自由曲面用 NC プログラミングのための 人工現実感システムの研究*

高 橋 秀 智** 金 井 理***

A Study on Virtual Reality of NC Programming for Free-Form Surfaces

Hidetomo TAKAHASHI and Satoshi KANAI

When we generate the cutter path for free-form surfaces by a CAM system, we have to minimize the air-cut of it and to ensure the accuracy of the machined products. But it is very difficult for the conventional CAM system to set the adequate cutting condition and to generate the path only for the part to be cut. On the other hand, a profiling machine has been commonly used by die-manufacturers, because it enables the workers to directly generate the cutter path during monitoring the cutting situation. However a profiling machine needs the master-model of product and the accuracy of the cutter path is not high. Therefore we introduce the virtual reality into NC programming system for free-form surfaces. And an accurate virtual profiling system without master-models was realized. The worker can manually profile the model in the computer and can generate NC data for free-form surfaces by using the proposed system. In this paper, the construction of the virtual profiling system is described. The virtual profiling system consists of a bilateral master-slave system which has a 3DOF orthogonal direct drive manipulator, a profiling simulation software, and a cutting simulation software. The virtual profiling system can generate the cutter path for free-form surface models in real time with the accuracy of $\pm 0.1\mu\text{m}$.

Key words: NC programming, CAM, free-form surface, virtual reality, master-slave system, profiling machine, cutter path

1. 緒 論

CADシステムにより生成された複雑な自由曲面から成る製品形状データに基づき、金型製作のためにCAMシステムによりNC加工用工具経路が生成される。工具経路には加工される金型の精度の保証と高い加工効率が要求される。前者の要求を満たすためには、生成される工具経路が許容誤差以下で、適切な加工条件(切削工具、切込み量、送り速度など)が指定される必要がある。この問題に対しては、切削負荷と工具びりモデルを用いて、2次元加工ではあるが許容誤差を満たす工具経路を生成し、さらに適切な送り速度をアルゴリズムにより指定する蔡らの研究¹⁾がある。

また加工効率の要求を満たすためには、加工する自由曲面の形状に適合した効率の良い切削モードが選択されること、切削に関与しないエアカットが少ないこと、さらには加工後の面形状がよいこと、が必要となる。この問題に対しては、荒加工、等高線加工、走査線加工など様々なモードの経路を自動的に生成する鈴木らの研究²⁾や、加工残り部のみに対して工具経路を生成させる近藤らの研究³⁾、また、複数の滑らかに接続した曲面間に連続した工具経路を生成する倉賀野らの研究⁴⁾がある。さらに、全加工時間を考慮し最も効率の良い切削工具直径の使用順序を決定する舩らの研究⁵⁾がある。

本来は、アルゴリズムのみで上述の条件をすべて満たす工具経路が自動的に生成されることが望ましいが、これらの研究で

は、各々の条件に対して個別に解決を試みており、それらの条件を統合的に解決するまでには至っていない。しかし、実際の製造現場では、複雑な自由曲面を含んだ製品形状に対して、最適な工具経路の生成が望まれている。

これに対して、従来より作業者が図1のようにマスタモデル表面をプローブにより触れ、そのプローブの軌跡に従い加工機の切削工具が移動し加工を行う触り工作機械が金型製作現場で使用されてきた。この加工法は、素材とマスタモデルの両方が加工機上にあるので、作業者が被加工物の切削状況とマスタモデル形状とを同時に把握しながら直接的に加工経路を指示できるために、どのような自由曲面形状に対してもエアカットが少なく効率的な加工経路を容易に生成できる。さらに面と面の間の隅肉を切削するペンシル触り加工のように、作業者が加工中の切削状態を観察でき、切削速度などを変えながら加工を行うことができるために、適切な加工条件の選択が可能である。以

Fig. 1 Profiling machine

* 原稿受付 平成7年5月31日

** 正会員 東京工業大学工学部 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 正会員 東京工業大学工学部 (現、北海道大学工学部; 札幌市北区北13条西8丁目)

Fig. 2 Virtual profiling system

上のように、倣い加工は自由曲面加工における作業者と工作機械の間の優れたインタフェースであるが、反面、マスタモデルが必要であり、プローブとマスタモデルの接触により工具経路を生成するため、生成される工具経路の精度がNC加工に比べて劣るという欠点を持つ。

そこで本研究では、人工現実感を自由曲面用CAMシステムに導入し、倣い加工の有する工具経路生成時の利点を活かしつつ、加工精度を保証し、マスタモデルの必要のない、NCプログラミングシステム（仮想倣いシステム）を提案する。これにより、作業者の経験的な判断を積極的に最適な工具経路の生成に活かすことができる。

仮想空間内のある程度の複雑さを有する形状に対して、作業者がその形状からの反力を感じながらなぞりや変形操作可能なシステムが、神徳ら⁶⁾や、足立ら⁷⁾により開発されている。しかしながら、本研究のような人工現実感のCAMシステムへの応用への試みは、国内外においてほとんど行われていない。唯一、光石らの研究⁸⁾があるが、これはNC工作機械の遠隔操作に重点が当てられており、われわれの目的と異なる。

本論文では、3軸の自由曲面加工を対象とし、提案する仮想倣いシステムの概要、バイラテラルデバイスとその制御システムの構築、自由曲面モデルに対する倣い作業を実現するシミュレーションソフトウェアについて論ずる。さらに、構築したシステムによる自由曲面形状モデルの倣い作業時の操作力と生成される工具経路の精度について実験的に検証する。

2. 仮想倣いシステムの概要

図2に本研究で提案する仮想倣いシステムの概略を示す。仮想倣いシステムは、

- (1) 作業者のプローブ操作を測定し、仮想空間からの力を作業者に伝えるバイラテラルデバイス、
  - (2) 作業者のプローブ操作に追従し移動する、仮想空間内のプローブ（仮想プローブ）による自由曲面形状モデル（仮想マスタモデル）の倣いシミュレーションソフトウェア、
  - (3) 仮想空間内の切削工具と被削材の切削シミュレーションソフトウェア、
- により構成される。

図3に本システムの装置外観を示す。このシステムを用いた処理の流れを以下に示す。

- (1) 作業者はバイラテラルデバイスの正面に座り、鏡に映るCRT内の仮想マスタモデルを自分の手の位置に見ながら、倣い加工機のプローブを模倣したバイラテラルデバイスのプローブを操作する。
- (2) 作業者の操作に従い仮想プローブが移動する。
- (3) 倣いシミュレーションソフトウェアにより、仮想マスタモデルから仮想プローブが受ける接触による反力がリアルタイムに計算される。
- (4) 接触している場合には、仮想マスタモデルからの反力が、バイラ

テラルデバイスにより作業者に提示され、作業者はプローブを仮想マスタモデルの内部に入り込ませることはできない。また、接触していない場合には、バイラテラルデバイスの動特性を補償する力が提示され、作業者はバイラテラルデバイスの質量などをほとんど感じることなくプローブを自由に操作できる。これにより作業者は、仮想マスタモデル表面をバイラテラルデバイスのプローブにより実際にマスタモデルが存在するのと同様に扱うことができる。さらに、この時の仮想プローブの移動軌跡に基づき工具経路NCデータが生成される。

- (5) 仮想プローブの軌跡に基づき、仮想空間内の切削工具が移動し、仮想の被削材の切削による形状変化が、切削シミュレーションソフトウェアによりリアルタイムに計算される。なお、切削抵抗については、本システムでは取り扱っていない。
- (6) 被削材の形状変化がCRTに表示される。これにより、作業者は削り残し部の位置、その量をCRT上で確認しながら自由曲面に対する工具経路を直接指示することができる。

3. バイラテラルデバイス

3.1 バイラテラルデバイスの構造

倣い加工機では、作業者はプローブを用いて仮想マスタモデル表面を倣うことにより、切削工具を移動させ加工を行う。そこで、この動作を仮想倣いシステムで実現するためには、作業者のプローブの移動操作を正確に測定し、かつ仮想プローブが受ける仮想マスタモデルからの反力を、実際に作業者に伝達するバイラテラルデバイスが必要である。

そこで、作業者が実際の倣い作業と同様に違和感無く作業できるように、バックラッシュがなく高い剛性をもつリニアサーボモータを用い、図3に示されるような直交3軸のバイラテラルデバイスを作成した。このデバイスでは、背面のリニアガイド上に配したカウンタバランスを、ワイヤにより上下からZ軸テーブルに接続することにより、重力が補償されている。また、3組の平行板ばねからなる力センサと、リニアサーボモータのドライバの位置信号から、作業中のプローブにかかる力及び位置を正確に検出できる。本バイラテラルデバイスの基本特性を表1に示す。

Fig. 3 Overview of the virtual profiling system

Table 1 Characteristics of the bilateral device

	Work Area mm	Mass kg	Linear Motor Output N	Sensor Resolution	
				Position μm	Force N
X	320	16.0	200	1.0	0.027
Y	320	38.0	400	1.0	0.025
Z	260	5.0	50	0.5	0.061

Fig. 4 Control model of the virtual profiling system

Fig. 5 Structure of the control system

3.2 バイラテラルデバイスの制御方式

作業者がバイラテラルデバイスを通じて、仮想プローブにより仮想マスタモデル表面の安定した食い操作を行えるように、システムを図4のようにモデル化し力帰還型制御を行う。仮想マスタモデル表面は質量 m ，ダンパ b ，ばね k により表現される。また， f_0 を作業者の操作力， f_1 をバイラテラルデバイスの駆動力， f_2 を仮想プローブの駆動力， f_e をプローブが仮想マスタモデル表面に作用する力， x_m, x_s をそれぞれバイラテラルデバイスと仮想プローブの位置ベクトル， k_p, k_v, k_s をそれぞれ力，速度，位置のフィードバック係数， m_m, b_m, m_s, b_s をそれぞれバイラテラルデバイスと仮想プローブの質量と粘性係数とすると，力帰還の制御方程式は式(1)～(5)で与えられる。

$$f_0 = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m - f_1 \quad (1)$$

$$f_1 = k_f(f_e - f_0) \quad (2)$$

$$f_2 = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + f_e \quad (3)$$

$$f_2 = k_v(\dot{x}_m - \dot{x}_s) + k_p(x_m - x_s) \quad (4)$$

$$f_e = m \ddot{x}_s + b \dot{x}_s + k x_s \quad (5)$$

式(1)，(3)はそれぞれバイラテラルデバイスと仮想プローブの動特性を表す運動方程式である。

力帰還型制御により仮想マスタモデル表面のより高い剛性を安定に実現するためには，より短い制御周期が要求される⁹⁾。

3.3 バイラテラルデバイスの制御システム構成

バイラテラルデバイスの制御システム構成を図5に示す。バイラテラルデバイスからのプローブの位置と操作力は，それぞれカウンタボードとA/Dコンバータボードによりパーソナルコンピュータに取り込まれる。また，次節で述べる食いシミュレーションソフトウェアにより計算された仮想プローブの仮想マスタモデルからの反力に基づく制御力が計算され，D/Aコンバータボードからリニアモータドライバへ出力される。一方，プローブの位置はソケット通信によりEWSに送られ，切削シミュレーションソフトウェアにより被削材の形状変化が作業者に提示される。切削シミュレーションソフトウェアでは，被加工物の形状はZ-mapで表現され，切削による形状変化を高速に計算できる。

Fig. 6 Representation of a virtual master-model

4. 食いシミュレーションソフトウェア

4.1 仮想マスタモデルの形状表現

本研究においては，仮想マスタモデルの形状表現として，式(6)で表される双3次ユニフォームB-スプライン曲面を用いる。

$$P_{i,j}(u, w) = \sum_{l=i-1}^{i+2} \sum_{k=j-1}^{j+2} N_{l-i+1,4}(u) N_{k-j+1,4}(w) Q_{l,k} \quad (0 \leq u, w \leq 1) \quad (6)$$

ただし， $N_{l,4}(u)$ は階数4のB-スプライン基底関数， $Q_{l,k}$ は制御点とする。この曲面と仮想プローブの中心点との最短距離の計算は，高次の代数方程式となり解析解が求められないために，数値的な収束計算を行う必要がある。収束計算では，その初期値により収束性が大きく異なる。さらに，バイラテラル制御システムではその制御周期が，制御系の安定性，実現可能な仮想マスタモデル表面の剛性に大きく影響する。

そこで本システムでは，この距離計算を高速に行うために，CADシステムからB-スプライン曲面を取り込む際に仮想空間を格子状に分割し，各々の格子点にある曲面の番号，曲面のパッチ番号，曲面上のパラメータ値，曲面の高さをあらかじめ計算し，Z-mapモデルを作成する。Z-mapモデルの作成には，3枚の曲面から成るマスタモデルを 60×60 分割する場合，数分を要する。これにより，仮想空間内のプローブの位置から，距離計算を行うべきパッチの選択，収束計算の際の適切な初期値の設定を高速に行える。さらに，収束計算を用いてB-スプライン曲面と仮想プローブの正確な距離を計算している。図6で示されるZ-mapモデルは，式(7)で表現される。

$$Z_{i,j}^k = [m_{i,j}^k, n_{i,j}^k, u_{i,j}^k, w_{i,j}^k, h_{i,j}^k] \quad (7)$$

ただし， (i, j) はZ-map格子番号， k は曲面番号， $m_{i,j}^k, n_{i,j}^k$ は格子点における曲面パッチの番号， $u_{i,j}^k, w_{i,j}^k$ は格子点における曲面のパラメータ， $h_{i,j}^k$ は格子点における曲面の高さとする。

4.2 食いシミュレーションソフトウェア

仮想マスタモデルの表面を仮想プローブが食いながら移動するためには，仮想プローブが仮想マスタモデルを表すB-スプライン曲面に接触する際のプローブ中心と曲面の最短距離を与える曲面上の点（最短距離点） $P_{m,n}(u, w)$ とその干渉量 c の計算が必要となる。Newton-Raphson法に基づくこの距離計算のアルゴリズムを以下に示す。

- STEP-1 仮想プローブの中心座標とその近傍にあるZ-mapモデルの高さとを比較し，干渉の可能性のあるZ-map格子点 (i, j) を取り出す。
- STEP-2 干渉の可能性のある格子点が無ければSTEP-8を実行する。
- STEP-3 各々の干渉の可能性のある格子点について，そのZ-mapモデルを干渉計算の初期値とし，以下の代入を行う。

Fig. 7 Calculation of the distance between a virtual probe and a virtual master-model

$$m \leftarrow m_{i,j}^t, n \leftarrow n_{i,j}^t, u \leftarrow u_{i,j}^t, w \leftarrow w_{i,j}^t, a \leftarrow r \quad (8)$$

ここで r は仮想プローブ半径とする。さらに図 7 に示されるように、自由曲面と仮想プローブの中心位置との距離 a の関係から、式(9)が得られる。

$$\begin{bmatrix} g_1(u, w, a) \\ g_2(u, w, a) \\ g_3(u, w, a) \end{bmatrix} \equiv P_{m,n}(u, w) + aN - R = 0 \quad (9)$$

ここで R は仮想プローブ中心の位置ベクトル、すなわち x_s であり、 N は最短距離点での仮想マスタモデル表面の単位法線ベクトルで式(10)で与えられる。

$$N = \frac{\left(\frac{\partial P_{m,n}(u, w)}{\partial u} \times \frac{\partial P_{m,n}(u, w)}{\partial w} \right)}{\left| \frac{\partial P_{m,n}(u, w)}{\partial u} \times \frac{\partial P_{m,n}(u, w)}{\partial w} \right|} \quad (10)$$

STEP-4 式(9),(10)より微小補正項 $\Delta u, \Delta w, \Delta a$ を求める。

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta w \\ \Delta a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u} & \frac{\partial g_1}{\partial w} & \frac{\partial g_1}{\partial a} \\ \frac{\partial g_2}{\partial u} & \frac{\partial g_2}{\partial w} & \frac{\partial g_2}{\partial a} \\ \frac{\partial g_3}{\partial u} & \frac{\partial g_3}{\partial w} & \frac{\partial g_3}{\partial a} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -g_1(u, w, a) \\ -g_2(u, w, a) \\ -g_3(u, w, a) \end{bmatrix} \quad (11)$$

STEP-5 もし、許容誤差を ε とし、

$$|P_{m,n}(u + \Delta u, w + \Delta w) - P_{m,n}(u, w)| < \varepsilon \quad (12)$$

かつ、

$$\left| \Delta a \left(\frac{\partial P_{m,n}(u, w)}{\partial u} \times \frac{\partial P_{m,n}(u, w)}{\partial w} \right) \right| < \varepsilon \quad (13)$$

であればSTEP-7を行う。

STEP-6 パラメータを式(14)に従い変更する。

$$u \leftarrow u + \Delta u, w \leftarrow w + \Delta w, a \leftarrow a + \Delta a \quad (14)$$

もし、 $0 \leq u, w \leq 1$ であれば、STEP-4に戻り、そうでなければ、パラメータ値に従い曲面パッチ番号を変更しSTEP-4に戻る。

STEP-7 もし、仮想プローブとの距離 a が、

$$a = |R - P_{m,n}(u, w)| \leq r \quad (15)$$

ただし、 r ：仮想プローブ半径

であれば、仮想プローブが曲面内部に干渉していることになる。この時、仮想プローブが受ける仮想マスタモデルからの反力 f_r は、図 4 のモデルからばねによる反力 f_k と粘性による反力 f_b の和となり、式(16)により計算する。ただし、 $c = r - a$ とする。

$$f_c = f_k + f_b = kcN - b(\dot{x}_s \cdot N)N \quad (16)$$

仮想プローブが曲面と干渉していない場合には、

$$f_c = 0 \quad (17)$$

とする。

STEP-8 仮想プローブが仮想マスタモデルと干渉していない場合には、仮想プローブ中心を工具中心として工具経路を生成する。また、干渉している場合には、仮想プローブは仮想マスタモデル表面内部に微小に食い込んでいたため、仮想プローブ中心をそのまま工具経路とすることは出来ない。そこで、本ソフトウェアでは、仮想プローブと仮想マスタモデルとの最短距離を与える点とその点での曲面の法線、干渉量から工具中心位置に対する補正ベクトル δr を計算し、正確な工具中心位置 R^* を式(18)により求める。

$$R^* = R + \delta r \quad (18)$$

仮想プローブと干渉する面が 1 枚の場合には、補正ベクトル δr を仮想プローブ中心を最短距離点における曲面の法線方向に、干渉距離 c だけ移動するベクトルとし、式(19)により求める。

$$\delta r = cN \quad (19)$$

また、干渉する自由曲面が 2 枚の場合には、工具の補正ベクトルと各最短距離点での曲面の法線 N_1, N_2 との内積が各干渉距離 c_1, c_2 となること、さらに補正ベクトルが工具の中心を通り N_1, N_2 により張られる平面にあるという条件より、補正ベクトルを式(20)により計算できる¹⁰⁾。

$$\delta r = \begin{bmatrix} N_{1x} & N_{1y} & N_{1z} \\ N_{2x} & N_{2y} & N_{2z} \\ (N_1 \times N_2)_x & (N_1 \times N_2)_y & (N_1 \times N_2)_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

また干渉する自由曲面が 3 枚である場合には、各最短距離点での法線と補正ベクトルとの内積が各点での干渉距離と等しい条件により式(20)と同様に工具の補正ベクトルを求められる。

以上のアルゴリズムにより、本システムでは仮想マスタモデルを表す 3 枚の自由曲面との距離計算、反力計算、そして工具経路の生成計算を、パーソナルコンピュータ(32bit/72.7 SPECfp92)を用いて、3ms以内で行うことが可能である。この計算時間は $k = 5.0 \times 10^4 \text{ N/m}$ という高い剛性の仮想マスタモデルを安定して実現できる。

5. 自由曲面の微い作業

仮想微いシステムにおいては、作業者が仮想マスタモデルの表面を確実に微うことができないとしない。そこで、本システムによる仮想マスタモデルの微い作業時の操作力の評価を行い、次いで、微い加工の特徴が最も活かされる複数の曲面の間を微うペンシル微いを想定し、生成される工具経路の精度について評価実験を行った。なお、システムの制御周期は 3ms である。また、制御系のパラメータはそれぞれ、 $m_s = 4.0 \text{ kg}$, $b_s = 22.0 \text{ Ns/m}$, $k_f = 20.0, 30.0, 15.0 \text{ N/m}$ (順に x, y, z 方向の値), $k_v = 1.0 \times 10^3 \text{ Ns/m}$, $k_p = 1.5 \times 10^3 \text{ N/m}$, $m = 0 \text{ kg}$, $b = 1.25 \times 10^3 \text{ Ns/m}$, $k = 5.0 \times 10^4 \text{ N/m}$ とした。これらのパラメータの値については予備実験により、プローブの仮想マスタモデルへの接触時の食込み量や振動などの動特性を検討し設定した。

5.1 仮想微いシステムの操作力特性

y 軸方向に高さが一様で x 軸方向に高さが変化する仮想マスタモデルを用い、x-z 平面内で仮想微い作業を行った。その際のバイラテラルデバイスと仮想プローブの軌跡ならびに操作力の変動を図 8 に示す。仮想プローブはほぼ仮想マスタモデルの形状を微っている。しかし、作業者が実際に操作するプローブは、バイラテラルデバイスの動特性のために仮想マスタモデル

(a) Movement (b) Operating force

Fig. 8 Profiling of virtual master-model

Fig. 9 An example of virtual master-model

Fig. 10 Output from the cutting simulation software

Fig. 11 Error of the generated tool path

ル形状とは異なった軌跡で移動している。しかし、x軸方向及びz軸方向の操作力は滑らかに変化しており、円滑な加工作業が行われていることがわかる。

5.2 仮想加工システムの仮想加工の精度

本システムにより、図9に示す3枚の自由曲面から成る仮想マスタモデルの曲面間のペンシル加工を行い、生成される工具経路の精度の評価を行った。切削工具半径を3mmとし、仮想プローブを曲面1、2の交線→曲面1、2、3の交点→曲面2、3の交線と移動させ工具経路を生成した。この際の切削シミュレーションソフトウェアの出力を図10に示す。この際に生成された工具経路中心座標と自由曲面までの距離をNewton-Raphson法により十分な精度で計算し、この距離と工具の半径との差である誤差を求めた結果を図11に示す。横軸は経過時間(s)、縦

軸は誤差(μm)を表す。仮想プローブは、経過時間 $t = \text{約}1\text{s}$ までは、どの曲面とも接触していないためにグラフは下限にある。 $t = \text{約}1 \sim 7.4\text{s}$ では曲面1と曲面2に同時に接触しており、 $t = \text{約}7.4 \sim 9\text{s}$ では、曲面1、2、3すべてに接触している。その後は曲面2と曲面3に同時に接触していることがわかる。このグラフより、本システムにより生成される工具経路の誤差は、最大 $\pm 0.1\mu\text{m}$ であり、NCデータとして十分な精度であることがわかる。

6. 結 論

自由曲面加工用NCプログラミングにおける現在のCAMシステムの問題点を論じ、これを解決するために人工現実感を導入し、従来の加工と同様なインタフェースを備えたプログラミングシステムの研究を行った。本論文の結論は以下にまとめられる。

- (1)自由曲面形状に対するNCプログラミングのためのマスタモデルの必要のない、高精度な仮想加工システムを提案した。
- (2)仮想加工システムのために、リニアサーボモータを用いた3軸直交型バイラテラルシステムを構築した。
- (3)自由曲面モデル（仮想マスタモデル）に対する高速加工シミュレーションアルゴリズムを開発した。
- (4)仮想加工システムを構築し、仮想マスタモデルの加工作業を行うことにより、システムの制御周期3msにおいて工具経路を $\pm 0.1\mu\text{m}$ の精度で生成可能であることを実験的に示した。

謝 辞

本研究は、高度自動化技術振興財団、中山科学振興財団の援助によりなされた。日本精工(株)佐藤忠一氏、柴崎弘氏には、機器の使用にご尽力いただいた。また池上金型工業(株)佐々木哲夫氏、並びに(株)グラフィックプロダクツ田端雅和氏には、技術上のコメントを頂いた。ここに記して感謝する。最後に、本研究に協力された渡邊賢司氏(現(株)安川電機)に感謝する。

参考文献

- 1) 蔡 明達, 乾 正知, 木村文彦, 高田祥三: 物理モデルの評価に基づく加工情報の自動生成, 1990年度精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, (1990) 513.
- 2) 鈴木 裕, 山崎和雄, 星 鐵太郎, 黒宮義久: 実時間金型加工用数値制御システムの開発 (第2報) 実時間工具生成について, 精密工学会誌, 53, 12 (1987) 1952.
- 3) 近藤 司, 斎藤勝政, 岸浪建史, 白井健二: 曲面加工における削り残し領域の認識と加工処理に関する研究, 1991年度精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, (1991) 551.
- 4) 倉賀野哲造, 佐々木伸夫: 意匠的に特徴ある自由形状加工用工具経路自動生成システム, FRES DAM/M, 精密工学会誌, 56, 5 (1990) 879.
- 5) 舩 明暉, 水垣善夫, 坂本正史: 遺伝的アルゴリズムによる最適工具群の選択, 精密工学会誌, 60, 9 (1994) 1237.
- 6) 神徳徹雄, 谷江和雄, 横井一仁, 藤川昭雄: 仮想環境におけるバイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションに関する基礎的研究, 計測自動制御学会論文集, 28, 6 (1992) 750.
- 7) Y. Adachi: Touch and Trace on the Free-Form Surface of Virtual Object, 1993 IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, Seattle, USA, Sept, (1993) 162.
- 8) 光石 衛, 割澤伸一, 閉念磨聡, 畑村洋太郎, 長尾高明: 超環境を結ぶヒューマン・フレンドリーな生産システム, 第7回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, (1990) 551.
- 9) M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F.P. Brooks, Jr. and M. Behensky: Feeling and Seeing: Issues in Force Display. Computer Graphics, 24, 2 (1990) 235.
- 10) I.D. Faux and M.J. Pratt: Computational Geometry for Design and Manufacture, Ellis Horwood Ltd., New York (1979) 268.