工具先端部不動点を有する 5 軸曲面 仕上工具の研究*

檜原弘之** 近藤 司** 三好隆志** 斎藤勝政**

A Study on a 5-axis Machine Tool for Sculptured Surface Having a Fixed Point
in the Tip of the Tool

Hiroyuki NARAHARA, Tsukasa KONDO, Takashi MIYOSHI and Katsumasa SAITO

This paper deals with an analysis of 5 axis-machine tool head with seven links. A fixed point in a tip of the tool is observed with the mechanism proposed. The utilization of a multi-axial machine is expected to make high efficiency of machining and finishing process for free form die. The variation of the head movement speed can be decreased with the mechanism proposed compared to an arm type 5-axis machine head. The effect of link distance error caused by a fabrication of the system is also discussed. The validity of the system is experimentally confirmed with wax models machining.

Key words: 5-axis control machine, mechanism, sculptured-surface

1. 緒 言

自由曲面を持つ金型の加工・仕上において、4 軸以上の多軸機械の利用は、高能率化、自動化の期待が持たれている。多軸により高速化、高能率化が可能となる理由として、段取替えが不要となり、自由曲面を有するワークに対して線/面切削が可能となることがあげられる。しかしながら 3 軸の場合と比較して、主軸旋回型での剛性低下、バックラッシュの問題、テーブルに回転 2 軸を付加する場合はワークが大型・重量物の場合に重量制限や段取替えの問題が生じたり、軌道生成の際に補間を適切に行わないと切込みを生じる問題¹⁾、工具・ホルダの干渉回避のための工具経路決定問題²⁾等、検討すべき点が多く残されている。機構による解決を意図して、多軸に特殊な構造を付与し、リンク機構を用いた工具先端部に不動点を有する 5 軸曲面仕上工具を開発した。

別の構造により不動点機構を実現した装置が報告されている。それは 45° 軸を傾けた形で回転軸を構成するもので、レーザカットやモデル加工に用いられている³⁾。しかしこの機構の場合主軸を片側で支持する構成しかとれないが、今回提案する機構では、主軸を

両側から支える構造も可能となる。

本報では、不動点機構を用いた 5 軸仕上工具の原理および首振り型 5 軸と比較した場合の特徴について報告し、その優位な点、問題点について述べる。

2. 原 理

図 1 に 7 節リンクの機構図を示す。各リンク長、リンクのなす角を、図に示すようにとる。いま、リンク L_a, L_b の交点を $[x, y] = [0, 0]$ とすると、リンク L_1 先端部の座標 $[x, y]$ は、

$$\begin{aligned} [x, y] = & [L_b + L_c \times \cos(\theta_c) + L_f \times \cos(\theta_c - \theta_{ef}) \\ & - L_1 \times \cos(\theta), \\ & L_c \times \sin(\theta_c) + L_f \times \sin(\theta_c - \theta_{ef}) \\ & - L_1 \times \sin(\theta)] \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここでリンク長を

$$L_a = L_c = L_i, \quad L_b = L_d, \quad L_f = L_h, \quad L_e = L_g$$

と設定すると、リンクは平行四辺形を形成するため、

$$\theta_{ab} = \theta_{ef} = \theta_{gh} = \theta_c = \theta_i$$

Fig. 1 Fix point mechanism

* 原稿受付 平成 2 年 12 月 14 日。1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成 2 年 9 月 30 日)にて発表

** 正 会 員 北海道大学工学部(札幌市北区北 13 条 西 8 丁目)

Fig. 2 Concave cutter path data

が成立し、よって $[x, y]$ は、 θ_{ab} によらず
 $[x, y] = [L_b + L_t, 0]$

と一定値となる。

ここで x 軸回りの回転 θ_x をリンクに付加して三次元空間でリンクの挙動を考えると、 θ_{ab} , θ_x によりリンク L_1 の先端部は不動としながら任意の姿勢にリンク L_1 を向けることができる。実際の工具においては、この不動点をボールエンドミル等の工具先端上の半球の中心に設定することで、任意方向からの加工が可能となる。

3. 特 徴

3.1 不動点機構の利点

不動点機構における特徴として以下が挙げられる。

- a) XYZ 軸の速度変動が小さい。
- b) 加工力に関して姿勢維持用モータ負荷が小さい。
- c) 工具軌跡計算が単純。

次に、それぞれの特徴について述べる。

- a) XYZ 軸の速度変動が小さい

位置と姿勢が構造的に完全に分離されているため形状加工において加工点の移動に対しその面の法線方向が急激に変化したとしても、首振り構造の工作機械のように工具先端部の位置を維持するために回転軸基部を xyz 方向に補正移動する必要がない。

同じ加工経路を指定したとき、各モータ軸に対する目標値の速度変動をシミュレーションにより求めた。

図2は、シミュレーションに用いた楕円体曲面のデータである。この曲面の法線方向に対して 45° 工具軸を傾けた状態で加工を行った場合、各軸への指令値、およびその速度変化を求めた。

シミュレーションデータとして、工具はボールエンドミルを用い、工具半径を 3 mm 、首振り5軸は工具中心から 100 mm に回転関節が存在するとし、不動点機構は各リンク長を 100 mm として与え、図2の工具軌跡の開始から終了までを 0 から 0.5 に正規化し、それを横軸として求めた。

図3に示すように、各軸に番号(1~5)を与えると。図4(a), (b)は、首振り構造の指令値および指

Fig. 3 Machine axis definition for simulation

Fig. 4 Command variation to each axis for arm type machine

令値の速度変化の結果である。図5(a), (b)は不動点機構の場合の指令値および指令値の速度変化の結果である。図4と図5を比較すると、不動点機構の場合は各軸に与えられる指令値の速度変化が小さい。

姿勢変化から生じる補正移動は慣性の大きい工作機械の場合、モータへ変動負荷として影響を与え、高速切削に不利な要因となると考えられる。

- b) 加工力に関して姿勢維持用モータ負荷が小さい

図6に示すように、首振り構造の工作機械において、主軸の姿勢を与える終段の回転軸中心から工具中心までの距離を L_a とするとき、切削力 F が工具中心から d_x 離れた点に加わった場合、終段の回転軸には $F \cdot (L_a - d_x)$ のモーメントが加わるのに対して、不動点機構の場合、 $F \cdot d_x$ の力しか加わらない。そのため切削力の変動による回転軸モータにかかる負荷変

Fig. 5 Command variation to each axis for fix point type machine

Fig. 6 Machining load on direction motor

動も小さくなる。このことは、高負荷切削において回転軸のモータに負荷に耐えられるだけ大きなものを探

Fig. 7 The difference of control software flow

用したり、あるいはクラッチ等で軸を固定していた従来の場合に比べて単純化が図れる。

c) 工具軌跡計算が単純

機構の違いにより、CL データが入力されてから行う処理の差異を図 7 に示す。

首振り構造の工作機械において、工具中心の位置・姿勢データから姿勢制御回転軸の位置を逆変換によって求めなければならない。通過点間のデータ補間を行うのに、各軸を独立に分割して動作させると切込みが発生するため、トロコイド補間¹⁾などの補間方法により各軸の駆動を行う必要がある。不動点機構の場合、加工情報として与えられた工具中心の位置・姿勢データに対して、位置のデータはそのまま用い、姿勢の回転角変換のみを工作機械側で計算すればよい。

3.2 問題点

不動点機構は、上記の利点がある反面、以下の問題点も有する。

a) 加工・組立誤差による不動点位置の振れの問題

リンク長がひとつでも設計値と異なる場合、入力角 θ_{ab} の変化に対してリンク L_1 の先端部 $[x, y]$ は不動点 $[L_b + L_i, 0]$ と一致しなくなる。各リンクの加工誤差により不動点位置にどれだけの影響が生じるか解析を行った。解析にはベクトルを用い⁴⁾、機構を 2 個の 4 節リンクの合成として連立して求めた。

いま機構を図 8 (a), (b) の 2 つの 4 節リンクに分ければ、4 節リンクは平面三角に分割して解くことがで

Fig. 8 Calculation step to determine tip of tool

き、入力角と出力角の関係式は以下のように表される。

$$\theta_c = \tan^{-1}(\sin c, \cos c) \quad (2)$$

$$\theta_{ef} = \theta_c - \theta_d \quad (3)$$

ただし、

$$\cos c = (p \times \cos(\theta_p) + L_d \times \cos(\theta_d)) / L_c$$

$$\sin c = (p \times \sin(\theta_p) + L_d \times \sin(\theta_d)) / L_c$$

$$\theta_d - \theta_p = \tan^{-1}(\sin p_d / \cos p_d)$$

$$\cos p_d = (L_c^2 - L_d^2 - p^2) / (2 \times L_d \times p)$$

$$\sin p_d = -(1 - \cos p_d^2)^{1/2}$$

$$\theta_p = \tan^{-1}(\sin p / \cos p)$$

$$p = (L_a^2 + L_b^2 - 2 \times L_a \times L_b \times \cos(\theta_{ab}))^{1/2}$$

$$\cos p = (L_a \times \cos(\theta_{ab}) - L_b) / p$$

$$\sin p = (L_a \times \sin(\theta_{ab})) / p$$

$$\theta_{mi} = \tan^{-1}(\sin g_i, \cos g_i) \quad (4)$$

$$\theta_{gh} = \theta_{mi} - \theta_{hf} \quad (5)$$

ただし、

$$\cos g_i = (q \times \cos(\theta_q) + L_h \times \cos(\theta_{hf})) / L_g$$

$$\sin g_i = (q \times \sin(\theta_q) + L_h \times \sin(\theta_{hf})) / L_g$$

$$\theta_{hf} - \theta_q = \tan^{-1}(\sin q_h / \cos q_h)$$

$$\cos q_h = (L_g^2 - L_h^2 - p^2) / (2 \times L_h \times q)$$

$$\sin q_h = -(1 - \cos q_h^2)^{1/2}$$

$$\theta_q = \tan^{-1}(\sin q / \cos q)$$

$$q = (L_e^2 + L_f^2 - 2 \times L_e \times L_f \times \cos(\theta_{ef}))^{1/2}$$

$$\cos q = (L_e \times \cos(\theta_{ef}) - L_f) / q$$

$$\sin q = (L_e \times \sin(\theta_{ef})) / q$$

$$\theta_i = \theta_{mi} + (\theta_c - \theta_{ef}) \quad (6)$$

入力角 θ_{ab} に対して、 θ_c , θ_{ef} , θ_i を計算し、先端部算出の式 (1) に代入してリンク先端部の座標 $[x, y]$ を求めることができる。誤差を図 8 (c) に示すように、理論

的不動点からの誤差ベクトルとし、その長さと偏角によって表した。

図 1 の各リンク長を 100 とし、そのうちのひとつのリンクが 0.1 長くなった場合 ($e_a=0.1 \sim e_i=0.1$) の先端部の振れを求めた結果を図 9 (a)~(i) に示す。グラフ (d), (e), (g) において見かけ上、偏角が不連続になっている。これは入力角 $\theta_{ab}=90^\circ$ の時に先端部が不動点を通り、誤差ベクトルが 0 となるために、先端部の運動自体は連続であるのに偏角は誤差ベクトルの方向に従うために不連続となる。(h) についても偏角 180° を境に正負の方向から求めているため実際には先端部は連続的な運動をする。

誤差の影響は、誤差ベクトルの長さ error としてグラフ中に示される。 L_f または L_c のリンクが長くなった場合 ($e_c=0.1$, $e_f=0.1$) その誤差は 0.2 と先端部で拡大されることがわかる。また L_d , L_e , L_g については、 θ_{ab} が $45 \sim 135^\circ$ の範囲においては 0.1 以下で、誤差への影響が少ないことがわかる。この結果より、リンク長 L_f , L_c が長くなる場合に誤差への影響が大きくなる。平行リンクは対向するリンクとの差が重要で、上の結果は、リンク長 L_h , L_a が短くなる場合に誤差への影響が大きくなると言い換えることもできる。

b) 工具交換に対するキャリブレーションの問題

不動点機構の利点を生かしてボールエンドミルを用いてその中心に不動点を設定すると、工具交換を行う度にキャリブレーション作業が必要となる。簡便なキャリブレーション手法を検討中である。

4. 装置構成

上述の原理を基に、既存の 3 軸 NC 工作機械へ新たに 2 軸を付加し 5 軸曲面仕上システムを構成した。開発した 2 軸ヘッドを図 10, 図 11 に示す。

2 軸ヘッドは、縦×横×高さ (不動点までの回転部+駆動部)= $130 \times 140 \times (260+95)$ mm の大きさであり、ステッピングモータでギアを介して 2 軸を駆動している。x, y, z 軸が $10 \mu\text{m}$ 、垂直軸が 0.036° 、水平軸が 0.04° の送り分解能を有している。主軸にはエアスピンドルを使用し、最高回転数 50 000 rpm、コレット径 $\phi 6 \text{ mm}$ の工具を取付け可能である。実システムでは工具とワークの作業領域を広げるために、リンク基部を斜めに配置し垂直軸に回転軸を与え、リンク基部を結ぶ線と垂直軸の交点を工具先端部不動点とした。NC フライスコントローラのパルス駆動部へ直接パルスを入力し、2 軸の駆動部も含めて DDA 補間により同時 5 軸制御を行っている。

Fig. 9 Error simulation results

Fig. 10 View of 5-axis machine head

Fig. 11 Scheme of fix point 5-axis machine head

Fig. 12 Machined coned shape

Fig. 13 Machined torus shape

Fig. 14 Torus tool path for 5-axis

5. 機能検証実験

開発したシステムの主軸に $\phi 6 \text{ mm}$ のボールエンドミルを取り付けて5軸によるワックスの切削を行い機能検証を行った。図12は円すいの切削を示す。また図13、図14は、円管直径12 mm、円管中心線直径28 mmのトーラスの工具軌跡と切削結果である。5軸制御としてのデータ構造は、 X, Y, Z 座標値および工具軸単位ベクトル値 N_x, N_y, N_z が一組のデータとなり、これを連続して読み込み5軸制御を行っている。工具干渉のための工具軸ベクトルの決定は、CADのほうであらかじめ求めている。

装置の剛性について、ばねばかりにより測定を行っ

Fig. 15 Rigidity experiment

Fig. 16 Rigidity result

た。図15のように主軸を xy 軸に垂直に立てた状態にして、工具先端部不動点に力を加えて、その点の変位を測定した。図16に変位の測定結果を示す。構造が平行板ばねに近いため剛性に異方性があるが、補強によってさらに剛性を高めることは可能である。今後、研削における効果について検討していく。

6. 結 言

- (1) 工具先端部に不動点を有する5軸の曲面仕上工具の開発を目的として、その原理、特徴を示した。
- (2) 不動点の振れの誤差を与える加工・組立時のリンク間距離誤差について機構の誤差解析を行い、特に配慮すべきリンク間距離は L_t と L_c であることを示した。
- (3) 提案する原理に基づいた、5軸曲面仕上工具を開発し、ワックスの5軸切削により、その基本機能を確認した。

終わりに、本研究に協力された泉重人氏（現、大隈鉄工(株)）に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岸浪建史, 近藤 司, 新庄博之, 中原博史: トロコイダル補間に基づくコンピュータ制御5軸工作機械, 精密工学会誌, **55**, 3 (1989) 557.
- 2) 竹内芳美, 清水弘幸, 出村 健, 渡辺隆弘: ソリッドモデルに基づく5軸制御加工, 精密工学会誌, **56**, 11 (1990) 2063.
- 3) ヤマザキマザック(株): FMS 3次元レーザ加工機, 油空圧技術, **6** (1989) 74.
- 4) 牧野 洋, 高野政晴: 機械運動学, コロナ社, (1978) 20.