

自由曲面の展開精度向上について†

島田 哲夫^{††} 多田 幸生^{†††}

設計・製造工程を自動化・省力化するためには、固有のノウハウをいかに手法化するかということが、重要な問題である。特に対象が自由曲面である場合、設計等に際して原型を得るため曲面を精度良く平面展開する必要がある。筆者らは自由曲面上の領域を平面に展開するため有限要素法を導入し、平面応力問題として解く手法について検討をおこない、自由曲面の設計やロボットシミュレータ等の三次元グラフィックス入力システムに適用し、手法の有用性を示した。この手法の利点は、曲面形状の決定問題に対して、有限要素の集合体として離散化できることにある。本報告では、さらに精度良く平面に展開するための手法を提案する。すなわち、曲面を四角形メッシュに分割し、各メッシュ単位の接ベクトルを算出し、接ベクトルの差に比例する値でメッシュを細分化することにより、精度良く平面に展開することを考える。次に平面展開時に生じる歪を曲面を切り開くことで、事前に小さくすることにより平面展開の精度をあげる手法について考察する。すなわち、中心軸にそった側面上で中心軸方向の接ベクトルを算出し、その値によって曲面を分断する手法である。また曲面の微分値が不連続である曲線が存在する場合は、その曲線にそって曲面分断し、各々をそれぞれ平面展開することにより、全体として精度の良い展開結果が得られることを明らかにする。

1. ま え が き

自由曲面を主な設計対象にしている分野において、原型を設定するために立体形状の正確な平面展開ができるということが重要な問題となっている。

曲面を平面に展開する問題は古くは正確な地図をいかに作るかという目的から端を発している。地図の理想は、任意の二点を結んだ直線距離に倍率をかければ対応する地点間の実測値に等しくなるということである。これを等距離図法というが、一般に球体などのようにガウス曲率¹⁾が零以外の曲面を平面に展開することはできないので、この図法を実現することは不可能である。そこで面積や基準点からの方位・距離および投影する軸など数々の要素を目的に応じて吟味することで、多くの地図投影法²⁾が考案されている。このように幾何学的形状である球体の平面展開問題は地図作成という実用的な課題において、従来よりいろいろと工夫がなされている。しかし自由曲面の場合、対象の曲面形状が多岐にわたるため従来の手法の踏襲では一律に平面展開することは難しい。

筆者らは、自由曲面上の閉領域を平面に展開するため有限要素法を導入し、平面応力問題として解く方法について検討をおこない、自由曲面の設計³⁾やロボッ

トシミュレータ等に用いる三次元グラフィックスの入力システム⁴⁾に応用し、手法の有用性を示した。この方法の利点は、幾何的な形状の決定問題に対して、構造力学に基づく方法を用いることにより、複雑な曲面を有限要素の集合体として離散的にとらえ、しかも形状決定の評価基準として、歪エネルギーによる定量的な把握が可能となることにある。

本研究では、さらに精度良く平面に展開するための近似的な展開手法について考察する。以下、曲面の微分値が不連続である曲線を不連続曲線と呼ぶことにする。最初に(1)接ベクトルの差に比例したメッシュ細分割法について述べる。一般に平面展開を必要とする自由曲面は非可展面であり、ガウス曲率は零ではない。そこで曲面をメッシュ分割し、有限要素の集合とするとときに、曲面を構成する二方向の接ベクトルの差に比例する分割をおこなうことで、“曲面のまがりぐあい”が比較的等しい要素を得ることを考える。すなわち、四角形メッシュごとに、接ベクトルの差を算出し、その値に比例した分割数で曲面の細分割をおこなうことにより高精度の平面展開を得る手法について提案する。次に、(2)平面展開時に生じる歪を曲面を切り開いて事前に取り除くことにより、平面展開の精度をあげる手法について述べる。この方法として、(a)接ベクトルによる方法と(b)不連続曲線による方法を考察する。

2. 曲面のパラメータ表現と接ベクトル

デザイン検討の過程において対象が立体である製品

† Improvement of Accuracy on Development of Curved Surface by TETSUO SHIMADA (Department of Machinery and Electronics, Industrial Institute of Hyogo Prefecture) and YUKIO TADA (Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University).

†† 兵庫県立工業試験場機械電子部

††† 神戸大学工学部システム工学科

の場合、スケッチや図面など平面上の表示による検討には限界がある。そこで自由曲面を設計対象にしている CAD/CAM システムにおいては、まず基本計画に基づいたモデルを作製し、立体的な角度から製品検討をおこなう。その後、モデルを三次元測定機によって計測し以降の曲面形状処理の素データとする。

上記のサンプリングしたデータからモデルの曲面を数式で表現するため、パラメータ u, v を用いてサンプリングデータ $P=P(x, y, z)$ をつぎのように表す。

$x=f(u, v), y=g(u, v), z=h(u, v), 0 \leq u, v \leq 1$
サンプリングデータの位置, $P(i, j)$, u 方向の傾き $P_u(i, j)$, v 方向の傾き $P_v(i, j)$, ($i, j=0, 1$) を生成することでパッチどうしのつながりをなめらかにする。これらの情報より曲面 $K(u, v)$ は次のような式であらわされる⁵⁾。

$$K(u, v) = (b_0(u)b_1(v)\underline{b_0(u)}\underline{b_1(v)}) \cdot A \cdot \begin{pmatrix} b_0(v) \\ b_1(v) \\ \underline{b_0(v)} \\ \underline{b_1(v)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} b_0(t) &= 2t^3 - 3t^2 + 1 \\ b_1(t) &= b_0(1-t) \\ \underline{b_0(t)} &= t(1-t)^2 \\ \underline{b_1(t)} &= -b_0(1-t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$A = \begin{pmatrix} P(0, 0), & P(0, 1), & P_u(0, 0), & P_u(0, 1) \\ P(1, 0), & P(1, 1), & P_u(1, 0), & P_u(1, 1) \\ P_v(0, 0), & P_v(0, 1), & 0, & 0 \\ P_v(1, 0), & P_v(1, 1), & 0, & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

さらに、曲面 $P(u, v)$ 上の曲線をパラメータ s で表すと

$$u=u(s), v=v(s) \quad (4)$$

となる。この曲線の経路 s についての接ベクトルは

$$\frac{dP}{ds} = \left[\frac{du}{ds}, \frac{dv}{ds} \right] \begin{pmatrix} P_u \\ P_v \end{pmatrix} \quad (5)$$

接ベクトルの大きさの自乗は

$$\left| \frac{dP}{ds} \right|^2 = \left[\frac{du}{ds}, \frac{dv}{ds} \right] \begin{pmatrix} P_u \\ P_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_u & P_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{du}{ds} \\ \frac{dv}{ds} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$= \left[\frac{du}{ds}, \frac{dv}{ds} \right] \begin{pmatrix} P_u^2 & P_u P_v \\ P_u P_v & P_v^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{du}{ds} \\ \frac{dv}{ds} \end{pmatrix} \quad (7)$$

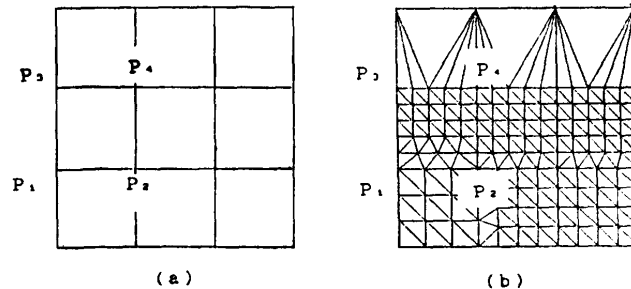


図1 メッシュ細分割の方法
Fig. 1 Redivision of mesh.

である。

曲面 P 上の曲線の経路 s を u 方向 (または v 方向) に一致させると、この曲線の接ベクトルは

$$\left(\frac{dP}{du} \right) = \left(\frac{dx}{du} \right) e_1 + \left(\frac{dy}{du} \right) e_2 + \left(\frac{dz}{du} \right) e_3 \quad (8)$$

となり、その接ベクトルの大きさは

$$\left| \frac{dP}{du} \right| = \sqrt{\left| \frac{dx}{du} \right|^2 + \left| \frac{dy}{du} \right|^2 + \left| \frac{dz}{du} \right|^2} \quad (9)$$

となる。そこで自由曲面の u 方向、および v 方向の接ベクトルをそれぞれの曲面パッチについて算出し、曲面の“まがりぐあい”を計算することができる。

3. メッシュ細分割による平面展開

3.1 メッシュ細分割の方法

自由曲面の形状データをもとに双三次元曲面パッチを張ることで曲面形状を数式として表現する。次に曲面を四角形メッシュに分割し、そのメッシュに対応して平面を分割した形状を初期 (試行) 平面形状とする。自由曲面はガウス曲率は零でなく、厳密な意味において平面に誤差なく展開することはできないため、近似的手法を用いる必要があるが、その精度に影響を与える要素のひとつにメッシュの分割方法がある。そこで、曲面を構成する u, v 二方向の接ベクトルの差に比例するメッシュ分割をおこなうことで“曲面のまがりぐあい”が比較的等しいメッシュ要素を得ることを考える。すなわち、個々の四角形メッシュについて上述の式に従い、各接ベクトルの差を算出し、その値に比例した割合で、それぞれの四角形を三角形メッシュに分割する。四角形メッシュを細分割した例を図1に示す。図1(a)において曲面パッチに相当する四角形メッシュ $\overline{P_1P_2P_4P_3}$ について点 P_1 と点 P_2 (および点 P_3 と点 P_4) の u 方向の接ベクトルの差を計算し、その値に比例する分割比で辺 $\overline{P_1P_2}$ (および $\overline{P_3P_4}$)

を細分割する。また点 P_1 と点 P_3 (および点 P_2 と点 P_4) の v 方向の接ベクトルの差を計算し、その値に比例する分割比で辺 $\overline{P_1P_3}$ (および $\overline{P_2P_4}$) を細分割する。このようにして $\overline{P_1P_2}$, $\overline{P_3P_4}$, $\overline{P_1P_3}$, $\overline{P_2P_4}$ を分割比 $n_1 : n_2 : n_3 : n_4$ (例の場合は $3 : 5 : 5 : 5$) で細分割し、他の四角形メッシュについても同様に分割したものが図 1 (b) である。次に、平面展開の初期形状として細分割した各点に対応する曲面形状の値を式 (1) より算出する。以下、近似的に曲面を平面に展開する手法³⁾ について述べる。

3.2 自由曲面の平面展開

まず対象曲面と初期平面形状を上述の方法によりメッシュを分割する (図 2 と図 3)。試行平面形状をもとに平面領域内で曲面形状に近づけるためには、平面上の三角形 T_2 を曲面上の三角形 T_1 に変形させる力をそれぞれの三角形について求め、それらを全領域に施せば良いと考えられる。

まず、それぞれの面上の対応する一組の三角形 T_1 と T_2 に着目し、幾何的な形状の関係について、変換行列を用いて定量化する。すなわち、曲面上の点 (x_1, y_1) を平面上の点 (x_2, y_2) と変換行列 A を用いて表すと変換行列は以下のようなになる³⁾。

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_p & 0 \\ 0 & d_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-\beta) & -\sin(-\beta) \\ \sin(-\beta) & \cos(-\beta) \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで ψ, β は回転角であり、 d_p, d_q は $(A^T \cdot A)$ の固有値の平方根である。これは平面上の三角形 T_2 を β 度回転させ (図 4 (1)), 続いて主軸方向に d_p, d_q 伸

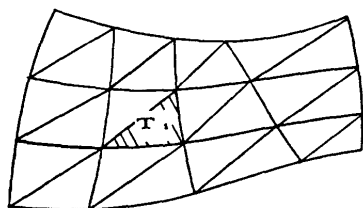


図 2 曲面のメッシュ分割
Fig. 2 Discretization of curved surface into mesh elements.

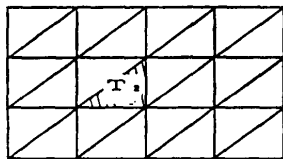


図 3 初期平面形状
Fig. 3 Initial trial shape on a plane.

縮させたのち (図 4 (2)), さらに ψ 度回転させれば (図 4 (3)), 曲面上の三角形 T_1 (図 4 (4)) になることを示している。

次に、平面上の三角形を伸縮させて、曲面上の対応する三角形に変形させる力を算出するため、有限要素法における平面応力問題を考える。すなわち、まず温度 0°C において無応力状態であるような平面上の三角形の主軸方向 p, q 上の、それぞれのある二線分の長さを $L_p(0), L_q(0)$ とし、温度 1°C にしたときの主方向の二線分の長さを $L_p(1), L_q(1)$ とする。熱を加えて、 0°C から 1°C に単位温度上昇させることにより、主軸方向 p, q の長さを d_p, d_q 倍させると

$$\left. \begin{aligned} L_p(1) &= d_p \cdot L_p(0) \\ L_q(1) &= d_q \cdot L_q(0) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

になる。このような変形をする材料は、主軸方向 p, q の線膨脹係数 α_p, α_q とすると

$$\alpha_p = (L_p(1) - L_p(0)) / L_p(0) = d_p - 1 \quad (12)$$

$$\alpha_q = d_q - 1 \quad (13)$$

となるような異方性線膨脹率をもっていると仮定することができる。そして、その材料がもつ熱応力を算出し、実際には熱応力と等価な力を各要素に負荷することを考える。平面応力問題においては変位-歪行列を $[B]$ 、剛性行列を $[k]$ および応力-歪行列を $[D]$ とし、変位を $\{u\}$ 、熱歪を $\{\epsilon_0\}$ とおくと、

$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} + \{f_i\} \quad (14)$$

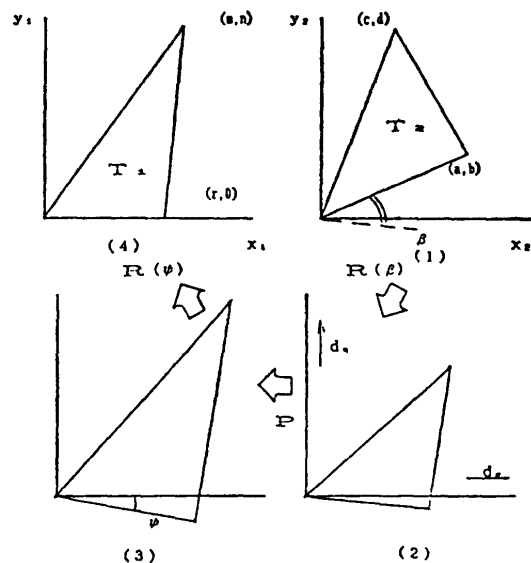


図 4 変換行列の特異値分解
Fig. 4 Singular value decomposition of transformation matrices.

となる。ここで

$$[k] = \int [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dv \quad (15)$$

$$\{f_i\} = \int [B]^T \cdot [D] \cdot \{\epsilon\theta\} dv \quad (16)$$

であり、 $\{f\}$ は節点力であり、これを全系に対して組み立てた $\{F\}$ を零とおく。 $\{f_i\}$ は等価力である。また、熱歪 $\{\epsilon\theta\}$ は、 β に依存する変換行列 $[T]$ を用いて主方向成分の線膨脹係数 α_p と α_q に分解することができる。

$$\{\epsilon\theta\} = [[T]^T]^{-1} \{\epsilon\theta'\} \quad (17)$$

となる。ここで

$$\{\epsilon\theta'\} = \begin{Bmatrix} \alpha_p \\ \alpha_q \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & , & \sin^2 \beta & , & -2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin^2 \beta & , & \cos^2 \beta & , & 2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & , & -\sin \beta \cos \beta & , & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (19)$$

である。熱歪(17)は、式(12)、(13)を代入することにより、

$$\{\epsilon\theta\} = [[T]^T]^{-1} \begin{Bmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (20)$$

となる。そこで等価力 $\{f_i\}$ (式(16)) に式(20)を代入して、

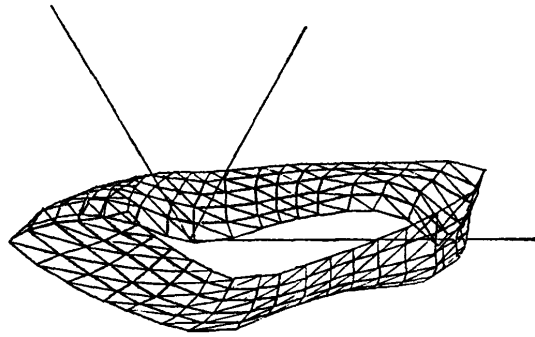


図5 自由曲面(靴モデル)
Fig. 5 Curved surface (shoe model).

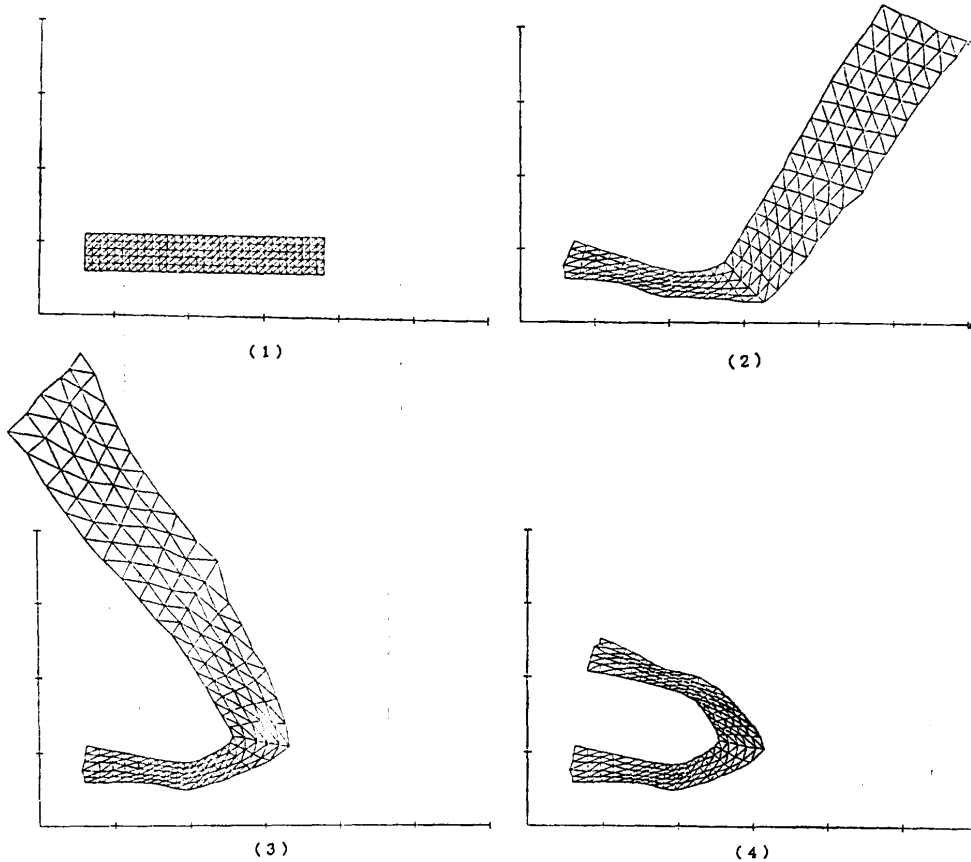


図6 平面展開過程(靴モデル)
Fig. 6 Development process (shoe model).

$$\{f_i\} = \int [B]^T [D] [[T]^T]^{-1} \begin{Bmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{Bmatrix} dv \quad (21)$$

と表すことができる。さらに、式(14)に式(21)を代入することにより剛性方程式は

$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} + \int [B]^T [D] [[T]^T]^{-1} \begin{Bmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{Bmatrix} dv \quad (22)$$

となる。このように試行平面形状のもつ剛性および歪と変位の関係より $[k]$, $[B]$, $[D]$ を求め、また曲面および平面の対応する三角形の関係から特異値分解により回転角 β および伸縮率 d_p , d_q を計算して、等価力(式(21))を求めることが可能となる。さらにそれを全系に組み立てることにより、変位を算出することができる。このときの変位は図3の試行平面形状に対し、個々の三角形が曲面上(図2)の対応する三角形に等しくなるような力を、平面上で負荷したときの節点変位である。

最後に、上述の手順を経て得られた

変形量の評価値として変位がもたらす歪エネルギーの総和 J を計算する³⁾。試行平面形状における歪エネルギーは縦弾性係数 E , ポアソン比 ν , 歪 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ と応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, 要素三角形の面積 S を用いて表すと

$$J = \sum (\epsilon_x \sigma_x + \epsilon_y \sigma_y + \gamma_{xy} \tau_{xy}) S / 2 \quad (23)$$

となる。この値が設定条件以下であれば、試行平面形状を平面展開形状とする。そうでなければ各節点座標に変位を足し加えることにより、試行平面形状の修正をおこない、その後上述の手順を繰り返す。

3.3 メッシュ細分割による平面展開の例

シューズ産業における設計工程は、デザインワーク

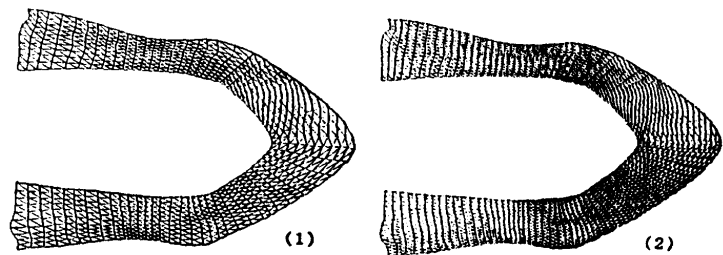


図7 平面展開形状 (メッシュの等分割)
Fig. 7 Flattened form (equi-division of mesh).

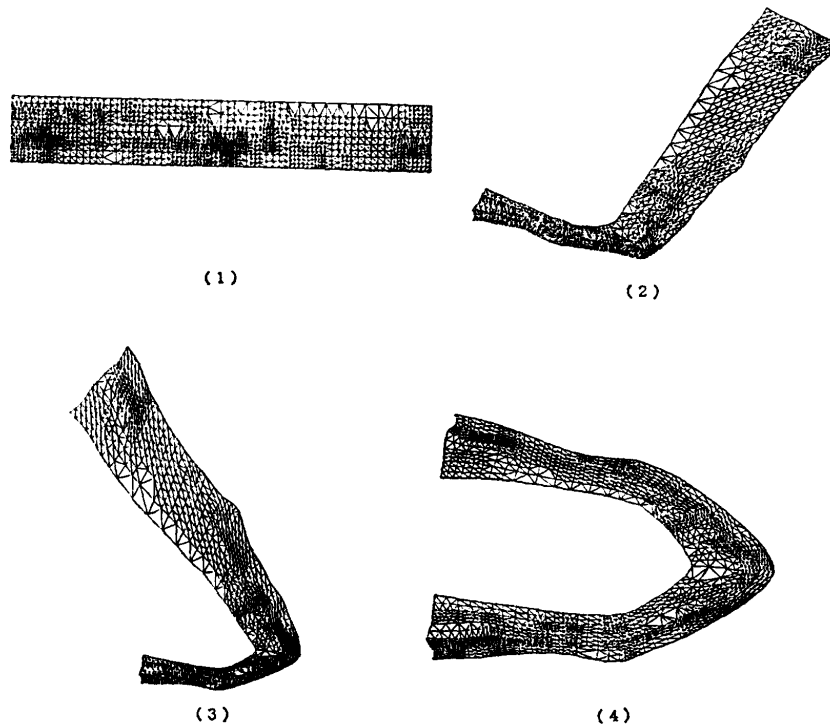


図8 平面展開過程 (接ベクトルによる分割)
Fig. 8 Development process (redivision of mesh by tangent vector).

からパターンメイキングおよび展開・グレーディング・マーキングなど業界独特の諸工程から成り立っている。このなかで特に重要な作業としてあげられるのは靴形状を平面展開する工程である。すなわち、靴の

設計に際しては、原理を設定するために足型の正確な平面展開ができるということが重要な問題となっている。そこで例として、靴モデル(図5)について曲面パッチを単位として有限要素法により曲面の平面展開をおこなったのが、図6である。図6(1)は初期平面展開形状であり、1回目および2回目の形状修正によって得られた形状が図6(2)、(3)である。そして5回目の修正によって、歪エネルギーの総和は評価のためのしきい値 $\epsilon=1.0 \times 10^{-7}$ 以下になったので図6(4)を平面展開形状とした。

この結果、得られた展開形状は、最初設定した曲面パッチを基準とし、曲面形状の“まがり

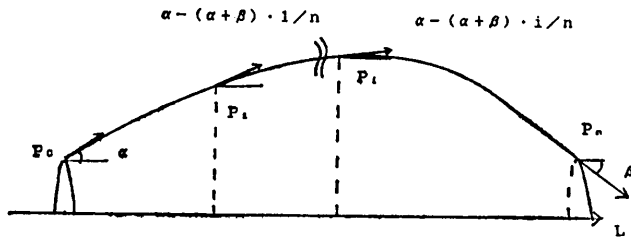


図9 接ベクトルによる曲面の分断
Fig. 9 Division of a curved surface by tangent vector.

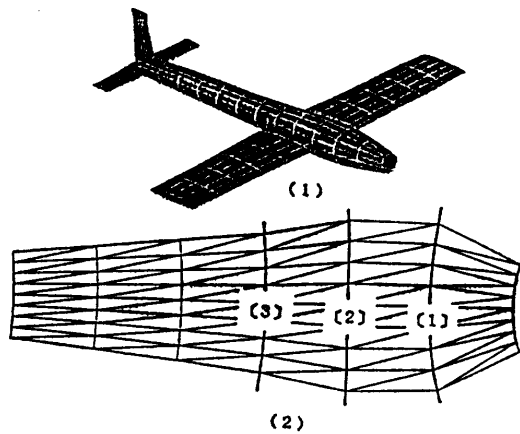


図10 曲面の分断(航空機モデル)
Fig. 10 Division of a curved surface (airplane model).

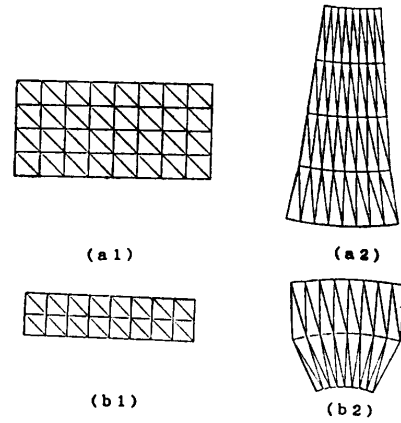


図12 平面展開形状[2]
(接ベクトルによる曲面分断)
Fig. 12 Flattened forms [2]
(division by tangent vector).

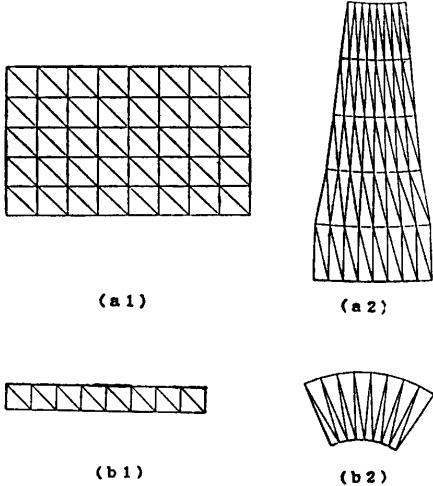


図11 平面展開形状[1]
(接ベクトルによる曲面分断)
Fig. 11 Flattened forms [1]
(division by tangent vector).

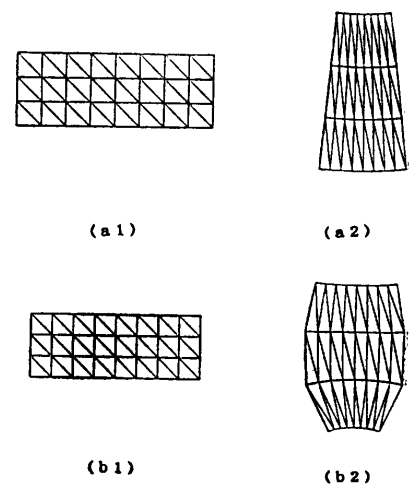


図13 平面展開形状[3]
(接ベクトルによる曲面分断)
Fig. 13 Flattened forms [3]
(division by tangent vector).

表 1 平面展開の評価 (メッシュ細分割)
Table 1 Estimation of flattened forms (redivision of mesh).

展開方法	節点数	要素数	評価関数 J の値
曲面パッチを単位とした平面展開	198	320	$1.61 \cdot 10^{-9}$
メッシュを2等分した平面展開	715	1280	$7.23 \cdot 10^{-10}$
メッシュを3等分した平面展開	1552	2880	$5.88 \cdot 10^{-10}$
接ベクトルに依存した平面展開	1330	2480	$5.59 \cdot 10^{-10}$

ぐあい”を考慮していないため、爪先等の曲率の大きな部分の展開精度があまり良くない。次に各曲面パッチの辺をパラメータ u, v について均一に二等分および三等分し、おのおの三角形を単位に平面展開の手順にしたがい、上述の例と同様に5回目の形状修正によって得られた平面展開形状が図7(1)と(2)である。また、曲面パッチの u 方向、 v 方向それぞれの接ベクトルの変化を算出し、その値に比例する分割比で曲面パッチを分割し、おのおのの三角形を要素として平面展開をおこなった結果(図8)である。図6と同様に図8(1)は初期平面展開形状であり、1回目および2回目の形状修正によって得られた形状が図8(2)、(3)である。そして5回めの修正によって、得られた平面展開形状である。三方法の平面展開の結果に関する評価値を表1に示す。このように曲面パッチを細かく設定することで平面展開の精度はあがるが、節点数・要素数が増えるため処理時間が非常にかかる。それにひきかえ、接ベクトルに依存した平面展開手法は、処理時間を比較的少なくでき、なおかつ展開精度をあげることができるという結果が得られた。

4. 曲面切断による平面展開

4.1 曲面切断の方法

従来より検討を加えてきた対象は、すでに切り開かれた曲面であるが、精度良く展開するには最初にかに曲面を切断するかを考察しなければならない。自由曲面は対象とする形状が千差万別であるため、一般論で分類することは非常に困難であるが、工業製品に用いられる自由

表 2 平面展開の評価 (接ベクトルによる曲面分断)
Table 2 Estimation of flattened forms (division of curved surface by tangent vector).

展開領域	節点数	要素数	評価関数 J の値
全領域	63	96	$1.04 \cdot 10^{-9}$
(1)の左側	54	80	$1.27 \cdot 10^{-10}$
(1)の右側	18	16	$9.22 \cdot 10^{-10}$
(2)の左側	45	64	$2.43 \cdot 10^{-11}$
(2)の右側	27	32	$8.86 \cdot 10^{-10}$
(3)の左側	36	48	$2.22 \cdot 10^{-10}$
(3)の右側	36	48	$1.05 \cdot 10^{-9}$

表 3 平面展開の評価 (不連続線による曲面分断)
Table 3 Estimation of flattened forms (division of curved surface by discontinuous line).

展開領域	節点数	要素数	評価関数 J の値
全領域	105	168	$6.20 \cdot 10^{-8}$
A	75	112	$1.80 \cdot 10^{-10}$
B	30	28	$4.79 \cdot 10^{-11}$
C	30	28	$4.54 \cdot 10^{-11}$

曲面を対象とし、次の二方法を提案する。ひとつは、接ベクトルによる分割する方法であり、他のひとつは、不連続曲線により分割したのち、それぞれを平面展開する手法である。設計工程や三次元グラフィックスの入力システムの対象となる自由曲面は、複雑な非可展面であっても、曲面の傾きは滑らかに変化している場合が大半であるため、ここでの対象は、接ベクトルが単調に変化している曲面とする。図9に示すようにL軸方向の側面で切り開くと位相的に長方形に等しいとみなすことができる。そこで、L軸とのなす角度(接ベクトル)を算出し、その値の変化が大きくなるように曲面を切断する。すなわち P での値 (α) から P_* での値 (β) の差を計算し、その差が必要とする

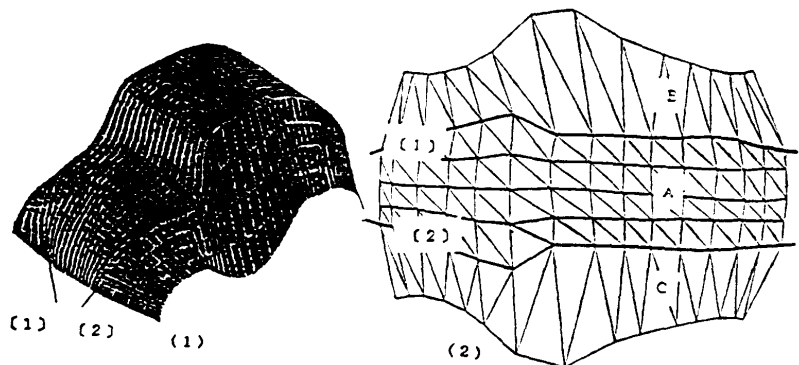


図 14 曲面の分断 (自動車モデル)
Fig. 14 Division of a curved surface.

展開精度を満たすべく決められた切断数 n によりなるべく均等に分割されるように、切断線を設定する。 i 番目の接ベクトルと中心軸のなす角度 (θ_i) は

$$\theta_i = \alpha - (\alpha + \beta) \cdot i/n \quad (24)$$

となる。

自由曲面の平面展開において精度を向上させるために、面分割が重要であり、比較的变化の少ない曲面に対しては接ベクトル差を算出すればよいが、不連続曲線が存在する場合は、曲線の付近において平面展開の歪が非常に大きくなることを考えられる。そこで不連続曲線にそって、切断することにより、展開時に生じる歪をあらかじめ、小さくすることができる。

このように曲面自体を切断し、このパーツを平面展開すれば、全体としての平面展開歪は小さくなり精度の向上を図ることができる。

4.2 曲面切断による平面展開の例

4.2.1 接ベクトルによる切断

曲面切断法による平面展開の例として航空機モデル【胴部】をあげたのが図10である。円柱と位相的に等しい対象モデルに対し、中心軸方向の面で切り開いた形状を平面に展開した図である。ここで中心軸方向の接ベクトルの差を算出し、その変化が大きくなるように曲面切断をおこなう。この場合、接ベクトルを計算すると図10の【2】で曲面分割すると良いことがわかる。ここでは比較のため、分割方法を図10の【1】、【2】、【3】のそれぞれの場合について曲面を分断した後、平面展開をおこなった例を図11~13に示す。図の(a1)、(b1)が初期平面形状であり、(a2)、(b2)は平面展開形状である。また、それぞれ平面展開における評価値を表2に示す。このように全体の平面展開の精度をあげるためには、曲面自体の分割方法が重要な要素のひとつであるという結果が得られた。

4.2.2 微分値の不連続線による切断

図14は自動車モデル全体とその平面展開形状である。ここで不連続曲線【1】と【2】にそって平面展開したのが図15である。このようにして分割した曲面に対して平面展開した評価値を表3にあげる。表から明らかのように不連続曲線【1】、【2】にそって切

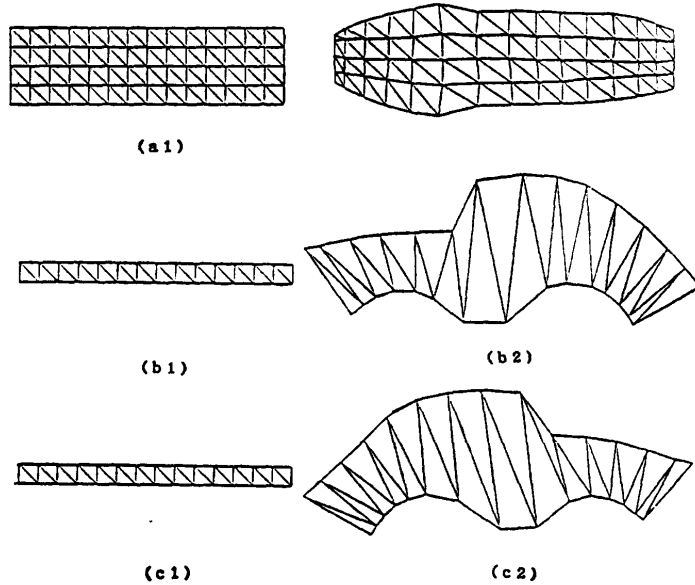


図15 平面展開形状 (不連続線による曲面分断)
Fig. 15 Flattened forms
(division by discontinuous line).

断したパーツの平面展開時の精度は全領域を一律に展開した精度より評価関数 J の意味で一桁まさるという結果が得られた。

5. むすび

本研究では、自由曲面を平面に精度良く展開するための手法について提案した。そのひとつは曲面上の接ベクトルの差に比例した分割数でメッシュを細分割し、各々の要素を単位として平面展開をおこなう方法である。他のひとつは、曲面を切り開くことにより平面展開の歪を事前に小さくする方法である。

参考文献

- 1) 安達忠次: 微分幾何学概説, pp. 59, 培風館, 東京 (1985).
- 2) 図形科学ハンドブック編: 図形科学ハンドブック, pp. 187, 森北出版, 東京 (1980).
- 3) 島田哲夫, 多田幸生, 他2名: 有限要素法による自由曲面の平面展開問題, 日本機械学会論文集C編, Vol. 54, No. 498, pp. 497-504 (1988).
- 4) 島田哲夫, 多田幸生: ロボットシミュレータのための曲面ロケータの開発, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 5, pp. 539-549 (1988).
- 5) Foley, J. D. and Dam, A. V.: *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, Addison-Wesley, New York (1982).

(昭和61年9月18日受付)
(平成元年3月7日採録)

**島田 哲夫 (正会員)**

昭和 26 年生。昭和 50 年神戸大学工学部計測工学科卒業。昭和 52 年同大学院修士課程修了。同年日立製作所入社。昭和 58 年神戸大学大学院博士課程単位取得後、現在、兵庫県立工業試験場主任研究員。三次元 CAD・ロボットシミュレータのマンマシンインタフェース、形状処理技術の研究開発および有限要素法による解析処理技術の研究開発に従事。日本機械学会会員。

**多田 幸生**

昭和 27 年生。昭和 50 年神戸大学工学部機械工学科卒業。昭和 52 年同大学院修士課程修了。昭和 55 年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程機械工学専攻修了。工学博士。同年、神戸大学工学部システム工学科助手。昭和 61 年同助教授。CAE などのシステム設計、構造物の最適設計、バイオメカニクス、画像処理などに関して研究している。日本機械学会、日本 OA 学会各会員。