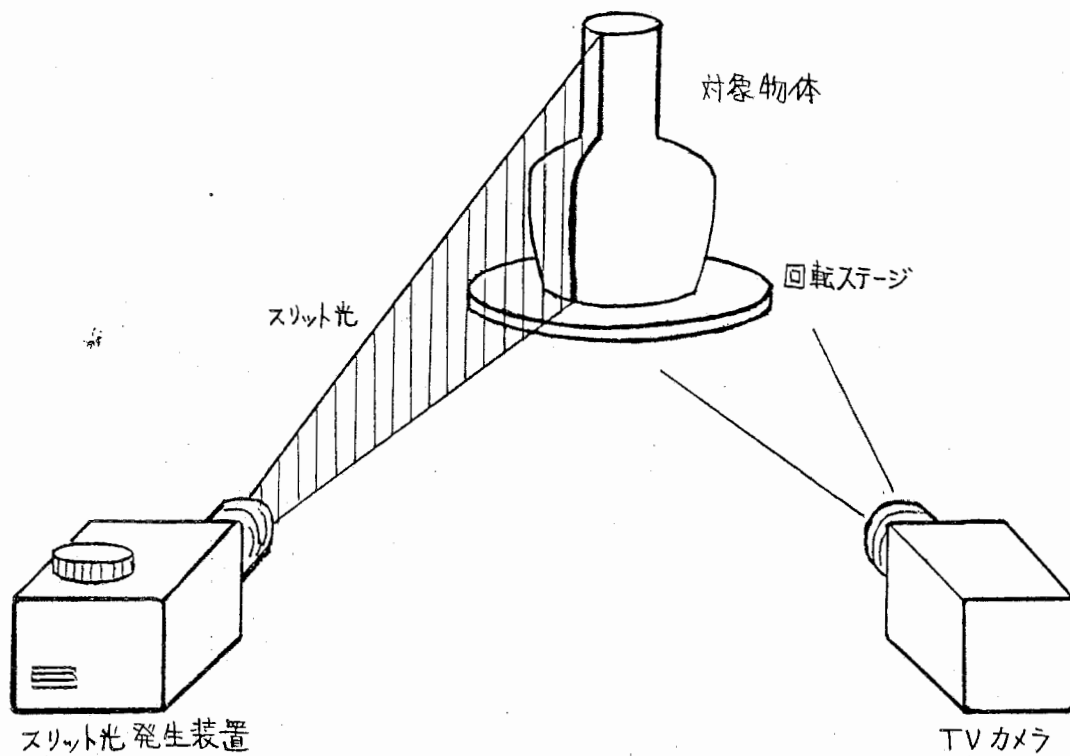


図1 計測原理

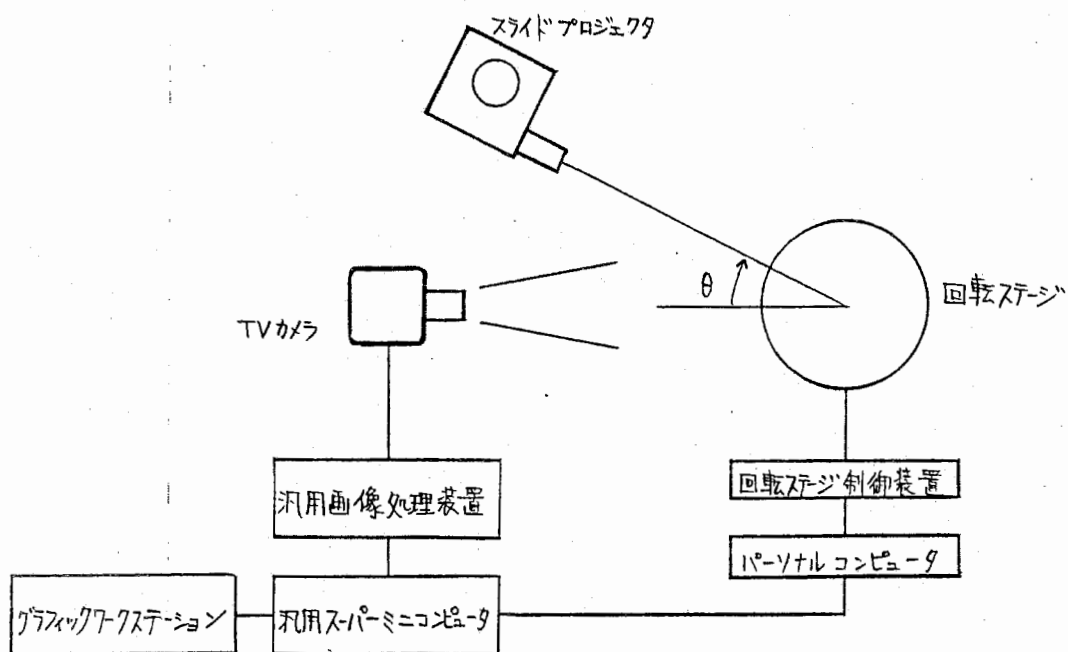
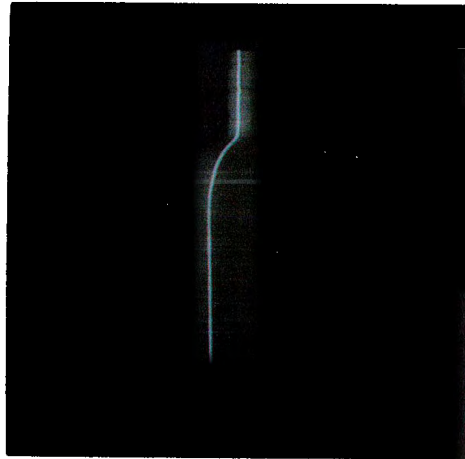
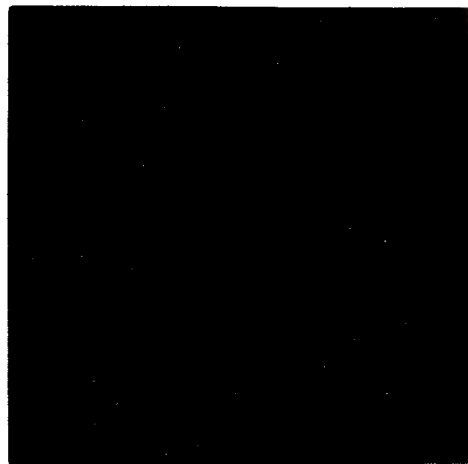


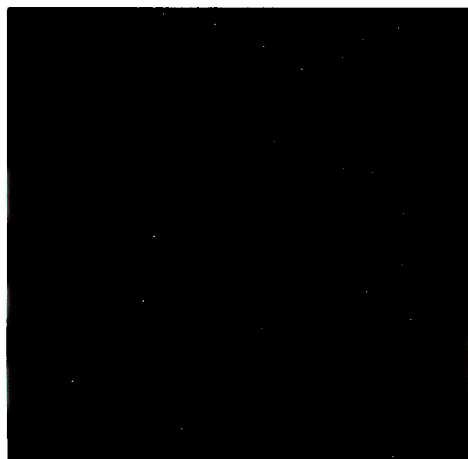
図2 本システムの構成



(a) 原画像



(b) 二値化



(c) 細線化

図3 画像処理による対象像の抽出

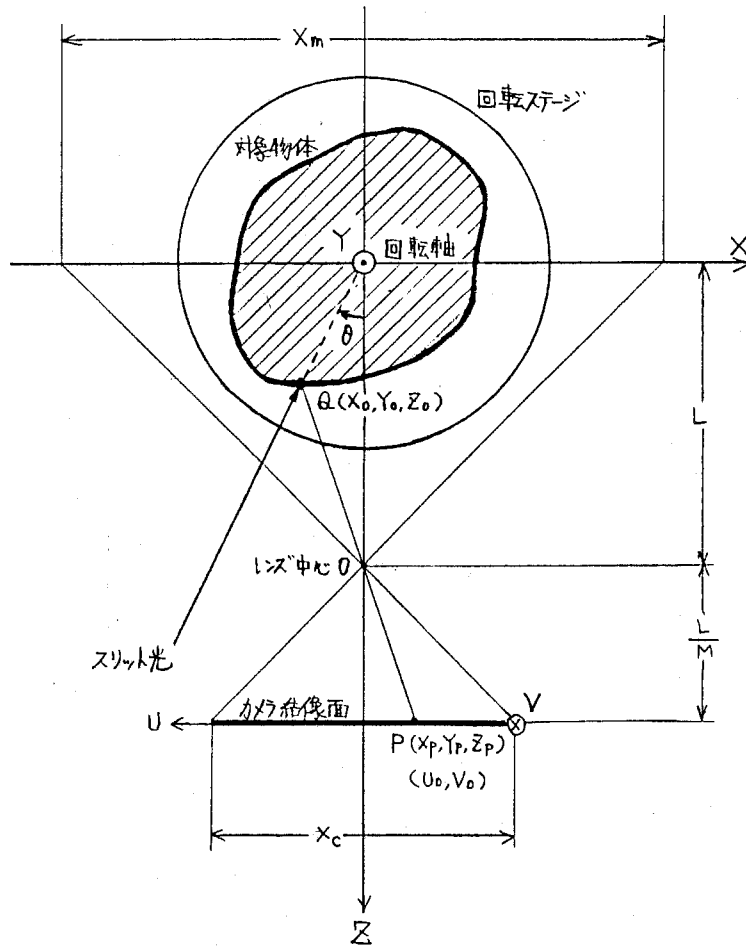


図4 計測座標系

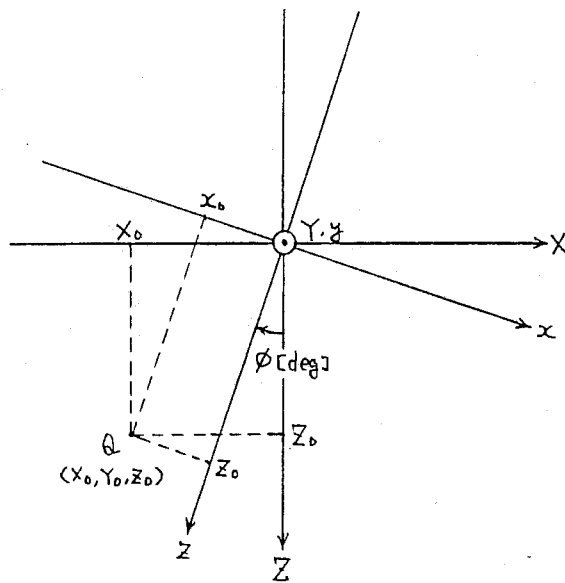
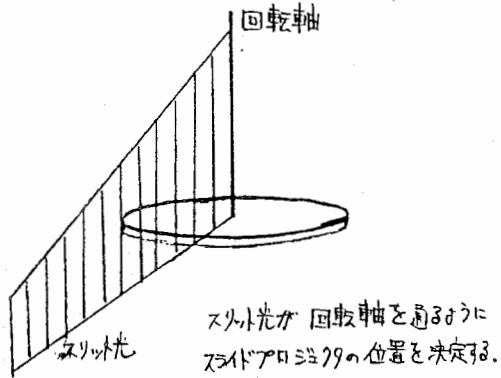
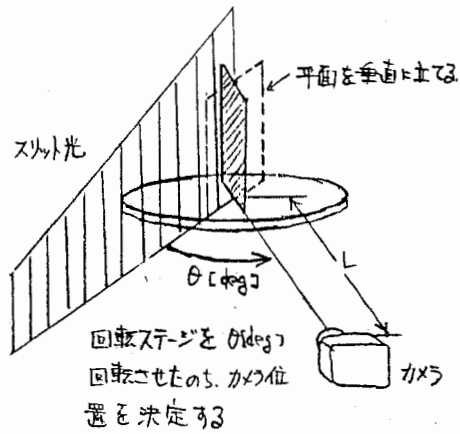


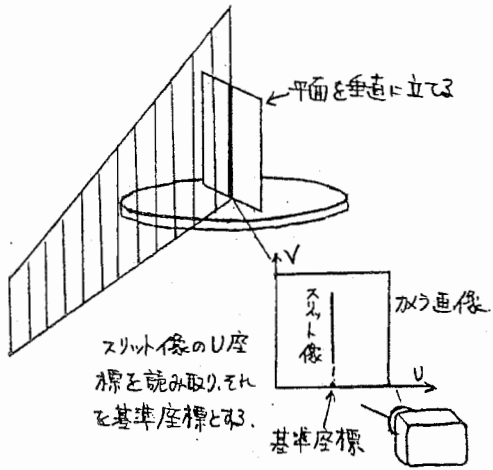
図5 回転ステージ回転分の補正



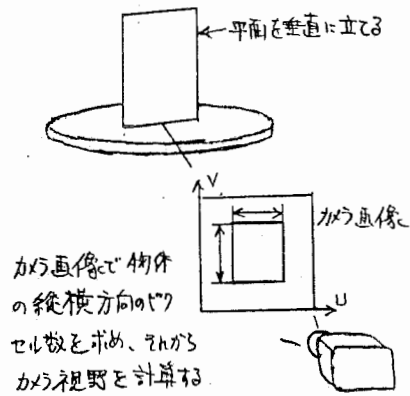
(a) スライドプロジェクタの位置の決定



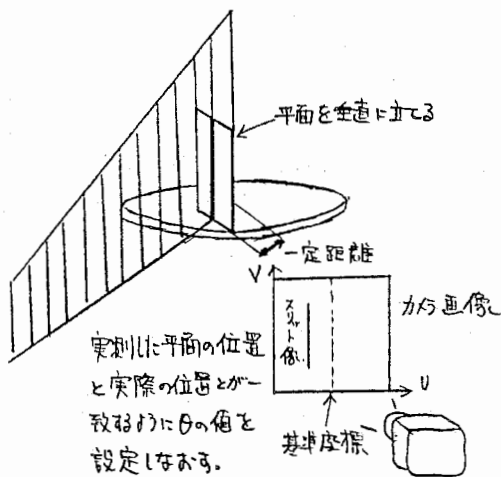
(b) カメラ位置の決定



(c) 基準座標の決定



(d) カメラ視野の測定



(e) スリット光角度の再設定

図6 計測パラメータの測定とキャリブレーション

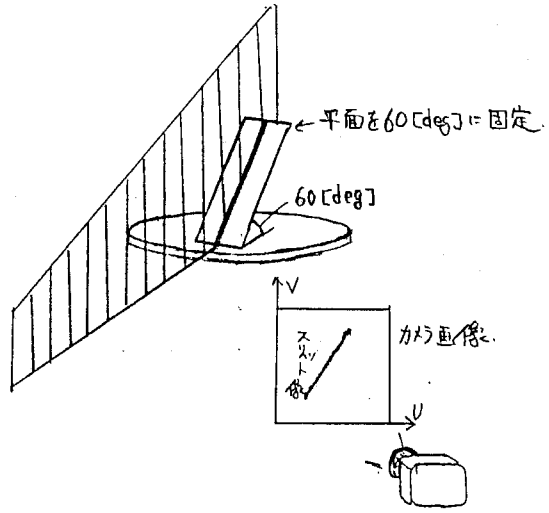
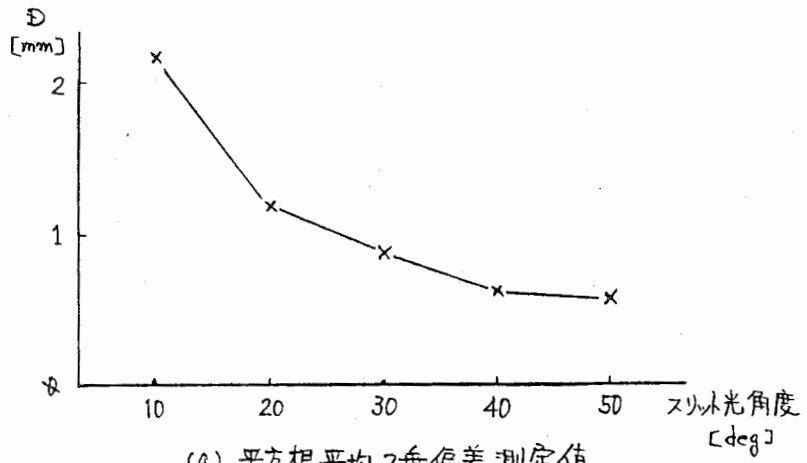
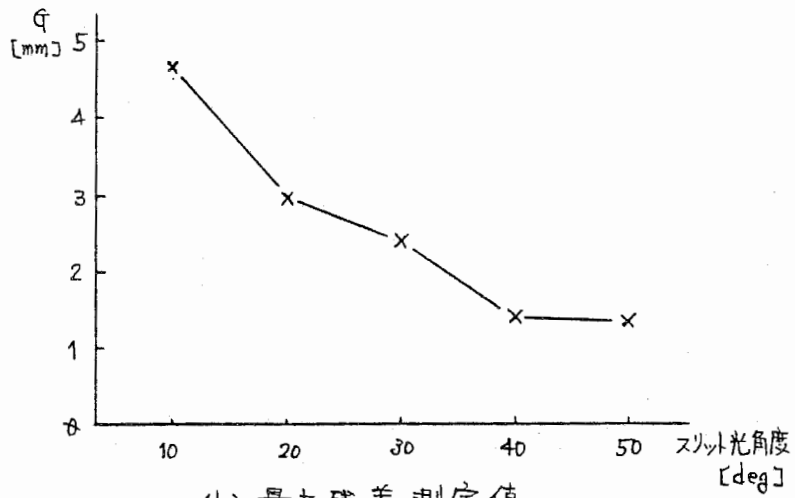


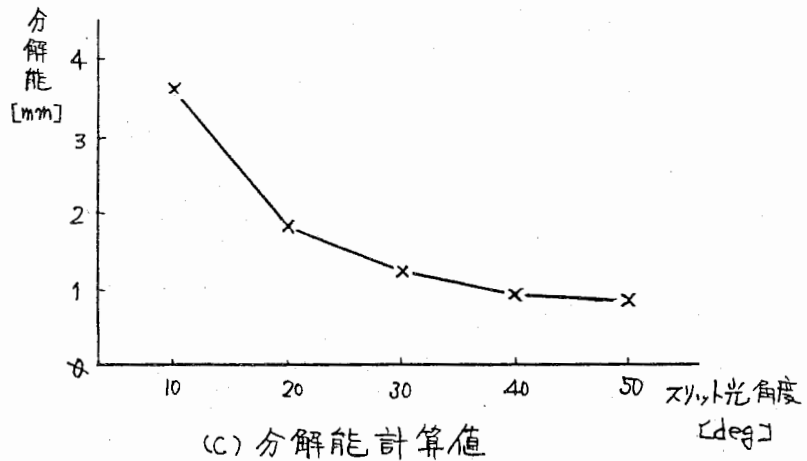
図7 計測誤差の評価実験



(a) 平方根平均2乗偏差測定値



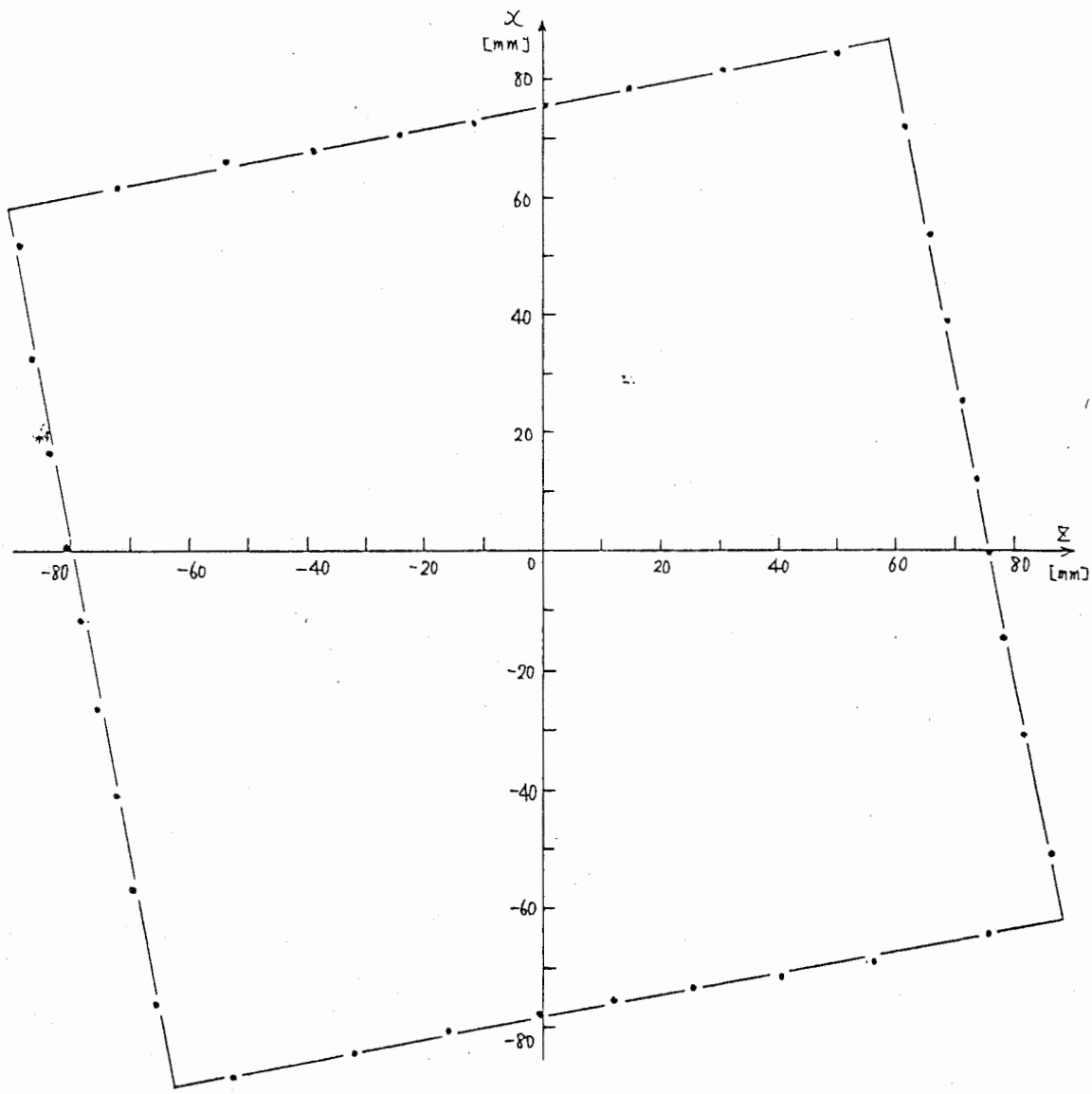
(b) 最大残差測定値



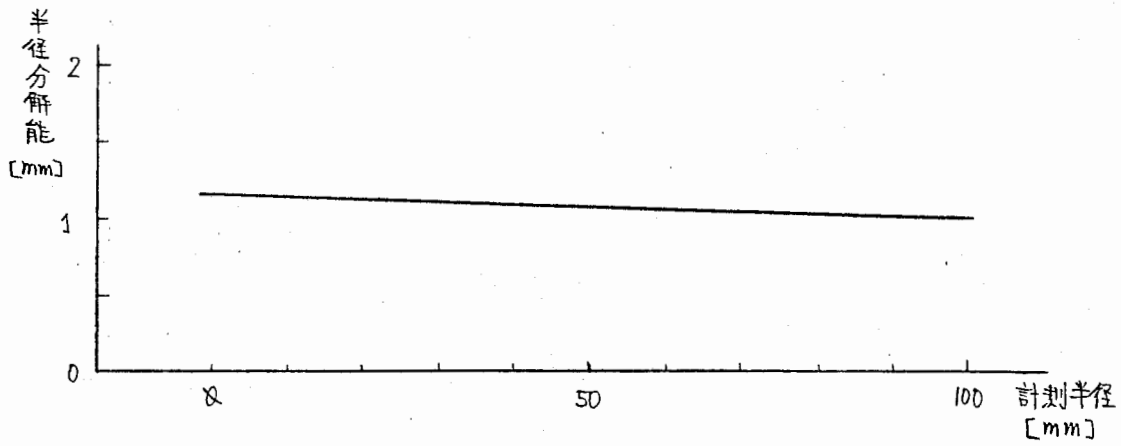
(c) 分解能計算値

図8 スリット光角度と計測誤差





(a) 立方体入力時の断面形状



(b) 立方体入力時の分解能計算値

図9 立方体の入力データ ( $\theta = 30[\text{deg}]$ ,  $\Delta\phi = 10[\text{deg}]$ )

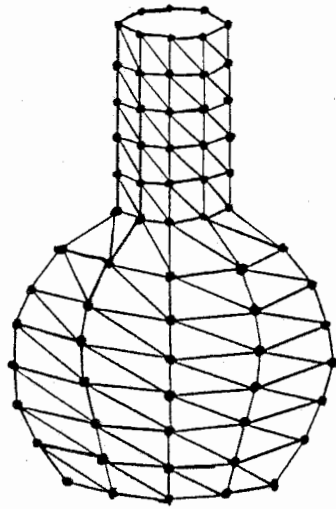


図10 ワイヤフレームモデルの作成方法

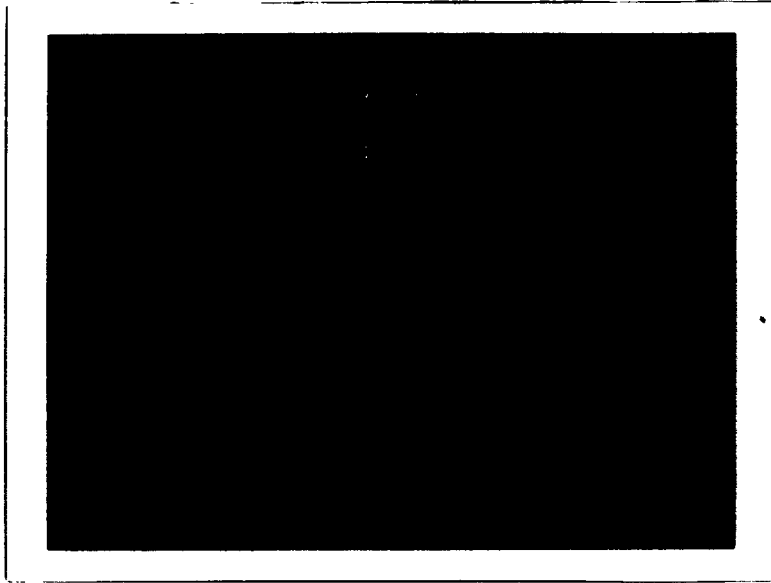


図11 ワイヤフレームモデルによるボトルの再構成  
( $\theta=30[\text{deg}]$ ,  $\Delta\phi=20[\text{deg}]$ , サミアリングピッチ 10ピクセル)

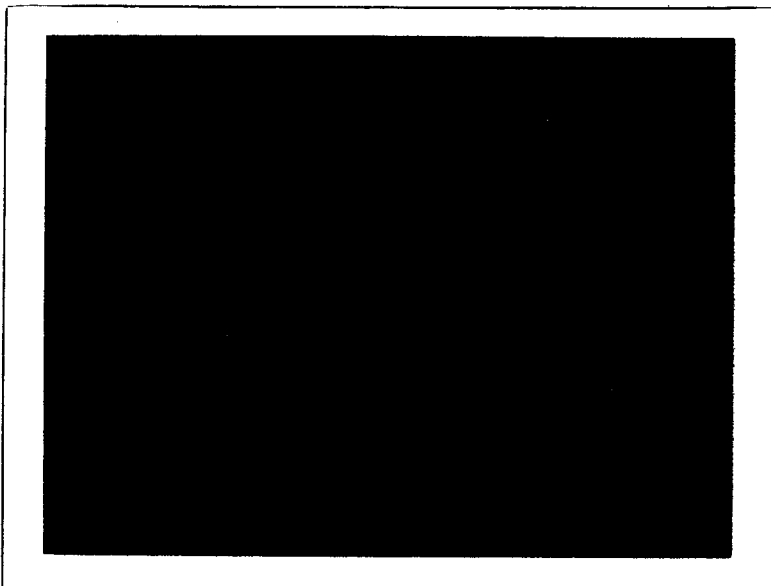


図12 ソリッドモデルによるボトルの再構成  
( $\theta=30[\text{deg}]$ ,  $\Delta\phi=20[\text{deg}]$ , サミアリングピッチ 10ピクセル)