手書き図形の自動認識による 3 次元自由曲線 モデルの生成*

古 島 終 作** 金 井 理*** 高 橋 秀 智***

Generation of 3 Dimensional Free-form Curve Model
by Automatic Recognition of Rough Sketch

Shusaku Furushima, Satoshi Kanai and Hidetomo Takahashi

This paper presents the system which enables a style designer to generate 3 dimensional free-form curve models in a computer easily as if he draws rough sketches on paper. The system consists of three modules; the user-interface module which enables a designer to draw rough sketches in the form of perspective projection directly on the display, the module to automatically recognize geometric and topological constraints on the rough sketches, and the module to calculate 3 dimensional points and free-form curves based on these constraints. The process of these modules can be quickly executed during the interaction of the designer with the computer. Finally some examples of the processing are shown, and efficiency of the system is evaluated.

Key words: 3 dimensional model, geometric modeling, free-form curve, automatic recognition, symmetrical constraints, CAD, human interface

1. はじめに

現在の意匠設計用 CAD システムへ自由曲線を含む 3 次元形状モデルを入力するには、自由曲線に関する知識が必要であるなど非常に手間がかかり、手書きのスケッチ図を表現手段として多用している意匠デザイナーにとっては使いにくいものである。

手書きの図面から 3 面図合成によってソリッドモデルを生成する研究¹⁾や、多面体の透視図からサーフェスモデルを生成する研究^{2) 3)}が行われているが、これらはいずれも意匠設計に必要な自由曲線・自由曲面の生成は困難である。

また、線画の対称性に基づいて自由曲面を生成する手法⁴⁾や、スケッチ図から自由曲線・自由曲面を生成する手法^{5) 6)}が提案されているが、前者は一度に複雑な位相をもつ形状を生成できないという制限があり、後者はスキャナ等からスケッチ図をコンピュータ上に

読み込む作業に手間がかかる。

そこで本研究では、意匠デザイナー自身が容易に 3 次元自由曲線モデルを入力できることを目的に、コンピュータ画面上で任意方向から描かれたデザイン対象の手書きの線画を自動認識し、3 次元自由曲線モデルを生成するシステムを開発した。

本研究で提案する 3 次元自由曲線モデル生成手法は次のような特徴を持っている。

- (1) 1 枚の線画の面对称性を自動認識することで、左右面对称の物体の 3 次元自由曲線モデルを生成できる
- (2) 2 枚の線画間の対応を自動認識することで、非対称の物体の 3 次元自由曲線モデルを生成できる。
- (3) 入力された線画から有理曲線式を用いて 3 次元自由曲線を計算しているため、2 次元曲線と 3 次元曲線との対応が明確で、なおかつ入力された線画の誤差の影響を受けにくい。
- (4) 3 次元自由曲線モデルの入力と生成が高速である。

2. 3 次元自由曲線モデル生成システムの概要

図 1 に示した本システムの処理の概要を説明する。

- (1) 操作者がディスプレイ上に表示された立方体のグリッドの角度と位置を適当に設定し、1 枚目の線画を

* 原稿受付 平成 4 年 8 月 27 日

** 正会員 東京工業大学大学院(現、(株)リコー
ソフトウェア事業部 東京都文京区小石川1-1-17)

*** 正会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

Fig.1 The outline of the system

入力する投影面を定める。

(2) 投影面上にマウスによってフリーハンドで、曲線の線画を入力する。このときグリッドの1方向を3次元自由曲線モデルの対称面の法線と定めているので、面対称の物体はその方向に合わせて図形を描く。1ストロークで1本の曲線を入力し、その両端点は頂点として認識される。

(3) 入力が終了した時点で左右対称である頂点と曲線の組が自動的に検出され、グリッドの角度をもとにそれらの3次元座標が計算され、3次元自由曲線モデルが得られる。

(4) グリッドの角度と位置を変更し、3次元自由曲線モデルに書き加える形で新たな投影面上に2枚目の線画を入力する。

(5) 入力が終了すると、2枚目の線画中の左右対称の対応のつく頂点と曲線の組が検出され、さらに2枚の線画間で対応のつく頂点と曲線の組も自動的に検出されて両者の3次元座標が計算される。左右対称である

Point Number	Possible Symmetrical Points List
1	3 θ_{1s} 4 θ_{1i} N
2	3 θ_{2s} N
3	N
4	N
5	N

Fig.2 List of possible symmetrical points

ことと2線画間で対応の付くことは同等の情報量を持つので、左右非対称の3次元自由曲線モデルも得ることができる。

(6) さらに(4), (5)の処理を繰り返して3次元自由曲線モデルを更新してゆくことが可能である。

これらの機能の実現のために必要な、描かれた1枚の線画中で左右対称な頂点と曲線の対応と、2線画間で同一な頂点と曲線の対応を自動的に検出する手法を3節に示す。また、対応のつけられた頂点と曲線の2次元座標からその3次元座標を計算する手法を4, 5節に示す。

3. 左右対称と2線画間の自動的な対応付け

3.1 左右対称頂点候補リストの生成

まず、1枚の投影面上に描かれた線画の頂点及び曲線の左右対称の対応付けの手法を示す。

最初に2節(1)で述べられたグリッドの角度から対称面の法線方向の投影面上の消失点を計算する。次に図2のように各頂点ごとの、真の消失点方向に延ばした直線と、他の頂点とを結んだ直線のなす角 θ を求め、 θ が一定より小さければ「左右対称頂点候補リスト」に頂点番号を保持する。同時に、そのリストに誤差である角度 θ を加える。

3.2 左右対称の頂点・曲線の組の決定

各頂点は左右対称頂点候補リストに保持された頂点と左右対称になり得るので、1図形中で頂点の左右対称の組合せは複数考えられる。それらのうち最も可能

性の高い組合せを選択する必要がある。そこで、すべての組合せを探索して各組ごとに

- ・左右対称の頂点の数
- ・左右対称として対応付け可能な曲線の数
- ・その組み合わせにおける誤差 θ の総計

を計算する。ここで、左右対称として対応付け可能な曲線は、両端点とも左右対称の頂点であるものであり、曲線自体が左右対称の1本の曲線である場合と左右対称の2本の曲線のペアの場合の2種類が存在する。

そして、以下の条件を満たす組合せを、その図形中の頂点の左右対称の組合せと定める。なお、頂点の組合せから左右対称として対応付け可能な曲線もすべて左右対称であるとする。

- ① 左右対称の曲線数が最大になる組合せ
- ② ①を満たす組合せが複数存在する場合、それらの中で左右対称の頂点数が最小の組合せ
- ③ ②を満たす組合せが複数存在する場合、それらの中で誤差 θ の総計が最小の組合せ

3.3 2線画間の自動的な対応付け

2枚の線画間の頂点、曲線の対応付けをする場合も、左右対称の対応と同様に各頂点に関して「2線画対応頂点候補リスト」を生成する。この場合、対応を仮定した2頂点から、後述する式(2)を用いて頂点の3次元座標を求め、式(2)の残差の自乗和が一定量より小さいときに互いの頂点を候補リストに加えるようにする。この後3.2節と同様のルールで最も可能性の高い組合せを探索する。ただし、「左右対称」を「2線画間で同一」に、「誤差 θ 」を「式(2)の残差の自乗和」におきかえて考える。

また、1枚目の線画で対称性より3次元座標の計算された図形は、2枚目の線画にあらかじめ投影されるため、2枚の線画間での対応が明らかである。そこで3次元座標の既知な頂点と連結している頂点については、まず3次元座標の既知な頂点に隣接する頂点のみを探索して対応付けを行い、さらに対応を定めた頂点に隣接する頂点の対応付けを順次行う。

4. 頂点の3次元座標の計算

4.1 2枚の線画(投影面)の対応による頂点の3次元座標の計算

図3のように、3次元ワールド座標から2枚の投影面 i ($i=1, 2$)への3次元透視変換行列 M^i と、各投影面上にフリーハンドで入力された点 P^i の投影面上の座標(p^i_x, p^i_y)が既知とする。このとき、ワールド座標上の1個の点 P を投影面 i に投影した点が P^i であるならば、 P の3次元座標(p_x, p_y, p_z)を以下の

Fig.3 3D point from two 2D points

手順で求めることができる。なお、 V_i は投影面 i の視点である。

P を M^i によって透視変換すると P^i に投影される条件から式(1)の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} w^i p^i_x \\ w^i p^i_y \\ w^i p^i_z \\ w^i \end{bmatrix} = M^i \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)では左辺 $w^i p^i_x, w^i p^i_y$ を w^i で割ることにによって p^i_x, p^i_y が得られる。式(1)より式(2)で示される2本の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} (m^i_{11} - m^i_{41} p^i_x) p_x + (m^i_{12} - m^i_{42} p^i_x) p_y \\ + (m^i_{13} - m^i_{43} p^i_x) p_z + m^i_{14} - m^i_{44} p^i_x = d^i_x \\ (m^i_{21} - m^i_{41} p^i_y) p_x + (m^i_{22} - m^i_{42} p^i_y) p_y \\ + (m^i_{23} - m^i_{43} p^i_y) p_z + m^i_{24} - m^i_{44} p^i_y = d^i_y \end{aligned} \quad (2)$$

d^i_x, d^i_y : 残差

ここで $m^i_{\alpha\beta}$ は行列 M^i の (α, β) 成分を示している。式(2)は投影面 $i=1, 2$ について計4本が成り立つ。 P^i の座標が正確なら $d^i_x = d^i_y = 0$ となり直線 $\overrightarrow{V^i P^i}$ と $\overrightarrow{V^j P^j}$ が P で交わるが、フリーハンドで P^i が入力された場合、直線 $\overrightarrow{V^i P^i}$ と $\overrightarrow{V^j P^j}$ は正確に P で交わらないので、残差の自乗和 $(d^i_x)^2 + (d^i_y)^2 + (d^i_z)^2 + (d^j_y)^2$ が最小になるように式(2)に最小自乗法を適用して $P(p_x, p_y, p_z)$ を求める⁷⁾。これにより得られる点 P の位置は、 P を含み投影面 i に平行な平面と、 V^i から P^i へ延ばした直線との交点と、点 P との距離の自乗和が最小になっている。

4.2 左右対称の頂点の3次元座標の計算

図4のように1枚の投影面上に入力された2点 P^1, P^2 が、3次元のワールド座標上で互いに面対称な2点 P, P' であるとき、 P^1, P^2 と投影面への透視変換行列 M が既知なら P, P' を求めることができる。

Fig. 4 3D point from symmetry points

P, P' がワールド座標上 YZ 平面に関し面対称であるとする、 M^1 を式 (3) のようにおけば式 (2) を用いて P を求めることができる。

$$M^1 = M, \quad M^2 = M \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

また、 P' は P の x 成分の符号を反転した値になる。

5. 3次元自由曲線の計算

任意の角度の投影面上に透視投影で描かれた、2次元曲線を定義する点列から、任意次数の3次元有理Bézier曲線⁹⁾を復元する手法を以下に示す。

投影面上の2次元曲線から3次元曲線を復元する手法はこれまでもいくつか提案されている。直交する2平面上に正射影で描かれた自由曲線から3次元曲線を復元する手法⁹⁾があるが、この手法は投影面の角度を任意に設定できず、また、曲線の端点での情報しか利用できないなどの制限がある。

また、任意の角度の投影面上の曲線を定義する点列から、3次元曲線を復元する手法⁶⁾があるが、この手法では投影面上の点列を2次元曲線にあてはめた後に投影面の視点から2次元曲線へ延ばした2枚の線織面の交線として3次元曲線を求めている。しかし、この手法では、2次元曲線上の点が3次元曲線上のどの点と対応するのか明確でない。また、線織面が交差する角度が小さいと、2次元曲線の小さな誤差（本来の正しく投影された2次元曲線からの差）によって、得られる3次元曲線形状が投影面に対して奥行き方向に大きく湾曲するという問題があった。

本手法では、透視変換に関し補間形式が不変である有理Bézier曲線を用いているので、投影面上の2次元曲線と3次元曲線との関係は正確に表され、両曲線上

Fig. 5 3D Bézier curve from two 2D curves

の同一パラメータをとる点と互に対応点となる。また、2次元曲線の制御点から直接3次元曲線の制御点を求めているので、従来の手法の問題点であった2枚の線織面の交線を求める問題が、視点と制御点を結ぶ2直線の交点を求める問題に置き換わっており、手書きで入力された2次元曲線の誤差の影響が小さい3次元曲線を得ることができる。

5. 1 基礎概念

図5のように t をパラメータとする3次元 n 次有理Bézier曲線を $P(t)$ とおき、その制御点の通常座標を $P_j(p_{jx}, p_{jy}, p_{jz})$ 、重みを w_j とおく ($j=0 \sim n$)。

透視変換行列 M^1 により $P(t)$ の制御点 P_j は同次座標で表すと式 (4) のように変換される。ここで透視投影された2次元有理Bézier曲線 $P^1(t)$ の制御点は $P^1_j(p^1_{jx}, p^1_{jy})$ 、重みは w^1_j となる。

$$\begin{bmatrix} w^1_j p^1_{jx} \\ w^1_j p^1_{jy} \\ w^1_j p^1_{jz} \\ w^1_j \end{bmatrix} = M^1 \begin{bmatrix} w_j p_{jx} \\ w_j p_{jy} \\ w_j p_{jz} \\ w_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

5. 2 前提条件

図5における3次元曲線 $P(t)$ の端点の位置ベクトル P_0, P_n 及び全制御点の重み $w_0 \sim w_n$ (通常1に設定する) は既知とする。ワールド座標から投影面 i ($i=1, 2$) への透視変換行列 M^i は既知とする。2枚の投影面上でマウスによる軌跡上の点をサンプリングして得られた2次元曲線を定義する点列 $S^i_k(s^i_{kx}, s^i_{ky})$ ($k=1 \sim c^i, c^i > n-2$) は既知とする (S^1_k と S^2_k は対応付けられている必要はない)。これらの既知量から未知量の3次元有理Bézier曲線の制御点 $P_1 \sim P_{n-1}$ を求めることが問題となる。

5.3 3次元曲線の計算手順

(A) 投影面上の点列のパラメータ初期値推定

投影面 i に投影された2次元有理Bézier曲線 $P^i(t)$ が点 S^i_k をパラメータ t^i_k で通過するものとする。 t^i_k の初期値は式(5)によって推定する。

$$t^i_k = (P^i_n - P^i_0) \cdot (S^i_k - P^i_0) / |P^i_n - P^i_0|^2 \quad (5)$$

また、重み w^i_j の初期値を1に設定する。この計算を各投影面 $i=1, 2$ において行う。

(B) 投影面上の点列の2次元有理Bézier曲線への当てはめ

現時点での t^i_k , w^i_j を用いて得られる曲線上の点 $P^i(t^i_k)$ と点 S^i_k が一致する条件から式(6)をたてる。

$$\begin{aligned} & \frac{w^i_1 b_{1n}(t^i_k)}{a^i_k} P^i_1 + \dots + \frac{w^i_{n-1} b_{n-1,n}(t^i_k)}{a^i_k} P^i_{n-1} \\ & + \frac{w^i_0 b_{0n}(t^i_k)}{a^i_k} P^i_0 + \frac{w^i_n b_{nn}(t^i_k)}{a^i_k} P^i_n - S^i_k = D^i_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$a^i_k = \sum_{j=0}^n w^i_j b_{jn}(t^i_k) \quad (7)$$

$$b_{jn}(t) = \binom{n}{j} (1-t)^{n-j} t^j \quad (8)$$

式(6)は投影面 i において点列の数 c^i 本だけ与えられる。残差 D^i_k の x 成分, y 成分の自乗和が最小になるように $P^i_1 \sim P^i_{n-1}$ を各成分ごとに最小自乗法によって計算する。この計算を各投影面 $i=1, 2$ において行う。これにより $P^i(t^i_k)$ と点 S^i_k の距離の自乗和が最小となる $P^i(t)$ が求められる。

(C) 2本の2次元有理Bézier曲線からの3次元有理Bézier曲線の計算

P_j を M^i によって透視投影すると P^i_j になる条件から式(2)と同様に式(9)が成り立つ。

$$\begin{aligned} & (m^i_{11} - m^i_{41} p^i_{jx}) p^i_{jx} + (m^i_{12} - m^i_{42} p^i_{jx}) p^i_{jy} \\ & + (m^i_{13} - m^i_{43} p^i_{jx}) p^i_{jz} + m^i_{14} - m^i_{44} p^i_{jx} = d^i_{jx} \\ & (m^i_{21} - m^i_{41} p^i_{jy}) p^i_{jx} + (m^i_{22} - m^i_{42} p^i_{jy}) p^i_{jy} \\ & + (m^i_{23} - m^i_{43} p^i_{jy}) p^i_{jz} + m^i_{24} - m^i_{44} p^i_{jy} = d^i_{jy} \\ & d^i_{jx}, d^i_{jy}: \text{残差} \end{aligned} \quad (9)$$

投影面 $i=1, 2$ について式(9)は計4本が成り立つので残差の自乗和 $(d^i_{jx})^2 + (d^i_{jy})^2 + (d^2_{jx})^2 + (d^2_{jy})^2$ が最小になるように最小自乗法によって P_j を求める。この計算を各制御点 ($j=1 \sim n-1$) ごとに行

う。

(D) 3次元曲線の投影面上への再投影

(C) で得られた P_j を, 式(4)を用いて投影面1, 2上に再投影し, 新たな P^1_j, P^2_j , ($j=1 \sim n-1$) 及び w^1_j, w^2_j ($j=0 \sim n$) を求める。

(E) 投影面上の点列のパラメータ推定

式(5)で推定された点列の通過点パラメータは2次元曲線 $P^i(t)$ と3次元曲線 $P(t)$ との整合が考慮されていない。そこで(D)で新たに得られた $P^i(t)$ が点 S^i_k 近傍を通過するときの新たなパラメータ t^i_k を式(10)にNewton法を用いることによって求める。曲線 $P^i(t)$ と点 S^i_k の距離が最小になる時のパラメータ t が t^i_k となる。

$$\begin{aligned} & (s^i_{kx} - p^i_x(t)) \frac{dp^i_x(t)}{dt} \\ & + (s^i_{ky} - p^i_y(t)) \frac{dp^i_y(t)}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

(F) 繰返し計算

(B)~(E)の手順を, $P(t)$ から再投影された $P^i(t)$ と点列 S^i_k , ($k=1 \sim c^i$) との最短距離の和が一定量より小さくなるまで(あるいは変化しなくなるまで)繰り返す。通常数回以内の繰返し計算で解が収束し, 入力された点列との距離の自乗和が最小になる投影面上の2次元有理Bézier曲線を与える3次元有理Bézier曲線 $P(t)$ の制御点 $P_1 \sim P_{n-1}$ が得られる。

6. 本システムの実行結果

本システムの実行結果を図6~10に示す。図6は入力した1枚目の線画, 図7は図6の線画の対称性を自動的に検出して得られた3次元自由曲線モデル, 図8は3次元モデルに書き加えられた2枚目の線画(実線), 図9は図8の線画の対称性と2線画間の対応から更新・付加された3次元モデルである。3次元曲線は3次元有理Bézier曲線を用いている。

本システムによって手書きの線画から自動的に3次元自由曲線モデルを生成できることが確認できた。4MIPSのEWSを用いて図9の3次元モデルを生成するまで, 操作者による線画の入力時間が計190秒, 計算時間が計11秒程度である。図10は別の生成例であり, 生成するまでに入力時間に計1200秒, 計算時間に計50秒程度を要した。計算時間は, 対応付けの組合せに要する時間と, 幾何的な座標計算に要する時間に分けられ, 前者は図形の要素数の階乗関数的に計算時間が増加し, 後者は図形の要素数に比例して計算時間が増加する。また, 左右対称な頂点と曲線及び2線画間

Fig. 6 A Rough sketch on first view

Fig. 7 3D free-form curve model from symmetry

Fig. 8 Added sketch on second view (solid curves)

で同一な頂点と曲線の自動的な対応付けは、多くの場合操作者の思い通りに行なわれる。

7. ま と め

本研究の結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 手書きの線画の位相情報と幾何情報をもとに、1枚の線画中で左右対称な頂点と曲線の対応付けと、2線画間で同一な頂点と曲線の対応付けを自動的に行う手法を提案した。
- (2) 2次元曲線と3次元曲線との透視変換の関係が明らかである有理Bézier曲線の性質を用いて、左右対称又は2線画間で対応付けられた2次元曲線を表わす点列から、その点列と投影された曲線との距離が投影面上で最小になる3次元有理Bézier曲線を直接計算する手法を提案した。

Fig. 9 3D free-form curve model from symmetry and two views

Fig. 10 Another example of 3D free-form curve model

- (3) (1), (2)の手法を統合し、容易かつ高速に手書きの線画から3次元自由曲線モデルを生成できるシステムを開発し、手法の有効性を確認した。

なお、本研究は東京工業大学工学部知能化機械研究設備を用いて行われた。

参 考 文 献

- 1) 北嶋克寛ほか：機械製図図面の認識（第2報），精密工学会誌，58, 1, (1992)169.
- 2) 近藤邦雄ほか：手書き透視図の視点推定とその応用，情報処理学会論文誌，29, 7, (1988)686.
- 3) 田中俊江ほか：平行性仮説による多面体の3次元形状復元，電子情報通信学会論文誌D-11, J72-D11, (1989)517.
- 4) 田中敏光ほか：Generalized Symmetryに基づく3次元形状の復元，電子情報通信学会論文誌D, J71-D, (1988)84.
- 5) 趙修偉ほか：物体の鏡面对称性を利用して2次元画像から3次元情報を復元する方法，デザイン学研究，78, (1990)23.
- 6) 古島終作ほか：ラフスケッチ図からの3次元モデルの生成，NICOGRAPH論文コンテスト，(1990)11.
- 7) 出口光一郎：画像と空間，昭晃堂，(1991)150.
- 8) G. Farin: Curves and Surfaces for CAGD, Academic Press, San Diego, (1990)231.
- 9) M. Hosaka: Modeling of Curves and Surface in CAD/CAM, Springer-Verlag, Tokyo, (1992)60.