タグチメソッドによる工作機械設計のロバスト性評価法*

三 島 望** 石 井 浩 介*** 森 和 男**

Robustness Estimation for Machine Tool Designs Using Taguchi Method

Nozomu MISHIMA, Kosuke ISHII and Kazuo MORI

It is well known that the cutting motions of a machine tool can be expressed by a combination of homogeneous transformation matrices. One such combination, called the form-shaping function, relates both the machine tool structure and the product shape to the machining tolerance. This function allows the prediction of machining tolerances based upon knowledge of the machine and product geometry. This paper first describes a generalized procedure used to obtain the form-shaping function. Then, the Taguchi method is applied to the form-shaping function of a T-base lathe. The goal is to identify which physical dimension of the machine most strongly influences its tolerance-holding capability. The numerical results for the T-base lathe indicate that the distance between the spindle center and the base is the most critical parameter for improving machine robustness. The results also lead us to conclude that the Taguchi method is useful in determining an optimum design strategy for a machine tool.

Key words: homogeneous transformation matrix, robust design, form-shaping function, machining tolerance, Taguchi method, T-base lathe

1. は じ め に

工作機械には様々な形状の工作物を所望の加工精度内で安定して加工を行うことが求められる。そのためには設計時にあらかじめ加工誤差の推定、設計の評価が行えることが望ましい。加工誤差は工具と工作物との相対的位置関係で決定される。そこで、その位置関係を解析的に記述し、設計しようとする工作機械の構造に合わせて、その加工性能を評価する研究が行われている。この相対位置関係を記述する方法のうち、良く知られたものに形状創成関数^{1) 2)}がある。この形状創成関数を加工誤差の予測、工作機械の設計評価に適用した例³⁾が報告されている。また、これとは独立に他の数学的表現を用いて、工作機械の加工誤差を解析・予測した研究^{4) 5)}や、誤差ベクトルを用いて工作機械の幾何誤差を表現し、数値補正に応用した研究⁶⁾等も見られる。

これらの研究により工作機械における誤差生成機構の解明に関しては著しい進展をみた。しかし、こうした手法は機械各部における誤差量が既知の場合に適用でき、新規に設計する場合など、誤差量が未知の場合には加工誤差の予測が困難である。つまり、任意の工作物形状や未知の組立誤差などの不確定な要因に対して安定して加工精度が発揮できるような工作機械構造のロバスト性を評価することはできない。

本研究では、同次変換行列⁷⁾ (HTM)を用いた工作機械の形状創成関数を導出し、これにタグチメソッド⁸⁾を適用することにより、加工誤差やそのロバスト性に及ぼす工作機械構造や工作物形状の影響を同定する方法を提案する。解析対象としては、工作機械の一般的な構造形式であるTベース旋盤を取り上げ、工作機械構造、工作物の代表寸法と加工誤差との関

係を明らかにする。この結果から、本研究の方法により未知の加工・組立誤差に対する工作機械設計を含む機械加工プロセスのロバスト性を評価可能であることを示す。

2. 形状創成動作の数学的表現

2.1 形状創成関数

工作機械構造を図1に示すように工作物から工具へと連なる剛体要素の連鎖と考える。

Fig.1 Corresponding elements, coordinates and HTM

いま、工作機械が要素0から要素 k までの合計 $k+1$ 個の要素が直列に連結された構造であるとし、要素 i ($i=1 \sim k-1$) において、要素 $i-1$ との界面に直交座標系 S_{i-1} 、要素 $i+1$ との界面に S_i を付与する。ただし、要素 $i=0$ は工作物、要素 $i=k$ は工具とし、 S_0' 、 S_k だけを付与する。このようにすると、 $S_i \rightarrow S_i'$ の変換は要素内部での座標変換、 $S_{i-1}' \rightarrow S_i$ の変換は要素

* 原稿受付 平成10年 4月22日

** 正 会 員 機械技術研究所 (つくば市並木1-2)

*** スタンフォード大学工学部 (Stanford, CA 94305, USA)

間の座標変換を表すことになる。それぞれの座標変換を同次変換行列 A_i と A_i' で表すものとする。通常、工作機械の場合、 A_i および A_i' は x, y, z 軸に沿った平行移動と x, y, z 軸回りの回転移動のいずれか 1 種類で表される。これら 6 種類の座標変換に対して、 x 軸に沿った平行移動を 1、 y 軸に沿った平行移動を 2 など 1 から 6 までの番号を与えて区別する。先に定義した同次変換行列 A_i, A_i' がそれぞれ j_i, j_i' ($j_i, j_i' = 1 \sim 6$) 番目の変換で表され、移動量（平行移動であれば距離、回転移動であれば回転角）が l_i, l_i' で表される場合、これを $A_{(j_i)(l_i)}$ および $A'_{(j_i')(l_i')}$ と表すことにする。いま、工作物と工具の相対変位をベクトル $\vec{r}_0$ で表し、工具に付与された座標系において、工具取付け点を原点としたときの工具先端位置ベクトルを工具形状と定義し、これを $\vec{r}_i$ で表す。 $\vec{r}_0$ と $\vec{r}_i$ の関係は式(1)により表され、 $\vec{r}_0$ が工作機械の形状創成関数である。

$$\vec{r}_0 = A'_{(0)(j_0)(l_0)} \cdots A'_{(i)(j'_i)(l'_i)} A_{(i+1)(j_{i+1})(l_{i+1})} \quad (1)$$

$$\cdots A'_{(k-1)(i'_{k-1})(l'_{k-1})} \vec{r}_l$$

$$(j_0', \dots, j_i, j_i', \dots, j_{k-1}' = 1 \sim 6)$$

($l'_0, \dots, l'_i, l'_i, \dots, l'_{k-1}$ は任意の移動量)

2.2 形状創成誤差関数

実際の工作機械には組立誤差，熱変形，経年変化，摩耗，外力による変形など多くの誤差要因が存在する．これらの誤差は座標変換の際に，平行移動誤差または回転誤差として現れるので，実際の機械における形状創成動作を記述するためにはこれらの誤差を考慮しなくてはならない．こうした誤差は，要素内部の変換，要素間の変換のどちらにも現れる．しかし，便宜上どちらかの変換に集約して取り扱うことができるので，本論文では，これらの誤差を要素間の変換に含めるものとする．そこでいま，要素間の変換 $S_i \rightarrow S_{i+1}$ における x , y , z 軸回りの回転誤差を α_i , β_i , γ_i とし，平行移動誤差を δ_{xi} , δ_{yi} , δ_{zi} と表すものとする．このとき， $S_i \rightarrow S_{i+1}$ の変換における誤差成分を含む同次変換行列 A_i は次の式で表される．

$$A_{\varepsilon_i} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_i & \beta_i & \delta_{xi} \\ \gamma_i & 1 & -\alpha_i & \delta_{yi} \\ -\beta_i & \alpha_i & 1 & \delta_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)における $A'_{(i)(j)(l)}$ と $A_{(i+1)(j+1)(l+1)}$ との間の要素間変換に式(2)を挿入することにより, 誤差を含む形状創成関数 $\bar{r}_{\epsilon 0}$ が次式のように表される.

$$\begin{aligned} \vec{r}_{E0} = & A'_{(0)(j_0)(l_0)} A_{E0} \cdots A'_{(i)(j'_i)(l'_i)} A_{Ei} A_{(i+1)(j_{i+1})(l_{i+1})} \\ & \cdots A'_{(k-1)(j'_{k-1})(l'_{k-1})} \vec{r}_l \end{aligned} \quad (3)$$

また、形状創成誤差関数 $\Delta \bar{r}_0$ は、誤差を含まない形状創成関数と誤差を含んだ形状創成関数との差として定義され、次式で表すことができる。

$$\Delta \vec{r}_0 = \vec{r}_{\varepsilon 0} - \vec{r}_0 \quad (4)$$

3. Tベース旋盤における形状創成動作のロバスト性評価法

次に工作機械の基本的な形式の一種であるTベース型の旋盤を取り上げ、その形状創成関数から加工誤差やそのロバスト性に与える工作機械形状の影響を同定する方法を検討する。

3.1 形状創成関数の導出

本研究で解析対象とするTベース旋盤の構造を図2に示

す。隣接する座標系間の変換が1種類の平行または回転移動によって表現できるよう、この旋盤の要素を工作物、主軸、主軸頭、ベース、工具台、工具に分けている。

Fig.2 Schematic view of the T-base lathe

図に示すように工作物の高さを h 、半径を R 、主軸中心のベース面からの距離を L_y 、工具長さを L_t 、工具と x 軸のなす角を θ とする。このとき工具先端のベース面からの距離も L_y となる。これら要素の結合順と、対応する座標系、同次変換行列を図 3 に示す。

Fig.3 Corresponding elements, coordinates and HTM for the T-base lathe

図中の同次変換行列において、 $A'_{(0)(3)(0)}$ のように移動量が0である変換は、誤差を考慮しない場合無視できるので、図2に示すTベース旋盤の形状創成関数として式(5)が得られる。

$$\begin{aligned} \vec{r}_0 &= A'_{(1)(6)(2\pi)} A_{(2)(2)(L_Y)} A'_{(2)(1)(R+Lt \cos \theta)} \\ &A'_{(3)(3)(h+Lt \sin \theta)} A_{(4)(2)(L_Y)} \cdot \vec{r}_i \end{aligned} \quad (5)$$

また、工具形状ベクトル $\vec{r}_i$ は定義より次の式(6)で表される

$$\vec{r}_i = \begin{Bmatrix} -L_t \cos \theta & 0 & -L_t \sin \theta & 1 \end{Bmatrix}^T \quad (6)$$

3.2 形状創成誤差関数の導出

工作機械の局所的誤差は式(2)で定義した6種類の誤差パラメータ、 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ を用いて表すことができる。これらの誤差は要素間の変換に際してのみ考慮すればよいから、図3のうちの要素間変換 $S_i \rightarrow S_{i+1}$ に式(2)に定めた $A_{i,i}$ を挿入し、誤差を含む形状創成関数が次式により求められる。

$$\vec{r}_{e0} = A_{e0} A'_{(1)(6)(2\pi)} A_{e1} A'_{(2)(2)(-L_y)} A'_{(2)(1)(R+L_t \cos \theta)}$$

$$A_{e2} A'_{(3)(3)(L_t \sin \theta)} A_{e3} A'_{(4)(2)(L_y)} A_{e4} \cdot \vec{r}_i \quad (7)$$

式(7)には5つの誤差を含む同次変換行列 $A_{i0} \sim A_{i4}$ があるので、各変換における誤差パラメータをそれぞれ定義し、表1のように表すことにする。

Table 1 Error parameters

HTM	Error parameters	
	Rotational error	Transitional error
A_{e0}	$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$	$\delta_{x0}, \delta_{y0}, \delta_{z0}$
A_{e1}	$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$	$\delta_{x1}, \delta_{y1}, \delta_{z1}$
A_{e2}	$\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$	$\delta_{x2}, \delta_{y2}, \delta_{z2}$
A_{e3}	$\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$	$\delta_{x3}, \delta_{y3}, \delta_{z3}$
A_{e4}	$\alpha_4, \beta_4, \gamma_4$	$\delta_{x4}, \delta_{y4}, \delta_{z4}$

ここで、実際のTベース旋盤の構造を考慮すると、表1の誤差パラメータについて以下の仮定が成り立つと考えられる。

- A) A_{e0} において工作物の主軸への取付誤差は無視できる。
- B) A_{e1} において、 γ_1 はz軸回りの回転誤差であり、同方向である主軸自体の回転に比べて微小なので無視できる。
- C) β_1 は工具台のz方向案内面に対する回転誤差である、同方向の工具取り付け角に比べ、微小なので無視できる。
- D) 工具は工具台に対して平行移動は行わないので、平行移動誤差 $\delta_{x4}, \delta_{y4}, \delta_{z4}$ は考慮する必要が無い。
- E) δ_{x1} と δ_{y1} は主軸の中心軸の偏心量に相当するのでx, y方向を区別せず $\delta_{x1} = \delta_{y1}$ とする。
- F) δ_{z2} は発熱に起因する主軸の伸びであるので、その大きさは主軸頭のベースからの距離に比例するものと考え、次のように式(8)で表す。

$$\delta_{z1} = c_1 \times L_y \quad (8)$$

ここで c_1 は比例係数で、その値については後述する。

- G) δ_{x2} と δ_{x3} はそれぞれx, z軸のスケール誤差として定義されるもので、工作機械全体の均一な温度上昇に起因すると考えられる。そこで、次式が成り立つものとする。

$$\delta_{x2} = c_2 \times R$$

$$\delta_{z3} = c_2 \times h \quad (9)$$

ここで、 c_2 は比例係数である。

- H) δ_{z2}, δ_{y2} および δ_{x3}, δ_{y3} はそれぞれ、案内面の粗さ、駆動用のボールねじの回転むらなど同一の原因に起因するものと仮定し、 $\delta_{z2} = \delta_{y2}, \delta_{x3} = \delta_{y3}$ とする。

- I) 主軸頭の傾き α_1, β_1 、ベースの傾き $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ 、工具台の傾き $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ 、工具の傾き α_4, γ_4 はすべて独立である。

これらの仮定により独立な誤差パラメータは表2に示すように15個となる。

Table 2 Considered error parameters

Parameters	Error description
α_1, β_1	Spindle head inclination
δ_{x1}	Spindle eccentricity
δ_{z1}	Spindle expansion to z direction
$\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$	Base inclination
δ_{x2}, δ_{x3}	Scale error
δ_{z2}	Straightness error of x slider
$\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$	Tool post inclination
δ_{z3}	Straightness error of z slider
α_4, γ_4	Tool inclination

式(4)～(9)より、対象とするTベース旋盤の形状創成誤差関数は式(10)のように求められる。

$$\Delta \vec{r}_0 = \begin{bmatrix} \delta_{x1} + c_2 \cdot R + \delta_{y3} + (\beta_1 + \beta_2) \cdot h \\ -(\gamma_2 + \gamma_3) \cdot L_y - (\beta_2 + \beta_3) \cdot L_t \sin \theta \\ \delta_{x1} + \delta_{y2} + \delta_{y3} - (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h \\ + (\gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4) L_t \cos \theta + (\alpha_3 + \alpha_4) \cdot L_t \sin \theta \\ c_1 \cdot L_y + \delta_{y2} + c_2 \cdot h - \alpha_1 \cdot R \\ + (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \cdot L_y + (\beta_2 + \beta_3) \cdot L_t \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.3 タグチメソッドの適用

式(10)において、すべての誤差パラメータが既知の場合は形状創成誤差関数 $\Delta \vec{r}_0$ は単純な演算で求めることができる。ところが、工作機械の設計時には、あらかじめ構成要素の加工誤差や組立誤差を見積もることは困難であるため、式(10)を直接解くことはできない。しかし様々な加工条件下で安定した加工精度が得られる設計を行うためには、未知の誤差パラメータに対してロバストな設計を実現することが必要である。つまり、未知の誤差パラメータを含んだままで形状創成誤差関数、式(10)を評価できる方法が必要である。その一つとしてタグチメソッドがあげられる。タグチメソッドは実験計画法や品質工学の分野で広く普及している方法であり、プロセスなどのロバスト性を評価できる。ここでは、誤差パラメータが未知である設計の初期段階において、工作機械の構造が加工誤差に及ぼす影響をタグチメソッドによって評価できるものと考え、解析式である形状創成誤差関数に適用する。

3.4 評価関数の設定

タグチメソッドでは、ある範囲内で変動するノイズファクタの下で評価関数を最適化するコントロールファクタの値の組み合わせを求める。そこでまず本問題における評価関数の設定が必要である。評価関数の取り方については様々な考えられるが、本例では、半径 R 、高さ h の円筒状の工作物を考え、点 $(R, 0, h)$ における誤差量に注目する。この点を目標として工具と工作物を相対変位させたときの各軸方向の誤差量を $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ で定義し、 $(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$ を半径誤差、 Δz を高さ誤差と呼ぶ。また、 $(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2}$ を総合誤差と定義する。本研究では、評価関数を総合誤差とした場合、半径誤差とした場合、高さ誤差とした場合の3通りについて評価を行う。

3.5 ノイズ、コントロールファクタの変動範囲の設定

評価関数の計算を行う際には、適切なコントロールファクタ、ノイズファクタを選定し、その変動範囲を設定しなくてはならない。本研究の例では、工作物の半径 R 、高さ h 、工具取付角 θ 、主軸中心のベッド面からの高さ L_y をコントロールファクタとし、表2の誤差パラメータをノイズファクタとすることができる。コントロールファクタについてはその加工誤差への寄与の様子が明らかでないので、それぞれについて3種類の値を用いる。そこでコントロールファクタには $L_9^{(4)}$ の直交配列を適用し、その値の組み合わせを Low, Mid, High という表現を使って表3のように表す。

Table 3 L_9 Orthogonal array

Number of run	R	h	θ	L_y
1	Low	Low	Low	Low
2	Low	Mid	Mid	Mid
3	Low	High	High	High
4	Mid	Low	Mid	High
5	Mid	Mid	High	Low
6	Mid	High	Low	Mid
7	High	Low	High	Mid
8	High	Mid	Low	High
9	High	High	Mid	Low

コントロールファクタの変動範囲は、Tベース旋盤における一般的な値を考慮し、表4に示すようにとる。

Table 4 Range of the control factors

Name of the factor	Parameters	Range
Product diameter	R	0.1, 0.2, 0.3m
Product height	h	0.1, 0.2, 0.3m
Tool angle	Overall	30, 45, 60°
	Radial	-45, 0, 45°
	Axial	30, 60, 90°
Main spindle - base distance	L_y	0.3, 0.4, 0.5m

一方、ノイズファクタに関しては、表2の誤差パラメータをノイズファクタとしたので、誤差パラメータの変動範囲を設定しなければならない。タグチメソッドではノイズファクタの厳密な値を設定する必要はなく、ある幅を持った変動範囲を定めればよい。そこで、表2の誤差パラメータについて、常識的に考えられる表5に示すような値を設定する。ただし、主軸の伸び δ_1 、スケール誤差 δ_2 、 δ_3 については値そのものではなく、その比例係数 c_1 、 c_2 を定める。

工作機械の特性を考えれば、ノイズファクタ、この場合誤差パラメータは出力である加工誤差に対して単調に作用すると考えられるので直交配列における変数のレベルは2つで充

Table 5 Range of the noise factors

Error description	Parameters	Range
Spindle expansion	c_1	$0 \sim 2 \times 10^{-5}$
Scale error	c_2	$0 \sim 5 \times 10^{-5}$
Spindle eccentricity	δ_1	$\pm 10 \mu\text{m}$
Straightness error	$\delta_2 = \delta_3$ $\delta_1 = \delta_3$	$\pm 10 \mu\text{m}$
Spindle inclination	α_1 α_2	$\pm 0.003^\circ$
Angular error	α_2 β_2 γ_2 α_3 β_3 γ_3 α_1 γ_1	$\pm 0.003^\circ$

分だと考えられる。そこで、ノイズファクタには $L_{16}^{(4)}$ の直交配列を用いる。また、式(10)の変数のうち、工具長さについては、 $L_t = 0.1\text{m}$ の一定値とする。

3.6 計算結果について

タグチメソッドによって規定された直交配列に基づき、表4、5の値を式(10)に代入し、計算を行う。1セットの計算は、4種類のコントロールファクタからなる9通りの組み合わせのそれぞれに対して、独立な15種のノイズファクタからなる16通りの組み合わせについて計算することから構成される。計算結果は表5に示した範囲内でノイズファクタが変動する場合に、各コントロールファクタが式(11)、(12)に示す評価関数の平均値 f_{em} および、S/N比 S_n に及ぼす影響を示す。

$$f_{em} = \sum_{i=1}^n f_{ei} / n \quad (11)$$

$$S_n = -10 \log(V + f_{em}) \quad (12)$$

ここに、 n はシミュレーションの試行回数（ここでは $n=16$ ）、 f_{ei} は i 番目の試行における評価関数の値、 V は分散である。このS/N比がロバスト性の指標として広く用いられている。この例では、まず評価関数を総合誤差とした場合について、評価関数の平均値 f_{em} 、S/N比 S_n とコントロールファクタの関係について解析を行った。これらの結果を図4(a)、(b)に示す。同様の計算を半径誤差、高さ誤差についても行い、評価関数の平均値に関する結果を図4(c)、4(d)に示す。

図において各コントロールファクタに対応する線分の傾きが急である時、そのファクタが加工誤差ないしS/N比に与える影響が大きいことを意味する。図4(a)ではすべての線分が右肩上がりになっており、コントロールファクタの値が小さいほど加工誤差も小さいことを示す。図4(b)はコントロールファクタの値が小さいほどS/N比が高い、つまり組立誤差などの外乱に対してロバストであることを示す。計算結果から、対象としたTベース旋盤について以下が言える。

- 加工誤差に与える影響が最も大きいのは主軸のベース上面からの高さ L_y である。
- ついで影響が大きいのは工作物高さ h であり、工作物半径 R の影響より大きい。
- 工具取付角 θ が加工誤差に与える影響は大きくないが、角度が小さい場合の方がわずかに誤差が小さい。
- S/N比に関しても傾向は同じであり、加工のロバスト性を高めるには L_y を小さくすることが有効である。

4. 考 察

計算結果から、今回対象としたTベース旋盤では、加工誤差に対して最も影響するのは主軸中心のベースからの高さであることが明らかになった。そこで、このような情報を用いて、工作機械設計において、主軸回転中心と z 方向案内面のオフセットが少ない工具台形状とするとロバスト性に優れた設計になる、というような具体的設計指針を得ることができる。

このように、形状創成関数にタグチメソッドを適用して工作機械による加工のロバスト性を評価することを行ってみた結果、本手法は、未知のノイズファクタに対してのおおまかな情報だけで、加工や工作機械の設計のロバスト性を評価で

(a) Relation between overall error and control factors

(b) Relation between S/N ratio and control factors

(c) Relation between radial error and control factors

(d) Relation between axial error and control factors

Fig.4 Results of the calculation

ることが明らかになった。したがって、形状創成関数とタグチメソッドを組み合わせたロバスト設計手法は、機械設計ないし工程設計の初期段階においてその最適構造の検討を行うために有用なツールになりうると考えられる。形状創成関数そのものはそれぞれの工作機械構造に固有であるものの、本方法は様々な構造形式の工作機械の評価に適用できる。ま

たすべて解析的に行える方法なので、コントロールファクタ、ノイズファクタにどのような変数を選ぶかには自由度が高く、例えば、工作物寸法をノイズファクタとし、誤差パラメータをコントロールファクタとすることも可能である。それにより、工作機械の各種誤差パラメータのうち、どれが加工精度に対して最も支配的かを明らかにすることもできる。これらの誤差パラメータは工作機械の部品の加工誤差、仕上げ誤差、組立の際のアライメント誤差などに起因するので、工作機械の製作時にどの部分の誤差に最も着目し、公差を厳しくすべきかを示唆できよう。このように決定したコントロールファクタに対して、具体的な示唆が得られる一方、コントロールファクタを変更することにより、他の場合にも適用できる柔軟性も備えている点が本方法の特徴である。

5. ま と め

以上により得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 形状創成関数にタグチメソッドを適用した工作機械設計のロバスト性評価手法を具体例により示した。
- (2) 本方法により工作機械構造や工作物の寸法などが加工のロバスト性に与える影響を評価できることを示した。

本方法の利点である、設計の初期段階において設計の評価ができる点をより有効に活用するために、工作機械の概念設計段階に本方法を適用し、概念設計段階における設計におけるロバスト性比較の考え方¹⁰⁾を導入することが今後の研究課題としてあげられる。これにより、異なる設計コンセプト間での加工性能比較も含めた、トータルな工作機械の設計プロセスにおいて強力な評価ツールを提供できよう。

参 考 文 献

- 1) D. N. Reshtov and V. T. Portman: Accuracy of Machine Tools, ASME Press, New York (1988).
- 2) 稲崎一郎, 岸浪建史, 竹内芳美, 杉村延広: 工作機械の形状創成理論, 養賢堂, 東京 (1997).
- 3) A. H. Slocum: Precision Machine Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs (1992).
- 4) 杉村延広ほか: 工作機械の設計に対する解析的アプローチ (形状創成過程のモデル化とその分析), 日本機械学会論文集 (C編), **47**, 418, (1981) 793.
- 5) 坂本重彦, 稲崎一郎: 5軸マシニングセンタの創成運動解析, 日本機械学会論文集 (C編), **59**, 561, (1993), 1553.
- 6) 竹内芳美ほか: 計算機補正による数値制御工作機械の加工精度向上 (第2報), 精密機械, **46**, 12 (1980) 79.
- 7) R. P. Paul: Robot Manipulators - Mathematics, Programming and Control-, The MIT Press, Cambridge (1981).
- 8) G. Taguchi and S. Konishi: Quality Engineering Series, Vol.1-4, ASI Press, New York (1991-1994).
- 9) W. Y. Folkes and C. M. Creveling: Engineering Methods for Robust Product Design, Addison Wesley, Menlo Park (1995).
- 10) R. B. Ford and P. Barkan: Beyond Parameter Design - A Methodology Addressing Product Robustness at the Concept Formation Stage, Proc. of ASME National Design Engineering Conf., (1995).