

非回転切削機構を用いた曲面加工用 CAM システムの開発*

神谷昌秀*¹, 島田元浩*², 鈴木裕*³
竹内芳美*⁴, 佐藤真*⁵Development of CAM System for Non-rotating Machining
of Curved SurfaceMasahide KOHYA, Motohiro SHIMADA, Hiroshi SUZUKI,
Yoshimi TAKEUCHI and Makoto SATO

The multi-axis machining technology using a non-rotating cutting tool can produce a well-finished surface with little machining damage or roughness, and can be used to remove the remaining material in a concavity formed by the ball-nosed end mill. This technique will extend the machining limits beyond the processing capability of the rotating tool. However, the single-blade non-rotating tool does not have a long life nor a flexibility for cutting various shapes. Therefore, a cylindrical non-rotating tool with long life and multiusability has been developed. This tool machines using a sharp blade having a wide curvature which gets shape by its inclination toward the feed direction. The cylindrical non-rotating tool can precisely machine a wide surface always with a sharp portion of the blade, because it can perform cutting at an arbitrary position on the blade due to spindle axis turn positioning. On the other hand, non-rotating machining with μm scale cutting depth requires more precise CL data than is necessary with a rotating tool. If such CL data are generated by existing methods, a greatly increased quantity of data results, and more time is required to generate an offset surface. However, the copy simulation CAM method for multi-axis machining has been developed, which makes it possible to calculate highly precise CL data without offset processing. The imaginary stylus of this copy simulation CAM method traces on a surface of the defined shape while it self-determines the distance and course to the defined shape. Therefore, it is easy to determine the necessary tool axis vector for multi-axis machining, and the present method can generate highly precise CL data for non-rotating cutting. Results of machining experiments with this CAM method and the cylindrical non-rotating tool show that (1) it was able to get a good surface with approximate roughness of $2\ \mu\text{m} R_a$ by smoothing machining, (2) it was able to completely removed material remaining in the concavity formed by a ball-nosed end mill, (3) the non-rotating tool and copy simulation CAM method for multi-axis machining can significantly extend the machining limits.

Key Words: CAM, Machine Tool, Non-rotating Cutting Tool, CL Data, Multi-axis Feed Mechanism

1. 緒 言

金型等の曲面加工には、ボールエンドミル等の回転工具が一般に用いられる。しかしながら、回転機構を用いるため、切削位置によって加工面粗さが異なり、特に回転軸近傍では、切削速度が低くなることから良好な面粗さを得ることができないことが指摘されている⁽¹⁾。また、工具半径以下の凹部では、切り残しが生じ

る等の問題がある。

こうした問題を解決し、良好な仕上げ加工面を得るために新たな非回転切削工具と六軸制御加工機を用いたシステム開発を行ってきた⁽²⁾。

本報では、さらに長時間の平滑加工が可能となる非回転工具を開発した。こうした非回転工具による加工では、切込み深さが数 μm から十数 μm と小さいことから、さらに高精度なCLデータが必要となる。そのため、定義モデルから直接的に、高精度なCLデータを算出できる三軸微いシミュレーション法⁽³⁾を基に、非回転切削加工を行うための六軸微いシミュレーションCAMシステムを開発した。このCAMシステムを曲面の平滑加工と凹部での加工残り除去加工に適用し、その有効性について検討したので報告する。

* 原稿受付 1995年12月19日。

¹ 正員、福岡県工業技術センター (☎ 807 北九州市八幡西区明松3-6-1)。² 正員、(株)豊田中央研究所 (☎ 480 11 愛知県愛知郡長久手町長瀬横道41-1)。³ 正員、九州工業大学情報工学部 (☎ 820 飯塚市川津680-4)。⁴ 正員、電気通信大学電気通信学部 (☎ 182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。⁵ (株)牧野フライス製作所 R & D センタ (☎ 243 03 神奈川県愛甲郡愛川町三増359-3)。

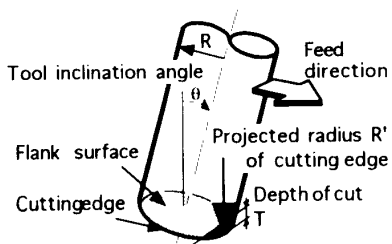


Fig. 1 Cylindrical non-rotating tool

2. 曲面平滑加工用非回転工具の開発

2.1 非回転円柱工具 非対称断面の溝加工等に用いられる非回転切削加工では、使用する工具を加工断面の形状に成形し、送り機構を利用して切削加工する。こうした工具では、加工断面に応じた刃先形状にその都度、成形する必要がある。また、加工対象が大きくなれば、切れ刃が1枚しかないため、工具寿命の点で十分とはいえない。

このような課題を解決するため、本研究では、図1に示す円柱を水平に切断した切口の稜線を切れ刃とする非回転工具(以降、非回転円柱工具という)を開発した。

この非回転円柱工具は、その工具軸を切削方向へθ°傾斜させることにより、近似式(1)で示されるように切れ刃の投影断面半径R'を変化させることができる。ここで、傾斜角θ°は、円柱側面であるすくい面が正となる工具傾斜方向を正とした。

$$R' = \frac{T^2 + R^2 - \left(\frac{T - R \sin \theta}{\sin \theta}\right)^2}{2T} \dots\dots\dots (1)$$

本工具は円柱形状を成すことから、製作が容易であり、主軸の割出し機構を用いることによって、鋭利な切れ刃を常に切削点へ向けることが容易にできる。しかも、全周が切れ刃として使用できるため長時間の加工が可能で、主軸による切れ刃位置の割出しや工具交換の場合にも、切れ刃位置の精度確保が容易である等の長所が考えられる(4)。

2.2 基礎実験 非回転円柱工具は、工具軸を傾斜させて切削加工し、しかもすくい面が凸面であるため、すくい角が位置によって変化する。そのため、適正な加工が可能となる傾斜範囲を把握することが必要である。

予備実験において、傾斜角θ°が正の範囲では、びりマークを生じ、良好な加工面を得ることができなかった。そこで、傾斜角θ°が負の領域について表1に示す条件で実験を行った。

Table 1 Experiment conditions

Tool shape	φ 25 Cylinder
Quality of material	Powder high speed steel
Roughness in cutting edge	1.0 μmRy
Work piece	S55C
Inclination angle of tool	0 ~ -30°
Depth of cut	5 ~ 20 μm
Width of cut	5 mm
Feed rate	500 ~ 2000 mm/min

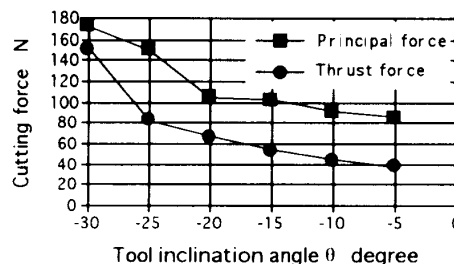


Fig. 2 Relationship between tool inclination angle and cutting force

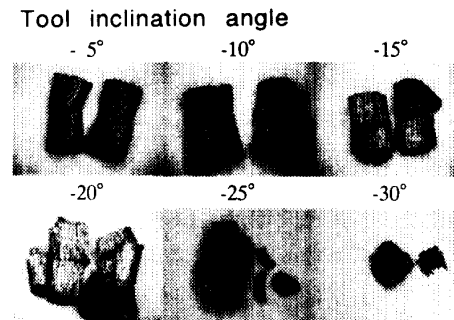


Fig. 3 Relation between tool inclination angle and cutting chips

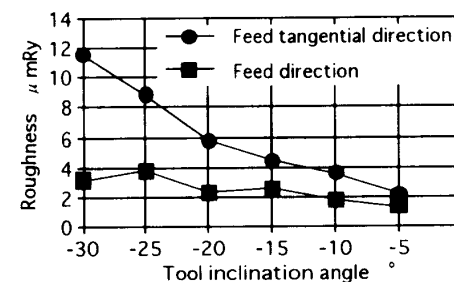


Fig. 4 Relation between tool inclination angle and roughness of cutted surface

その結果を図2に示す。切削抵抗の主分力は、傾斜角θ°が-20°より小さい領域で、背分力は-25°より小さい領域で大きく増加した。そのときの切りくず状態を図3に示す。-20°までは連続的な流れ形の切りくずが巻き状に排出されたが、-20°より小さい領域では不連続な切りくずとなった。

次に、加工面の表面粗さを図4に示す。その表面粗

さは、傾斜角 θ° が 0° に近づくに従って小さくなっており、 $2\ \mu\text{m}Ry$ が達成できた。このことから、傾斜角 θ° は、できるだけ 0° に近い角度がよいと言える。

以上のことから、本工具で良好な切削が可能な傾斜範囲は、小さな切削抵抗で安定した切削が行える 0° から -20° の範囲で、工具傾斜角ができるだけ 0° に近いほど、良好な加工面が得られると考えられる。

この傾斜範囲で直径 25 mm の非回転円柱工具を用いた場合、切削面に転写される切れ刃の断面半径 R' は、式(1)より 36 mm から無限大となり、1本の工具で広範囲な加工断面に対応できることがわかる。

3. 非回転切削加工用 CAM システム

3.1 倣いシミュレーションアルゴリズム 非回転切削加工では、 μm 単位の切込みで曲面切削を行うため、高精度な CL データが必要となる。このような CL データを算出する場合、従来手法では処理時間がかかり、データ量が非常に大きくなることが予想される。また、オフセット面を離散データで表現する手法⁵⁾では、特徴線や曲面の精度の点で問題がある。

そこで、定義モデル形状から直接、高精度な CL データを算出する手法として、倣い加工機の動作原理に基づく CAM システムを開発した。

本手法は、モデル形状と仮想スタイラスを定義し、図5(b)に示すように、仮想スタイラスの中心を通る法線ベクトル \vec{L} を算出する。次に、式(2)に示すようにその法線ベクトル \vec{L} のスカラー量と仮想スタイラ

ス半径 r の差分をスカラー量とする差分ベクトル $\Delta\vec{R}$ を算出し、この差分ベクトルが、倣い加工機のスタイラス変位と等価と考える。倣い動作原理に基づき、動作平面内でこの差分ベクトル $\Delta\vec{R}$ を二次元補正処理することによって、仮想スタイラスがモデル表面を倣うように自発的に動作し、CL データの算出を行うことができる。

本手法は、モデル形状から直接的に高精度な CL データ算出を行うと同時に、自己干渉回避が可能であるなどの長所がある。

$$\Delta\vec{R} = (r - |\vec{L}|) \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|} \dots\dots\dots (2)$$

3.2 非回転切削加工用 CAM システム

非回転切削加工では、切削点に対して工具を適切な位置と姿勢に位置決めする五軸制御機構と非回転工具の切れ刃面を切削方向へ向ける主軸制御機構が必要となる。

工具位置の算出は、非回転工具の切削点に倣いシミュレーションを行うための仮想スタイラスを設定し、この仮想スタイラスが定義モデル表面を倣うことによって、切削点の CL データを決定する。

また、工具姿勢と切れ刃面の方向は、仮想スタイラスの中心点に与えられる法線ベクトルと動作平面を基に決定する。仮想スタイラスにおける差分ベクトル $\Delta\vec{R}$ は、モデル表面とスタイラス表面との距離と方向を表している。したがって、切れ刃上や工具の必要な位置に制御点として第2、第3の仮想スタイラスを設定し、これらが定義モデル形状表面と接触する位置を算出することによって、切れ刃が精度よく定義モデル表面を倣う工具姿勢を決定することができる。

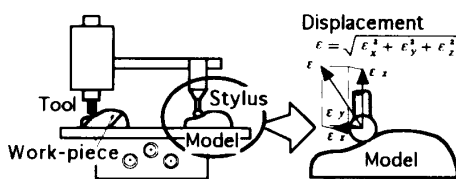
非回転切削加工では、非対称形状断面の溝加工や曲面の平滑加工、凹形状部での回転工具の工具半径以下の加工残り除去加工などが想定される。そこで、本報告では、曲面の平滑加工、凹形状部での残り除去加工を対象とした倣いシミュレーションの開発を行った。

(1) 曲面平滑加工

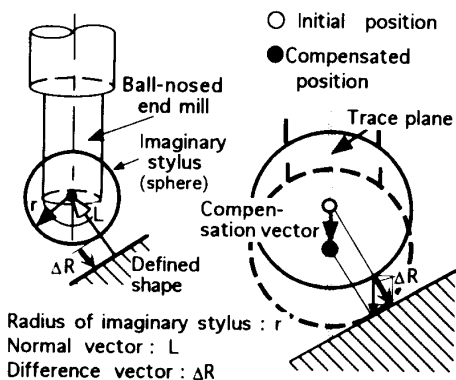
非回転円柱工具では、びびりなどが生じず良好な切削ができる工具傾斜範囲は、 0° から -20° である。また、凹面形状で工具干渉が生じる場合、上記の範囲内であれば、工具傾斜角を干渉しない角度とすることで加工できる。

図6(a)にその概念を示し、動作平面と切れ刃稜線との交点はその切削点となる。この切削点に半径 r の仮想スタイラスを定義し、この仮想スタイラスが倣い動作するように、走査線モードの倣いシミュレーションアルゴリズムを適用すればよい。

図6(b)に示すように、工具軸ベクトルは、切削点



(a) The copy machine tool



(b) The copy simulation in CAM system

Fig. 5 Concept of the copying simulation

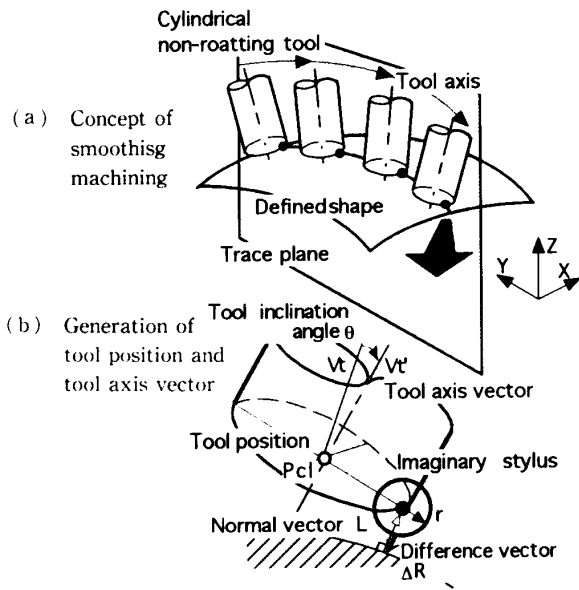


Fig. 6 Smoothing machining with a cylindrical non-rotating tool

に対して工具を傾斜角 θ° だけ傾けた工具軸ベクトルを算出する必要がある。仮想スタイラス中心に対する法線ベクトル \vec{L} を基本工具軸ベクトル \vec{V}_i とすると、この基本工具軸ベクトル \vec{V}_i の送り方向成分と他の 2 成分の合成が成す平面内でベクトル \vec{V}_i を送り方向へ θ° 傾斜させたベクトルを工具軸ベクトル \vec{V}'_i とすればよい。

また、工具軸ベクトル $\vec{V}'_i(i, j, k)$ および動作平面内で、そのベクトルに直角でスカラー量が工具半径 R であるベクトルを考え、工具中心位置 $Pcl(x, y, z)$ を算出し、CL データとして出力する。

出力された CL データは、ポストプロセッサを経由し、六軸加工機を動作させるための六軸 NC データに変換される⁽⁶⁾。

(2) 凹部残りの除去加工。

ボールエンドミル加工で生じる工具半径以下の凹部残りを除去加工するためには、非回転工具の切れ刃形状をその断面とほぼ同形状に成形し、その切れ刃が凹部残りをなぞるように動作させる。つまり、その凹部の特徴線に沿って、三次元的な輪郭倣い加工をする。そのためには、凹部残り断面において、切れ刃先端がその断面の交線に位置し、切れ刃がその断面線に接する位置を算出して、工具姿勢を決定する必要がある。

そこで、図 7 に示すような工具形状と工具座標系を設定した。つまり、切れ刃先端 P_2 に工具位置としての仮想スタイラスを設け、工具姿勢を決定するための仮想スタイラスを点 P_1 または P_3 に設ける。それぞれの半径は r である。

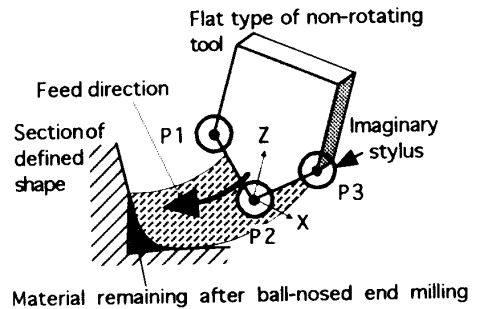


Fig. 7 Flat type of non-rotating tool

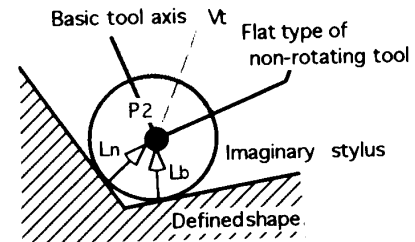


Fig. 8 Compensation at the tip of the cutting edge

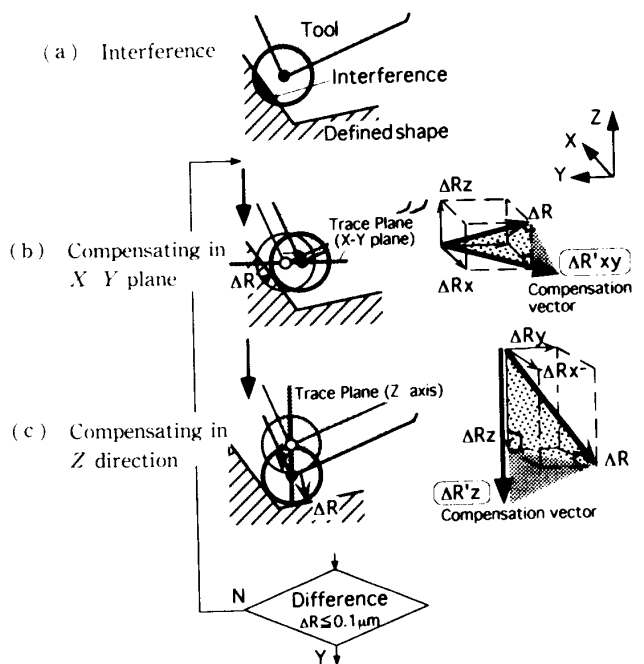


Fig. 9 Compensation in 3D profile tracing

まず、図 8 に示す刃先端 P_2 の仮想スタイラスが、凹部残りの断面を構成する 2 線と同時に接触する位置を決定する。図 9 に、そのアルゴリズムを説明する。

図 9(a) に示す仮想スタイラスが凹部残りにおいて、ある一面に食い込んだ状態であるとする。まず、図 9(b) の等高線輪郭モードの XY 方向補正処理を行う。この場合の動作平面は、 XY 平面であり、三次元成分から成る差分ベクトル $\Delta\vec{R}$ を直角三角形の辺の長さの相似関係から $\Delta\vec{R}'_{xy}$ を算出し、仮想スタイラス

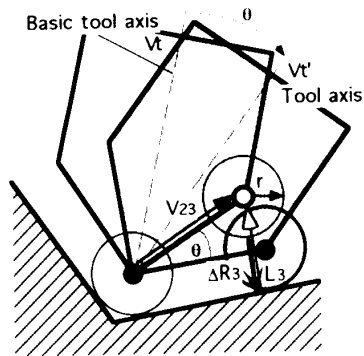


Fig. 10 Tool axis calculation

が接触するように二次元補正する。

次に、図9(c)に示すように他の一面と接触するようにZ方向の補正を行う。この場合の補正動作方向は、Z軸のみであり、三次元成分から成る差分ベクトル ΔR_2^z から ΔR_2^z を同様に算出して補正する。

以上の処理を繰り返し、仮想スタイラスが2面と接触状態 ($\leq 0.1 \mu\text{m}$) となった位置を工具位置として決定する。

このときの二つの法線ベクトルからその中間方向を求め、基本工具軸ベクトル V_i とする。

次に、制御点 P_1 または P_3 の仮想スタイラスが一面に倣う動作をさせる。図10に示すように、指定したいいずれかの仮想スタイラスが、そのモデル表面と接触するための差分ベクトル ΔR_1^z または ΔR_3^z を求める。

この値を基に、工具先端 P_2 からのベクトル V_{23} と成す角度 θ に基づき、基本工具軸ベクトル V_i を補正し、刃面が接する正確な工具軸ベクトル V_i' を決定する。

次点への移動は、 P_2 の仮想スタイラスが2面と接触した位置において、等高線輪郭モードにおける動作平面内(XY平面)で、基本工具軸ベクトルのXY成分に対して垂直に、次位置を算出し移動を行う。

また、仮想スタイラス径は、仕上げ代を考慮した変数として定義し、切り込み量に応じて変化させる。

4. シミュレーションおよび加工実験

4.1 シミュレーション結果

(1) 曲面平滑加工

モデル形状は三次元形状とするため、図11に示す半径500mmの球を定義し用いた。加工モードは走査線加工で、工具径が25mm、工具傾斜角は -5° である。

図12に、そのCLデータ算出結果を示す。

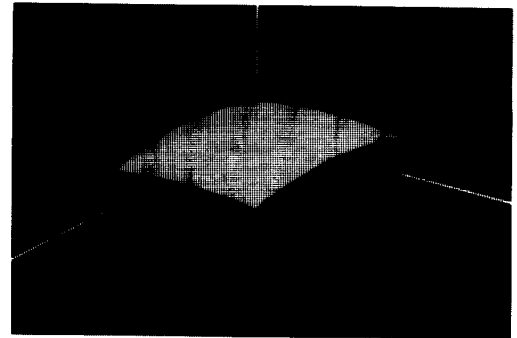


Fig. 11 Defined shape for smoothing machining

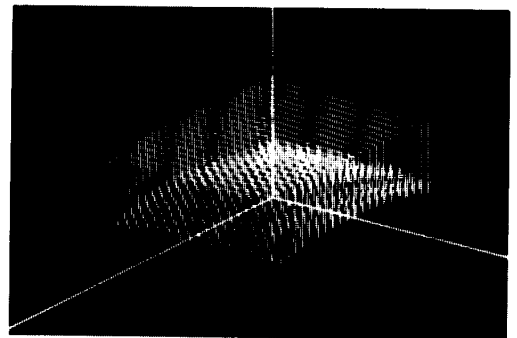


Fig. 12 Result of CL data generated of smoothing machining

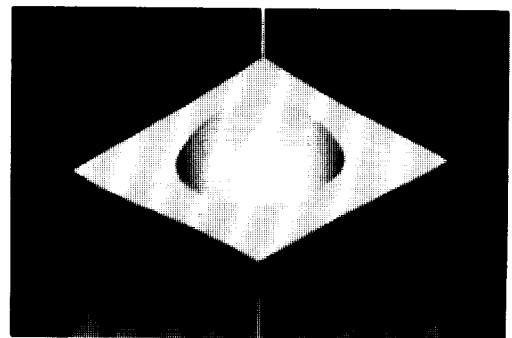


Fig. 13 Defined shape for removing remaining material

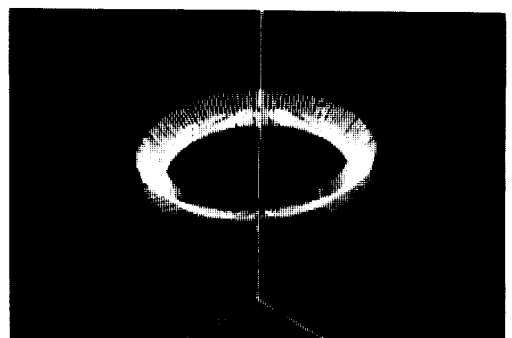


Fig. 14 Result of CL generated of removing remaining material

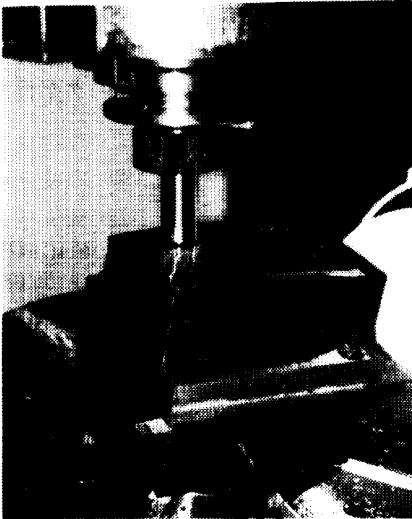


Fig. 15 Smoothing machining with a cylindrical non rotating tool

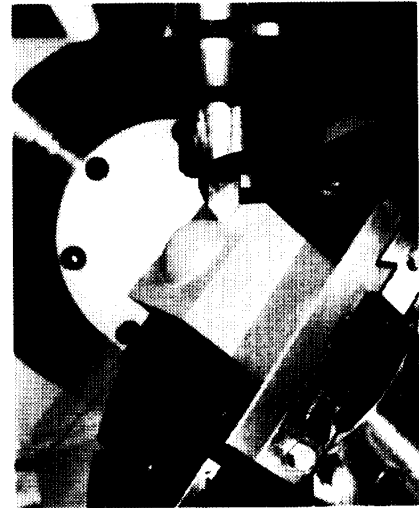


Fig. 18 Removing remaining material with a flat type of non rotating tool

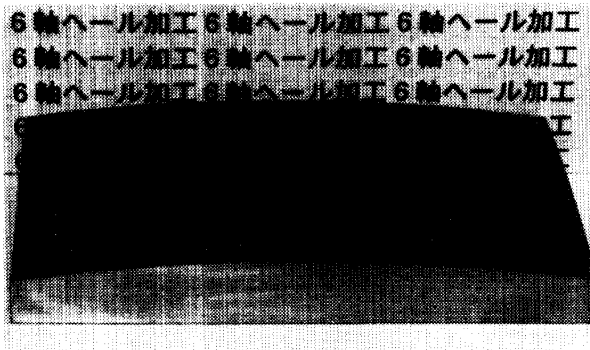


Fig. 16 Smoothed surface

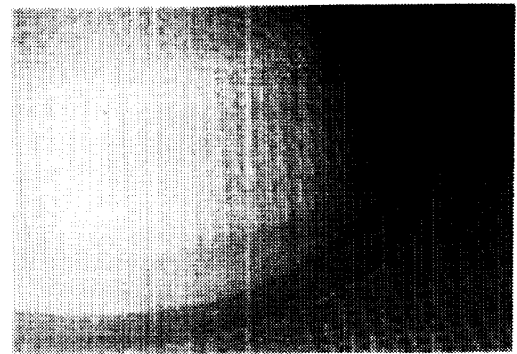


Fig. 19 Surface after removing remaining material

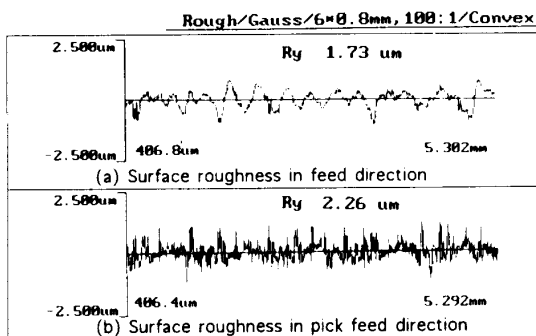


Fig. 17 Roughness of smoothing machined surface

(2) 凹部残りの除去加工

モデル形状を図13に示し、自由曲面上に半径25mmの球を配置して、その境界部を凹部残りとして想定した。

この加工残り面は、三次元輪郭形状となり、自由曲面側と球面側にそれぞれ倣う加工モードで加工した⁽⁷⁾。

図14に、自由曲面側のCLデータ算出結果を示す。

4・2 加工実験結果

(1) 曲面平滑加工

NAK55材をボールエンドミルで加工し、切り残しの高さが70 μ mの曲面を形成した。

その表面に対し、図15に示すように非回転円柱工具を工具傾斜角 -5° 、ピクフィード1.0mmの条件で適用し、同時六軸制御加工を行った。使用した非回転円柱工具は、 $\phi 25$ で円柱側面と底面を研磨し、その面粗さから刃先稜線の算術面粗さは1 μ m R_y である⁽⁸⁾。

その結果、図16に示す良好な加工面が得られ、その加工面の面粗さは図17に示す約2 μ m R_y であった。

(2) 凹部残りの除去加工

ケミカル材をR5ボールエンドミルで三軸加工した後、図18に示すように凹部の残り除去加工を行った。

工具の刃先形状は、直線部と円弧を交わらせた加工断面形状であり、刃先干渉を避けるためにモデル形状

よりその挟角を 5° 小さくした。加工モードは、自由曲面側と球面側にそれぞれ倣う加工で、1回の切り込み量は $50\ \mu\text{m}$ である。

加工された凹部を図19に示し、自由曲面側と球側、それぞれに加工残りが無い状態であることがわかる。

5. おわりに

曲面平滑加工では、半径 $500\ \text{mm}$ の球面で約 $2\ \mu\text{m Ry}$ の面粗さが得られた。また、凹部残りの除去加工では、ボールエンドミル加工で生じる加工残りの除去が、可能であることが明らかとなった。

すなわち、開発した非回転円柱工具が曲面の平滑加工に有効で、しかも倣いシミュレーションアルゴリズムが、六軸制御加工に対して適用できたことを示すものである。このことは、倣いシミュレーションアルゴ

リズムが、三軸加工から六軸加工まで統一的なアルゴリズムとして利用可能で、定義モデル形状から直接的に算出可能なため、高精度な CL データが得られることを示すものである。

文 献

- (1) 内藤国雄・ほか5名, 精密工学会誌, **59** 4(1993), 649-654.
- (2) 竹内芳美・ほか4名, 精密工学会誌, **60** 12(1994), 1786-1790.
- (3) 神谷昌秀・ほか3名, 機論, **61**-590, C(1995), 4111-4116.
- (4) 鈴木裕・ほか4名, 1995年度精密工学会春季大会学術公演会公演論文集, C02(1995), 43-44.
- (5) 近藤司・ほか2名, 精密工学会誌, **54**-05(1988), 971-976.
- (6) 竹内芳美・渡辺隆弘, 精密工学会誌, **58** 9(1992), 1586-1592.
- (7) Takeuchi, Y., *Annals of the CIRP*, **43** 1 (1994), 341-344.
- (8) 小島一志, 応用機械工学, **29** 2(1988), 86-91.