位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく 自由曲面加工形状の評価法に関する基礎研究*

青山 英樹** 岸 浪 建 史*** 斎 藤 勝 政***

An Evaluation Method of a Machined Shape with Free-form Surfaces Based on the Detection of Positional Vectors and Unit Normal Vectors

Hideki AOYAMA, Takeshi KISHINAMI and Katsumasa SAITO

This paper proposes an evaluation method of a machined shape with free-form surfaces and describes the basic way of thinking for the evaluation in which free-form surfaces are classified into a style surface and a function surface according to the application purpose. The evaluation items of a style surface and a function surface are determined as a unit normal vector and a positional vector respectively. The transformation from a designed shape to a machined shape is assumed as a model of a coordinate transformation, and the permitted transformations in the evaluations of a style surface and a function surface are clarified. The evaluation procedure based on the detection of positional vectors and unit normal vectors at sixteen arbitrary points on a patch of a machined surface is described in detail. In addition, the validity of the proposed evaluation method is examined by a computer simulation.

Key words: measurement, evaluation, free-form surface, machined shape, positional vector, unit normal vector, style design, CAD/CAM

1. 緒 言

自動車・航空機のボディや家庭電器製品の外装形状の設計において、意匠性や機能性を向上する目的により自由曲面形状が要求され、それを対象としたCAD/CAMシステムが開発されてきた。自由曲面の設計加工技術が実用化されるとともに、その加工形状の測定評価技術の確立が望まれてきた。

この目的を達成するため三次元座標測定機による自由曲面形状の測定が行われているが、自由曲面は法線方向が任意に変化するため、三次元座標測定機により得られるプローブ中心座標値から測定点座標値を求めることが大きな課題¹⁾となっている。この問題を解決するため、筆者らは自由曲面上の任意点の位置ベクトルと単位法線ベクトルの直接測定を可能とする面法線検出プローブ²⁾とそれを基にした測定システム³⁾に関する研究を行ってきた。

本研究は自由曲面加工形状の評価における基本的な

考え方とその評価項目を明らかにし、位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の評価法を提案する。また、設計形状（計算機モデル）から加工形状（物理モデル）への変換を座標変換としてモデル化し、自由曲面加工形状を評価するうえで許容できる座標変換を明らかにするとともに、本研究で提案する評価法と従来行われているベストフィット法^{4)~6)}との評価の違いについて検討する。さらに計算機シミュレーションにより提案する評価法の妥当性を確認する。

2. 加工形状評価の基本的考え方と評価項目

自由曲面は意匠性の向上を目的として用いられる場合が多いが、意匠形状の設計すなわちスタイルデザインにおいて、設計形状の評価はシルエット曲線あるいはハイライト曲線^{7,8)}を基に視覚（感覚）により行われている。式(1)は観測点を無限遠点としたときのシルエット曲線式を、また式(2)はハイライト曲線式を表している。

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{N} = 0 \quad (1)$$

$$-2(\mathbf{a} \cdot \mathbf{N})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{N}) + (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) = \text{const} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{N}$ は設計曲面の単位法線ベクトルを表しており、 $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ はそれぞれ入射光線方向、視線方向を表

* 原稿受付 平成3年2月12日。1990年度精密工学会秋季大会学術講演会（平成2年9月28日）にて発表

** 正会員 苫小牧工業高等専門学校（苫小牧市宇錦岡443番地）

*** 正会員 北海道大学工学部（札幌市北区北13条西8丁目）

Table 1 Evaluation item

Type of free-form surface	Evaluation item
Style surface	Unit normal vector
Function surface	Positional vector

す単位ベクトルである。式(1)、式(2)より、意匠性の向上を目的とする自由曲面の設計形状は単位法線ベクトルに基づき評価されていることが分かる。したがって本研究では、意匠性の向上を目的とする自由曲面を意匠曲面と呼ぶこととし、その加工形状は単位法線ベクトルに基づき評価されるべきであると考ええる。

しかし金型のキャビティブロックとコアブロックの分かれ面であるパーティング面⁹⁾に自由曲面を用いる場合、キャビティブロックとコアブロックの間にすきまが存在しないことが加工面(パーティング面)の有すべき最大の機能となる。本研究ではこのような機能を有する自由曲面を機能曲面と呼ぶこととし、その加工形状は位置ベクトルに基づき評価されるべきであると考ええる。

表1は、意匠曲面と機能曲面の加工形状の評価項目がそれぞれ単位法線ベクトルと位置ベクトルであることを示している。したがって意匠曲面と機能曲面の評価において、設計形状と加工形状の単位法線ベクトルあるいは位置ベクトルの比較を行うことになるが、単位法線ベクトルと位置ベクトルが有意義であるためには、計算機モデル空間と物理モデル空間の座標系および原点が明確に認識されている必要がある。

一方、従来自由曲面加工形状の評価法として採用されているベストフィット法は、物理モデル空間に任意に設定された測定座標系を基準として得られた加工形状の測定座標値を並進変換および回転変換により設計形状に可能な限り接近させる手続きを基礎としており、測定座標値の相対的位置関係と設計形状との相関から加工形状を評価する方法である。このように同評価法は、計算機モデルと物理モデルの座標系および原点を明確には意識しておらず、提案する意匠性評価および機能性評価の概念と基本的に異なっている。

3. 設計形状から加工形状への変換モデル

自由曲面の設計形状は一般に、CAD システムにおいてパラメータ u, v の重み関数を用いた補間式により計算機モデルとして構築されており、その加工形状はCAM システムにより計算機モデルから物理モデルへと写像され生成される。ここでは設計形状から加工形状の写像を設計座標空間(計算機モデル空間)から加工座標空間(物理モデル空間)への座標変換として

モデル化し、座標変換と加工形状評価の関係について検討する。この設計形状から加工形状の写像を、座標変換モデルと呼ぶ。本研究では3次 Bézier 補間式を対象として検討を行っているが、双3次 Coons 補間式、3次 Bézier 補間式や双3次 Coons 補間式を応用した補間式、そしてこれらと補間次数が異なる補間式に対しても同様の議論の展開が可能である。ただし、補間式の次数が3次と異なる場合には、第4章で述べている評価に必要とされる測定点数がその次数に応じて増減する。

3.1 位置ベクトルと単位法線ベクトル

設計形状の位置ベクトル ($P_x(u, v)$, $P_y(u, v)$, $P_z(u, v)$) は、式(3)で表されるように16個の制御点 ($Q0x, \dots, Q15x$, $Q0y, \dots, Q15y$, $Q0z, \dots, Q15z$) に基づくパラメータ u, v の補間式で与えられている。

$$\left. \begin{aligned} P_x(u, v) &= f(u, v, Q0x, \dots, Q15x) \\ P_y(u, v) &= f(u, v, Q0y, \dots, Q15y) \\ P_z(u, v) &= f(u, v, Q0z, \dots, Q15z) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これより、設計形状の単位法線ベクトル ($N_x(u, v)$, $N_y(u, v)$, $N_z(u, v)$) は、位置ベクトルのパラメータ u, v 方向の接線ベクトルの外積より式(4)のように導くことができる。

$$\left. \begin{aligned} N_x(u, v) &= (P_y^u \cdot P_z^v - P_z^u \cdot P_y^v) / N_v \\ N_y(u, v) &= (P_z^u \cdot P_x^v - P_x^u \cdot P_z^v) / N_v \\ N_z(u, v) &= (P_x^u \cdot P_y^v - P_y^u \cdot P_x^v) / N_v \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)において、 N_v は次式(5)で与えられる。

$$N_v = \sqrt{(N_x(u, v))^2 + (N_y(u, v))^2 + (N_z(u, v))^2} \quad (5)$$

また、記号 P_a^b (a は x, y, z を、 b は u, v を表している) は次式(6)で表され、同記号は本論文において以下同様に用いられる。

$$P_a^b = \frac{\partial P_a(u, v)}{\partial b} \quad (6)$$

座標変換モデルの変換マトリクス M を式(7)とすると、加工形状の位置ベクトル ($P'_x(u, v)$, $P'_y(u, v)$, $P'_z(u, v)$) は式(8)により表される。

$$M = \begin{bmatrix} a & d & g & t_x \\ b & e & h & t_y \\ c & f & i & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} P'_x(u, v) \\ P'_y(u, v) \\ P'_z(u, v) \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} P_x(u, v) \\ P_y(u, v) \\ P_z(u, v) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(7)において、 $a \sim i$, t_x, t_y, t_z は実定数である。

これより、加工形状の単位法線ベクトル ($N'_x(u,$

v), $N'_y(u, v)$, $N'_z(u, v)$) は式 (3), (4), (7), (8) より次式 (9) のように導くことができる。

$$\left. \begin{aligned} N'_x(u, v) &= \{(b \cdot P_x^u + e \cdot P_y^u + h \cdot P_z^u) \\ &\quad \cdot (c \cdot P_x^v + f \cdot P_y^v + i \cdot P_z^v) \\ &\quad - (c \cdot P_x^u + f \cdot P_y^u + i \cdot P_z^u) \\ &\quad \cdot (b \cdot P_x^v + e \cdot P_y^v + h \cdot P_z^v)\} / N'_v \\ N'_y(u, v) &= \{(c \cdot P_x^u + f \cdot P_y^u + i \cdot P_z^u) \\ &\quad \cdot (a \cdot P_x^v + d \cdot P_y^v + g \cdot P_z^v) \\ &\quad - (a \cdot P_x^u + d \cdot P_y^u + g \cdot P_z^u) \\ &\quad \cdot (c \cdot P_x^v + f \cdot P_y^v + i \cdot P_z^v)\} / N'_v \\ N'_z(u, v) &= \{(a \cdot P_x^u + d \cdot P_y^u + g \cdot P_z^u) \\ &\quad \cdot (b \cdot P_x^v + e \cdot P_y^v + h \cdot P_z^v) \\ &\quad - (b \cdot P_x^u + e \cdot P_y^u + h \cdot P_z^u) \\ &\quad \cdot (a \cdot P_x^v + d \cdot P_y^v + g \cdot P_z^v)\} / N'_v \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式 (9) において N'_v は式 (10) で与えられる。

$$N'_v = \sqrt{(N'_x(u, v))^2 + (N'_y(u, v))^2 + (N'_z(u, v))^2} \quad (10)$$

先に述べた自由曲面加工形状の評価における基本的考え方に従うならば、意匠曲面が適当であると判断できる条件は式 (11) で、機能曲面が適当であると判断できる条件は式 (12) で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} N'_x(u, v) &= N_x(u, v) \\ N'_y(u, v) &= N_y(u, v) \\ N'_z(u, v) &= N_z(u, v) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} P'_x(u, v) &= P_x(u, v) \\ P'_y(u, v) &= P_y(u, v) \\ P'_z(u, v) &= P_z(u, v) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式 (4) と式 (9) より、式 (11) を満足する変換マトリクス M の十分条件は式 (13) で、また式 (7) と式 (8) より、式 (12) を満足する変換マトリクス M の必要十分条件は式 (14) で表すことができる。また、式 (12) の条件は式 (11) の十分条件であるため、機能曲面であるならば意匠曲面としての条件を満足していることが分かる。

$$\left. \begin{aligned} b &= c = d = f = g = h = 0 \\ a &= e = i = s \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} b &= c = d = f = g = h = 0 \\ t_x &= t_y = t_z = 0 \\ a &= e = i = 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

したがって、変換マトリクス M が式 (15) で表されるならば、その加工形状は設計形状の意匠性を満足していると評価でき、変換マトリクス M が式 (16) で表されるならば機能性を満足していると評価できる。

$$M = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & t_x \\ 0 & s & 0 & t_y \\ 0 & 0 & s & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式 (15) で表される変換マトリクス M は、設計形状から加工形状への写像において、 X, Y, Z 方向に等倍率 (s 倍) の拡大縮小変換と、 X, Y, Z 方向にそれぞれ t_x, t_y, t_z の並進変換を許容している。また式 (16) で表される変換マトリクス M は単位マトリクスであり、設計形状と加工形状の完全な一致を要求している。

一方、従来行われているベストフィット法は、設計形状に対して加工形状の並進変換、回転変換を許容しており、この点において提案する意匠曲面評価、機能曲面評価のどちらの考え方も一致していない。

3.2 座標変換モデルと加工形状評価

設計形状から加工形状への座標変換モデルの変換マトリクスとその変換モデルの原因となる主な加工誤差要因、および本研究で提案した意匠曲面評価、機能曲面評価とベストフィット法に基づく評価について定性的な検討を行う。表 2 は検討結果を示しており、座標変換モデル、その原因となる主な加工誤差要因、およびその座標変換により生成された加工形状の評価結果 (○ 印は適、× 印は不適を表す) を表している。

表 2 に示されているように、本研究で提案する意匠曲面の評価は並進変換と拡大縮小変換 (x, y, z 方向等倍) の原因となる加工誤差に対して寛容であり、機能曲面の評価はいかなる加工誤差も寛容としていない。一方ベストフィット法による評価は並進変換と回転変換の原因となる加工誤差に対して寛容となっており、ベストフィット法と提案する意匠曲面評価法では拡大縮小変換と回転変換に対して逆の評価が得られている。

4. 自由曲面加工形状の評価法の提案

4.1 評価法の概要

図 1 は自由曲面形状の設計、加工、評価の一連の関係を示している。設計形状は CAD システムにおいて設計者より位置ベクトル補間式が与えられ、計算機モデルとして構築される。同時にこの位置ベクトル補間式より設計形状の単位法線ベクトル補間式が導かれる。また加工形状は、CAM システムにより設計形状から物理モデルとして写像され形成される。

設計形状から加工形状への写像において設計座標系との関係が明らかな加工座標系を形成し、加工形状を測定する際、この加工座標系を同定し基準とすること

Table 2 Relationship between coordinate transformations and evaluation results

Model of coordinate transformation	Machining errors causing coordinate transformation	Positional vector	Unit normal vector	Best-fit method	Proposed method	
					Style surface	Function surface
Identity matrix	Nothing	constant	constant	○	○	○
Translation	Deflection of cutting tool, Errors of reference planes, Short rigidity of machine tool	change	constant	○	○	×
Scaling (with equal ratios)	Tool wear, Radius error of cutting tool, Uniform expansion of work by heat	change	constant	×	○	×
Scaling (with different ratios)	Deflection of cutting tool, Un-uniform expansion of work by heat	change	change	×	×	×
Rotation	Errors of reference planes, Short rigidity of machine tool	change	change	○	×	×
Shear	Short rigidity of machine tool, Deflection of cutting tool	change	change	×	×	×

Fig. 1 Schematic flowchart of proposed evaluation method

Table 3 Evaluation of machined shape

Transformation matrix M	Evaluation
Equation (15)	Suitable for style surface
Equation (16)	Suitable for function surface
Not Equations (15) and (16)	Un-suitable for style surface and function surface

により位置ベクトルと単位法線ベクトルの測定が可能となる。測定位置ベクトルと測定単位法線ベクトルから加工形状の位置ベクトル補間式および単位法線ベクトル補間式を導き設計形状のそれらと比較し、設計形状から加工形状への変換マトリクス M が式 (15) を満足するのか、式 (16) を満足するのか、あるいはどちらも満足しないのかを判断する。

変換マトリクス M は、設計形状と加工形状の単位法線ベクトルが等価である場合には式 (15) を満足し、設計形状と加工形状の位置ベクトルが等しい場合には式 (16) を満足する。したがって表 3 に示すように、加工形状は変換マトリクス M が式 (15) で表される

場合には意匠曲面として適当であり、式 (16) で表される場合には機能曲面として適当であると評価できる。また、変換マトリクス M が式 (15)、式 (16) で表されない場合は、加工形状は意匠曲面としても機能曲面としても適当であるとは評価できない。

4.2 測定点のパラメータ値の必要性と算出法

加工形状が意匠曲面あるいは機能曲面として適当であると仮定するならば、設計形状から加工形状への変換マトリクス M は式 (15) または式 (16) を満足し、加工形状補間式のパラメータ u, v の重み関数は設計形状補間式のそれと等しくなる。したがってこの仮定を前提とするならば、加工形状補間式のパラメータ u, v の重み関数が既知となり、加工面上の 1 曲面パッチに関する任意の 16 点の位置ベクトル値とそれらの点のパラメータ値 u, v より、その加工曲面パッチの位置ベクトル補間式を求めることができる。

変換マトリクス M が式 (16) を満足する時、すなわち設計形状と加工形状が完全に一致する時、図 2 に

Fig. 2 Iterative calculation based on positional vector

Fig. 3 Iterative calculation based on unit normal vector

示すように設計形状の位置ベクトル補間式と加工面の測定位置ベクトル値に基づく反復計算法により測定点のパラメータ値 u, v を算出できる。位置ベクトルに基づく反復計算法とは、設計曲面パッチ全域においてパラメータ u, v に関してそれぞれ 10 分割して得られる格子点の位置ベクトル値 P_d と測定点 M_p の測定位置ベクトル値 P_m との差が最小となる格子点 (u_i, v_j) を検索し、次にこの格子点 (u_i, v_j) を取り囲む格子領域 $(u = u_{i-1} \sim u_{i+1}, v = v_{j-1} \sim v_{j+1})$ を 1 パッチと見なして同様の手続きを繰り返し、パラメータ値が必要精度に達した時に反復計算を終了し測定点 M_p のパラメータ値 u, v を求める方法である。

しかしながら変換マトリクス M が式 (15) で表される場合には、位置ベクトルに基づく反復計算法から測定点のパラメータ値 u, v を算出することは困難である。変換マトリクス M が式 (15) を満足する時、設計形状と加工形状の単位法線ベクトルは等価であり、それらのパラメータ u, v の重み関数が等しいことは前述した。すなわち、変換マトリクス M が式 (15) の場合には、図 3 に示すように設計形状の単位

法線ベクトル補間式と加工面の測定単位法線ベクトル値に基づく反復計算法により測定点のパラメータ値 u, v を算出できる。単位法線ベクトルに基づく反復計算法とは、測定単位法線ベクトル値 N_m との差が基準値以下となる格子点 (u_i, v_j) を検索することを基礎としており、基本的には前述した位置ベクトルに基づく反復計算法と同じである。しかし、この反復計算法では格子点 (u_i, v_j) が複数検索される場合が認められる。このような場合には、「自由曲面は法線が滑らかに連続的に変化する」という仮定に基づき、複数算出された格子点の中でその位置ベクトル値と測定点の位置ベクトル値の差が最小となる格子点のパラメータ値を測定点 M_p のパラメータ値 u, v として決定する。

したがって単位法線ベクトルに基づく反復計算法は変換マトリクス M が式 (15) および式 (16) で表される場合を統一的に取り扱うことができるため、意匠曲面評価および機能曲面評価のどちらの場合も単位法線ベクトルに基づく反復計算法により測定点のパラメータ値を算出することとする。

4.3 評価手順

図 4 は提案する評価法の実行手順を示している。以下において同図中に示されている Step 番号と対応させて手順を説明する。

Step ①：設計座標系と加工座標系の同定に基づき、加工面の 1 パッチ内に存在することが認められる任意の 16 点の位置ベクトル $(x_k, y_k, z_k : k=0 \sim 15)$ と単位法線ベクトル $(l_k, m_k, n_k : k=0 \sim 15)$ を測定値として得る。これらは筆者らがすでに開発している測定システム³⁾により測定可能である。

Step ②：単位法線ベクトルに基づく反復計算法を用いて、CAD において導かれている単位法線ベクトル補間式 N と Step ① で得られている測定単位法線ベクトル $(l_k, m_k, n_k : k=0 \sim 15)$ より 16 点のパラメータ値 $(u_k, v_k : k=0 \sim 15)$ を求める。

Step ③：Step ① において得られている位置ベクトル $(x_k, y_k, z_k : k=0 \sim 15)$ と Step ② で算出されたパラメータ値 $(u_k, v_k : k=0 \sim 15)$ との組合せを得る。

Step ④：加工形状の位置ベクトル補間式の重み関数は設計形状のそれと同一であると仮定し、Step ③ で得られている加工面上の 16 点の位置ベクトルとパラメータ u, v の関係を満足する補間式 (17) を求める。

$$\left. \begin{aligned} P'_x(u, v) &= f(u, v, Q0x', \dots, Q15x') \\ P'_y(u, v) &= f(u, v, Q0y', \dots, Q15y') \\ P'_z(u, v) &= f(u, v, Q0z', \dots, Q15z') \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式 (17) において、 $Q0x', \dots, Q15x', Q0y', \dots, Q15y'$

Fig. 4 The evaluation procedure of machine shape with free-form surfaces

$Q_0z', \dots, Q_{15}z'$ は制御点を表しており、同式 (17) が加工形状の位置ベクトル補間式 P' を表している。

Step ⑤: Step ④ で求められた加工形状位置ベクトル補間式 (17) のパラメータ u, v 方向の接線ベクトルの外積より、加工形状の単位法線ベクトル補間式 $N'(N'_x(u, v), N'_y(u, v), N'_z(u, v))$ を式 (18) のように導く。

$$\left. \begin{aligned} N'_x(u, v) &= (P'_y{}^u \cdot P'_z{}^v - P'_z{}^u \cdot P'_y{}^v) / N'_v \\ N'_y(u, v) &= (P'_z{}^u \cdot P'_x{}^v - P'_x{}^u \cdot P'_z{}^v) / N'_v \\ N'_z(u, v) &= (P'_x{}^u \cdot P'_y{}^v - P'_y{}^u \cdot P'_x{}^v) / N'_v \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Step ⑥: 評価対象曲面が意匠曲面の場合、設計形状と加工形状の単位法線ベクトル補間式 N, N' を比較し、それらが一致しているならば変換マトリクス M は式 (15) を満足することとなり、意匠曲面として適当であると評価する。また機能曲面の場合、設計形状と加工形状の位置ベクトル補間式 P, P' を比較し、それらが一致しているならば変換マトリクス M は式 (16) を満足することとなり、機能曲面として適当であると評価する。

5. 計算機シミュレーション実験

計算機シミュレーション実験により、提案した自由曲面加工形状の評価法を試みた。設計形状は、3次 Bézier 補間式に基づく 1 パッチ曲面により近似的に表現した図 5 に示すような長さ 150 mm、半径 100 mm の 1/4 円筒面 (斜線) とした。加工形状は、設計形状に対して X, Y, Z 方向に等倍率で設計座標値の 1% の拡大変換と、 X, Y, Z 方向にそれぞれ 100

Fig. 5 Designed shape

μm , 150 μm , 50 μm の並進変換を施すことにより生成した。

加工面上の任意の 16 点の位置ベクトルを算出し測定値として与え、提案した評価手順に従って加工形状の位置ベクトル補間式と単位法線ベクトル補間式を求めた。単位法線ベクトルは、その方向を感覚的に理解するため、図 6 に示す極座標 (θ, ϕ) により表現する。

図 7 (a), (b) は、曲面全域 (パラメータ $u=0 \sim 1$, $v=0 \sim 1$) における設計形状に対する加工形状の θ, ϕ 方向の単位法線ベクトル誤差 $\Delta\theta, \Delta\phi$ を示している。また図 8 (a), (b), (c) は曲面全域 (パラメータ $u=0 \sim 1$, $v=0 \sim 1$) における設計形状に対する加工形状の X, Y, Z 方向の位置ベクトル誤差 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ を示している。図 7, 8 より、設計形状に対して拡大変換および並進変換が施された加工形状は、設計形状と等価な単位法線ベクトルが得られているが位置ベクトルは同一ではなく、この変換マトリクス M は式 (16) を満足していないが式 (15) を満足していることが分かる。これより、同加工曲面は意匠曲面としては適当であるが機能曲面としては適当でないと判断でき、提

Fig. 6 Spherical coordinate (θ, ϕ)

Fig. 7 Errors of unit normal vectors

Fig. 8 Errors of positional vectors

した評価法の妥当性が認められた。

6. 結 言

本研究は自由曲面加工形状の評価法を提案してお
り、以下の通りにまとめられる。

- (1) 自由曲面加工形状の評価において、使用目的より自由曲面を意匠曲面と機能曲面に分類した。
- (2) 自由曲面加工形状の評価項目は、意匠曲面の場合には単位法線ベクトルであり、機能曲面の場合には位置ベクトルであることを示した。
- (3) 設計形状（計算機モデル）から加工形状（物理モデル）への変換を座標変換としてモデル化し、意匠曲面の場合には並進変換および拡大縮小変換が許容でき、機能曲面の場合には単位マトリクス変換でなければならないことを示した。
- (4) 従来のベストフィット法は、自由曲面の意匠性評価、機能性評価を明確には意識していないことを示した。
- (5) 自由曲面加工形状評価の基本的考え方に基づく評価法を提案し、その評価手順を示した。
- (6) 計算機シミュレーション実験により、提案した評価法の妥当性の確認を行った。

参 考 文 献

- 1) 岸浪建史, 中村 久, 斎藤勝政, 亀井明敏: 三次元曲面形状測定プローブの基礎的研究, 精密工学会誌, **52**, 8 (1986) 1420.
- 2) 青山英樹, 岸浪建史, 斎藤勝政: 球面抵抗薄膜を用いた接触式面法線検出プローブの基礎的研究, 精密工学会誌, **54**, 10 (1988) 1957.
- 3) H. Aoyama, M. Kawai & T. Kishinami: A New Method for Detecting the Contact Point between a Touch Probe and a Surface, Ann. CIRP, **38**, 1, (1989) 517.
- 4) 杉 達雄, 生駒俊郎: 3次元計測機のCNC化・ソフトウェアの動向, 機械設計, **31**, 1 (1987) 37.
- 5) 萱場義隆: 三次元測定機による非球面形状測定, 光技術コンタクト, **27**, 5 (1989) 249.
- 6) 宿利浩章: 三次元測定機による金型計測, 機械と工具, **29**, 3 (1985) 65.
- 7) M. Higashi, I. Kohzen & J. Nagasaka: An Interactive CAD System for Construction of Shapes with High-quality Surface, CAPE '83, North Holland, (1983) 371.
- 8) M. Higashi, T. Kushimoto & M. Hosaka: On Formulation and Display for Visualizing Features and Evaluating Quality of Free-form Surfaces, Eurographics '90, (1990) 299.
- 9) 倉賀野哲造, 鈴木 章, 佐々木伸夫: 高品位形状の射出成形品に対するパーティング面の設計とその工具経路生成, 精密工学会誌, **56**, 7 (1990) 1256.