カメラ用自由曲面生成処理システム*

——三次元測定データからの自由曲面の生成——

高 井 憲 二 郎**

Free-Form Surface Generation System for Camera Design
-Free-Form Surface Generation from 3 Dimensional Measurement Data-

Kenjiro Takai

This paper describes a free-form surface generation system for camera design. The design of cameras has some aspects that differ from that of cars or airplanes. It is necessary to use real object models like wood or clay ones not only to confirm camera shapes but also to design them. Therefore a system is necessary that can generate or modify surfaces in the computer from the real object models as well as generate NC cutter paths to make real objects. The author has developed the system that generates free-form surfaces from three dimensional measurement data. The surface is generated with the following procedure. (1) Define a boundary line to specify the region where the surface will be generated. (2) Measure the real object with the three dimensional measurement machine. (3) Generate the free-form surface to be fitted for the measurement data. The system can offset surfaces and generate NC paths for them.

Key words: free-form surface, three dimensional measurement data, camera design, offset surface, NC cutter path

1. 緒 言

近年、カメラ工業界では操作性、及び意匠性を向上させる目的でカメラ外装に自由曲面を積極的に用いている。自由曲面のモデリングはCADの主要な分野の一つであり、Coons¹⁾ や Bezier²⁾、あるいは Riesenfeld³⁾ らによって提案された曲面表現式を用いた多くのシステムが開発され、車や航空機のボディの設計に用いられている。しかしながら、カメラ外装設計は車体や機体の設計とは異なった側面を持っており、それらに特有な問題を解決するシステムが必要である。

カメラユーザはカメラ外装の見た目の美しさを求めるばかりでなく、グリップしたときの感触のよさ、実際に操作した時の使いやすさをも求めている。カメラの外装設計では、管面上で曲面を評価するだけでなく、木型、あるいはクレイ等の実モデルを作成して操作性のよさを確認しなければならない。現在、CADは急速に進歩してきてはいるが、計算機内部に表現されたモデルを実際の物を作らずに、それが手に馴染みやすいかどうかを判断することはそれほど容易なことではない。また、カメラ

外装に必要とされる自由曲面は非常に複雑であり管面上の操作ではなかなか満足の得られる曲面を設計するのが困難である。

カメラ本体の大きさは車体や機体と比べると非常に小さく、それらの実モデルを作成するコストは設計全体に要する費用に比較してそれほど多額ではない。そこで、我々は実モデルを積極的に使用することを考える。管面上の操作により計算機内モデルを生成したり、それらに変形を加えることによって曲面の設計を進めていくとともに、必要であれば実モデルを計算機内モデルから作成し評価する。モデルに修正が必要であれば、実モデルに変形を加え（例えば、実モデルの不要な部分を削りとりたり、粘土を加えたりすること等）曲面を修正する。それらの修正は実モデルを三次元測定器で計測し、得られた測定データを近似するように計算機内モデルを修正することによって計算機内モデルに反映させる。

測定データから曲面を生成することはよく行われていることである⁴⁾ が、測定点をすべて通過するような曲面を生成するのではなく、デザイナーが管面上で修正しやすいような曲面を生成する。

上記のような考えに基づき、三次元測定データから自由曲面を生成し、それらに金型作成のためのNCカットパスを生成するシステムを開発したのでそれについて報告する。

* 原稿受付 昭和63年1月17日、昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和62年3月28日）および昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和63年3月18日）にて発表
** 正会員（株）キャノン（東京都大田区下丸子2-9-4）

Fig. 1 Design flow

2. システム概要

2.1 システムの機能

本システムに基づいた自由曲面設計の流れを図1に示す。まず、デザイナーは自分のアイデアをまとめるために、デザイン図（三面図）を作成する（1）。その三面図を基にして実モデルを作成する（2）。あるいは、それらの三面図を利用して管面上で曲面を設計しそれから実モデルを作成する。次に、三次元測定器で実モデルを計測し（3）、その測定データを用いて曲面を生成する（4）。生成した曲面に等高線を描いたりシェーディングを施して曲面を評価する（5）。この時点でも修正が必要であれば管面上でそれを行う（6）。管面での評価が良好ということであれば、それに対するカットパスを生成し（7）、それにより実モデルを作成し評価する（8）。実モデルを評価して必要があれば修正を加える（9）。この時点でO.K.ということになれば設計完了であり、不良ということになれば、（3）、（4）あるいは（6）から処理を繰り返す。図1中、点線で囲んだ部分が本システムによって処理される。

この流れに基づき本システムでは

- (1) 三次元測定データからの自由曲面の生成
 - (2) 金型作成用NCカットパスの生成
- を行う。

2.2 三次元測定データからの自由曲面の生成

曲面は以下の手順で生成される。

(1) 三面図より曲面の境界線を定義する。

(2) 実モデルを三次元測定器で測定する。

(3) (1) で定義した境界線の内側に測定点を近似するように曲面パッチを生成する。

測定データを近似する曲面としては滑らかな曲面、すなわち至る所で接平面連続な曲面を生成することを考える。しかしながら、カメラのような工業製品のデザインでは製品のすべての面が自由曲面で出来ているという事はほとんどなく、三面図で明確にキャラクタラインが定義されている場合が普通である。そこで、キャラクタラインや輪郭線を面モデルに反映させるために、こうしたラインを曲面の境界線として三面図を用いて定義する。

2.3 金型作成用NCカットパスの生成

生成した曲面にボールエンドミル用のNCカットパスを生成する。パスは次の手順で生成される。

(1) 曲面を工具の径だけオフセットする。

(2) オフセットした曲面に等高線を作成しそれを連結することによってパスを生成する。

2.4 曲面表現式

2.4.1 四辺形パッチ

曲面の表現式として四辺形パッチは双三次Gregoryパッチ⁵⁾、いわゆる千代倉・木村パッチ⁶⁾を用いる。このパッチは図2のように20個の制御点によって定義され、パッチ $S(u, v)$ は以下のように表される。

$$S(u, v) = (1-u+uE)^3(1-v+vF)^3P_{00}(u, v) \\ 0 \leq u, v \leq 1$$

$$P_{11}(u, v) = (vP_{11,0v} + uP_{11,u0}) / (u+v)$$

$$P_{21}(u, v) = (vP_{21,1v} + (1-u)P_{21,u0}) / ((1-u)+v)$$

$$P_{12}(u, v) = ((1-v)P_{12,0v} + uP_{12,u1}) / (u+(1-v))$$

$$P_{22}(u, v) = ((1-v)P_{22,1v} + (1-u)P_{22,u1}) / ((1-u)+(1-v))$$

ただし、 E, F は以下の式で表されるシフト演算子である。

$$EP_{ij} = P_{i+1,j}, \quad FP_{ij} = P_{i,j+1}$$

境界線上で2枚のパッチの接平面を連続に接続させる方法として千代倉の内挿法⁷⁾に従い、本システムでも“基礎パッチ”の概念を用いる。

この方法でパッチを内挿するならば、隣接するパッチの境界線が一致し、かつ境界線の両端点において接平面が一致していればパッチ間の接平面を連続させることが出来る（図3）。したがって、至る所接平面連続となる曲面を生成するためには、パッチの4隅の制御点で指定された法線方向を満たす境界曲線網を作成すればよい。

2.4.2 三辺形パッチ

曲面の表現能力を高めるために、本システムでは図4に示すような三辺形パッチをも使用する。

Fig. 2 Gregory patch

Fig. 3 Condition of continuous tangent plane

Fig. 4 Three-sided patch

四角形パッチとの接続を考慮し、三辺形パッチの各辺は3次Bézier曲線として定義する。ただし、パッチを内挿する際には4次Bézier曲線に次数を上げ、パッチT(u, v, w)を以下の式によって表現する。

$$T(u, v, w) = (u + vE + wF)^4 P_{00}$$

$$0 \leq u, v, w \leq 1, u + v + w = 1$$

$$P_{11}(u, v, w) = (wP_{11,0w} + vP_{11,0v}) / (v + w)$$

$$P_{12}(u, v, w) = (uP_{12,0u} + wP_{12,0w}) / (w + u)$$

$$P_{21}(u, v, w) = (vP_{21,0v} + uP_{21,0u}) / (u + v)$$

この表現式は千代倉・木村パッチの考えを三辺形パッチに応用したものであり、パッチ内部の6個の制御点(図4のP₁₁, P₁₂, P₂₁)は“基礎パッチ”と接平面が連続に接続されるように決定される。内部の制御点の決定法を図5を用いて説明する。

図5に示すように三辺形パッチSbの制御点を決定するためにパッチSbと四角形パッチSaとの接続を考え

Fig. 5 Connection of basis patch and three-sided patch

る。図5において a_i, b_i ($i=0, \dots, 3$), および c_i ($i=0, \dots, 2$) を以下のように定める。

$$a_0 = P_{30}^a - P_{20}^a, a_1 = P_{31}^a - P_{21,1v}^a$$

$$a_2 = P_{32}^a - P_{22,1v}^a, a_3 = P_{33}^a - P_{32}^a$$

$$b_0 = P_{03}^b - P_{04}^b, b_1 = P_{12,0vw}^b - P_{13}^b$$

$$b_2 = P_{21,0vw}^b - P_{22}^b, b_3 = P_{30}^b - P_{31}^b$$

$$c_0 = P_{31}^a - P_{30}^a, c_1 = P_{32}^a - P_{31}^a$$

$$c_2 = P_{33}^a - P_{32}^a$$

2つのパッチの境界線上のパラメータuとvに関する微分ベクトルは、 a_i, b_i, c_i によって次のように表される。

$$\partial S_a(1, v) / \partial u = 3(1 - v + vE)^3 a_0 \quad (1)$$

$$\partial S_b(0, v, 1 - v) / \partial u = 4(1 - v + vE)^3 b_0 \quad (2)$$

$$\partial S_a(1, v) / \partial v = 3(1 - v + vE)^3 c_0 \quad (3)$$

これらの式は千代倉の内挿法における微分ベクトル関数⁸⁾と式(2)の係数だけが異なる式となっている。したがって、千代倉の内挿法を適用することができ、 b_1, b_2 が次式によって一意に決定される。

$$b_1 = (k_1 - k_0) a_0 / 3 + k_0 a_1 + 2h_0 c_1 / 3 + h_1 c_0 / 3$$

$$b_2 = k_1 a_2 - (k_1 - k_0) a_3 / 3 + h_0 c_2 / 3 + 2h_1 c_1 / 3$$

ただし、 k_0, k_1, h_0 および h_1 は次式を満たす定数である。

$$b_0 = k_0 a_0 + h_0 c_0, b_3 = k_1 a_3 + h_1 c_2$$

本システムでは、Saを“基礎パッチ”として接続を考えることによってパッチを構成する三辺によって内部の制御点を決定している。すなわち、Saのベクトル a_0 は c_0 に垂直で、 b_0, c_0 によって定義される平面上に存在する単位ベクトルであり、同様に、 a_3 も b_3, c_2 によって定義され、 c_2 に対して垂直である。また、 $\partial S_a(1, v) / \partial u$ が一次関数となるように a_1, a_2 を定めている。

3. 曲面の生成

本章ではデザイナーが変形しやすい曲面を四角形 -

Fig. 6 Three orthographic views and boundary line

三辺形パッチを混在させて生成する方法と、測定点を通る曲面を三辺形パッチのみによって生成する方法について述べる。

3.1 境界線定義

曲面を生成すべき領域を定めるために三面図を用いて境界線を定義する。境界線の各稜線は三面図間の対応付けを行うことにより三次元化する。三次元化した稜線はパッチとの親和性を考え3次 Bézier 曲線として表現する。図6にカメラグリップ部の三面図、及びその部分に対する測定点と三面図から定義した境界線を示す。各稜線の位置での曲面の法線方向を制御したいのなら、境界線定義時にそこの法線方向を指定する。

3.2 初期曲面生成

四辺形-三辺形パッチ混在曲面と三辺形パッチ曲面とで初期曲面の生成法は異なるので別々に述べる。

3.2.1 四辺形-三辺形パッチ混在曲面

まず、ユーザの指定した方向（この方向を向くベクトルを以後、射影ベクトルと呼ぶ。）から境界線を眺めそれを二次元平面に投影する。投影した境界線にパッチ境界となる断面を図7(a)のように指定する。次に、境界線と断面線との交点、断面線同志の交点を求め、それらの交点で線分を分割する。境界線の外部にある線分は削除する。これらの線分によって囲まれた領域を1つのパッチとし、四辺で囲まれた領域は四辺形パッチ、三辺で囲まれた領域は三辺形パッチとする（図7(b)）。非三-四辺で囲まれた領域は、その領域に含まれる頂点の座標値の平均を計算し、その値を座標とする頂点を新たに生成する。生成した頂点を中心として領域を三角形に分割しそれらを三辺形パッチとする。

3.2.2 三辺形パッチ曲面

(a) Section line

(b) Patch generation

Fig. 7 Initial surface

ここでは例として図9(a)のような境界線に曲面を生成する。まず、この境界線を射影ベクトル方向から眺め三角形要素に自動分割する。分割は参考文献9)の方法に従い、まずオペレータの入力するパッチサイズに合わせて境界線上に節点を生成する。次に境界線内部に節点を、指定したパターンに基づいて生成する。これらの節点を用いてできる限り正三角形に近くなるように分割する（図9(b)）。

自動分割で生成した

三角形要素は2次元平面内で定義されたものであり、測定点を近似するように3次的に変形した場合、正三角形から大きく外れてしまい曲面に不必要な凹凸が生じてしまうことが考えられる。曲面が均質に生成されるように、3次的に正三角形に近いパッチで曲面を生成することが望ましい。

そこで、まず境界線から曲面形状を予測し、予測した曲面を適切に三辺形パッチに分割することとする。曲面形状を予測する方法としては、ユーザが形状を予測しやすいようにその方法の物理的意味が明確なものを用いる。そこで、与えられた境界線に薄膜を張ることを考え次式のラプラス方程式を解くことによって形状を予測する。

$$\partial^2 s / \partial x^2 + \partial^2 s / \partial y^2 + \partial^2 s / \partial z^2 = 0$$

ラプラス方程式を近似的に、三角形要素の各辺、を長さ0のばねとし、内部エネルギーを最小にする問題として解く。これは最小自乗法により連立1次方程式を立て解けばよい。この方法で求めたのが図9(c)である。

3.3 制御点の制御

測定点を近似するように3.2節で生成した初期平面パッチの各隅の制御点の位置とそこの法線方向を制御する。まず、各隅の制御点を射影ベクトル方向から眺め、それにオペレータが指定した値（図8(a)中のR、この値よりも近接する領域を影響範囲と呼ぶ。）よりも2次的に近接する測定点を算出する。それらの測定点を用いて6点以上の場合にはそれらを最良近似する2次曲面を、3点以上5点以下の場合には平面を最小自乗法により算出する。2点以下の場合には最も近接する3点を

Fig. 8 Surface generation

用いて平面を算出する。制御点を通り射影ベクトルを方向ベクトルとする直線と2次曲面、あるいは平面との交点をその制御点の位置、そこでの法線方向をその制御点での法線方向とする（図8（b））。

各Gregoryパッチの境界線は曲面が滑らかになるように、両端点の法線方向を満足し、かつ射影ベクトル方向から眺めて直線であるような3次曲線とする（図8（c））。周辺部のパッチの制御点は曲面の外周が境界線に一致するように、また法線方向が指定されていればそれを満足するようにパッチを変形する。この変形はパッチ境界の3次Bezier曲線が境界線上で法線に垂直になるように変形することによって実現される。

図8（d）はこの方法で作成した曲面のパッチ境界を表示したものである。以上述べたようにこの曲面生成法では射影ベクトル方向から眺めて多価関数となる曲面を生成することは出来ない。

三辺形パッチ曲面の場合には、既に曲面の形状を予測してあるので、制御点を射影ベクトル方向ではなく予測した曲面の法線方向に移動させる。ここでは、測定点を通過する曲面を生成させる。そこで、その制御点を通りそこでの法線方向を方向ベクトルとする直線に最も近接する測定点をその制御点の位置とする。そこでの法線方向は3.3節と同様の方法で求める。この手順で生成したのが図9（d）である。

3.4 管面上の操作による曲面の変形

本システムでは曲面変形操作として次の5つの方法を用意している。

- (1) 指定した頂点の位置、法線方向を変更する。
- (2) いずれか1つの断面線を取り出し、それを断面内で変形する。
- (3) ある特定のパッチを分割しそれらを測定点を近似するように変形する。
- (4) (3) で分割したパッチをマージする。
- (5) 指定した頂点での影響範囲を変えて近似する。

4. 曲面のオフセットとカッタパスの生成

曲面のオフセットは、曲面を構成しているすべてのパッチをオフセットすることによって生成される。

4.1 パッチのオフセット

オフセットする際、まず、オフセットの近似許容誤差とパッチの最大分割数を入力する。次に、着目しているパッチと同一形状のパッチ（以下オフセットパッチと呼ぶ。）を生成し、そのパッチを構成するすべてのエッジをオフセットする。エッジのオフセットは、パッチの最大分割数に合わせて、エッジ上の数点を法線方向にオフセットし、それらの点をパッチ間の接平面の連続性を保存するような条件を与えながら最小自乗法で近似し3次Bézier曲線として求め、それをオフセットパッチのエッジとする。

オフセットパッチを2.4節で述べた方法で内挿し、それと元のパッチとのオフセットの近似度の算出を行い、近似誤差が近似許容誤差以上であれば、オフセット・パッチを4分割した4つの子パッチを生成する。分割生成した子パッチに対しても、オフセット近似度の算出を行い、近似度が許容誤差範囲内になるか、最大分割数に達するまで、パッチの分割、エッジの再生成を繰り返す。

4.2 近似誤差の算出

オフセットパッチと元のパッチとの近似誤差を算出するため図10（a）のようにパッチ上に最大分割数に依存するチェックポイントを設定している。オフセットした曲面を図10（b）に示す。

4.3 NCカッタパスの生成

4.1, 4.2節で述べた方法によりオフセットした曲面に対してNCカッタパスを生成する。生成例を図10（c）、加工例を図10（d）に示す。

5. 結 言

Fig. 9 Three-sided patch generation

木型,あるいはクレイモデルの三面図および三次元測定データから自由曲面を生成し,それらをオフセットしてからNCカッタパスを生成するシステムを開発した.このシステムを開発することにより

- (1) ランダムな測定点から境界線に適合した曲面が生成可能となった.
- (2) 計算機内モデルを管面上で変形するだけでなく,実モデルの変形を測定し,それを計算機内モデルに反映させることによってデザイナーの意図する曲面を生成することができることを確認した.

現在,本システムは実際の製品設計に使用されておりその有効性が確認されている.

今後,予測した曲面形状や実モデル変形前の曲面からパッチ境界を自動的に測定し,実モデルから計算機内モデルへの流れをよりスムーズにしていける予定である.

謝 辞

本研究を進めるにあたって,貴重な示唆を与えて下さった東京大学工学部木村文彦教授に深く感謝し,システム開発に熱心に協力して下さいった川崎寿弘,田崎禎明両氏に謝意を表する.

参 考 文 献

- 1) S.A.Coons: Surfaces for Computer Aided Design of Space Forms, MIT Project MAC TR-41, June (1967).
- 2) P.E.Bézier: Numerical Control-Mathematics and Applications, John Wiley and Sons, London, (1972).
- 3) R.F.Riesenfeld: Applications of B-spline Approximation to Geometric Problems of Computer Aided Design, Ph.D thesis, Syracuse University, May (1973).
- 4) F.J.M.Schmitt & B.Barsky: An Adaptive Subdivision Method for Surface-Fitting from Sampled Data, Siggraph 86 Proc., (1986) 179.
- 5) J.A.Gregory: Smooth Interpolation without Twist Constraints, in Computer Aided Geometric Design, Academic Press, N.Y., (1974) 71.
- 6) 松島克守: やさしいCAD/CAM, 工業調査会 (1983).
- 7) H.Chiyokura, F.Kimura: Design of Solids with Free-Form Surfaces, Siggraph 83 Proc., (1983) 289.
- 8) 千代倉弘明: ソリッド・モデリング, 工業調査会 (1985).
- 9) 奥田敏, 福井幸男: 有限要素解析のための三角形自動要素分割, グラフィクスとCAD (1987.3).

(d) Sample Cutting
cutter path interval: 1mm
radius of ball end mill: 3mm

Fig. 10 (d) Offset and cutter path generation