3次元仮想空間を用いた距離画像からの形状抽出

正員 大野 尚 則 (岐阜県工業技術センター)

非会員 丹 羽 義 典 (岐阜県工業技術センター)

A Method to Generate Shape Data from Range Data in 3D Virtual Space

Naonori Ohno, Member, Yoshinori Niwa, Non-Member

(Gifu Prefectural Industrial Technology Research Center)

This paper presents a system to convert range data to 3D CAD data by the operator's interaction in 3D Virtual Space. Recently, although many researches have been done, it is difficult to obtain exact shapes for 3D CAD systems. Also, there are systems for the purpose by the operator. However, since using displays and pointing devices for 2D in them, the operator cannot operate on range data easily. To solve such problems, the authors utilize Virtual Reality Technology for converting range data to 3D CAD data, and have developed a prototype system for it. This system provides a suitable interface to select a part of range data and generate geometric shapes by using a stereoscopic display, 3D pointing device and various template cursors. In addition, by applying methods of pattern recognition to the selected points, we can obtain 3D CAD data efficiently and exactly. As a result of the experiments, this system can generate 3D shapes from range data, and its effectiveness is confirmed.

キーワード：距離画像，形状抽出，Virtual Reality，画像認識

1. まえがき

近年の3次元計測技術の普及により、距離画像が容易に得られるようになった。しかしながら、それとは対照的に距離画像の利用はCG用形状データの作成や研究対象に限られており、産業分野での実用的利用が望まれている。例えば、リバースエンジニアリングやラピッドプロトタイピングにおいては試作モデル等の距離画像からの形状抽出等の用途が考えられる。

距離画像からの形状認識・構築問題については多くの有効な手法^{(1)~(5)}が報告されている。これらの手法では法線ベクトル^{(2) (3)}や各種曲率^{(4) (5)}等の特徴を抽出し、それを領域分割やマッチングに利用することにより対象物の種類と位置、姿勢を決定する。しかしながら、これらの手法の工業分野における利用を考えた場合、工業製品の形状は面の境界が滑らかであったり、フィレット面（平面間を補間する円筒面）を含んでいる形状が多く、そのうえ形状計測時の誤差等の影響により、画像中に含まれる形状の境界情報の抽出が困難であり誤抽出の可能性が高い。したがって、コンピュータによる画像認識アルゴリズムのみでは、抽出した形状を実用的なCADデータとして利用することは容易ではない。

これに対して近年では、オペレータを介して距離画像からの形状抽出を行うシステム⁽⁶⁾が存在する。これらのシステムは距離画像からCADデータへの変換に用いることがで

きるが、それらのシステムでは2次元モニタ上で計測誤差を含んだ距離画像を表示しているため、オペレータには特定の点の位置の確認が困難であり、また、指示デバイスに通常のキーボードやマウスを採用しているため、3次元空間中の点や形状に対しての操作が容易ではない。よって、高精度な形状抽出のためには、オペレータが形状を構成する点群を正確かつ容易に選択する手法が必要である。

このため、本研究ではVR技術を利用して3次元仮想空間とオペレータとのインタラクションによる距離画像からの形状抽出を試みる。VR技術を用いることにより、オペレータに対して仮想空間を実空間のように提示でき、位置関係の複雑な対象の立体表示や、空間位置の直感的な指示が可能となる。

筆者らは既にVR技術を用いて3次元スプライン曲線編集システム⁽⁷⁾を開発し、設計分野での有効性を確認した。さらに、この技術を利用した距離画像を高精度なCADデータに変換する実用的なシステムの構築を目指し、点、線形状を用いた平面形状抽出方法⁽⁸⁾やオペレータのインタラクションによる円筒面のパラメータ抽出方法^{(9) (10)}について研究を行っている。

本論文では、これらの手法を統合し、抽出目的形状に適したカーソルをテンプレートとして点群を選択し、これに画像処理手法を適用することにより、高精度に形状を抽出する3次元モデリングシステムの開発を行い、その有効性を確認したので報告する。

図1 システム概要

Fig.1. System block diagram.

図2 カーソル形状

Fig.2. The template cursors.

2. 3次元モデリングシステムの設計

3次元モデリングシステムのブロックダイアグラムを図1に示す。システムは、(i)距離画像及び生成形状を立体的に表示する画像表示部、(ii)表示画像中の点、線等の指示やメニューを選択する指示入力部、(iii)選択された点、線等を解析し、新たな形状を生成するデータ解析部、そして(iv)距離画像の入力やCADデータの出力を行うデータ入出力部の4部で構成されている。

〈2.1〉 3次元空間における指示方法の検討 本システムでは、オペレータが選択した点群データに画像認識手法を適用して形状を抽出するため、点の選び方により抽出結果が大きく左右される。したがって、オペレータが形状抽出に必要な点群を正確に選択できるように、空間の3次元的な指示が可能な超音波式のポインティングデバイスを利用する。この装置により、オペレータの手首に追従した動きを仮想空間中で実現できる。

また、特定の形状を構成する点群を効率よく選択するために、その形をしたテンプレートカーソルを利用する。工業製品の形状は一般的に平面とフィレット面から構成されている場合が多いことから、今回は図2に示す5種類のカーソルを用いている。

- (i) 矢印カーソルは、先端からの距離が最短の点データや抽出された形状及びメニューの選択に用いる。
- (ii) 直線カーソルは、CADデータとして重要な基準線の抽出用で、軸の長さや軸からの距離が一定の範囲内に存在する点群を選択する。
- (iii) 平面カーソルは、基準面や工業製品を構成する平面の抽出用で、形状表面からの一定距離以内の点群を選択する。
- (iv) 円筒面カーソルは、フィレット面抽出用で、(iii)と同

図3 平面カーソルによる点群の選択

Fig.3. Selecting points using the plane cursor.

様の方法で点群を選択する。

- (v) 球カーソルは、雑音が少ない距離画像において、中心点からの距離内に含まれる点群を素早く一括して選択する場合に使用する。

これらにより、それぞれのカーソルをテンプレートにして、抽出目的形状に属した点群を一括して選択できる(図3)。また、矢印カーソルを除くこれらのカーソルのサイズを変化させ、抽出形状の大きさに調節して点群選択できる。

〈2.2〉 選択点からのデータ解析・画像認識 ここでは選択された点群から、工業製品に必要な形状要素である直線、平面、円筒面の抽出を行うための手法について検討する。以下では、モニタ画面において立体視できる範囲に正規化された距離画像を扱うことにする。

〈2.2.1〉 最小二乗法による抽出 距離画像から形状を抽出するための方法として、雑音分布の偏りが少ない場合に有効な最小二乗法を用いる。

ここでは、本手法を直線と平面の抽出に用いている。選択された点群とのZ軸方向の距離の二乗和が、それぞれ最小となるように方程式を導出すると、3次元空間中の直線方程式は、式(1)から式(4)で表現できる。なお、 α_x, α_y はそれぞれYZ, ZX平面上でのYとZ軸方向の傾きを示す。また、3次元空間中の平面は、式(5)から式(9)で表現できる。なお、式中のバーは平均値を示す。

$$y = \alpha_x(z - \bar{z}_0) + y_0 \quad (1)$$

$$x = \alpha_y(z - \bar{z}_0) + x_0 \quad (2)$$

$$\alpha_x = \frac{\overline{yz} - \bar{y}\bar{z}}{\overline{z^2} - (\bar{z})^2} \quad (3)$$

$$\alpha_y = \frac{\overline{xz} - \bar{x}\bar{z}}{\overline{z^2} - (\bar{z})^2} \quad (4)$$

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (5)$$

$$A = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{y^2} - (\bar{y})^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{\overline{xz} - \bar{x}\bar{z}}{\overline{z^2} - (\bar{z})^2} \quad (7)$$

$$C = \frac{\overline{yz} - \bar{y}\bar{z}}{\overline{y^2} - (\bar{y})^2} \quad (8)$$

$$D = -(\bar{x}\bar{y} + \bar{x}\bar{z} + \bar{y}\bar{z}) \quad (9)$$

〈2.2.2〉 ハフ変換による形状抽出 最小二乗法が局所的な雑音の影響に左右されやすい方法であるのに対して、ハフ変換は雑音の影響を受けにくい、離散的な画像から形状を抽出する場合に有効な手法であることが知られている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。本システムでは、この手法も直線と平面の抽出に用いる。

3次元直線の抽出は、点群をXY, YZ, ZX平面の3面に投影し、その平面上での線分長の長い2平面を選択して、それぞれの平面上でハフ変換を用いて2次元の直線方程式を抽出した後に、抽出された2本の直線方程式から3次元直線方程式を導出する。

また、平面抽出は次の方法を検討する。平面の方程式は式(5)に示される通り4個のパラメータで表現できるが、ハフ変換を用いて4つのパラメータを高精度に抽出するためには膨大な投票空間が必要であり、処理時間も増大する。そのため、最初にハフ変換により平面の単位法線ベクトルを A', B', C' を求める。これらのパラメータ空間は範囲を±1.0に限定できるため、それらを m 分割し、 $m \times m \times m$ の立方体空間を投票空間とする。求められた単位法線ベクトルと n 個の点データ (x_j, y_j, z_j) を用いてパラメータ D' は、式(10)によって求めることができる。

$$D' = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Ax_j + By_j + Cz_j) \quad (10)$$

〈2.2.3〉円筒面の抽出方法の検討 無限円筒面は、軸の方向余弦を $u = (a, b, c)$ 、軸の基準位置を $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 、半径を r とすると式(11)で表現される。

$$f(P, P_0, u, r) = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - \frac{\{a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0)\}^2}{a^2 + b^2 + c^2} - r^2 = 0 \quad (11)$$

また、有限長の円筒面を定義するためには、軸の始点と長さを合わせて合計11個のパラメータを求める必要がある。

本論文で用いた手法の流れを図4に示す。まず、無限円筒面の7個のパラメータを求める。円筒面の式(11)に選択された n 個の点の座標値 $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ を代入した時の二乗誤差の平均 ε は式(12)で定義する。

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(P_i, P_0, u, r)^2 \quad (12)$$

この値が最小となるようにパラメータを最適化する。パラメータの初期値には、点群選択時に用いた円筒カーソルの値を用いて、かけ離れた局所解に陥らないように考慮した。方向余弦、基準位置、半径のグループの1つを乱数により選択し、それに対してニュートン・ラフソン法により部分的に最小化を行う。例えば、方向余弦のグループが選択された場合、それらのパラメータに対してニュートン・ラフソン法を適用し、 ε が極値をとる時の方向余弦を求める。基準位置、半径のグループに対しても同様に行う。

この一連の処理を繰り返し、下記のいずれかの条件を満たしたときを停止条件とし、その時のパラメータを近似的に円筒形状のパラメータとして決定する。

- (i) $\varepsilon \leq \varepsilon_T$ となった場合。

図4 円筒面の抽出

Fig.4. Flow of detecting cylindrical surface.

- (ii) 連続して求められた ε を ε_{i-1} と ε_i とした時、式(13)の条件式が真となる場合が20回以上続いた場合。

$$(\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i) / \varepsilon_i < 0.005 \quad (13)$$

なお、 ε_T はユーザが実験対象や距離画像の測定条件等を考慮して定める定数である。これらの条件を厳しくすることで、さらに高精度な円筒形状のパラメータが得られるが、処理時間が増大しインタラクティブ性が失われる。

次に、有限長の円筒面の定義に必要な軸の始点と長さは、選択されたすべての点を軸上に投影させた点群の両端点の座標値から算出する。

〈2.3〉拘束条件を用いた形状抽出 点群データから個別に形状を抽出する場合、他の形状との関係を考慮していないため、抽出された隣り合う形状間で不整合が生じる可能性がある。そのため、既に抽出された形状を基準に、拘束条件を用いて新規形状を抽出する機能を付加する。

拘束条件として以下の条件を設定した。

- (i) 2平面は直交する。
(ii) 3平面は直交する。
(iii) 2平面とフィレット面は接する。

基準とする平面を選択することにより、抽出形状のパラメータ数を減らすことができる。特にフィレット面の抽出については条件(iii)を用いることにより、方向余弦の3個のパラメータを決定できるため、安定な形状抽出が可能である(図5)。

〈2.4〉形状の再抽出・形状変更 選択点によっては雑音等の原因により、オペレータが意図する形状が得られない場合が生ずる。この場合には、その原因となる点データを選択点から外し、最適な選択点のみで再度抽出を行う必要がある。選択された点が明らかに不適切な場合には、矢印カーソルを用いて個別にそれらの点の選択を解除することができるが、本システムでは図6に示すように抽出された形状を利用して、不適切な点をインタラクティブに除去し、形状を再抽出する機能を持つ。この機能により、抽出精度の向上が期待できる。また、抽出された形状に対して手動でパラメータの変更・調整を行う機能も持つ。

図5 拘束条件を用いた形状抽出
Fig.5. Detecting shapes on restrictive conditions.

Fig.6. Re-detection by using detected shapes.

3. 試作システム

〈3・1〉 基本仕様 2章での検討をふまえて、3次元モデリングシステムの試作を行った。図7にシステム全景、図8に本システムの流れを示す。

入力データは、ASCII形式の(x, y, z)の座標をもつ距離画像とし、出力データはCADの標準的なデータ交換形式であるIGES (Initial Graphics Exchange Specification)形式とする。本システムを動作させるGWS (Graphics Work Station)としてIndigo2 (CPU: R4400, 150MHz, SGI社製)を用いた。立体視用の装置として液晶シャッタ方式の立体視用眼鏡 (Crystal Eyes: STEREOGRAPHICS社製)、また、指示デバイスには3D mouse (LOGITECH社製)を用いている。

プログラミング言語はC言語、グラフィック処理用ライブラリとしてPerformer (SGI社製)を使用した。このPerformerの仮想空間を構造木で表現するSceneGraph機能を用いて、仮想空間の記述を行う。また、このライブラリで対応が困難な部分はIRIS GL (SGI)を用いる。

〈3・2〉 視覚系の設計 液晶シャッタ方式眼鏡を用いた立体表示方法は、両眼それぞれに適した画像を生成し、その表示を眼鏡のシャッタと同期させ、1つの画面上に表示させることにより、オペレータの残像効果を利用する方法である。よって、オペレータに対して違和感の無い立体表示を行うためには、視覚系のパラメータを適切に設定する必要がある。本システムでは、オペレータとディスプレイ面間の実測距離(約500mm)から、文献(7)により、焦点距離: 500.0 (mm)、上下視野角: 29.3 (deg)、左右視野角: 36.5 (deg)、及び幅角: 0.8 (deg)に設定した。

図7 システム全景
Fig.7. Overview of the system.

図8 本システムの流れ
Fig.8. Flow of the system.

〈3・3〉 システムメニュー 本システムでは選択された点群や形状に対し、表1に示す機能をオペレータが選択して適用する。機能の選択は、点や形状を選ぶ場合と同様に矢印カーソルを用いて行う。

4. 実験及び考察

最初に、本システムの有効性を確認するために4種類の

表1 システムメニュー
Table 1. Various functions in the system.

番号	機能	備考
1	直線抽出	最小二乗法／ハフ変換
2	平面抽出	最小二乗法／ハフ変換
3	円筒抽出	円筒パラメータ最適化法
4	形状調整	形状パラメータ
5		
6		
7	選択解除	選択形状, 点データ
8	形状削除	選択形状, 点データ
9	データ出力	IGES形式
0	終了	

実験を行った。距離画像計測装置として高精度な非接触 3 次元測定機 (Surveyor2000: マツオ社製) を用い、2 (mm) の計測間隔で測定した距離画像を用いた。

〈4.1〉 最小二乗法による抽出 図 9 に示す一辺が 50 (mm) の立方体の距離画像に対して、平面カーソルを用いて選択された点群に最小二乗法を用いて実験を行った。3 面の平面 (A, B, C) の抽出を行い、互いの面の成す角度について評価を行った。10 回の試行の結果、真値の 90 (deg) に対して表 2 に示す良好な結果が得られた。

〈4.2〉 最小二乗法とハフ変換による抽出手法の比較

最小二乗法とハフ変換による平面抽出の比較実験を行った。図 9 の距離画像に対して、距離画像の値の範囲の 3% と 6% の雑音強度を持つ 2 種類のランダム雑音を入為的に付加したものを実験対象とした。これらの距離画像に 2 手法を用いて、選択される点の個数の変化による平面抽出の精度を〈4.1〉節と同様に評価した。ハフ変換に用いる単位法線ベクトルのパラメータ空間の分割数 m は予備実験の結果と処理時間を考慮して 50 とし、 $50 \times 50 \times 50$ の投票空間とした。点群の選択データ数を 3, 5, 10, 20 の 4 種類に設定して、それぞれ各 10 回の平面形状抽出を行った結果を表 3 に示す。

表中の値は、10 回の試行における誤差の平均値である。表より、雑音強度の大小に係わらずデータ数が多くなるにつれ誤差は減少する傾向にある。2 種類の手法を比較した

図 9 立方体の距離画像

Fig.9. Range image of a cube.

表 2 最小自乗法による平面抽出の結果

Table 2. Result of detecting planes by LSM.

	面 A-面 B	面 A-面 C	面 B-面 C
平均 (deg)	90.06	89.53	90.29
分散	1.92	0.17	0.26

表 3 雑音を含む距離画像からの平面の抽出

Table 3. Result of detecting planes in noisy range image.

データ数	雑音強度小 (3%)		雑音強度大 (6%)	
	LSM	HT	LSM	HT
3	1.47	26.61	5.74	0.18
5	0.44	8.50	1.55	3.06
10	0.25	0.89	1.14	0.45
20	0.18	0.09	1.34	0.09

LSM: 最小二乗法 HT: ハフ変換 単位は (deg)

場合、全般的に最小二乗法による抽出方法はハフ変換による方法よりも高速で安定的な形状抽出ができたが、雑音強度が大きい場合にはデータ数を増加させても抽出精度の向上はみられなかった。一方、ハフ変換による形状抽出精度は若干不安定であるが、雑音強度の大小に係わらず、データ数を増加させることにより、最小二乗法よりも高精度に形状を抽出することができた。

〈4.3〉 円筒パラメータの抽出 次に円筒パラメータの最適化による円筒面抽出実験を行った。本実験では、円筒パラメータ最適化法における停止条件 (i) の ε_T を予備実験の結果と処理時間を考慮して 200 と設定した。図 10 のサンプル A (長さ 50mm, 直径 25mm, 角度 45 (deg)) に示す距離画像から円筒面の抽出を行った結果を表 4 に示す。軸の方向余弦の値に関しては良好な結果が得られたが、円筒の径の値に対しては約 3% の誤差が生じた。これは終了判定に使用する二乗誤差 ε が方向余弦の値に大きく左右されることが原因であると考えられる。また、点群の選択時に用いた円筒カーソルを、パラメータ最適化のための初期値として利用しており、その値によっても最終的に得られるパラメータの精度が異なることも確認できた。

〈4.4〉 拘束条件を用いた形状抽出 拘束条件を用いて、距離画像に含まれるすべての形状を抽出する実験を行った。実験に用いた距離画像を図 10 のサンプル B に、抽出結果を図 11 に示す。最初に最も大きな平面 a を抽出し、それを基準面として互いが直交していることを利用して他の 2 つの平面形状 b, c を抽出した後に、平面が直交しているこ

サンプル A

サンプル B

上: ワイヤフレーム 下: 距離画像

図 10 実験用サンプル形状

Fig.10. Samples for experiments.

表 4 円筒面抽出結果 (軸方向角度と径)

Table 4. Result of detecting cylinders.

軸角度誤差 (deg)	径誤差 (%)
0.05	2.62

とを利用して平面dを抽出した。最後に、拘束条件を用いて2つの平面間に存在する円筒面e, fを抽出した。図より4つの平面形状と2つの円筒面が抽出できたことが確認できた。

図11 拘束条件機能を用いた抽出結果
Fig.11. Detecting all shape in the sample (B).

5. むすび

本論文では、距離画像から形状を正確に抽出することを目的とし、3次元仮想空間とオペレータのインタラクションにより、基本形状(直線, 平面, 円筒面)を抽出するシステムを開発した。

本システムでは、VR技術によりオペレータが距離画像を立体視しながら直感的な空間操作を行うことができ、また、抽出目的の形状をしたカーソルをテンプレートとして用いることで雑音の影響を吸収できるため、高速かつ正確に点群を一括して選択できる。また、その点群に対してオペレータが画像処理手法を選択、適用することで安定に形状の抽出ができる。更に、拘束条件による形状抽出機能により、抽出目的形状のパラメータ数を減らし、境界情報を持つ正確な形状抽出も可能である。抽出実験の結果、本システムの有効性が確認できた。

今後、さらに実用的なシステムの実現を目指し、複雑な形状を含んだ距離画像へ利用するために、複数の平面を補間するブレンド面等、他の形状の抽出方法について検討する予定である。

また、本研究に対して有益な御助言をいただいた岐阜大学工学部小鹿丈夫教授に深く感謝致します。

(平成10年6月26日受付, 平成10年10月26日再受付)

文 献

- (1) J. P. Brady, N. Nandhakumar, and J. K. Aggarwal: "Recent progress in object recognition from range data", image and vision computing, Vol.7, No.4, pp.295-307(1989).
- (2) M. Oshima and Y. Shirai: "Object Recognition using three dimensional information", IEEE Trans., Vol.PAMI-5, No.4, pp.353-361(1983).
- (3) 土屋健一・松尾啓志・岩田彰:「MEGI モデルを用いた3次元物体認識」, 信学技報, PRU92, 3 (1993).
- (4) T. Fujita, K. Sato and S. Inokuchi: "Range image processing for bin-picking of curved object", Proc.IAPR WorkShop on CV, pp.451-454(1988).
- (5) 横矢直和・マーチン D. レビン:「距離画像から回転面を抽出するための一手法」, 信学技報, PRU88, 27 (1988).
- (6) 例えば "SURFACER Ver.5.0 Manual", Image ware Inc. (1995).
- (7) 郷泰彦・大野尚則・丹羽義典:「ステレオ画像を利用した三次元形状操作—仮想空間における三次元スプライン曲線の生成手法—」, 信学技報, EID94, 6 (1994).
- (8) N. Ono, Y. Go and Y. Niwa: "A Study on Three-Dimensional Shape Modeler", Proc.VSMM'95, pp.278-283 (1995).
- (9) N. Ono, T. Yamada, M. Usui and Y. Niwa: "Three-Dimensional Shape Modeler", Proc. SPIE, Vol.2910, pp.148-155 (1996).
- (10) 白井正和・藤井勝敏・大野尚則・丹羽義典:「距離画像を利用した立体視三次元形状復元システムの研究」, 信学技報, PRMU96, 123 (1996).
- (11) P.V.C. Hough: "Method and means for recognizing complex patterns", U.S. Patent 3069654, Dec.18 (1962).
- (12) R.O.Duda and P.E.Hart: "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures", Comm. ACM, Vol.15, pp.11-15 (1972).

大野 尚則

(正員) 1968年8月10日生まれ。90年3月岐阜大学工学部電子情報工学科卒業。同年岐阜県(工業技術センター)入庁。96年3月岐阜大学前期博士課程修了。現在、岐阜大学後期博士課程在学中。主に3次元形状処理, CADに関する研究に従事。

丹羽 義典

(非会員) 1951年10月23日生まれ。74年3月名古屋大学工学部電気工学科卒業。同年岩崎通信機(株)入社。78年岐阜県(金属試験場)入庁。主に画像認識, CAD/CAM関連の研究に従事。