総形ドレッシングを要しないボールナット内研創成法の開発*

原田 宏 幸^{*1}, 鍵和田 忠男^{*1}, 浦池 隆 文^{*2}

Method for Ball Nut Generation without Form Dressing

Hiroyuki HARADA^{*3}, Tadao KAGIWADA and Takafumi URAIKE^{*3} Hokkaido University, Graduate School of Engineering, N-13 W-8, Kita-ku Sapporo, 060-8628 Japan

A method for ball nut generation was developed. The shape of the ball nut groove is a gothic arch composed of two arcs of the same radius with different centers. Form-grinding is conventionally used to generate ball nut. However, it requires extensive form-dressing to shape the grinding wheel into the ball nut groove, and further, the generated shape of groove is an imperfect gothic arch created by the interference of the grinding wheel. In this paper, the ball nut generation method based on a generation process using a standard-shaped grinding wheel with a profile different from the gothic arch was proposed. The relative motion between ball screw workpiece and grinding wheel generated the shape of ball nut. Optimum settings of wheel were determined through the grinding simulation. A new method for the simulation with simple algorithm named "contact point helicoid method" was developed. Through the grinding experiment, it is found that the generated ball nut did not always have a perfect optimum shape, because of an influence of the shape irregularity of grinding wheel. However, the result of simulation shows that present ball nut generation method is effective and it make possible to obtain an accurate ball nut.

Key Words: Grinding, CAM, Generation Motion, Dressing, Ball Screw, Ball Nut, Form Grinding, Form Dressing, Simulation, Optimization

1. 緒 言

ボールナットのねじ溝形状の研削加工工程においては通常は総形研削が行われる。ボールねじ溝の断面形状は円弧を二つ組合せたゴシックアーチであり、砥石をこの形状に仕上げるためには複雑なドレッシング工程が必要である。また、総形研削によるねじ溝断面形状は、ねじ溝のねじれに起因する砥石の干渉により目的のゴシックアーチとは必ずしも一致しない。著者らは、これまでに総形研削によらずにボールねじを加工する方法を開発してきた^{(1)~(4)}。すなわち目的形状のゴシックアーチとは形状が本質的に異なる、JISなどにより規格化された形状をもつ砥石(以下、普通形状砥石と呼ぶ)を用い、研削シミュレーションを通じて得られるボールねじ工作物と砥石の最適な位置関係と相対運動によってボールねじを研削する方法である。本報では、砥石と工作物の位置関係がねじ軸の加工とは基本的に異なるボールナットの加工法の開発を行う。研削シミュレーションの方法としてこれまで用い

てきた最深軌跡法^{(1)~(3)}と比較してよりアルゴリズムの簡単な接点らせん法を開発し、加工現場でのより容易な運用を目指す。

本研究の方法によれば、ドレッシングによる総形砥石の製作が困難な超砥粒砥石の使用によるボールナット研削も可能となる。

2. 研削法と研削装置

本研削法に用いられる研削装置の模式図を図1に示

Fig. 1 Diagram of the grinding configuration

* 原稿受付 1999年3月8日。

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)。^{*2} 准員, 北海道大学大学院。

E-mail: hard@eng.hokudai.ac.jp

す。砥石は普通形状砥石であり、図1はJIS 1号平形砥石を想定した例である。砥石軸 z_s は傾き角 j_G と旋回角 ψ によって、ボールねじ工作物の軸 z に対して三次元的に傾いて設定され、砥石の原点 O_s は軸 z との距離 L を保ちながらボールねじのリードに従って z 方向に移動する。普通形状砥石を用いることと、傾き角 j_G をボールねじのリード角に一致させず砥石断面の輪郭を転写させない点が本研削法の特徴である。

砥石軸の傾き角 j_G と旋回角 ψ は3章で述べられる研削過程のシミュレーションと、そこで得られる仕上げ精度を判定基準とした極値探索の過程を通じて決定される。

研削装置の外観を図2に示す。通常のねじ研削盤には旋回角 ψ を設定するための機構が設けられていないため、ここでは通常のNC旋盤を用い、旋盤の刃物台に砥石軸の三次元的な角度設定が可能な研削ヘッドを取付けて用いた。本研削ヘッドは本研究のために専用に設計されたものである。NCにより、十分な送りの分解能と精密かつ高速な位置決めが可能になり、加工時間の短縮にも効果がある。研削装置の詳細については後の第5章で述べる。

3. 砥石傾き角の決定法

3.1 接点らせん法による研削シミュレーション

本報においては最深軌跡法^{(1)~(3)}と比較してよりアルゴリズムの簡単な研削シミュレーションの方法を開発し、接点らせん法と名付けた。以下はその概要である。砥石座標系と工作物座標系をそれぞれ直交座標系 $(x-y-z)$, $(x_s-y_s-z_s)$ で表す。砥石中心が z 軸から L 離れており、砥石軸がねじ工作物に対して傾き角 j_G 、旋回角 ψ で傾いているとき、砥石上の点 $p(x_s, y_s, z_s)$ が工作物座標系では $p(x, y, z)$ であるとする、この関係は回転を表す行列 R と平行移動を表す行列 L を

用いて

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + L \quad \cdots (1)$$

と表される。ただし

$$R = \begin{bmatrix} \cos j_G \sin \psi \sin j_G & \cos \psi \sin j_G \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ -\sin j_G \sin \psi \cos j_G & \cos \psi \cos j_G \end{bmatrix} \quad \cdots (2)$$

$$L = \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \cdots (3)$$

である。

$p(x_s, y_s, z_s)$ における砥石表面の法線ベクトルを砥石座標系において

$$N_s = \begin{bmatrix} n_{sx} \\ n_{sy} \\ n_{sz} \end{bmatrix} \quad \cdots (4)$$

と表すと、ねじ工作物座標系における砥石表面の法線ベクトル N は R を用いて

$$N = RN_s \quad \cdots (5)$$

と表すことができる。工作物は座標系 $(x-y-z)$ 中を回転しながらボールナットのリード l に従って z 方向に移動するから、点 p は工作物上にらせんを形成する。点 $p(x, y, z)$ におけるこのらせんの方向を表すベクトルを T とおくと、 T は次式で表される。

$$T = \begin{bmatrix} -r \sin \theta \\ r \cos \theta \\ \frac{l}{2\pi r} \end{bmatrix}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad \cdots (6)$$

研削点においては工作物表面と砥石表面が接していなければならないから、研削点を通るらせんと砥石表面も接していなければならない。すなわちらせんの方向ベクトル T は砥石表面の法線ベクトル N と直交しており、次の関係を得る。

$$T \cdot N = 0 \quad \cdots (7)$$

なお、このとき点 p におけるねじ面の法線ベクトルは砥石表面の法線ベクトル N と逆向きに定められる。

シミュレーションにおいては砥石上の各点においてその点を通るらせんを考え、式(7)を満たす点の集合を求める。このようにして求められた各点を通るらせんの集合が研削されるねじ溝の三次元形状を表す。また、その形状はねじ溝と鋼球の接触点を含む平面における断面形状によって評価される。ここで、ボールねじ軸の場合には接触点は鋼球の中心円径におけるらせんに垂直な平面 (j_m 断面) に存在することが証明され

Fig. 2 Grinding device with NC lath and grinding head

ているが⁽⁴⁾、ボールナットについては明らかにされていない。以下にボールナットにおける接触点位置についての幾何学的考察を行う。

3.2 鋼球とボールナットの接触点 図3はボールナットと鋼球の接触を表す模式図である。 p_1, p_2 が接触点を表す。接触点 p_1 と p_2 を結んだ直線が z 軸となす角を j_m 、接触角を α 、鋼球径を D_a 、鋼球の中心円径を d_m とする。このとき接触点 p_1 における鋼球の接平面 P_{A1} の法線ベクトル A_1 は次のように表すことができる。

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin j_m \\ -\sin \alpha \cos j_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

また p_1 におけるナット円筒の接平面 P_{B1} の法線ベクトル B_1 は次のように表される。

$$B_1 = \begin{bmatrix} d_m + D_a \cos \alpha \\ D_a \sin \alpha \sin j_m \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

接触点 p_1 の瞬間的な運動方向は鋼球から見た場合には接平面 P_{A1} に含まれ、ナットから見た場合には接平面 P_{B1} に含まれるから、運動方向は二つの接平面の交線方向 C_1 となる。 C_1 はそれぞれの接平面の法線ベクトル A_1 および B_1 にともに垂直な方向であるから、運動の方向を考慮して

$$C_1 = A_1 \times B_1 = \begin{bmatrix} D_a \sin^2 \alpha \sin j_m \cos j_m \\ -\sin \alpha \cos j_m (d_m + D_a \cos \alpha) \\ -d_m \sin \alpha \sin j_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

として求められる。図示していないが、 p_1 におけるナットの円周方向を表すベクトル T_1 は次のように表すことができる。

Fig. 3 Geometrical condition around contact points

$$T_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_m + D_a \cos \alpha} \\ -\frac{1}{D_a \sin \alpha \sin j_m} \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

C_1 が p_1 における円周方向となす角を j_1 とすると

$$\cos j_1 = \frac{T_1 \cdot C_1}{|T_1| |C_1|} \dots\dots\dots (12)$$

の関係から、 j_1 と j_m の符号は同じであるとして次の関係を得る。

$$\tan j_1 = \frac{d_m \tan j_m}{\sqrt{D_a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 j_m + (d_m + D_a \cos \alpha)^2}} \dots\dots\dots (13)$$

一方、 j_1 は接触点の半径位置におけるねじのリード角であるから次のように求められる。

$$\tan j_1 = \frac{l}{\pi \sqrt{D_a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 j_m + (d_m + D_a \cos \alpha)^2}} \dots\dots\dots (14)$$

式(13)および(14)を等しくおくことにより次の関係が得られる。

$$\tan j_m = \frac{l}{\pi d_m} \dots\dots\dots (15)$$

これらの関係は接触点 p_2 についても同様である。よって式(15)から、ボールナットの場合にも、鋼球とねじ溝の接触点は接触点の半径位置や鋼球の大きさに無関係に、鋼球の中心円径におけるらせんに垂直な平面 (j_m 断面) に存在することが確認された。よってボールナットにおけるねじ溝形状の評価も j_m 断面において行われるべきである。

3.3 誤差判定と極値探索 誤差判定は既報^{(1)~(3)}と同様の方法を用いた。すなわち、ボールねじ面は円弧であるから、高さ誤差をねじ面の法線方向の差として求める。また接触点位置から離れるに従ってボールねじ面と鋼球の間隔は大きくなり、形状誤差による接

Fig. 4 Dimensions of ball nut to be generated

触状態への影響は小さくなることから、ゴシックアーチ上に接触点を含む一定領域を設定し、この範囲の外側においては誤差の評価を小さくする。この詳細については省略する。

シミュレーションと誤差判定を通じて傾き角 j_G 、旋回角 ϕ に対する最大高さ誤差 e_{HMAX} が求められる。この j_G を独立変数、 e_{HMAX} を従属変数として極値探索を行い、最小の e_{HMAX} を与える j_G, ϕ を最適傾き角として決定する。極値探索法として確実に最小値(最大値)を探索でき、アルゴリズムが簡単な方法としてこれまでも用いてきた極点取込み法^{(1)~(3)}を用いている。この詳細については省略する。

4. 研削シミュレーションと結果

4.1 目的形状 ボールねじの目的形状を図4に、寸法諸元を表1に示す。既報^{(1)~(3)}において対象としたボールねじ軸と組合せることのできるナットを目的形状とした。またシミュレーションにおいてはねじ溝中央部に幅3mmの逃げ溝を考慮した。想定した砥石の断面形状および寸法を図5に示す。厚さがねじ溝の幅よりも小さいこと、直径が工作物の内径よりも小さいこと、ねじ溝断面形状が比較的円弧に近いことを考慮し、直径 $D_s=50$ mm、厚さ $T=5$ mm の JIS 1 号平型砥石(縁形状 F)とした。

4.2 シミュレーション結果 接点らせん法によるコンピュータシミュレーションの結果を図6に示す。砥石中心 O_s と工作物回転軸 z の距離 $L=4.75$ mm において最適砥石傾き角 $j_G=9.0^\circ$ 、旋回角 $\phi=2.1^\circ$ が選択された。図6(a)は j_m 断面における研削形状と砥石背面の干渉状態を表す。縦軸 X_{jm} は図3における X 軸に相当し、横軸 z_{jm} は同図 z 軸の j_m 断面への投影である。図6(a)研削形状はねじ溝の右半

Table 1 Specifications of ball nut to be generated

Nominal nut diameter, D	53 mm
Lead, l	12 mm
Ball diameter, D_a	7.938 mm
Ball center diameter, d_m	51.5 mm
Conformity factor, γ	0.55
Contact angle, α	45°
Radius of gothic arch, R	4.366 mm

Fig. 5 Dimensions of grinding wheel

分を加工している状態を示しており、加工の際に砥石背面が反対側のねじ面(図6の左半分)に干渉していないことがわかる。最終的なねじ溝形状は図6の右半分を中心線に対称に複写したものとなる。図6(b)は高さ誤差 e_H の分布である。 $X_{jm}=28.8$ mm において最大高さ誤差 $e_{HMAX}=2.31 \mu\text{m}$ (値は負)が得られた。ボールナットのねじ溝の形状精度は特に規定されていない。JIS⁽⁵⁾によればねじ軸とナットを組合せた状態におけるナット外周の円周方向振れが精度を規定する一つの基準とされているが、この値はナットの溝形状の他のさまざまな要因の影響を含んでおり、溝形状の評価には適用しえない。ここではねじ軸の支持部軸線に対するねじ溝面の半径方向円周触れを参考にした。この値は外径50 mmのねじ軸に対し $7 \mu\text{m}$ (C₀級)から $17 \mu\text{m}$ (C₅級)であり、シミュレーションの結果得られた形状精度はこれと比較して十分小さく、許容できる物であると判断される。

5. 研削実験

5.1 研削装置 研削装置はNC旋盤の刃物台に専用に設計された研削ヘッドを取付けて構築した。研削ヘッドは水平面内の旋回(ϕ)、垂直面内の傾き(j_m)、および砥石軸方向の突き出し(z_s)の3軸で砥石の位置および姿勢の設定を行うことができる。これら三つの軸はそれらの延長線を空間内の一点で交差させることができるように設計されている。使用する軸の長さおよび砥石の厚さに応じてあらかじめ軸方向突き出し量を調整し、砥石中心を3軸の交点と一致させておくこ

(a) Simulated profile of ball screw and interference between optimum ball screw and grinding wheel

(b) Distribution of height error

Fig. 6 Simulation of grinding by Type 1 plain wheel ($D_s=50$ mm, $T=5$ mm, edge shape F), $L=4.75$ mm, $j_G=9.0^\circ$, $\phi=2.1^\circ$

とにより、砥石軸の角度設定の際に砥石中心を空間内の一点に固定することができる。これにより角度設定の変更に伴う砥石の高さおよび切り込み方向の位置ずれの発生を防止できる。また NC における工具オフセットや座標系の変更なども不要となる。砥石は高い回転精度を得るために、静圧式空気軸受けによって支持されてビルトインモータによって回転される高周波スピンドル(心振れ：円周方向 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 軸方向 $0.12\text{ }\mu\text{m}$ 、ただし回転数 $12\,000\text{ rpm}$ 、供給空気圧 6 kgf/cm^2 時)に取付けられる。モータの外周にはウォータジャケットを設けてあり、研削加工中は流水によって冷却を行ってモータの発熱による軸の熱膨張を防ぎ、加工精度への影響を軽減させている。

5.2 研削工程 4章の結果をもとに実際に研削実験を行った。まず、NC 旋盤本来の工具台を用いた切削により研削代を残したねじ溝を作成し、次に、上記の研削ヘッドを用いて図5に示す形状に成形した WA 砥石(#60)により粗研削を行った後、同形状の市販の CBN 砥石(#100)にて仕上げ研削を行った。WA 砥石による研削においては研削装置用に製作した簡易ドレッサを用いてオンマシンの円弧状に砥石をドレッシングすることができる。ボールナット工作物は三つ爪スクロールチャックにより旋盤主軸に取付けた。本研削法においては研削1工程においてボールねじ溝の片側のみが研削されるため、本来は片面の加工後にボールナット工作物を反転させて残る片面の加工を行う必要がある。しかし工作物の再取付は加工精度の低下につながるため、ここでは使用している砥石形状が裏表対称であることに着目し、ねじ面の片方の加工が終了した後、砥石軸の角度設定を相対的に逆転させて(ϕ の符号を反転させて)、残るねじ面の加工を行った。これにより切削工程から仕上げ研削工程まで工作物を取外すことなく加工することが可能となった。

砥石の最終的な位置は工作物表面に対する切り込み量 $D_c^{(1)-(3)}$ ではなく、シミュレーションの際に用いられる距離 L を直接用いた。これはあらかじめ砥石中心の位置座標と旋盤主軸の位置関係を NC 制御装置に記憶させておくことによって可能であり、これによって工作物ブランクの加工精度などの影響によるねじ半径の狂いなどを排除することができる。研削されたボールナットの外観を図7に示す。

6. 加工形状と精度

6.1 測定と解析 以前に開発された形状解析システム⁽⁴⁾を適用して加工されたボールナットの形状評価を行った。以下は形状解析システムをボールナッ

Fig. 7 Generated ball nut

Fig. 8 Measurement of ball center diameter, d_m

トに適用する際の測定と処理の概略である。

(1) 鋼球の中心円径 d_m を求める。

鋼球の中心円径の測定には、ボールねじ軸の場合は六球法⁽⁴⁾を用いたが、ボールナットの場合には測定子である鋼球の位置を容易に固定し得る。そこで図8に示すように3個の鋼球を用い、内測用のノギスを用いて測定した。ノギスは本測定用に設計されたもので、内測用ジョウの測定面が 10 mm の幅(紙面に垂直に)をもち、平行な二平面で鋼球を安定して支持することができる。測定の結果 $d_m=51.60\text{ mm}$ が得られた。

(2) 輪郭形状測定装置を用いてねじ溝の断面形状をねじ軸方向に測定する。

(3) 測定された二次元の断面形状を用い、測定された d_m の位置に鋼球が存在し、かつねじ溝と二点で接触する条件を満足するように三次元のねじ溝形状をコンピュータシミュレーションによって構築する。

これによりねじ溝と鋼球の接触点が空間的に決定される。

(4) 求められたねじ溝の三次元形状から j_m 断面におけるねじ溝の断面形状を求める。

以上の方法で求められた接触点位置を表2に示す。位置は j_m 断面内における座標で表している。図9に j_m 断面におけるねじ溝形状を4章の研削シミュレーションの結果とともに示す。

図10は j_m 断面におけるねじ溝各点の曲率 $1/R$ と

Table 2 Contact points of generated ball nut

	z_{jm} mm	X_{jgm} mm	α °
p_1 (left)	-2.971	28.430	48.47
p_2 (right)	2.016	29.218	30.52

Fig. 9 Profile of groove in j_m -plane Fig. 10 Analysis of profile in j_m -plane ($b_{zjm}=0.4$ mm)

ねじ面の傾き α_p である。曲率は上に凸を正、傾きは時計回りを正としており、ノイズ除去のため、平均化にかかわる領域の幅⁽⁴⁾ $b_{zjm}=0.4$ mm で平滑化している。曲率は必ずしも滑らかには変化していないが外側から内側へ向かって小さくなってゆく傾向を示し、傾きはほぼ一様の変化を示すことがわかる。

6・2 砥石形状と加工精度 本加工法における研削シミュレーションにおいては使用する砥石形状は幾何学的に正しいものであることを前提としている。しかし実際に使用する市販の砥石形状は必ずしも正確ではない。これまでに行われたねじ軸の研削において、市販の砥石は直径が 0.1 から 0.2 mm 大きい場合があり、また輪郭形状は必ずしも円弧ではなく、表裏の形状も対称ではないことがわかっている。砥石半径の大きさは d_m の値に直接影響する。また、前述のとおり本実験では工作物を反転させずにねじの両面の加工を行った。工作物を反転させる場合には対向するねじ面は砥石の同一面(裏または表)で加工されるが、本方

法ではねじの各面が砥石の表面と裏面で別々に研削される。このため砥石表裏形状の非対称性がそのままねじ面の非対称性に反映される。

本実験では目的の $d_m=51.50$ mm に対して測定結果が約 0.1 mm 大きく、また接触点位置が左右で大きく異なっている。これらの誤差の値は砥石形状に含まれる誤差の値とほぼ対応しており、誤差の主たる原因は使用した砥石の形状誤差の可能性が高い。ダイヤモンド砥石に代表される超砥粒砥石を使用する場合にはドレッシングによって砥石の整形を行うことは困難であることから、今後の課題として砥石の実形状を検討に加えることが必要であると考えられる。

7. 結 論

本研究では総形ドレッシングを要しないボールナットの内研削成法を提案し、実際に研削加工を行って本方法の有効性を検討した。その結果、研削シミュレーションを通じ、普通形状砥石によって十分な精度を持つボールナットの加工が可能であり、本方法が有効であることが示された。ただし市販の砥石をそのまま用いる場合には、砥石の実形状を検討に加える必要があることが明らかとなった。

本研究の遂行にあたり協力を得た北海道大学文部技官 吉田明彦氏に深謝する。また有益な御助言をいただいた日本精工(株)の関係各位に深謝する。

本研究は平成 9-11 年度文部省科学研究費補助金〔基盤研究 A(2)〕(09305012)の助成を得て実施したことを記し関係各位に深謝する。

文 献

- (1) 鍵和田忠男・原田宏幸, 総形ドレッシングを要しないボールねじ研削法, 機論, **62**-596, C(1996), 1612-1618.
- (2) Kagiwada, T. and Harada, H., Method for Ball Screw Generation without Form Dressing, *JSME Int. J., Ser. C*, **39**-4(1996), 871-877.
- (3) 原田宏幸・鍵和田忠男, 総形ドレッシングを要しないボールねじ研削法(砥石軸二次元設定と 1 パス加工法), 機論, **63** 605, C(1997), 247-253.
- (4) 原田宏幸・鍵和田忠男, 総形ドレッシングを要しないボールねじ研削法(ボールねじ測定および形状解析システムの開発), 機論, **63** 612, C(1997), 2911-2917.
- (5) JIS B 1192 1997.