

CAD 用 3 次元形状入力装置

二挺木睦子 池谷和俊 津田幸文

松下技研株式会社

画像情報研究所

デザイン工程の時間短縮を目的として、デザイン・モデル等の対象物の 3 次元形状を計測して CAD に入力する CAD 用 3 次元形状入力装置を開発した。高速な非接触式 3 次元計測装置で計測した点列データをデザイナーが指示した領域毎に 1 つの *B-Spline* 曲面に近似した後、IGES フォーマットに変換し CAD に入力する。曲面近似の際に、点列にエッジの位置を考慮したパラメータ値を与え、前回の近似結果を基に制御点を増加する方向と新しく挿入する節点の位置を自動的に決定して繰り返し近似を行い、繰り返しの終了条件を設定することで、制御点数とうねりができるだけ少ない *Non-Uniform B-Spline* 曲面で点列を再構成することができる。

A 3-D Scanner System for CAD

Mutsuko Nichogi, Kazutoshi Ikegaya and Yukifumi Tsuda

Matsushita Research Institute Tokyo, Inc.

Image Processing Research Laboratory

3-10-1 Higashimita, Tama-Ku, Kawasaki 214, Japan

Using a 3-D Scanner System for CAD in the modeling step has been proposed to get the shape of design models speedily and modify the shape in CAD system. For reduction of the data points, the selected measurement data points are approximated by the least-square fitting of single *B-Spline* surface repeatedly, translated to IGES file format and put into CAD system. Decreasing swelled surface, the data points are given parameters arranged at edges, and in repetitive fitting the direction and position of the new knot point are decided by the error of the before fitting.

1 まえがき

近年、3次元CADやコンピュータグラフィックスの普及が進んでいる。特に各種産業のデザイン分野では、工程の効率的な時間短縮を目的として3次元CADを導入している。具体的には、以下のような効果が期待できる。

1. 三面図やスケッチと比較して、立体でデザインを渡すため、デザイナーと設計者、加工者間で形状の伝達ミスが削減される。また、視点の変更が容易なため、デザイナーは複数のスケッチを描く必要がない。
2. 形状の変更、修正が容易である。例えば、内部機構との干渉による設計段階での変更や、異なる対象物を部分的に計測しCAD上で結合することができる。
3. 対象物にレンダリングを施しデザインの評価を行うことができる。
4. 図面がファイルなので管理が容易である。

一方、現在の3次元CADのモデリング操作は、かなりの訓練が必要である。そこで、粘土や木材で作ったデザイン・モデルの形状を3次元計測装置で計測しCADに入力する方法が提案されている。[1] 3次元計測装置とは、対象物表面の多数の点列の3次元座標値を測定する装置である。装置により計測された点の羅列を、以下点列データと呼ぶことにする。点列データをつないだ複数のパッチで面を構築し、面データをCAD用のフォーマットに変換してCADに入力する。筆者らは、このようなデザイン分野での用途に適応した高速、高精度な非接触式の3次元計測装置を以前に開発し、CAD用3次元形状入力装置として報告した。[2] しかし、このような点列データの処理は以下のような問題があるため3次元CADの導入効果が活きてこない。

1. 対象物の形状によってはデータが冗長で面数が膨大となり、CAD入力後の操作性が低下する。例えば、移動や視点変更時の再作図にかなりの時間がかかる。
2. 点列データに近傍画素を用いた平均値フィルターをかける等の平滑化処理を行うと、稜線が鈍る。

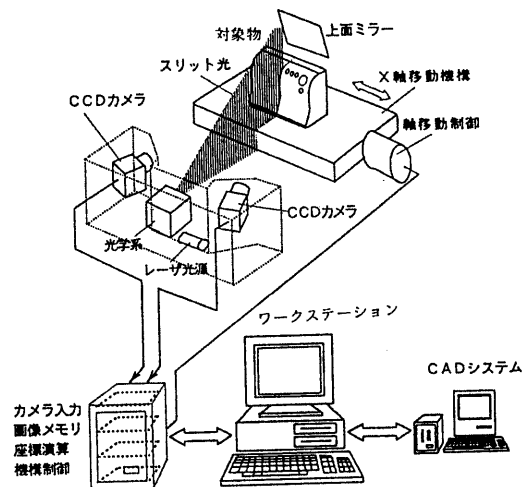


図 1: CAD 用形状入力装置のシステム構成

3. CAD 入力後の修正、変更が困難である。人間が1点ずつ不要な点を削減している例もある。

本報告では、上記のデータ処理に関する問題点の解決を図るため、デザイナーが指定した領域内の点列データを1つの *B-Spline* 曲面に近似することを提案する。近似手法は、まず等間隔に節点を設定した *B-Spline* 曲面にデータを最小自乗近似し、次に近似誤差が大きい位置に新たに節点を追加して再び *B-Spline* 曲面にデータを近似する。以下、同様に節点を増加し近似を繰り返すことで、制御点ができるだけ少ない曲面に近似する。また、曲面上のエッジを予め指定し、点列に与えるパラメータをエッジの位置に応じて設定することで、近似の結果発生するうねりを軽減する手法を提案する。本手法により対象物をもつ構造線を忠実に保存しつつ点列データを平滑化し、また膨大なデータ量を圧縮したCAD入力用のデータを作成することができる。

2 CAD 用3次元形状入力装置

2.1 システム構成

点列データを取得する計測装置はレーザー光を用いた光切断法に基づいている。本システムの構成を図1に示す。本システムは、レーザー光源と、振動ミラー、X軸移動機構、2台のカメラ、A/D変換器、画像メモリ、ワークステーション、そしてCADシステムで構成されている。基本動作を説明する。対象物をX軸移動機

表 1: 計測装置仕様

測定範囲	150x150x150mm
測定時間	約 60 秒
測定精度 (z 方向)	0.1mm
y 方向分解能	0.6mm
x 方向分解能	0.4mm

構上に置き、振動ミラーによってスリット状にしたレーザ光を対象物に照射する。その反射光を2台のカメラで撮像し誤差補正方式 [2] により算出した反射光の中心位置から、3角測量法を用いてスリット上の点列の3次元座標値を得る。従って、1スリット上の点のx座標値は等しい。この操作をX軸移動機構の移動に同期して繰り返すことで、対象物全体の点列データを取得する。データは180×256点の3次元座標値である。以下、点列データにおいて、対象物に向かって右からm番目、下からn番目の点を *slit m, size n* と呼ぶ。本システムの計測装置の仕様を表1に示す。計測装置の詳細については [2] を参照されたい。

計測されたデータはワークステーションで *B-Spline* 曲面に近似した後、IGES フォーマットに変換し CAD に入力する。

2.2 形状入力手順

形状入力の手順を図2を用いて説明する。X軸移動機構上に対象物を設置し、形状を計測する。取得した点列データのz座標値を輝度値に変換し2次元画像として計測形状をワークステーション上に表示する。デザイナーは表示された形状全体において1つの曲面として表現したい領域をマウスで指示する。次に、指示された領域内の点列データをワークステーション上で *B-Spline* 曲面に近似する。近似の結果得られた *B-Spline* 曲面のパラメータ値をIGES フォーマットの幾何要素128に変換し、CADに入力する。複数の曲面をつなぎ合わせる操作はCAD上で行う。粘土や木で作成したデザイン・モデルは丸め部分が正確ではない場合が多く、一定半径の丸めをつける操作は人間よりもCADが正確である。従って、デザイン・モデルの形状を入力する際に、デザイナーが丸めの位置で点列を分割し複数の曲面としてCADに入力し、CAD上で丸めをつける。その他の形状の変更、修正もCAD上で行う。しかし、CAD上での

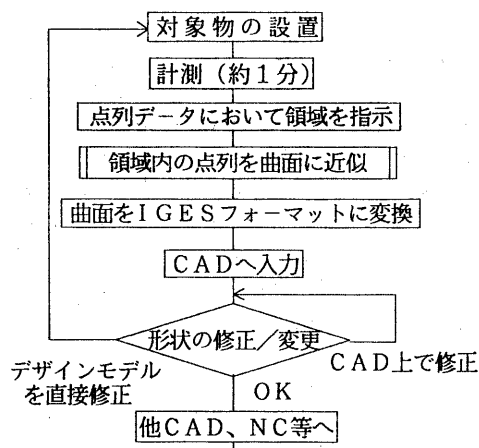


図 2: 形状入力装置の手順

修正が複雑な場合は再びデザイン・モデルを修正し計測する。

3 B-Spline 曲面近似

3.1 点列の曲面近似手法

3次元座標値の点列データのデータ量を削減する方法として、Schmittら [3]、西田ら [4]、鳥山ら [5] は点列データを、分割して *Bézier* 曲面に近似している。しかし、*Bézier* 曲面は各バッチ毎の接続を考慮する必要がある。西田らは0次の接続を行っている。

一方、*B-Spline* 曲面はバッチの接続を考慮する必要がある。また、現在のデザインCADは、形状表現力の高さから *Nurbs* でデータを保持しているものが多い。*Nurbs* は *B-Spline* を有理型に拡張したものである。岸本ら [6] は点列データを双3次 *B-Spline* 曲面に近似しているが、予め作成した人体モデルを用いるため対象物は人体に限られる。Sarkarら [7] は点列データをガウシャンオペレータにより領域分割し、各小領域毎を *B-Spline* 曲面に近似し、非線形最小2乗法でパラメータを最適化して領域境界の接続エラーを減少させている。曲面を分割することは、CAD入力後の修正、変更を困難にするため、接続を考慮する必要がない1つの *B-Spline* 曲面に近似することが望ましい。また、入力後に修正変更がかかる部位は、デザイナーの感性によって見極められるため、対象物を領域に分割することは、デザイナーの裁量に任せる必要

がある。

広範囲な領域を *B-Spline* 曲面に近似する際には、いくつかの制御点を用いるかが問題になる。多くの制御点を用いればより詳細に形状を再現しやすいが、できるだけ少ない制御点で形状を再構成することが望ましい。しかし、対象物の形状によっては、多くの制御点を用いても形状を再現できない場合もある。特に、節点を定義する2方向に対し斜めのエッジ付近にうねりが発生しやすく、制御点を増加してもうねりは消えにくい。

また、*Spline* 関数近似では節点の位置が非常に重要である。曲率の大きい箇所に節点を置くと *Uniform* な節点よりも良い近似結果が得られる。吉本 [8] は1次元データを *Spline* 曲線に近似する際に、まず区分的3次関数にデータを近似して求めた2次微分値を折れ線近似する。そして、隣合う折れ線の交点の位置に節点を置き、最小自乗法で制御点の位置を算出する。このとき、*Uniform* な節点よりも少ない制御点数で、曲線形状を再構成できることを示している。しかし、曲面の場合、曲率の大きい箇所は2次元に混在するため同様な方法で適切な節点の位置を予め決定することは不可能である。一方、点列データの圧縮率はできるだけ高いことが望ましいが、形状から表現可能な制御点数を予測することは不可能である。また、曲面を繰り返し近似する場合、節点を定義する2方向のどちらに制御点を増加すればより効率的な近似結果が得られるかを形状から推測することは難しい。

そこで、本報告では、点列を1つの *NonUniform B-Spline* 曲面に近似する。その際、前回の近似結果を基に制御点の増加する方向と節点の位置を自動的に決定して繰り返し近似することにより、制御点数とうねりができるだけ少ない近似を行う。

3.2 本手法の概要

B-Spline 曲面は、パラメータを u, w として式1により表現される。

$$P(u, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m Q_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(w) \quad (1)$$

$Q_{i,j}$ は制御点、 p, q は次数、 $N_{i,p}(u)$ 、 $N_{j,q}(w)$

は正規化 *B-spline* 基底関数 である。

実験では u, w の両端点で節点を階数回重ねた双3次の *Non-Uniform B-Spline* 曲面に点列を近似する。 u, w 方向は、 X, Y 軸と同方向に設定する。

近似手法の概要を説明する。まず、対象物のエッジを指示し (3.3)、次にエッジの位置に応じて点列データの各点に u, w パラメータ値を設定する (3.4)。そして、節点を等間隔に設定して、点数に見合った適当な制御点数で点列データを *B-Spline* 曲面に最小自乗近似する。近似の結果、誤差の大きい位置に新たな節点を設定し、再びデータの近似を行う。以下、同様の演算を繰り返すことで、より少数の制御点の曲面に点列データを効率良く近似する (3.5)。

3.3 エッジの指示

3.4で使用するエッジを指示する。指示するエッジは、エッジ幅が1の連続した線でなければならない。そこで、デザイナーが指示した領域内の点列の z 座標値を濃淡値に変換した2次元画像で領域をワークステーション上に表示し、エッジをマウスで指示する。特に u, w に対し斜めのエッジを指示する。次に、指示したエッジを以下の規則の基に分割する。

- 1本のエッジの構成点が1つの *slit* につき1点でない場合 (但し、エッジの構成点が連続して1つの *slit* 中に並ぶ場合を除く)
[処理] 1本のエッジの構成点が1つの *slit* につき1点となるように複数のエッジに分割し、以下2.に従う。
- 1本のエッジの構成点が1つの *slit* につき1点である場合、次の2通りに分けられる。(ただし、エッジの構成点が連続して1つの *slit* 中に並ぶ場合を除く)
 - エッジの両端点が、第1の *slit* と最終 *slit* に載っている場合
[処理] エッジを構成する全ての点を *slit, size* 単位で計算機内に持つ。
 - エッジの両端点が、第1の *slit* と最終 *slit* に載っていない場合
[処理] エッジの両端点からエッジを *slit* 方向に平行に延長したものを新たにエッジと定め、エッジを構成する全て

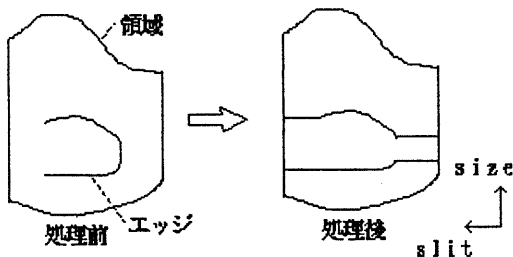


図 3: エッジの例

の点を *slit*、*size* 単位で計算機内に持つ。

以上の処理により作成されるエッジの例を図 3 に示す。設定された複数のエッジは、エッジを構成する点の *size* の値が小さい順に並べておく。

3.4 パラメータ設定

3.3 で抽出したエッジの位置に応じて点列データの各点にパラメータ *u*、*w* の値を 0～1 の範囲で設定する。

各 *slit* のパラメータ *u* の値をまず設定する。X 軸移動機構に対象物を設置した場合、1 つの *slit* 上の点列のパラメータ *u* の値は等しい。移動機構は一定ピッチで移動するため、第 1 の *slit* に 0、最終の *slit* に 1 を与え、各 *slit* の *u* の値は、0 から 1 を均等に分割した値を設定する。

次にパラメータ *w* の値を求める。パラメータ *w* は、1 つの連続したエッジ上の点が等しい値を持つように設定する。詳細な方法を説明する。まず、第 1 の *slit* と最終 *slit* の中央にある *slit* を中央 *slit* と呼び、中央 *slit* の点列に対しパラメータ *w* の値を *y* 座標値に応じて線形に付与する。

次に、中央 *slit* 以外の *slit* のパラメータ *w* の値を決定する。3.3 で作成した複数のエッジを用いる。エッジは、エッジを構成する点の *size* の値が小さい順に並べられている。まず中央 *slit* 上で 1 本目のエッジの構成点にあたる点のパラメータ *w* の値 w_{mid} を抽出する。そして、他の *slit* で 1 本目のエッジの構成点にあたる点のパラメータ *w* の値を全て w_{mid} に設定する。この操作を全てのエッジで行うことにより、エッジ上の点のパラメータ *w* の値が決定する。

次に各 *slit* のエッジ以外の点のパラメータ *w* の値を求める。 *slit* *m*, *size* *n* の点のパラメータ *w*

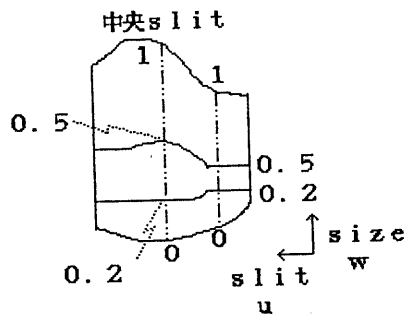


図 4: パラメータ設定の説明図

の値 w_{mn} は、式 2 により得られる。

$$w_{mn} = \frac{\text{data}[m][n][1] - y_2}{y_1 - y_2} (w_1 - w_2) + w_2 \quad (2)$$

data は点列データの 3 次元座標値が格納されている配列であり、*data*[*slit* の数][各 *slit* 内のデータの数][3] で定義されている。 w_1, w_2 は *slit* 上で点に最も近い 2 つのエッジの構成点の *w* の値、 y_1, y_2 はそれらの *y* 座標値である。以上の操作を説明する図を図 4 に示す。

3.5 B-Spline 曲面近似

まず、3.4 で設定したパラメータを持つ点列データを、点数に見合った適当な制御点数で B-Spline 曲面に第 1 回目の最小自乗近似を行う。節点は *Uniform* に予め設定する。2 回目以降の近似では、前回の近似の結果と点列データの誤差から新たな節点の位置を決定し、再び点列データの最小自乗近似を行って制御点位置を算出する。

新たな節点位置の決定方法について説明する。最も点数が少ない *slit* を求め、*size* 最小 *slit* と呼ぶ。また、*size* 最小 *slit* のパラメータ *w* の値を *w* 方向の基準パラメータと呼び、*w* 方向の基準パラメータとパラメータ *u* によって作られる格子を基準格子パラメータと呼ぶことにする。そして、基準格子パラメータにおける近似曲面上の点の 3 次元座標値を求める。次に、基準格子パラメータにおける仮の点列データの 3 次元座標値を求める。基準格子パラメータ u_1, w_1 における仮の点列データの 3 次元座標値は以下のように算出する。 $\text{para}_w[m][n]$ を *slit* 番号が *m*、*size* 番号が *n* の点列データのパラメータ *w* の値とする。まず、パラメータ u_1 の値によって *slit* の番号 *i* が決まる。次に、 $\text{para}_w[i][j-1] \leq w_1 < \text{para}_w[i][j]$ となるような *size* 番号 *j* を求め、式 3、式 4、式 5 により基準格子パラメータ u_1, w_1 における仮の計測データ点の *y* 座標値 *y*、*z* 座標値 *z* を算出する。

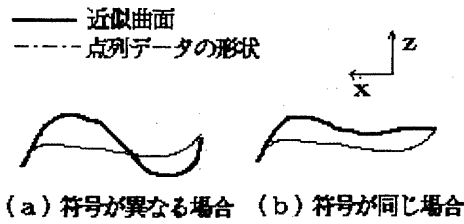


図 5: 符号による近似結果の違い

$$c = \frac{w - \text{para}_w[i][j] - 1}{\text{para}_w[i][j] - \text{para}_w[i][j-1]} \quad (3)$$

$$y = c(\text{data}[i][j][1] - \text{data}[i][j-1][1]) + \text{data}[i][j-1][1] \quad (4)$$

$$z = c(\text{data}[i][j][2] - \text{data}[i][j-1][2]) + \text{data}[i][j-1][2] \quad (5)$$

次に、基準格子パラメータにおける近似曲面上の z 座標値から仮の点列データの z 座標値を引き、その正負を符号とした残差の自乗値を求める。このように符号付きで残差自乗値を求める理由は、残差自乗値が等しくても符号が異なれば点列データに対し凹凸ができるため視覚的に大きな違いがあり、逆に符号が同じであれば比較の違いが少ないからである。説明図を図 5 に示す。

以上の手法で算出した基準格子パラメータの各点における符号付き残差自乗値を用いて次のように新しい節点を設定する方向及び位置を決定する。まず、パラメータ u の値が等しい点列の符号付き残差自乗値の分散、及びパラメータ v の値が等しい点列の符号付き残差自乗値の分散をそれぞれ求める。それぞれの分散を配列 var_u [基準格子パラメータの u 方向の格子数]、配列 var_w [基準格子パラメータの w 方向の格子数] に格納する。

そして、 var_u 、 var_w の平均をそれぞれ求め、大小を比較する。 var_u の平均が大きければ、 w 方向に新しい節点を追加し、 var_w の平均が大きければ、 u 方向に新しい節点を追加する。次に節点を追加する位置について説明する。説明のため、以下、 var_u の平均の方が大きいと仮定する。まず、配列 var_u [] の要素の最大値を求

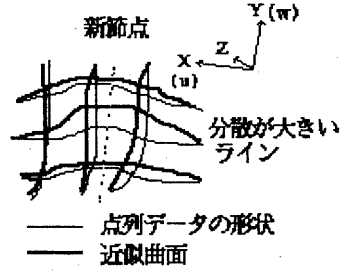


図 6: 節点挿入位置の決定

めることにより、最も近似度の低い *slit* の番号が得られる。次に、得られた *slit* 上で、節点が成す区間毎に点列の残差の自乗和を算出する。これらの残差の自乗和の最大値を求め、その節点間の中心に新しい節点を追加する。以上の操作を説明する図を図 6 に示す。

以上の操作により得られた新しい節点を追加した *Non-Uniform* な節点で、再び点列データを *B-Spline* 曲面に近似する。本節の操作を繰り返すことにより、より少ない制御点数で点列データを *B-Spline* 曲面に効率良く近似することができる。

3.6 近似の評価

本手法は曲面近似を繰り返して、比較的小さい制御点数で計測形状を近似するため、繰り返しの終結条件を設定する必要がある。それを近似の評価と呼ぶ。評価基準には 2 つある。基準 1 では、近似曲面上の少なくとも 1 点で、 x 、 y の少なくとも一方の残差自乗値が予め決められたしきい値 $\text{error}_x, \text{error}_y$ を越える場合は近似が不良であると判断して、再び近似を行う。しきい値 $\text{error}_x, \text{error}_y$ を越えない場合は、次に基準 2 として、 z 座標値の残差の自乗平均を算出し、あらかじめ決められたしきい値よりも小さい場合は繰り返し近似を終了する。しきい値よりも大きい場合でも、今回の近似結果の残差自乗平均値が前回の近似結果よりも小さい場合は再び近似を行い、大きい場合は前回の近似が最良と判断して繰り返し近似を終了する。以上のように近似の評価基準を基準 1 と基準 2 に分けた理由は、基準 1 の x 、 y 方向の残差が大きい場合は、 z 方向の残差が大きい場合よりも視覚的に誤差が大きく感じるからである。

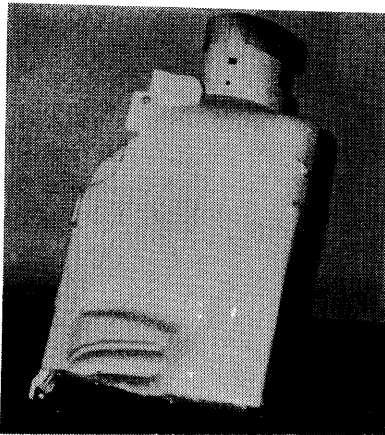


図 7: ムービーのデザイン・モデル

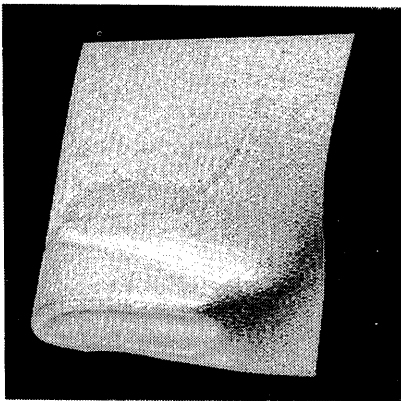


図 8: 点列データからパッチで構成した面

3.7 実験結果

図 7 に示すビデオムービーのデザイン・モデルを計測し、切り出した領域内の点列からパッチで面を作成し CG で表示したものを図 8 に示す。指示したエッジを図 9 に、*B-Spline* 曲面に近似した結果を図 11 に示す。なお、グラフィックスソフトにはヒューレットパッカード社のワークステーション上で *Starbase* を使用している。

デザイン・モデルの点列データ数は 19800 点である。繰り返し近似の制御点の初期値は *slit* 方向を 20、*size* 方向を 12 とした。このとき、制御点数が *slit* 方向 32、*size* 方向 15 のとき残差自乗平均が 0.033743 となり、下方にややうねりは残っているが対象物の形状をほぼ復元した結果が得られた。従来手法を用いて同数の制御点で *Uniform B-Spline* 曲面にデザイン・モデルを近似した結果を図 10 に示す。

また、ビデオムービーの一部を切り出し、そ

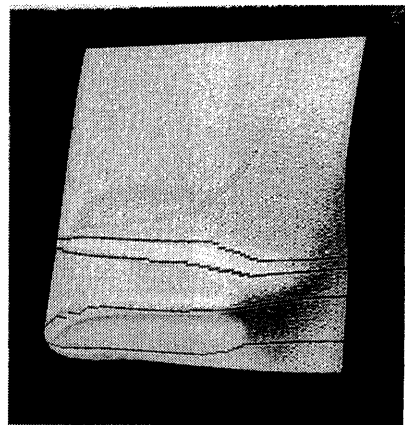


図 9: 対象物にエッジを指示した図

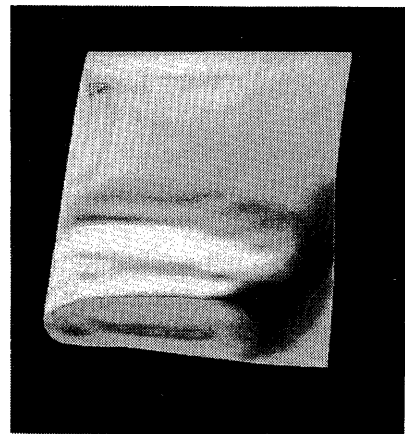


図 10: 従来手法による近似結果

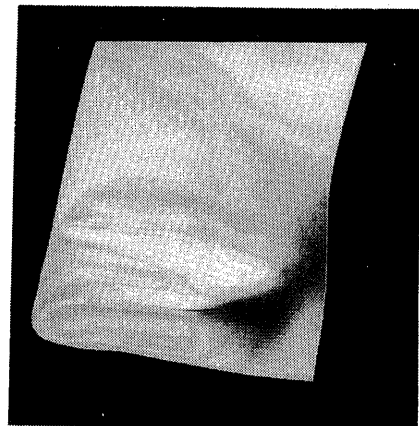


図 11: 本手法による近似結果

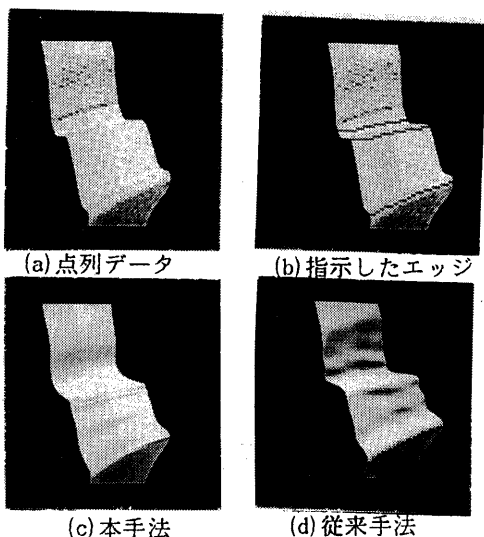


図 12: 小領域の曲面近似結果の比較

の点列データ 1800 点を、従来手法で近似した結果と本手法で近似した結果を図 12 に示す。全制御点数は共に 20 個である。従来手法では明らかに面のうねりが見られる。

4 まとめ

CAD 用の 3 次元形状入力装置として、対象物の形状を 3 次元計測装置で計測して得られた点列データをデザイナーが指示した領域毎に 1 つの *B-Spline* 曲面に近似し、IGES フォーマットに変換して CAD に入力する方法を提案した。特に、点列データを曲面近似する際には、斜めのエッジ付近にうねりが発生する。そこで、制御点数とうねりができるだけ少ない *Non-Uniform B-Spline* 曲面に近似するために、点列にエッジの位置を考慮したパラメータ値を与え、前回の近似結果を基に制御点を増加する方向と新しく挿入する節点の位置を自動的に決定して繰り返し近似を行い、繰り返しの終了条件を確立した。

しかし、本手法の問題点として、

1. 近似の結果発生するうねりは本手法で大幅に軽減されたが、小さなうねりが残ることがある。
2. 3 次元形状への指示を 2 次元画像に置き換えマウスで行っているため、指示精度が落ちる。
3. 制御点数の初期値の設定が近似結果に影響

を与える。

4. 計算時間がかかる。

が挙げられる。1. に示した不良近似が起きた場合、現状では、点列データからパッチを用いて面を作成し CAD に入力する従来手法をとらざるを得ない。2. については、エッジはできるだけ正確に指示されることが望ましいため、より正確なエッジを抽出する画像処理手法あるいは計算機インタフェースが必要である。これらは、実用化に向けた課題である。また、*B-Spline* を有理型に拡張した *Nurbs* は表現能力が大きい、点列データを *Nurbs* 曲面に近似する手法は未だない。*Nurbs* は更に少ない制御点数で近似できる可能性があるため今後検討していきたい。

参考文献

- [1] 田中: "簡易型 3 次元形状入力装置", 日経 CG, (Sep. 1988)
- [2] 五味 他: "CAD 用三次元形状入力装置", PRU91-87, (Nov. 1991)
- [3] Francis J.M. Schmitt: "An Adaptive Subdivision Method for Surface-Fitting from Sampled Data", *SIGGRAPH'86*, vol.20, No.4, (Aug. 1986)
- [4] 西田 他: "分割手法を用いた *Bézier* 曲面による 3 次元物体再構成", テレビジョン学会誌, vol.45, No.10, pp.1249 1255, (1991)
- [5] 鳥山 他: "3 次元形状表現のための曲面パッチに関する一検討", 1991 年電子情報通信学会秋季大会, D-205
- [6] 岸本 他: "衣服 CAD のための人体 3 次元形状モデル", 第 22 回画像工学コンファレンス, 9-11, (1991)
- [7] B Sarkar: "Smooth-Surface approximation and reverse engineering", *Computer-Aided Design*, vol.23, No.9, (Nov. 1991)
- [8] 吉本、市田: "スプライン関数とその応用", シリーズ新しい応用の数学 20, 教育出版, (1979)
- [9] L.Piegel: "Modifying the shape of rational B-Splines Part2:surfaces", *Computer-Aided Design*, vol.21, No.9, (1989)