

ロボットシミュレータのための曲面ロケータの開発†

島田 哲夫^{††} 多田 幸生^{†††}

現在、製造工程等の省力化のため、ロボットの実用的な導入が各方面で、検討されている。しかし、作業対象が自由曲面である場合、曲面形状を操作性よくハンドリングする手法が確立されていないため、プレイバックおよびプログラミング方式のいずれをとっても、ロボット軌跡作成方法として不十分な場合が多い。このような自由曲面を対象とする作業をロボットを導入することにより省力化するには、作業軌跡をどのように決定するかということが重要である。そこでグラフィックスの論理装置として三次元ロケータを用いる手法が提案されているが、操作性に問題があり、実用的でないという指摘がなされている。その原因として、三次元ロケータの定義空間と対象とする環境モデルの空間が、一対一に対応していないことがあげられる。本報告において、自由曲面を扱う三次元グラフィックスの論理入力装置として、「曲面ロケータ」を提案する。曲面ロケータの定義域は、作業環境である対象曲面の展開形状からなる平面領域であり、値域は自由曲面上の対象領域である。曲面ロケータを動かす感覚に比例する距離と曲面上を移動するロボットの動きを比例の関係に保つことができるために、三次元入力作業を容易にすることが可能となった。また本手法の応用として画像を、曲面ロケータの入力データとすることによって、曲面上に画像データを精度良く転写する例を示した。

1. ま え が き

現在、製造工程ならびに過酷な環境下での作業を自動化するため、ロボットの実用的な導入が、各方面で検討されている。従来より自動車産業、電気機器製造業および合成樹脂製造加工業などにおいて、多品種少量生産および労働環境の整備への対応から、産業用ロボット¹⁾を導入し、省力化を図っているが、なお人手に頼らざるを得ない工程が数多く存在する。特に作業対象が自由曲面である場合、曲面形状上を操作性よくハンドリングする手法が確立されていないため、プレイバックおよびプログラミング方式のいずれをとっても、ロボット軌跡作成方法として不十分な場合が多い。自由曲面を対象とする作業を、ロボットを導入することにより省力化するには、作業軌跡をどのように決定するかということが重要である。

従来より、グラフィックスの入力装置として三次元ロケータ²⁾を用いる手法が提案されているが、その定義空間と対象環境モデルの空間が一対一に対応していないため、操作性に問題があり、実用的でないという指摘がなされている。そこで、入力装置の定義空間と作業環境モデルの空間との対応をとるため、対象曲面を精度良く平面に展開する手法³⁾が必要となる。自由曲

面を平面に展開する手法は、造船業界において船殻を構成する外板の設計用として開発されている。たとえば、二点間の曲線に沿う長さが最小になる測地線を中心に各フレームごとに順次展開する測地線展開法や接触面展開法などがある⁴⁾。しかし、これらの手法は曲面をフレームごとに平面近似することにより、幾何学的な計算を行うため、曲面ごとにそれぞれのプログラムを使い分ける必要があり、さらに曲率半径の大きな船殻の曲面に限られるという欠点がある。そこで、筆者らは、従来より各種の曲面に対して適用でき、しかも展開精度の良い手法について検討を行っている。

本報告において、操作性良く自由曲面をハンドリングするため、その定義域は対象曲面を展開した平面領域であり、値域は自由曲面上の対象領域である「曲面ロケータ」という論理入力装置を提案し、ロボットシミュレータに適用して、その有用性を示す。

2. 基本機能とシステム構成

本ロボットシミュレータは、ハードウェアとして三次元グラフィックス装置とデータ・タブレットを中心とし、以下の機能を有するシステムである。

(a) 三次元測定機により自由曲面形状を入力

数学モデル化できない複雑な形状については三次元形状モデルから直接、三次元測定機を用いて数値データをサンプリングし、以降の曲面形状処理の素データとする。

(b) 作業環境の曲面生成

コンピュータ内に格納された素データをもとに視覚的に作業対象を把握するために、自由曲面を生成し、

† "Curved Surface Locator" for Robot Simulator by TETSUO SHIMADA (Department of Mechanics 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

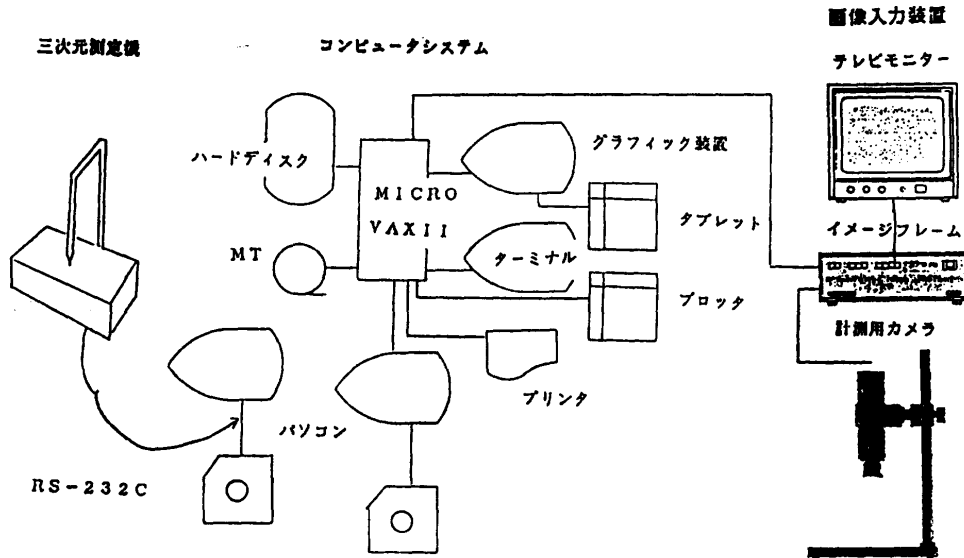


図1 ロボットシミュレータのシステム構成
Fig. 1 Configuration of robot simulator.

ワイヤフレームおよびシェーディングを施して画面に表示する。

(c) ロボット軌跡の決定

グラフィックス入力システムとして、「曲面ロケータ」を用いて、作業対象である自由曲面をハンドリングし、ロボット軌跡を算出する。

本ロボットシミュレータのシステム構成を図1に示す。

3. 作業環境のモデリング

自由曲面を作業環境にしているロボットシミュレータシステムにおいて、モデル化すべき対象の入力方法として、主に二つのものが考えられる。ひとつは造形イメージを木材・クレイ・エポキシ樹脂・発泡スチロールなどでモデルを作製し、そのモデルを三次元測定機によって計測し、三次元データをファイル化する方法である。他のひとつは航空機 CAD におけるマスタディメンションシステムなどのように、機体の三次元形状を厳密に数式定義し、以降の曲面形状処理の素データとする方法である。現実には数式化できる箇所とそうでない箇所が生じるため、ここでは双方のデータをマッチングさせることにより、コンピュータ内に格納する。上記のサンプリングしたデータからパラメータ u, v を用いて、Ferguson⁵⁾の曲面パッチ式 $K(u, v)$ を導く(式(1))。

$$K(u, v) = (b_0(u)b_1(u)b_0(v)b_1(v)) \cdot Q$$

$$\begin{Bmatrix} b_0(v) \\ b_1(v) \\ \underline{b_0(v)} \\ \underline{b_1(v)} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

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

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

さらに $P(i, j)$ ($i, j=0, 1$) は、ひとつのパッチに対する4隅のサンプリングした座標点であり、 $P_u(i, j) = \frac{\partial}{\partial u} P(u, v)|_{(u,v)=(i,j)}$, ($i, j=0, 1$) は、サンプリングした各点の u 方向における傾きベクトルである。また、 $P_v(i, j) = \frac{\partial}{\partial v} P(u, v)|_{(u,v)=(i,j)}$ ($i, j=0, 1$) も同様に v 方向における傾きである。式(1)で表される曲面パッチを用いて数式化された航空機モデルの例を図2に示す。

4. ロケータと自由曲面

ロボットの動作軌跡を求めることは、ハンドの位置と姿勢にあたる法線ベクトルを決定することに相当する。コンピュータでは、それらから座標変換して各関節の角度を算出し、その値を目標値として制御することになる。ここでは、まず軌跡を求めるための入力シ

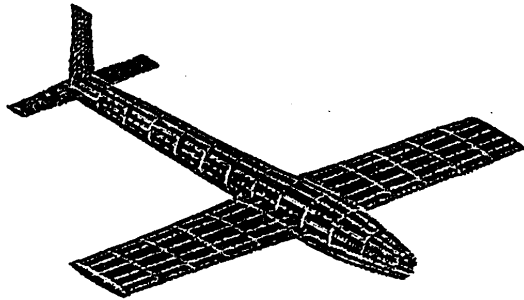


図2 作業環境モデルの生成 (航空機モデル)
Fig. 2 Robot world geometric model (airplane model).

ステムと作業対象である自由曲面との関係を考察する。

はじめに、パッチ (図3(1)) とパラメータ (図3(2)) を関係づける。つぎに全体の曲面を表すパラメータ (U, V) ($0 \leq U, V \leq 1$) は、曲面が u 方向に M 個、 v 方向に N 個から成っている場合、 (i, j) 番目パッチのパラメータ (u, v) の値を用いて次式のように表すことができる。

$$\begin{cases} U = (i-1)/M + u/M \\ V = (j-1)/N + v/N \end{cases} \quad (4)$$

さらに、ジョイスティックまたはタブレットの動作領域である正規化デバイス座標空間 (x, y) ($0 \leq x, y \leq 1$) と自由曲面モデルのパラメータ (U, V) ($0 \leq U, V \leq 1$) とを、一対一に対応させることを考える (図4)。そして、二次元ロケータを用いて (U, V) を指定し、そのパラメータから逆に、指定した点を含むパッチの位置 (i, j) とパッチ自身のパラメータ (u, v) を算出する。最後にそれらの値を式(1)に代入することにより、自由曲面上の位置および位置からロボットの姿勢

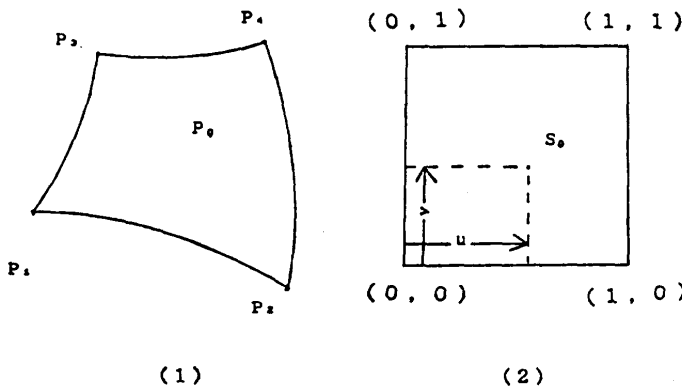
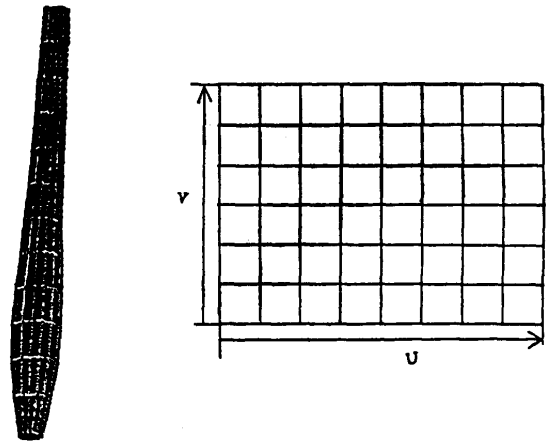


図3 曲面パッチとパラメータ (u, v)
Fig. 3 Value of (u, v) on a surface patch.



(1) (2)
図4 作業環境モデル (航空機モデル) とロケータ空間との対応
Fig. 4 Robot world model (body of airplane) and domain of a locator.

である法線方向のベクトルを、ともに導出することができる。このようにして、ロケータと曲面とを結びつけることにより、ロボットを対象曲面上に拘束して移動させることができ、遠隔操縦型マニピュレータのごとくシミュレーションすることが可能となる (図5)。

5. 曲面ロケータの構成

上述の方法により、ジョイスティックまたはタブレットの XY 空間と作業環境である曲面の UV 空間とを対応づけることが可能となった。しかし、対応する二点間の距離が一般には異なるため、ジョイスティックまたはタブレットのスタイラスペンを動かす感覚に対する距離と、曲面をロボットが移動する距離とは一致しない。そこで、作業対象である曲面形状を精度良く平面に延展し、展開平面をロケータの移動領域とすることにより、自由曲面とロケータ空間を対応させることが必要となる。以下、既に提案しているように近似的に曲面を平面に展開する手法³⁾について述べる。

5.1 自由曲面の平面展開

まず対象曲面を三角形メッシュに分割する (図6)。次に曲面上のメッシュに対応して、平面を分割した形状を試行平面形状とする (図7)。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

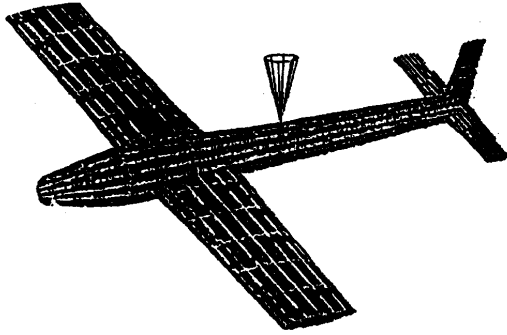


図5 ロケータによる軌跡のシミュレーション
Fig. 5 Simulation of robot locus using a locator.

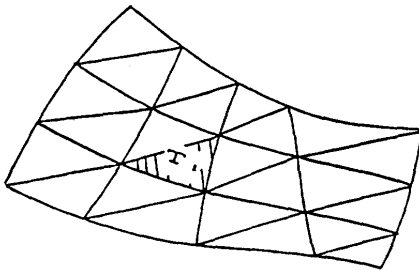
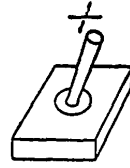


図6 曲面のメッシュ分割
Fig. 6 Discretization of a curved surface into mesh elements.

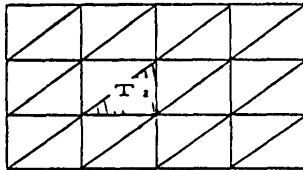


図7 初期平面形状のメッシュ分割
Fig. 7 Initial trial shape on a plane.

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。そこで変形に必要な力を算出するため、 T_2 から T_1 への形状変換の行列を求め、その伸縮成分を、仮想的な熱歪により生じる力と関連づけることにする。このようにして得られた等価力を各要素に負荷し、力学的手法である有限要素法を用いて、試行平面形状の各節点の変位を算出することができる。この変位がもたらす歪エネルギーをもとに、試行平面形状が、対象とする曲面の平面展開形状として妥当であるか否かの評価を行うことにする。以下に平面展開の手順を述べる (図 8)。

- (1) 曲面を三角形メッシュに分割する (図 6)。
- (2) 続いて曲面を平面に展開した初期形状 (試行形状) として位相的に等しい三角形メッシュを設定する (図 7)。
- (3) この対応する二つの三角形に着目し、平面形

状の三角形 T_2 から曲面形状の三角形 T_1 への変形を変換行列として定量化する。

- (4) 変換行列の特異値分解⁶⁾を行い、変換の回転成分と伸縮成分に分割する。
- (5) 伸縮成分をもとに、平面形状に負荷すべき等価力 f_i を算出する。
- (6) 平面形状の剛性行列 k を算出する。
- (7) k および f_i を全系に組み立てることにより、変位 U を算出する。
- (8) U を用いて、形状の評価関数 J を計算する。
- (9) J の値が設定条件を満たしていれば、その形状を平面展開形状とする。
- (10) そうでなければ、平面形状の修正処理を行って、(3)へ戻る。

以下、具体的に手法の詳細を記述する。

5.2 変換行列の特異値分解

単位長さを二辺とする直角二等辺三角形を基本要素としたとき、曲面上および平面上の三角形を変換行列

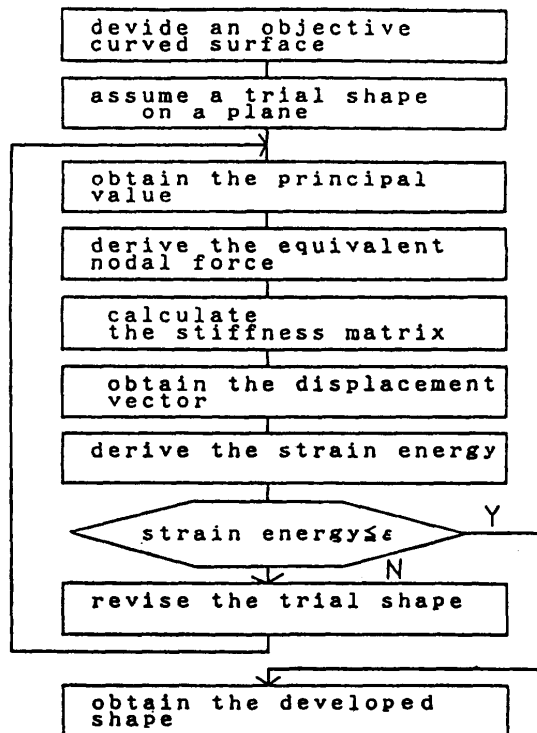


図8 平面展開の手順
Fig. 8 Algorithm of development from 3-D to 2-D.

H, G を用いて表す (図 9 および図 10). すなわち曲面上の点 (x_1, y_1) を基本三角形要素 T_0 上の点 (x, y) を用いて次のように関係づける.

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r & m \\ 0 & n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = H \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (5)$$

同様に展開面上の点 (x_2, y_2) は以下のように表される.

$$\begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = G \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (6)$$

したがって, 平面上の三角形から曲面上の三角形への変換は, これらの変換行列を用いて

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} = H \cdot G^{-1} \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} = A \cdot \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

となる. ここで

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

である. つぎに変換行列の伸縮成分を求めるために, 特異値分解を行うと

$$A = R(\phi) \cdot P \cdot R(\beta) \quad (9)$$

となる. $R(\phi), R(\beta)$ はそれぞれ回転角が ϕ, β 度の回転行列であり, P は $A^T \cdot A$ の固有値の平方根を対角成分にもつ対角行列で, それぞれ

$$R(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P = \begin{bmatrix} d_p & 0 \\ 0 & d_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

である. これは図 11(1)のように平面上の三角形 T_2 を β 度回転させ, 図 11(2)について主軸方向に d_p, d_q 伸縮させたのち, 図 11(3)を ϕ 度回転させれば, 曲面上の三角形 T_1 (図 11(4)) になることを示している.

5.3 有限要素法による取扱い

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熱応力問題⁷⁾ 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 $L_p(0^\circ), L_q(0^\circ)$ とし, 温度 1°C にしたときの主軸方向の二線分の長さを $L_p(1^\circ), L_q(1^\circ)$ 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

$$\left. \begin{aligned} L_p(1^\circ) &= d_p \cdot L_p(0^\circ) \\ L_q(1^\circ) &= d_q \cdot L_q(0^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

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

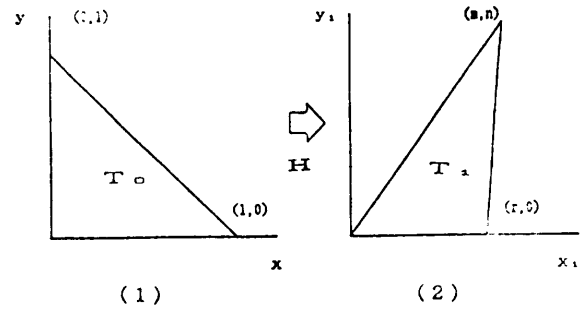


図 9 曲面上への変換

Fig. 9 Transformation onto a curved surface.

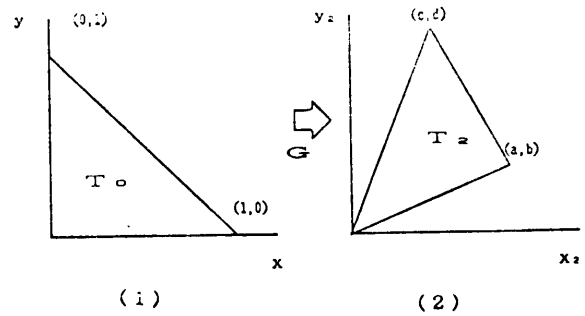


図 10 平面上への変換

Fig. 10 Transformation onto a plane.

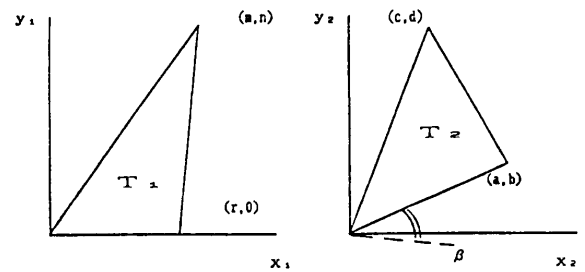


図 11 変換行列の特異値分解

Fig. 11 Singular value decomposition of transformation matrices.

$$\alpha_p = (L_p(1^\circ) - L_p(0^\circ)) / L_p(0^\circ) = d_p - 1 \tag{13}$$

$$\alpha_q = d_q - 1 \tag{14}$$

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 $\{\epsilon\theta\}$ とおくと、

$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} + \{f_i\} \tag{15}$$

となる。ここで

$$[k] = \int [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dv \tag{16}$$

$$\{f_i\} = \int [B]^T \cdot [D] \cdot \{\epsilon\theta\} dv \tag{17}$$

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 $\{F\}$ は零とおく。 $\{f_i\}$ は等価力である。

下図のように熱歪 $\{\epsilon\theta'\}$ の主方向 p, q が全体の基準系より β 度傾いている場合 (図 12)、 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、

$$\{\epsilon\theta\} = [[T]^T]^{-1} \{\epsilon\theta'\} \tag{18}$$

となる。ここで

$$\{\epsilon\theta'\} = \begin{Bmatrix} \alpha_p \\ \alpha_q \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{19}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & -\sin \beta \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \tag{20}$$

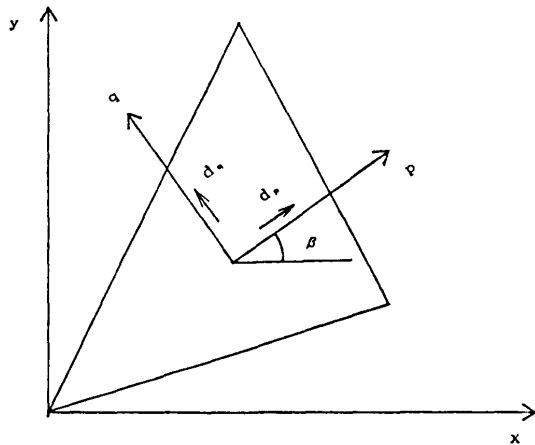
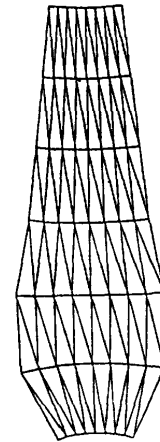
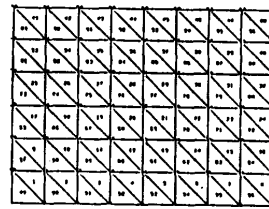


図 12 $\{\epsilon\theta\}$ と $\{\epsilon\theta'\}$ の関係
Fig. 12 Relation between $\{\epsilon\theta\}$ and $\{\epsilon\theta'\}$.



(1) (2) (3)

図 13 自由曲面の平面展開 (航空機モデル)

Fig. 13 The development of curved surface (airplane model).

である。熱歪 (18) は、式 (13)、(14) を代入することにより、

$$\{\epsilon\theta\} = [[T]^T]^{-1} \begin{Bmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{21}$$

となる。そこで等価力 $\{f_i\}$ (式 (17)) に式 (21) を代入して、

$$\{f_i\} = \int [B]^T [D] [[T]^T]^{-1} \begin{Bmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{Bmatrix} dv \tag{22}$$

と表すことができる。さらに、式 (15) に式 (22) を代入することにより剛性方程式は

$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} + \int [B]^T [D] [[T]^T]^{-1} \begin{Bmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{Bmatrix} dv \tag{23}$$

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 (22) 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 $\{U\}$ を算出することができる。このときの U は図 7 の試行平面形状に対し、個々の三角形が曲面上 (図 6) 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、この U をもとに形状の評価関数を求め、

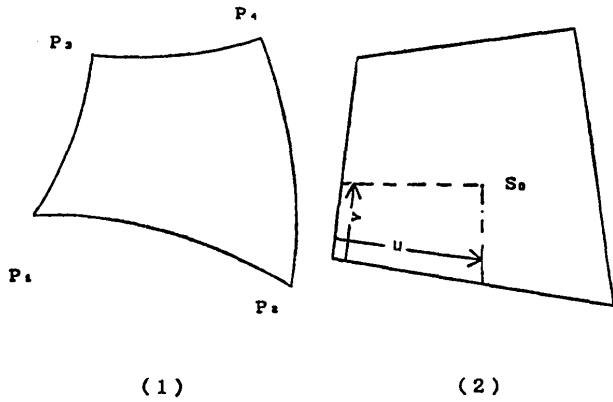


図 14 曲面パッチとパラメータ値
Fig. 14 A patch and its values of parameters.

そ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行い、その後上述の手順を繰り返す。図 13 に平面展開の例として、航空機（胴部）モデル（図 13(1)）とその初期面形状（図 13(2)）および平面展開形状（図 13(3)）を示す。

5.4 曲面ロケータの構成

ここで自由曲面上を動作範囲にしているロボットシミュレータにおいて、「曲面ロケータ」という新しい論理入力システムを提案する。

図 14(1) はサンプル点 P_1, P_2, P_3, P_4 から構成される曲面パッチであり、図 14(2) はその平面展開形状とパラメータ (u, v) である。つぎに対象とする曲面モデル（図 15(1)）がこのパッチを単位として、 u 方向

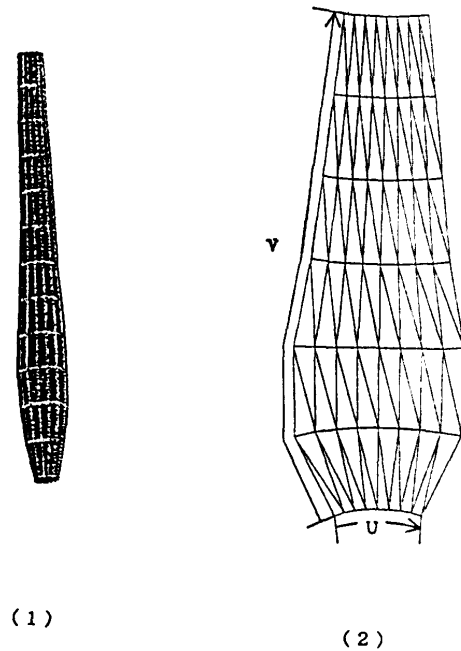


図 15 曲面モデルと平面展開形状
Fig. 15 Curved surface model and its flattened form.

に M 個、 v 方向に N 個からなる場合、その平面展開形状上（図 15(2)）のパラメータ (U, V) を、 (i, j) 番目のパッチのパラメータ値 (u, v) を用いて表すことができ、4 章における議論と同様に、

$$\begin{cases} U = (i-1)/M + u/M \\ V = (j-1)/N + v/N \end{cases} \quad (24)$$

となる。

ここで、平面展開のデータ（図 16(1)）を二次元ロ

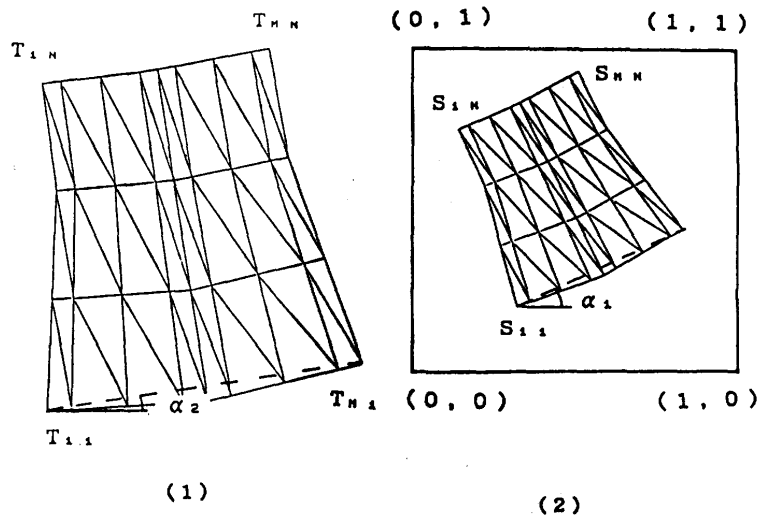


図 16 平面展開データと曲面ロケータデータ
Fig. 16 Data of flattened form and curved surface locator.

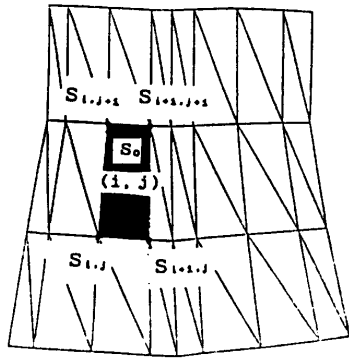


図 17 パッチ番号の算出
Fig. 17 Identification of (i, j)-th patch.

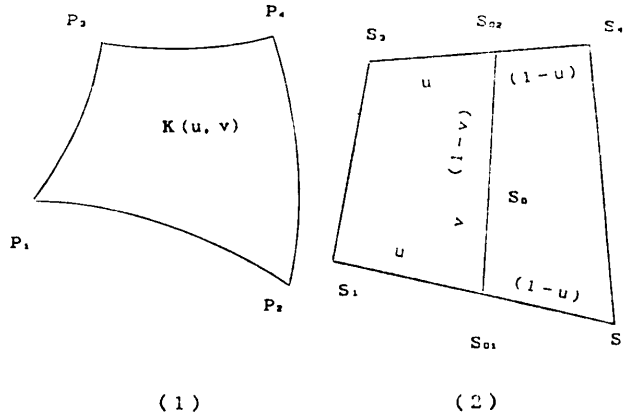


図 18 パラメータ (u, v) の導出
Fig. 18 Derivation of (u, v) parameter.

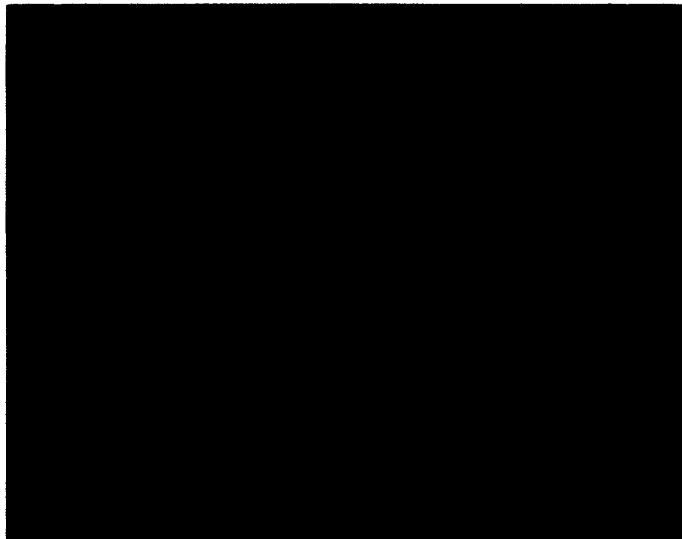


図 19 洗浄ロールとロボット軌跡
Fig. 19 Washing roll and robot locus.

データの平面領域上に転写することを考える。具体的には、展開形状の縮小ハードコピーを、タブレット上に置き、その形状の左下端および右下端 $[S_{11}=(SX_{11}, SY_{11}), S_{M1}=(SX_{M1}, SY_{M1})]$ を指定する。

$$SX_d = SX_{M1} - SX_{11} \quad (25)$$

$$SY_d = SY_{M1} - SY_{11}$$

よりハードコピーの両端の傾きおよび長さを求めると

$$\alpha_1 = \tan^{-1}(SY_d/SX_d) \quad (26)$$

$$d_1 = \sqrt{SX_d^2 + SY_d^2} \quad (27)$$

となる。一方、 S_{11}, S_{M1} に対応する平面展開上のデータを、 $T_{11}=(TX_{11}, TY_{11})$ および $T_{M1}=(TX_{M1}, TY_{M1})$ とおき、その形状の対応する両端の傾きと長さを求めると

$$\left. \begin{aligned} TX_d &= TX_{M1} - TX_{11} \\ TY_d &= TY_{M1} - TY_{11} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}(TY_d/TX_d) \quad (29)$$

$$d_2 = \sqrt{TX_d^2 + TY_d^2} \quad (30)$$

となる。このとき、展開形状のデータを α 度 ($\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$) 回転させ、つぎに d 倍 ($d = d_1/d_2$) することにより(式(31))、曲面ロケータのデータを導出することができる。

$$\left. \begin{aligned} SX_{ij} &= d(TX_{ij} - TX_{11}) \cos \alpha \\ &\quad - d(TY_{ij} - TY_{11}) \sin \alpha + SX_{11} \\ SY_{ij} &= d(TX_{ij} - TX_{11}) \sin \alpha \\ &\quad + d(TY_{ij} - TY_{11}) \cos \alpha + SY_{11} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

次に上述した曲面ロケータを用いて、曲面モデルをハンドリングすることを考える。まず、曲面ロケータ上の一点 S_0 を指定する。具体的には、タブレット上においたハードコピー上の一点をピックアップする。次に、 S_0 と曲面ロケータを構成するメッシュデータ ($S_{ij}, S_{i+1,j}, S_{i+1,j+1}$) とを比較し、曲面パッチの番号 (i, j) を見いだす (図 17)。

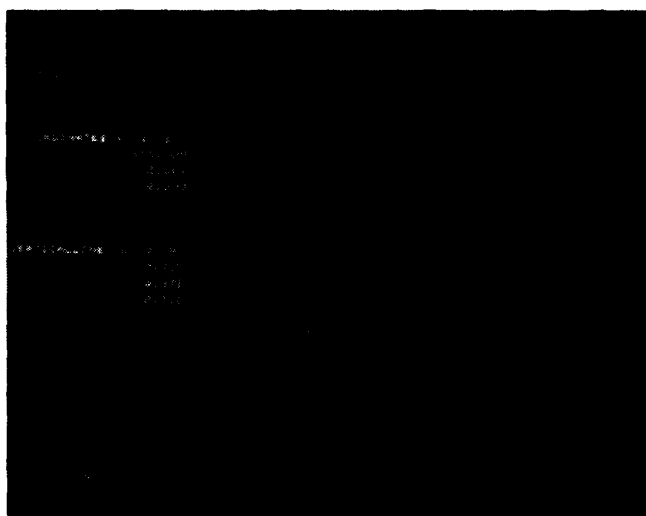
さらに、曲面パッチのパラメータ (u, v) は式(32)により導出することが可能となる(図 18)。

$$\begin{aligned} S_{01} &= (1-u)S_1 + uS_2 \\ S_{02} &= (1-u)S_3 + uS_4 \\ S_0 &= (1-v)S_{01} + vS_{02} \\ &= (1-v)(1-u)S_1 + u(1-v)S_2 \\ &\quad + (1-u)vS_3 + uvS_4 \end{aligned} \quad (32)$$

曲面上の座標 $K(u, v)$ は、3章の式(1)にパラメータ (u, v) を代入することにより得られ、その値をもとに法線方向のベクトル値を導出する

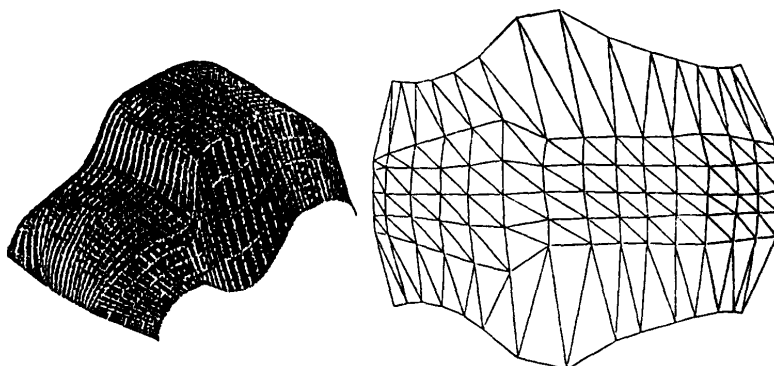


(1)



(2)

図 20 航空機洗浄ロボットシミュレータ
Fig. 20 Washing robot simulator for airplane.



(1)

(2)

図 21 曲面モデルと平面展開形状 (自動車モデル)
Fig. 21 Curved surface model and its developed form (car model).

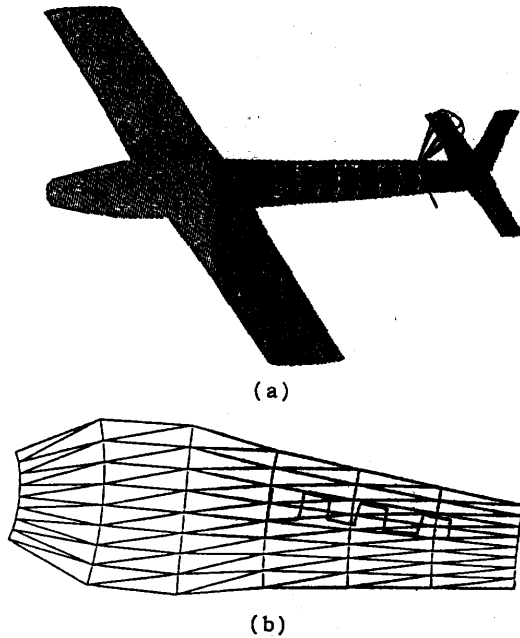


図 22 曲面および平面展開形状上のロボット軌跡
Fig. 22 Robot locus on the curved surface and on the flattened form.

HYOGO

(1)

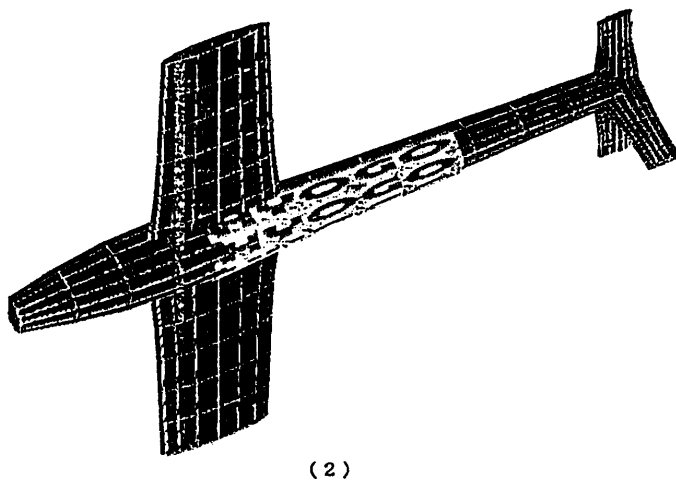


図 23 画像データの自由曲面への転写 (航空機モデル)
Fig. 23 Transformation of visual data from 2-D to curved surface (airplane model).

ことができる。

曲面ロケータの定義域は、作業環境である対象曲面の展開形状からなる平面領域であり、値域は自由曲面上の対象曲面である。対象とする曲面の任意の二点に対応する展開平面上の二点を結ぶ線は測地線に準ずる直線になることが、入力装置の操作性に有効に働く。すなわち、展開精度の範囲内において、ロケータを動かす感覚に対応する距離と、曲面形状を移動するロボットの動きとを比例の関係に保つことが可能となる。

6. ロボットシミュレーションの例

この章では、曲面ロケータを用いたロボットシミュレータおよび CAD の例を示す。航空機表面の洗浄作業は、従来曲面上のロボット軌跡を見いだすことが難しいために、自動化することが困難な作業である。

そこで、航空機洗浄用ロボットシミュレータの三次元入力システムとして曲面ロケータを用いた例を以下に示す。各種の洗浄ロールをもったロボットにより機体表面を洗浄するとき、洗浄された領域の色が変化するため、未洗浄の表面を認識することが容易となり、洗浄作業のシミュレーションを行うことが可能となる

(図 19)。図 20 はロボットシミュレータの画面である。

溶接作業は、溶接物から最適な距離に電極を位置決めすることと、一定速度で溶接ライン上を動かすということが必要である。図 21 は、作業環境である自動車モデルと溶接用ロボットシミュレータの入力システムとしての曲面ロケータのデータである平面展開形状を示している。

6.1 ロボット軌跡の二次元化

ロボットの作業環境である曲面の展開平面を曲面ロケータ空間と一致させることの利点は、曲面のハンドリングを良くすることのほか、曲面ロケータ平面上にロボットの移動軌跡を残すことができることにある。すなわち、作業対象である自由曲面上を三次元的にどのように移動すべきかということを、展開平面上に記録することができる。このように作業軌跡を平面上に記述することにより、ロボットの三次元教示を非常に簡略化することが可能となる。図 22 は航空機の表面洗浄処理用ロボットのシミュレーションにより生成したロボット軌跡である。

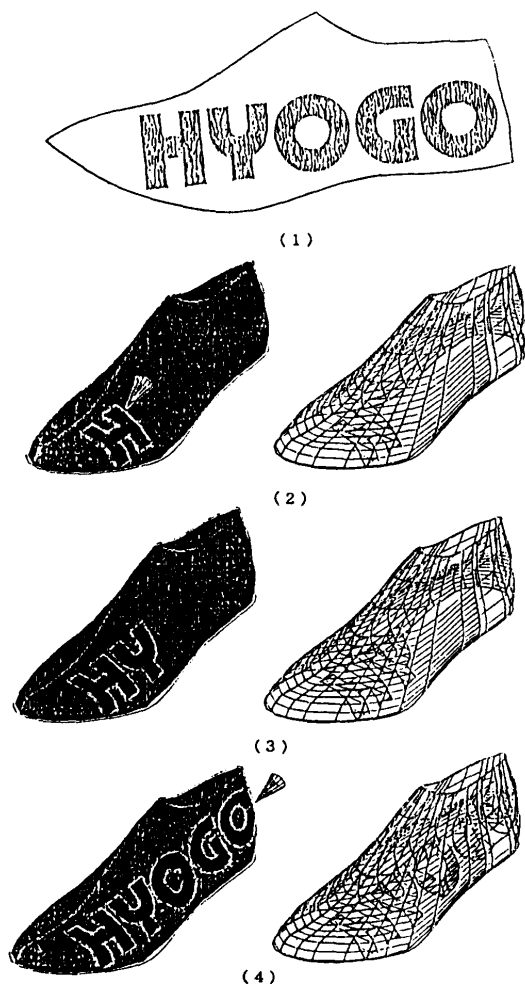


図 24 画像データの自由曲面への転写 (靴モデル)
Fig. 24 Transformation of visual data from 2-D to curved surface (shoes model).

6.2 画像データの自由曲面への転写

この節では、画像データを自由曲面上に転写することを考える。まず TV カメラなど光学的画像入力装置によって、各種テクスチャ・写真・絵画などをフレームメモリに貯える。そして、これらの画像データを、対象とする曲面を近似展開した平面空間上にマッピングすることにより、展開平面からのオペレータ入力の代わりに画像データを直接、曲面ロケータの入力データとすることができる。このようにして自由曲面への画像データの転写を行うことが可能となる。図 23 と図 24 に例を示す。

7. あとがき

筆者らは、自由曲面を平面に展開するため有限要素法を用いて解く手法について考察を行っている。本報告では、三次元グラフィックスの入力システムとし

て、平面展開手法をもとに構成した「曲面ロケータ」を提案した。この曲面ロケータを用いることにより、自由曲面を作業環境とする各種のロボット軌跡を見いだすためのシミュレータに適用し、その有効性を示した。加えて、画像データを自由曲面に転写することにより、塗装ロボット等のシミュレーションに応用できることを示した。

参考文献

- 1) Engelberger, J. F. (長谷川訳) : 応用ロボット工学, pp. 162-184, 朝倉書店, 東京 (1984).
- 2) Hopgood, F. ほか 3 名 (吉川訳) : コンピュータグラフィックス・基本ソフトウェア GKS, pp. 92-113, 啓学出版, 東京 (1984).
- 3) 島田哲夫, 多田幸生ほか 2 名 : 有限要素法による自由曲面の展開問題, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 54, No. 498, pp. 497-504 (1988).
- 4) 日本造船学会数値制御委員会編 : 造船における NC 技術, p. 101, 産報 (1968).
- 5) Foley, J. D. and Dam, A. D. (今宮訳) : コンピュータ・グラフィックス, pp. 191-550, 日本コンピュータ協会, 東京 (1984).
- 6) 伊理正夫, 児玉慎三, 須田信英 : 特異値分解とそのシステム制御への応用, 計測と制御, Vol. 21, No. 8, pp. 763-772 (1982).
- 7) Zienkiewicz, O. C. : *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York (1971).

(昭和 61 年 8 月 11 日受付)

(昭和 63 年 3 月 9 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(株)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イス、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。