3次元点群データからの自由曲面生成

旭川高専　○九里隆志，齋藤剛志，後藤孝行
大阪大学　　高谷裕浩，高橋　哲，三好隆志　東京農工大　浅井　亨

要　旨

意匠製品の設計では，デザイナが制作した実体モデルをベースとする方法，いわゆるリバースエンジニアリングが行われている．本報は，実体モデルの形状を計測して獲得した離散的な3次元点群データに基づいて高品位な自由曲面を生成するための，曲率を考慮したB-spline閉自由曲面あてはめ手法を提案し，計算機シミュレーションによって本手法の有効性を確認したことを報告する．

1.　緒論

現在，家電製品の外筐や自動車のボディなどの工業製品は，その製品の付加価値を高めるため，意匠性の高い形状（意匠形状）をしたものが多くなっている．意匠形状の設計（意匠設計）は，「なめらかさ」や「見た目の美しさ」を容易に表現・検証できるように粘土や木により実体モデルを制作して行われている．実体モデルを用いた意匠設計は，3次元形状計測装置でモデルの形状を測定し，得られた3次元の形状データ（点群データ）に基づいて計算機モデル（CADモデル）を生成している．このとき，獲得した点群データは離散的であることから，これらを数式化するために点群データに曲面のあてはめを行っている．しかし，実体モデルの形状の特徴を損なわずに高品位なCADモデルを生成する手法は未だ確立していないのが現状である．

本研究では離散的な3次元点群データへ曲率を考慮したB-spline曲面をあてはめる手法を提案する．そして，本手法の有効性を計算機シミュレーションにより確認したことを報告する．

2.　B-spline曲面変換と逆変換

2.1　B-spline曲面変換

B-spline曲面変換とは，制御点からB-spline曲面を生成することである．そこで，uおよびvを曲面のパラメータとするB-spline曲面式を以下に示す．

2.1.1　B-spline開曲面変換

u方向の制御点数を$(n+1)$，階数をk，v方向の制御点数を$(m+1)$，階数をl，制御点を$\mathbf{V}_{ij}$（$i=0,1,\cdots,n$；$j=0,1,\cdots,m$）とすると，B-spline曲面$\mathbf{S}(u,v)$は次式で与えられる．

$$\mathbf{S}(u,v)=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,k}(u)M_{j,l}(v)\mathbf{V}_{ij} \tag{1}$$

ここで，$N_{i,k}(u)$，$M_{j,l}(v)$はそれぞれuおよびv方向のB-spline基底関数である．

2.1.2　B-spline閉曲面変換

一般に閉曲面は，(1) u方向のみが閉じている場合，(2) v方向のみが閉じている場合，(3) uおよびv方向ともに閉じている場合の3つのパターンが考えられる．そこで，それぞれの場合についてのB-spline曲面式は以下のようになる．

(1)　u方向のみが閉じている場合

$$\mathbf{S}(u,v)=\sum_{i=0}^{n+k-1}\sum_{j=0}^{m}N_{i,k}(u)M_{j,l}(v)\mathbf{V}_{i\,\mathrm{mod}(n+1)\,j} \tag{2}$$

(2) v方向のみが閉じている場合

$$\mathbf{S}(u,v)=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m+l-1}N_{i,k}(u)M_{j,l}(v)\mathbf{V}_{i\,j\,\mathrm{mod}(m+1)} \tag{3}$$

(3) uおよびv方向ともに閉じている場合

$$\mathbf{S}(u,v)=\sum_{i=0}^{n+k-1}\sum_{j=0}^{m+l-1}N_{i,k}(u)M_{j,l}(v)\mathbf{V}_{i\,\mathrm{mod}(n+1)\,j\,\mathrm{mod}(m+1)} \tag{4}$$

なお，A mod BはAをBで除算したときの余りを示す．

2.2　B-spline曲面逆変換

実体モデルの形状を計測し，獲得した点群データへB-spline曲面をあてはめるとき，点群データとB-spline基底関数から制御点を算出する．この処理をB-spline曲面逆変換と呼ぶ．

制御点マトリックスを[**V**]，基底関数マトリックスを[**NM**]，B-spline曲面マトリックスを[**S**]とすると式(1)～式(4)は次式のように表せる．

$$[\mathbf{S}]=[\mathbf{NM}][\mathbf{V}] \tag{5}$$

したがって，点群データマトリックスを[**P**]とすると，点群データへあてはめるB-spline曲面の制御点マトリックス[**V**]は次式で求められる[1]．

$$[\mathbf{V}]=\left([\mathbf{NM}]^{T}[\mathbf{NM}]\right)^{-1}[\mathbf{NM}]^{T}[\mathbf{P}] \tag{6}$$

3.　点群データへのB-spline曲面あてはめ

3.1　パラメータ算出法

点群データを$\mathbf{P}_{ij}$（$i=0,1,\cdots,s$；$j=0,1,\cdots,r$）とするとき，各点群データに対応するuおよびv方向のパラメータu_{ij}およびv_{ij}は，それぞれ連続する点群データの弦長を用いて求める．また，各方向のパラメータ値の範囲は，$0.0\leqq u_{ij}\leqq 1.0$，$0.0\leqq v_{ij}\leqq 1.0$とする．

3.2　ノットベクトル決定法

点群データへB-spline曲面を良好にあてはめるには，形状の変化にあわせてノットを配置することが望ましいことがB-spline閉曲線あてはめ処理において検証されている[2]．そこで，これを閉曲面あてはめに拡張する．

一般に形状計測で獲得された点群データは格子状に並んでいる．そこで，u方向を例にとりノットベクトルを以下の方法で求める．なお，v方向についても同方法で求める．

(1) v方向の点群データの数だけ切断面を考える．

(2) 各切断面において点群データへ曲線論[3]を適用して各点群データにおける曲率を求める．

(3) 各切断面において曲率図（曲率とパラメータの関係図）を求める．
(4) u 方向の各パラメータにおいて最大の曲率を全切断面の曲率図から抽出する．
(5) (4)で抽出した曲率とパラメータの関係図（曲率図）を求める．
(6) (5)の曲率図に等曲率面積分割法 [4]を適用してノットを配置し，ノットベクトルを決定する．

本決定法により，形状の変化が大きい場所にノットを密に配置したノンユニフォーム型のノットベクトルが決定できる．

3.3 あてはめ誤差算出法

点群データ $\mathbf{P}_{ij}$ $(i=0,1,\cdots,s\,;\,j=0,1,\cdots,r)$ とそれに対応するパラメータ値 u_{ij} および v_{ij} における曲面上の点 $\mathbf{S}(u_{ij},v_{ij})$との距離をあてはめ誤差とする．すなわち，$\mathbf{P}_{ij}$におけるあてはめ誤差 e_{ij} $(i=0,1,\cdots,s\,;\,j=0,1,\cdots,r)$ は次式で求められる．

$$e_{ij}=\left\| \mathbf{P}_{ij}-\mathbf{S}(u_{ij},v_{ij}) \right\| \tag{7}$$

4. 結果および考察

図1は計算機シミュレーションに用いた点群データである．点群データは全高 50mm，全幅 48mm の意匠形状物を高さ方向に 0.5mm 間隔で高密度形状計測して得られたものと仮定している．したがって，点群データの総数は 101×101＝10201 点である．

図 2 は制御点数とあてはめ誤差標準偏差との関係である．□印は本研究で提案したノットベクトル決定法で求めたノンユニフォームノットベクトルを用いた場合であり，■印はユニフォームノットベクトルを用いた場合である．本手法を用いた場合の方があてはめ誤差を小さくできていることがわかる．

図3は点群データへあてはめたB-spline閉曲面と制御点(20×20)の位置である．(a)は本研究で提案した決定法で求めたノットベクトルを用いた場合である．形状変化が大きい場所に制御点が密に配置されていることがわかる．このときのあてはめ誤差標準偏差は 0.43mm であった．(b)はユニフォームノットベクトルを用いた場合である．このときのあてはめ誤差標準偏差は 0.77mm であり，本手法を用いることで，あてはめ誤差標準偏差を約 55.8%に減少することができた．

5. 結論

本研究において，閉じた形状を表す点群データへ曲率を考慮して B-spline 閉曲面を良好にあてはめるノットベクトル決定法を提案し，計算機シミュレーションにより本手法の有効性を確認した．

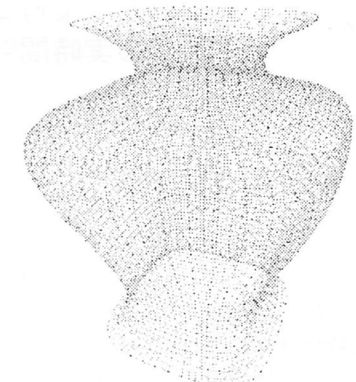


図 1 計算機シミュレーションに用いた点群データ

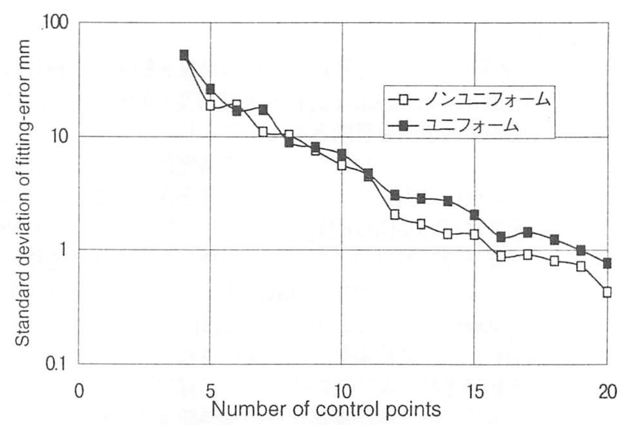
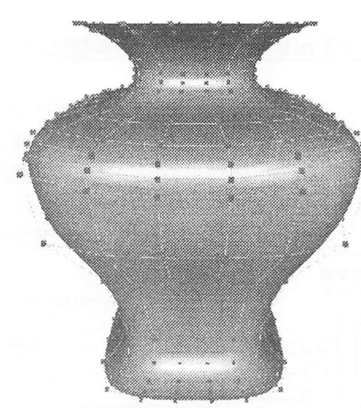
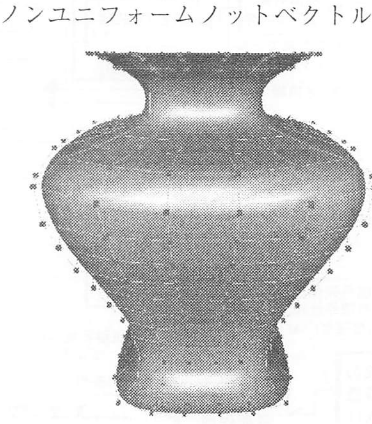


図 2 制御点数とあてはめ誤差標準偏差の関係



(a) ノンユニフォームノットベクトルの場合



(b) ユニフォームノットベクトルの場合

図 3 あてはめた B-spline 曲面と制御点位置

参考文献

1) David F.Rogers and J.Alan Adarns：Mathematical Elements for Computer Graphics (Second Edition), Mac Graw Hill (1990).
2) 亀水拓哉：B-spline 閉曲線形状処理の研究，平成 10 年度卒業研究論文（1999）.
3) 山口富士夫：形状処理工学［Ｉ］, 日刊工業新聞社 (1982).
4) 後藤孝行，他 3 名：曲率を考慮した B-ｽﾌﾟﾗｲﾝ曲線の点群データへのあてはめ，精密工学会誌，60，7 (1994) 964.