

曲面ロケータによる三次元入力手法† —超音波探傷用ロボットシミュレータの場合—

島田 哲夫** 多田 幸生***

三次元グラフィックスシステムを用いた設計やロボット動作のオフライン教示において、操作性の良い入力方式が必要となる。現在、CAD やロボットシミュレータを用いて、設計工程や作業工程の自動化が求められているが、対象が自由曲面である場合、コマンドメニューや言語の組合せによって、曲面モデルの形状処理を行うことは非常に困難である。位置情報を入力する装置としてロケータがあり、従来より、三次元座標の入力に三次元ロケータを用いる手法が提案されているが、曲面形状上をなぞるなどの処理自体がむずかしく、操作性に問題があるという指摘がされている。そこで、作業対象である曲面上を確認しながら、しかも曲面から離れた任意の場所に基準点の位置指定ができ、操作性の良い三次元の入力が必要となる。本論文では、対象である自由曲面モデルの展開形状を基準平面とし、それぞれの点において、法線方向に可変のオフセット成分を付加した三次元領域を定義域にもつ入力システムを提案する。そして、航空機に用いられているハニカムサンドイッチなどの複合材やダクト・鋼管などの金属溶接部分の欠陥を見出すための超音波探傷用ロボットシミュレータを対象とし、本手法を適用した例をあげる。

1. ま え が き

三次元グラフィックスシステムを用いた設計やロボット動作のオフライン教示において、操作性の良い入力方式が必要となる。現在、CAD やロボットシミュレータを用いて、設計工程や作業工程を自動化することが求められているが、対象が自由曲面である場合、コマンドの組合せによって、曲面モデルの形状処理を行うことが非常に困難である。

位置情報を入力する装置としてロケータがあり、従来より、グラフィックスの三次元座標入力に三次元ロケータ¹⁾を用いる方法が提案されているが、曲面形状をなぞるなどの処理自体がむずかしく、操作性に問題があるという指摘がされている。これは、入力装置の定義域である三次元空間内において、作業領域である曲面上の位置指定を行うことが非常に困難であることによると考えられる。

そこで、筆者らは、入力装置の定義域と自由曲面上のひとつの領域（単領域）との対応をとるために、対象曲面を精度良く平面に展開²⁾することを手法の基礎においた「曲面ロケータ」³⁾という論理入力システムを提案し、航空機洗浄用ロボットシミュレータ等に適用することにより、その有用性を示した。

さらに、多様な三次元形状の設計や複雑なロボット軌跡の教示作業に適用するには、三次元グラフィックスの表示および対話機能を用いて、曲面上の単領域のみならず、三次元空間の任意の場所の位置を指定し、さらに処理を加えるための実用的な入力システムを開発する必要がある。

本報告では、航空機に用いられているハニカムサンドイッチなどの複合材やダクト・鋼管などの金属溶接部分の欠陥を見出すための超音波探傷用ロボットシミュレータを対象とした入力システムについて検討し、対象である曲面上を確認しながら、しかも曲面から離れた位置にロボットの基準点の位置指定を行うことができる三次元入力手法を提案する。そして、検査対象である自由曲面モデルの複数領域の展開形状を基準平面とし、それぞれの点において、法線方向に可変のオフセット成分を付加した三次元領域を定義域とする入力システムを開発した結果を以下に述べる。

2. 超音波探傷法の概略

以下の議論に必要な超音波探傷法として(1)噴流探傷法および(2)斜角探傷法についての概略を述べる。

2.1 噴流探傷法

航空機搭載レーダのアンテナは、電気的に大気と同様の特性をもち、しかも構造的には水滴の流入や風圧の影響を防ぐことができるようなレドーム⁴⁾とよばれる覆いをもっている。このレドームの壁には、ハニカムサンドイッチが用いられ、航空機部品に必要な軽さと強度および剛性を得ている。図1は、軸方向1,206.5mm、軸に垂直な面の最大幅1,054.0mmであるレドーム

† 3-D Input Method Using "Curved Surface Locator" — In the Case of Robot Simulator for Ultrasonic Inspection 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

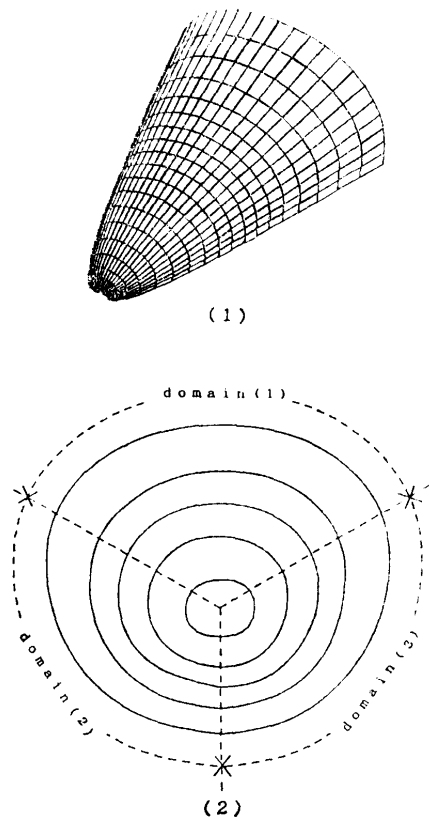


図1 レドームの曲面形状(1)と断面図(2)
Fig. 1 Radome model (1) and cross figure (2).

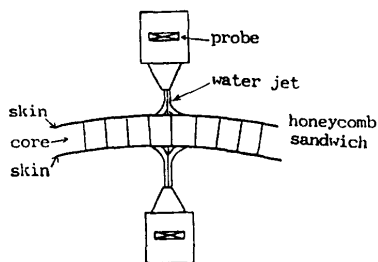
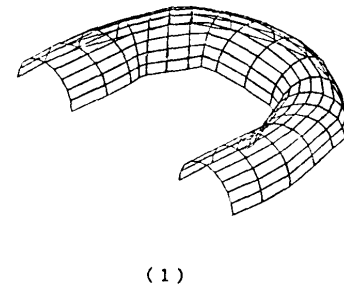
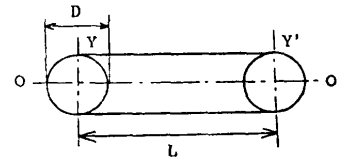


図2 噴流探傷法
Fig. 2 Water jet coupling method.

ム曲面を対象とし、三次元グラフィックス上に表示した曲面モデル(1)とその断面図(2)を示している。このような複合材料の内部に存在する気泡や、その他の欠陥を見出すための検査法として、超音波を用いた噴流探傷法⁵⁾がある(図2)。この探傷法は、複合材の上下に送信と受信の一对の探触子を対向させ、接触子と複合材の間をジェット水流で音響的に結合して超音波を伝搬していく。このとき受信信号が、あらかじめ定めたしきい値以下である場合に、複合材のその箇所は欠陥であると判断する。



(1)



(2)

図3 ダクトの曲面形状(1)と断面図(2)
Fig. 3 Duct model (1) and cross figure (2).

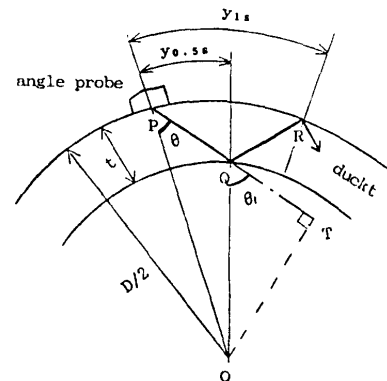


図4 斜角探傷法

Fig. 4 Angle beam technique.

2.2 斜角探傷法

通気・製粉用のダクトや海洋構造物に用いられる鋼管などの金属溶接部分の欠陥の検査法として、斜角探傷法⁶⁾がある。これは、管類の探傷面に対して斜めに進行する超音波を用いて探傷する方法である。図3は、外径 $D=40.0$ mm、 $Y-Y'$ 軸間の距離 $L=120.0$ mm、肉厚 $t=4.0$ mm、 $O-O'$ 平面が溶接面であるダクトの曲面形状の例である。図4のPに斜角探触子を置き、斜角 θ で超音波ビームを管材に入れる場合を想定する。このとき内面に入射する点をQ、入射角を θ_1 、その反射波が外面と交わる点をRとすると、図4中の \overline{OT} は、

$$\begin{aligned} \overline{OT} &= (D/2) \sin \theta \\ &= (D/2 - t) \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (1)$$

であるので、

$$\theta_1 = \sin^{-1}(\sin \theta / (1 - 2t/D)) \quad (2)$$

となる。斜角探傷法により欠陥を見出すための重要な値である \overline{PR} すなわち1スキップ距離 y_{1s} と0.5スキップ距離 $y_{0.5s}$ は θ_1 を用いて

$$y_{1s} = D(\theta_1 - \theta) \quad (3)$$

$$y_{0.5s} = D(\theta_1 - \theta)/2 \quad (4)$$

と表される。例に示したダクトの場合、斜角 θ を 45° とすると、 $y_{1s} = 11.95 \text{ mm}$ (同様に $y_{0.5s} = 5.97 \text{ mm}$) となる。斜角探傷子を、検査対象である溶接面から1スキップ距離はなれた位置に垂直に置き、溶接面に向かって走査させ、その反射波を測定することにより、欠陥を見出すことができる。

3. 曲面ロケータによる三次元入力手法

対象とする曲面モデル上はもとより、曲面から離れた三次元空間の任意の場所の位置指定を行うための入力手法について、以下に述べる。曲面ロケータ³⁾は、局所的に平面であるとみなした曲面を、精度よく平面に延展することを、手法の基礎においた入力システムである。しかし、広い範囲の曲面を対象とするとき、一つの平面として展開すると、非常に誤差の大きな平面形状となる場合がある。そこで、正確な平面形状を得るために、曲面を複数の領域に分け、相互の関係を保ちつつ、平面に展開することにする。また、対象曲面上の位置を見出すだけでなく、曲面上を確認しながら、さらに面の上下の任意の位置を指定することを考える。

3.1 複数領域の平面展開

まず曲面の複数の領域を、図5のように三角形メッシュに分割する。ここで領域(1)と領域(2)は節点 P_{b1} , P_{b2} , P_{b3} を共有するものとする。次に領域(1)の

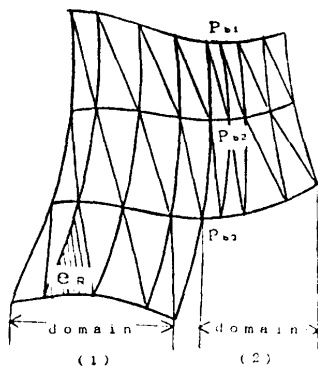


図5 複数曲面のメッシュ分割
Fig. 5 Discretization of curved surface (1) and (2) into mesh elements.

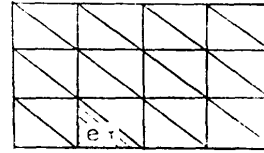


図6 領域(1)に対する初期平面形状のメッシュ分割
Fig. 6 Initial trial shape on a plane according to curved surface (1).

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6)。以下に平面展開の手法を簡単に述べる²⁾。まず対応する一組の三角形 e_r と三角形 e_t に着目し、曲面上の点 (x_R, y_R) を、変換行列 A と平面上の点 (x_T, y_T) を用いて表すと以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで形状変化を回転成分と伸縮成分に分けるために変換行列の特異値分解⁶⁾を行うと、

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_p & 0 \\ 0 & d_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (6)$$

となる。 ψ, β は回転角、 d_p, d_q は (A^T, A) の固有値の平方根であり、平面上の三角形 e_t を β 度回転させ、主軸方向に d_p, d_q 倍伸縮させたのち、さらに ψ 度回転させれば曲面上の e_r になることを示している。

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、平面上のある三角形要素は、単位長さが、 d_p, d_q 倍となるような、以下に示した異方性の線膨脹率 α_p, α_q をもつ仮想的な特性を有するものとする。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p &= d_p - 1 \\ \alpha_q &= d_q - 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

単位時間の温度上昇にともない、主軸である β 方向とその垂直方向を伸縮させるような仮想材料のもつ熱歪 $\{e\}$ は、

$$\{e\} = [(T)^T]^{-1} \begin{pmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

と表すことができる。ここで

$$(T) = \begin{pmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & -\sin \beta \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{pmatrix} \quad (9)$$

であり、 β は前述の特異値分解における回転角 β である。そして実際には、熱歪から生じる等価な力を各要

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〕, 節点力を〔f〕とすると, 剛性方程式は

$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} + \int (B)^T (D) \{ (T)^T \}^{-1} \times \begin{pmatrix} d_p - 1 \\ d_q - 1 \\ 0 \end{pmatrix} dv \quad (10)$$

となる ($\int dv = \int t dx dy$ である。v は対象とする三次元空間であり, 要素の厚みを t とおくと要素三角形の全域について積分することを意味する.)。これを全系に組み立てることにより, 全系の変位 U を算出することができる。最後に, この変位をもとに形状の評価関数を求め, 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, 上述の変位 U に適当な係数 α をかけた値と, 平面形状における各節点座標 x を足し加えた値を, 新たな平面形状の節点座標 $x' (= x + \alpha \cdot U)$ とすることで, 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。

このようにして, 設定値以下である試行形状を平面展開形状とすることが可能となる。

次に, 図5の領域(1)と境界線上の節点 P_{b1}, P_{b2}, P_{b3} を共有する領域(2)を平面に展開することを考える。

領域(2)の初期平面形状は, 領域(1)の平面展開形状の節点 T_{b1}, T_{b2}, T_{b3} と対応する節点の位置関係を同じようにとり, かつ曲面上の領域(2)と位相的に等しい形状を設定する(図7)。この初期平面形状をもとに境界線上の節点座標を固定しつつ, 上述の手法に従い平面展開を行う。このようにして, 対象とする曲面上のすべての領域について, 展開した形状を組み合わせて, 複数領域の平面展開形状を得ることが可能となる(図8)。

3.2 曲面ロケータを用いた三次元入力手法

次に, 対象となる曲面モデルの定式化を行うため, サンプルした点の位置とその正接をもとに, 求めた Hermite 型曲面パッチ¹⁾ $K(u, v) (= K^x(u, v), K^y(u, v), K^z(u, v))$ は

$$K(u, v) = (b_0(u), b_1(u), b_0(v), b_1(v)) \cdot G \cdot \begin{pmatrix} b_0(v) \\ b_1(v) \\ b_0(v) \\ b_1(v) \end{pmatrix} \quad (11)$$

である。
ここで

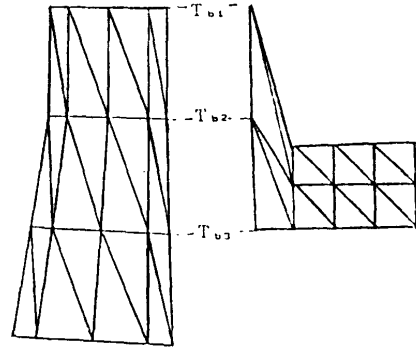


図7 領域(1)の平面展開形状と領域(2)の初期平面形状

Fig. 7 Flattened form and initial trial shape according to curved surface (1) and (2).

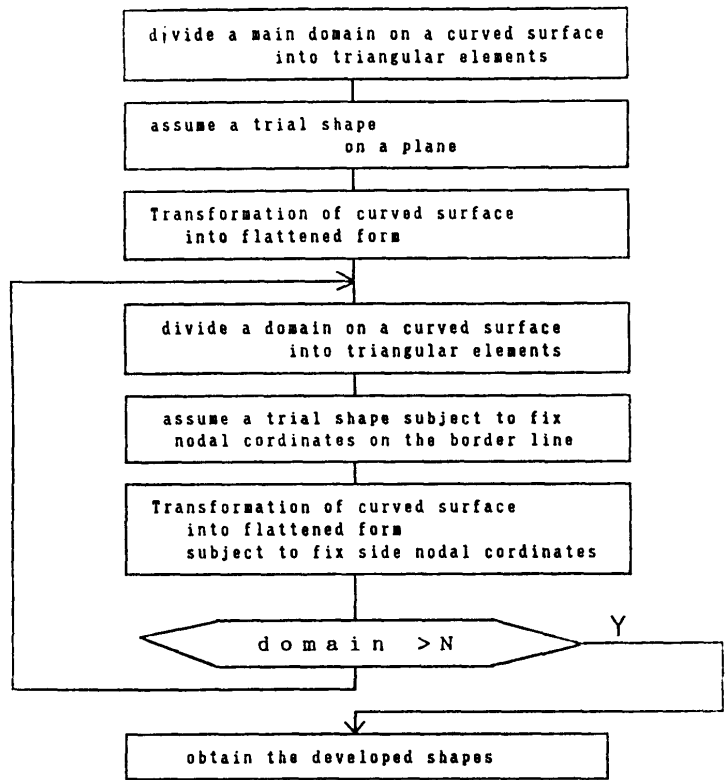


図8 複数曲面の平面展開手順

Fig. 8 Algorithm of development from various curved surfaces to flattened forms.

$$\left. \begin{aligned} b_0(t) &= 2t^3 - 3t^2 + 1 \\ b_1(t) &= b_0(1-t) \\ \tilde{b}_0(t) &= t(1-t)^2 \\ \tilde{b}_1(t) &= -\tilde{b}_0(1-t) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$G = \begin{pmatrix} P(0,0), & P(0,1), & P_v(0,0), & P_v(0,1) \\ P(1,0), & P(1,1), & P_v(1,0), & P_v(1,1) \\ P_u(0,0), & P_u(0,1), & 0, & 0 \\ P_u(1,0), & P_u(1,1), & 0, & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

さらに $P(i, j)$ ($i, j=0, 1$) は、一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。

この曲面モデルをもとに、曲面上の点を確認しながら、曲面の法線方向の位置を指定するための入力システムを二次元ロケータ（二次元の位置を指定するための装置）とバリュエータ（値を指定するための装置）を用いて構成する方法を以下に示す。

この曲面パッチ上の任意の点の u および v 方向の接線ベクトルは

$$K_u(u, v) = \frac{K(u + \delta u, v) - K(u - \delta u, v)}{2 \cdot \delta u} \quad (14)$$

$$K_v(u, v) = \frac{K(u, v + \delta v) - K(u, v - \delta v)}{2 \cdot \delta v} \quad (15)$$

となる。ここで $\delta u, \delta v$ は u, v 方向の微小な値とする。法線ベクトルは接線ベクトルの外積を用いて

$$K_w(u, v) = \frac{K_u(u, v) \times K_v(u, v)}{|K_u(u, v) \times K_v(u, v)|} \quad (16)$$

と表すことができる。これをもとに曲面上からオフセット値 w の位置を指定することを考える。すなわち、この法線ベクトルとオフセット値 w から、パラメータ (u, v, w) に対応する $Q(u, v, w) = (Q^x(u, v, w), Q^y(u, v, w), Q^z(u, v, w))$ は、

$$Q(u, v, w) = K(u, v) + K_w(u, v) \cdot w \quad (17)$$

となる。

曲面パッチを単位として、 u 方向に M^* 個、 v 方向に N^* 個からなる自由曲面上の第 k 番目領域 ($k=1, \dots, K$) の平面展開形状におけるパラメータ (U^*, V^*, W^*) を、 (i, j) 番目のパッチのパラメータ値 (u, v) とオフセット値 w を用いて表すことができ、

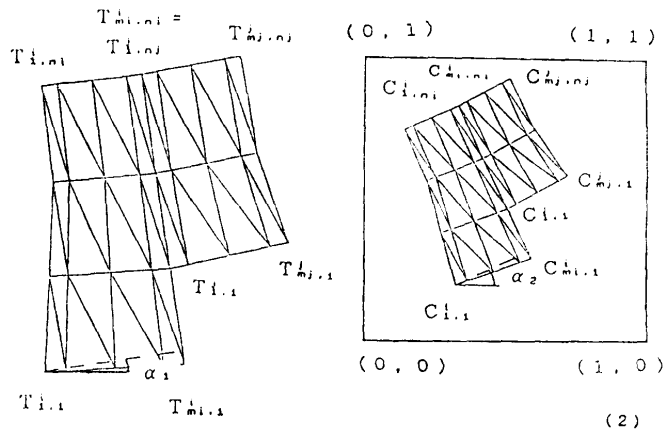
$$\left. \begin{aligned} U^* &= (i-1)/M^* + u/M^* \\ V^* &= (j-1)/N^* + v/N^* \\ W^* &= w \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

となる。

ここで、複数領域の平面展開形状を二次元ロケータの平面領域上に転写することを考える。図 9 (1) は、 $(T^{i_1,1}, T^{i_{m_1,1}}, T^{i_1,n_1}, T^{i_{m_1,n_1}})$ を端点とする領域 i の平面展開データと $(T^{j_1,1}, T^{j_{m_j,1}}, T^{j_1,n_j}, T^{j_{m_j,n_j}})$ を端点とする領域 j の平面展開データである。これらのデータを適当な値 α と d により、図形変換を行って、二次元ロケータ上に転写することが可能である。すなわち、 α 度 ($\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$) 回転させ、つぎに d 倍させたことにより、曲面ロケータのデータ $C^k_{ij} = (SX^k_{ij}, SY^k_{ij})$ を導出することができる (図 9 (2))。

$$\left. \begin{aligned} SX^k_{ij} &= d(TX^k_{ij} - TX^k_{i1}) \cos \alpha \\ &\quad - d(TY^k_{ij} - TY^k_{i1}) \sin \alpha + SX^k_{i1} \\ SY^k_{ij} &= d(TX^k_{ij} - TX^k_{i1}) \sin \alpha \\ &\quad + d(TY^k_{ij} - TY^k_{i1}) \cos \alpha + SY^k_{i1} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

上述したデータを用いて、三次元座標の指定をする方法を述べる。まず、曲面ロケータ上の一点 $S_0 = (SX_0, SY_0)$ をピック（位置を指定すること）し、その点におけるオフセット値 w をバリュエータ（値を指定するための装置）によって入力する。次に S_0 と曲面ロケータを構成する四角形メッシュデータ $(S^k_{ij}, S^k_{i+1,j}, S^k_{i+1,j+1})$ とを比較し、領域の番号 k と曲面パッチの番号 (i, j) を見出す (図 10)。さらに曲面パッチのパラメータ (u, v) は式 (20) より導出することが可能となる。



(1) 平面展開データ (2) 曲面ロケータデータ
(1) Data of flattened forms. (2) Data of curved surfaces locator.

図 9 平面展開データと曲面ロケータデータ
Fig. 9 Data of flattened forms and curved surfaces locator.

$$\left. \begin{aligned} SX_0 &= (1-v)(1-u)SX^k_{i,j} + u(1-v)SX^k_{i+1,j} \\ &\quad + (1-u)vSX^k_{i,j+1} + uvSX^k_{i+1,j+1} \\ SY_0 &= (1-v)(1-u)SY^k_{i,j} + u(1-v)SY^k_{i+1,j} \\ &\quad + (1-u)vSY^k_{i,j+1} + uvSY^k_{i+1,j+1} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式(20)とオフセット値 w より (u, v, w) を求め、式(17)に代入することにより、三次元座標 $Q(u, v, w)$ が算出される(図11)。このようにして、対象とする曲面の複数領域を平面に展開したデータを基礎とした曲面ロケータ上の位置と、その点におけるオフセット値を指定することにより、曲面から離れた任意の三次元座標を位置指定することが可能となる。

4. 超音波探傷のためのロボット軌跡の数示

4.1 噴流探傷用ロボットのシミュレーション

前述の三次元入力手法を用いて、超音波探傷ロボットの軌跡を生成する方法について記述する。まず最初に、航空機搭載レドームに用いられているハニカム・

サンドイッチ構造のスキン材とコア材との接着面の欠陥位置を自動的に見出すためのロボット教示システムとして、曲面ロケータを構成した例を以下に示す。

レドームに対して、噴流法に基づく超音波探傷を行う例として、探触子が曲面の上下 50~80 mm、走査間隔 50 mm となるようなロボット軌跡を見出す場合を考える。まず、広範囲の曲面を精度良く平面に延展するためにレドーム曲面を三つの領域に分割する(図1(2))。領域(1)に対応して平面を分割したものを初期平面形状(図12(1))とする。この形状をもとに、前述の平面展開手順に従って得られた平面展開形状が図12(2)である。次に、領域(2)と領域(3)の初期平面形状として境界線上の節点 $T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}, T_{b4}, T_{b5}, T_{b6}$ を領域(1)の平面展開形状の対応する節点と同じ位置関係になるように設定する(図13)。これをもとに、上述の節点座標を拘束条件として平面に展開した形状が図14である。この平面展開データを二次元ロケータの定義領域上に転写したデータが曲面ロケータデータである。この曲面ロケータ上に等間隔の軌跡を描く(図15)。そして、探傷用ロボットを動かすためのロボット軌跡は、つぎのようにして得ることとする。すなわち、軌跡上の点をピックし、その点における法線方向のオフセット値をバリュエータを用

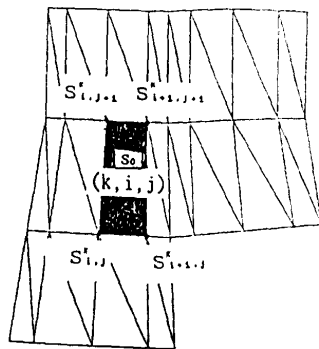


図10 領域番号とパッチ番号の算出
Fig. 10 Identification of k -th domain and (i, j) -th patch.

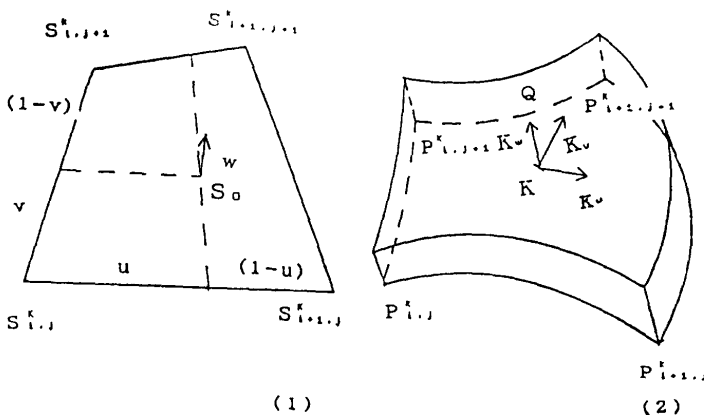
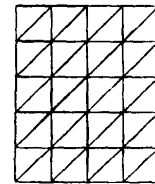
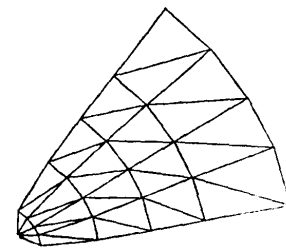


図11 三次元座標と法線ベクトルの導出
Fig. 11 Derivation of 3D-coordinates and normal vector.



(1)



(2)

図12 レドームの領域(1)に対応する初期平面形状と平面展開形状
Fig. 12 Initial trial shape and flattened form according to domain (1) of radome.

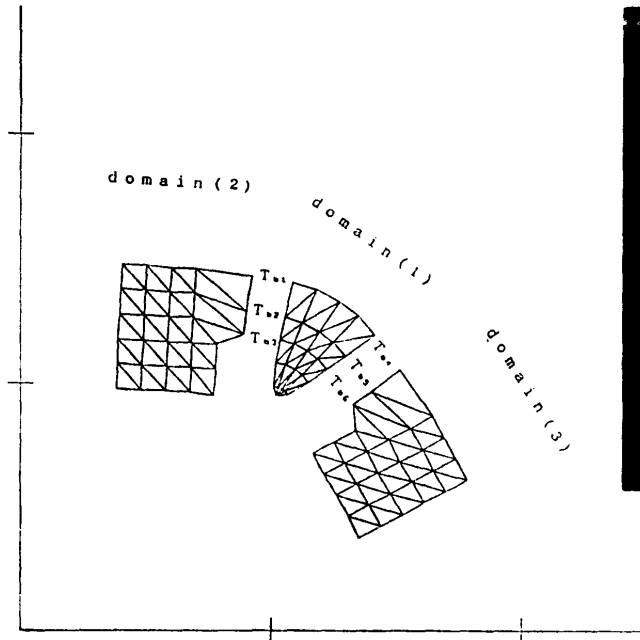


図 13 レドームの領域(2)および(3)に対する初期平面形状
 Fig. 13 Initial trial shapes according to domain (2) and (3) of radome.

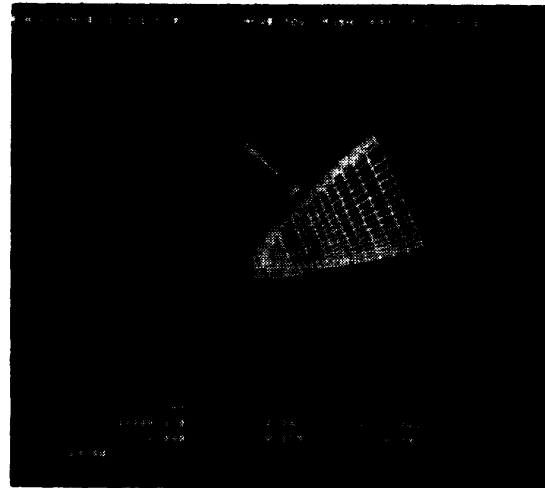


図 16 ロボットシミュレーション(レドームモデル)
 Fig. 16 Robot simulation (Radome model).

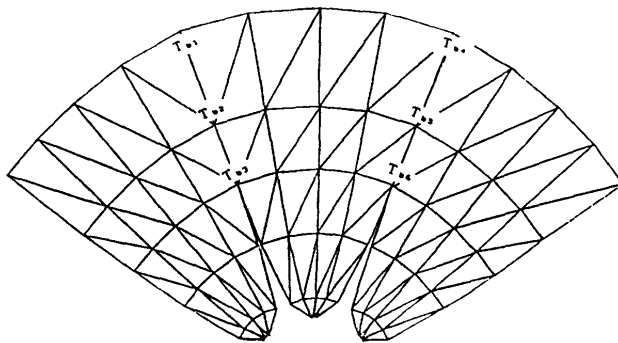


図 14 レドームの平面展開形状
 Fig. 14 Flattened forms of radome.

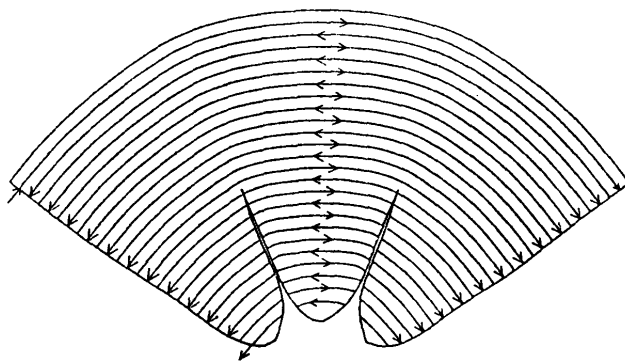


図 15 平面展開形状上のロボット軌跡 (レドームモデル)
 Fig. 15 Robot loci on the flattened form (Radome model).

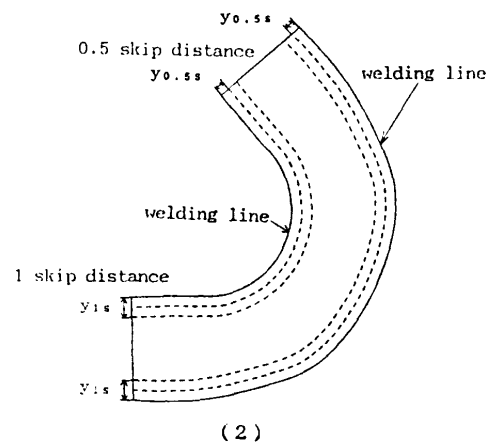
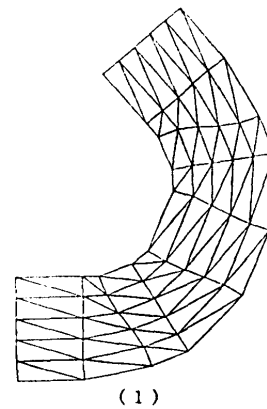


図 17 ダクトの平面展開形状とスキップ距離
 Fig. 17 Flattened form of duct and skip distance.

いて指定することにより、三次元空間の位置指定が可能となる。ロボット軌跡の間隔を 50 mm として一定にすることにより、レドーム表面に対して、均一な探傷作業が可能となる。レドーム曲面上の欠陥の場所を探傷するため、上述の方法を用いて、ロボット軌跡を作成するシミュレーションのディスプレイ画面を図 16 に示す。

4.2 斜角探傷用ロボットのシミュレーション

つぎに、斜角探傷法に基づくロボット教示システムの例として、ダクトの溶接部の欠陥を見出すためのロボット軌跡を、曲面ロケータを用いて作成することにする。

ここで対象とするダクト(図 3)の溶接面に対し、探触子から出るビームの斜角を $\theta=45^\circ$ とする。探触子をダクト曲面上の溶接部付近に置き、曲面上を移動させることにより、探傷していく。このようなロボットの軌跡を見出すためにダクト上半分の曲面を平面に展開し、曲面ロケータを構成する(図 17(1))。さらに図 17(2)に示したように溶接ラインを基準とし、

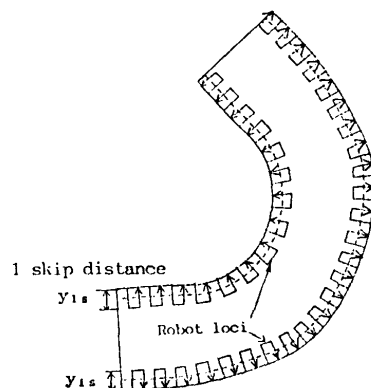


図 18 平面展開形状上のロボット軌跡(ダクトモデル)
Fig. 18 Robot loci on the flattened form (Duct model).

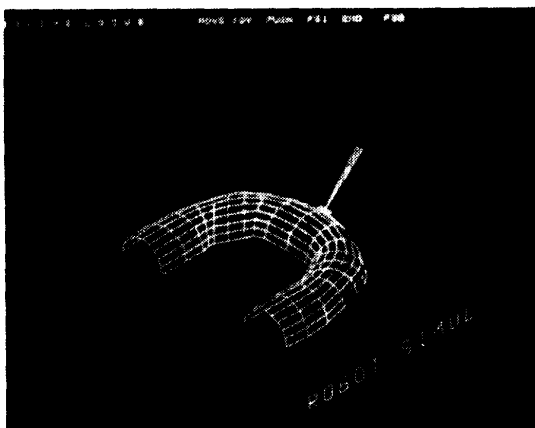


図 19 ロボットシミュレーション(ダクトモデル)
Fig. 19 Robot simulation (Duct model).

1 スキップ距離 ($y_{12}=11.95$ mm) はなれた点を結び、その曲線を走査の基準とする。そして斜角探傷子を溶接面に垂直に、しかも 1 スキップ距離はなれた点から溶接ラインに向け移動させる。この動作を繰り返し行うことにより、探傷ロボットの曲面ロケータ上の走査軌跡が得られる(図 18)。図 19 は、ダクト形状の曲面の欠陥を探傷するため、本手法を用いて、ロボット軌跡を作成するシミュレータのディスプレイ画面である。

5. む す び

本報告では、グラフィックスの表示および対話機能を用いて、複雑な三次元形状の設計やロボット軌跡の教示作業をするための三次元入力手法を検討した。

まず、複数領域の曲面形状を精度良く平面に延展した展開形状を基準平面とする。そして、それぞれの点において、可変のオフセット成分を付加することにより入力装置の定義領域とグラフィックスの対象領域との間に密接な対応関係のある論理入力システムを開発した。これにより、従来曲面の単領域上に限られていた曲面ロケータの適用範囲を複数領域上を含む三次元空間に広げることが可能となり、複雑な曲面に対し面を確認しながら、曲面の法線方向上の三次元座標の位置を指定することができた。さらに、本手法を超音波探傷用ロボットシミュレータに適用し、教示システムの操作性の改善を行うことが可能となった。なお今後は、対象とする曲面モデル自体の修正を操作性良く行う手法を開発していく予定である。

参 考 文 献

- 1) Foley, J.D. and Dam, A.V.: *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, pp. 516-519, Addison-Wesley, New York (1982).
- 2) 島田哲夫, 多田幸生, ほか: 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, Vol. 54, No. 498, pp. 497-504 (1988).
- 3) 島田哲夫, ほか: 自由曲面を作業対象とするロボットシミュレータの開発, 情報処理学会グラフィックスと CAD シンポジウム講演論文集, p. 11 (1986).
- 4) 三橋清通, ほか: 航空機搭載用広帯域レドームの研究, 川崎重工技報, No. 92, pp. 44-53 (1986).
- 5) 日本非破壊検査協会編: 超音波探傷試験 A, 日本非破壊検査協会, 東京 (1976).
- 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 63 年 2 月 3 日受付)
(平成 元年 1 月 17 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。