総形ドレッシングを要しないコンピュータ支援ねじ研削*

鍵和田 忠 男^{*1}

Computer-Aided Thread Grinding Going without Form Dressing

Tadao KAGIWADA

The present investigation proposes a computer-aided thread grinding method for generating helicoids without the form-dressing process, using a standard-shaped grinding wheel independent of the final helicoid. The method uses a simple conical or plain wheel, without limitations on diameter and base angle. With a five-axis control system, the wheel axis is set three-dimensionally at the computed optimum angle of inclination, comprising the tilt and swivel angle components of the planned helicoid and wheel. The optimum angle of inclination is determined through simulation of the grinding process and an exploration of the optimum angle of inclination that gives the minimum geometrical error. The helicoids, approximate ideal screw helicoids or developed chased helicoids, are more accurate than the usual milled helicoids.

Key Words: Grinding, CAM, Threading, Thread Grinding, Form Grinding, Form Dressing, Simulation, Optimization, Extremum Search Method, Accuracy

1. 緒 言

ねじの研削は、焼入れされた材料や高い精度を必要とするねじやウォームの加工に用いられるが、通常のねじ研削においては、砥石軸を目的とするねじの進み角に等しい傾き角に設定し、またねじの圧力角に対応した総形砥石が用いられる。ねじ研削盤にはこのためのドレッシング装置が備えられているが、個々のねじ形状に合わせて総形ドレッシングを行うには多くの手間を要する。またこうして研削されたねじ形状は通常は3形（フライス切りヘリコイド）か4形（インボリュートヘリコイド⁽¹⁾）である。4形は一つの目的形状に一致していると言えるが、3形は目的形状である2形（チェイズドヘリコイド⁽²⁾）からの、砥石あるいはフライスとねじ面の干渉によるずれによって生じると言える。

本研究では総形ドレッシングを必要とせず、目的のねじ形状に依存しない普通形状砥石を用いるコンピュータ支援ねじ研削法を提案する。本方法においては、直径や底角の大きさに制限を受けない、単純な円すい

形または平形砥石を用いる。砥石軸は、傾き角と旋回角とからなる目的ねじ形状と使用砥石形状に対応したコンピュータ支援による最適砥石軸角に、5軸制御システムにより三次元的に設定される。最適砥石軸角は研削過程のシミュレーションと、最小の形状誤差を与える最適砥石軸角の探索によって決定される。

本方法によると任意に設定した目的ねじ形状に対して高い近似精度で研削できるので、2形を目指した場合には通常の3形によるよりも高精度で研削できる。さらに通常の2形自体も理想的なねじ形状とはいえ、本研究においては2形を発展させた理想的なねじ形状を目的ねじ形状とした。

2. システムの概要

研削装置の模式図を図1示した。砥石軸 z_s は次章で述べるシミュレーションと探索によって決定される傾き角 j_c と旋回角 ψ によって、ねじの軸 z から傾いて設定される。砥石の原点（円すい形砥石の底面の中心または平形砥石の作業平面の中心） O_s は、 z からの距離 L の位置に設定され、ねじのピッチに従って z 方向に移動する。図示していないがねじの半径方向における砥石切込深さ D_c は山と谷の半径差とし、目的とするねじの外径 d と谷の径 d_1 に対して次式で決定す

* 原稿受付 平成3年6月27日。

^{*1} 正員、北海道大学工学部（〒060 札幌市北区北13条西8丁目）。

る。

$$D_c = (d - d_1) / 2 \dots \dots \dots (1)$$

本コンピュータ支援ねじ研削過程のフローチャートを図2に示した。以下これに従って過程を説明する。

(1) 研削過程の前提条件を入力する。始めに砥石の幾何学的データすなわち円すい形砥石の底面の半径 R_s と底角 β を入力する。平形砥石の場合は $\beta=0$ とする。次に目的とするねじの幾何学的データ、すなわちねじの外径の半分 R 、有効径の半分 R_p 、ピッチ P 、軸平面上の圧力角 α_a (1形の場合) または歯直角圧力角 α_n (2形を發展させた理想的なねじの場合)、ひっか

かりの高さ H_1 を入力する。最後に砥石切込深さ D_c を入力する。

(2) 砥石軸の傾き角 j_c と旋回角 ψ の組に対する研削過程のシミュレーションを行い、ねじ面の高さを各半径 r について計算する。

(3) シミュレーションにおける幾何学的精度を検査する。上記(2)のシミュレーションにおけるねじ面の高さとの目的とするねじ面の高さの差を、各半径における高さ誤差 e_H として求める。そして $r=R-H_1 \sim R$ における $|e_H|$ の最大値を $e_{H\max}$ とする。

これにより、 j_c と ψ の組に対する最大高さ誤差が $e_{H\max}$ として求められる。また必要に応じてこのときのねじ面の形状が等高線で表示される。

(4) j_c と ψ を独立変数、 $e_{H\max}$ を従属変数として極値探索を行い、最大高さ誤差 $e_{H\max}$ の最も小さな値を与える組を、傾き角 j_c と旋回角 ψ の最適な組合せとして求める。

(5) 上記(4)の過程で決定された傾き角 j_c と旋回角 ψ に砥石軸の傾きを設定し、式(1)で決定した砥石切込深さ D_c を実現すべく砥石の原点 O_s を z からの距離 L の位置に設定して研削を実行する。

以上で、総形ドレッシングを要しないコンピュータ支援ねじ研削の全過程を終了する。

図1 研削装置の模式図

図2 コンピュータ支援ねじ研削過程のフローチャート

3. 研削装置と研削方法

五軸制御のねじ研削盤は一般に供されていないので、研削装置としては旋盤と研削ヘッドからなる研削装置か、または四軸制御のジグ研削盤を用いる。ここでは図3に示した旋盤と研削ヘッドからなる研削装置を用いた。旋盤の往復台上に工具台の代わりに研削ヘッドを装着するが、この装着の角度によって旋回角 ψ を実現する。研削ヘッド本体には鉛直面内のスウィーヴェルがあり、これによって傾き角 j_c を実現する。砥石の原点 O_s の高さを z 軸と同一にするために研削ヘ

図3 旋盤と研削ヘッドからなる研削装置の外観

ッドの上下ハンドルで研削ヘッド本体の高さを調整する。\$O_s\$ の \$z\$ からの距離 \$L\$ によってねじの半径方向における砥石切込深さ \$D_c\$ を調整するが、これは旋盤の往復台の横送りハンドルによって実現する。図 1 の関係から \$L\$ は目的の \$D_c\$ に対して次式で決定される。

$$L = R - D_c + R_s \cos \psi \quad (2)$$

圧力角が小さいねじの場合に工程ごとの切込みを半径方向に加えながら研削すると、切込深さ \$D_c\$ による最終的な研削において、ねじ面と砥石が接触しない箇所の生じる可能性がある。このときにはさらに半径方向の切込深さ \$D_c\$ のままで、切込みを \$z\$ 方向に加えながらねじ面全体が削られるまで研削を行う必要がある。また切削によって荒加工を施した上で研削する場合には、砥石切込深さを \$D_c\$ に設定した上で切込みを \$z\$ 方向に加えていくと便利である。これらのための \$z\$ 方向の切込みは、回し金に設けたアジャスタねじの調整による主軸と工作物の回転ブランクの変化によって実現した。

4. シミュレーション

ここでは種々の傾き角 \$j_c\$ と旋回角 \$\psi\$ に対する研削過程を、最深軌跡法と名づけた方法によってシミュレーションする。なお最深軌跡法は平形や円すい形砥石に限らず、任意の形状の砥石を対象としたシミュレーションに適用可能である。

図 1 に示したようにねじ工作物は円柱座標系 \$(r-\theta-z)\$ で、砥石は円柱座標系 \$(r_s-\theta_s-z_s)\$ で表されている。図 4 は研削過程の模式図であるが、図 1 の位置関係をそのままに視点を \$z_s\$ 軸の周りにほぼ半回転させたものである。最深軌跡法のアルゴリズムは以下のとおりである。ねじ面上に 1 点 \$p(r, \theta, z)\$ を考え、

図 4 研削過程の模式図

次式の関係を与える。

$$z = \theta P / (2\pi) + f_z \quad (3)$$

ただし \$P\$ は目的とするねじのピッチである。点 \$p\$ が半径位置 \$r\$ における研削点に位置するときの \$f_z\$ の値 \$f_{zp}\$ が、\$r\$ におけるねじ面の \$z\$ 座標を与え、これによりねじの幾何形状が決定される。座標系 \$(r_s-\theta_s-z_s)\$ における点 \$p\$ の \$z_s\$ 座標は次式で与えられる。

$$z_s = (z + z_c) \cos j_A - r \sin \theta \sin j_A \quad (4)$$

ここで \$z_c\$ は \$z\$ 方向の切込みを表す定数である。\$j_A\$ は \$\theta_A\$ を媒介として \$j_c\$ と \$\psi\$ から

$$\sin j_c = \sin j_A \cos \theta_A$$

$$\sin \psi = \sin j_A \sin \theta_A / \cos j_c \quad (5)$$

によって変換される(図 4)。点 \$p\$ が砥石作業面上の点でもありとして、平形・円すい形砥石に対しては、

$$z_s = (R_s - r_s) \tan \beta \quad (6)$$

とする。本論文では用いていないが、任意の形状の砥石の場合は \$r_s\$ に対する \$z_s\$ の数値を

$$z_s = f_1(r_s) \quad (6')$$

の形で与える。一方図 4 の幾何学的関係から

$$r_s^2 = (L \cos \theta_A - r \cos \theta)^2 + \{ [L \sin \theta_A - (z - R_s \sin \psi) \tan j_A - r \sin \theta] \cos j_A \}^2 \quad (7)$$

を得る。

ある半径 \$r = r_p\$ について式(3)、(4)と式(6)または(6)'および式(7)の 4 式を連立させて 4 個の未知数 \$z, f_z, z_s, r_s\$ を決定すると、結果として \$f_z\$ が \$\theta\$ の関数として求められる。ここで \$\theta\$ を変化させると、\$f_z\$ が変化しながら点 \$p\$ が砥石の作業面上に \$r = r_p\$ の軌跡を描く。\$f_z\$ が最大値 \$f_{zp}\$ をとるときに軌跡がねじ面に最も深く入り込み、この点が研削点である。このときの \$\theta, z\$ の値 \$\theta_p(r_p), z_p(r_p)\$ が \$r_p\$ における研削点の座標を、\$f_{zp}(r_p)\$ がねじ面の \$z\$ 座標を与える。

各 \$r_p\$ における \$f_{zp}(r_p)\$ を結んだ曲線が軸平面上におけるねじ面の形を与える。

砥石によってねじが半径方向に最も深く削られる点の \$r_s\$ 座標は \$R_s\$ で既知数であり、逆に \$r\$ が未知数である。この場合は上の 4 式の連立によって \$r\$ が \$\theta\$ の関数として求められる。ここで \$\theta\$ を変化させると \$r\$ が変化しながら点 \$p\$ が工作物内に砥石外周の軌跡を描き、そこで \$r\$ の最小値 \$r_{p0}\$ を与える \$\theta\$ と \$z\$ の値 \$\theta_p(r_{p0}), z_p(r_{p0})\$ および \$f_z\$ の値 \$f_{zp}(r_{p0})\$ が、半径方向に最も深く削られる点の座標とねじ面の \$z\$ 座標を与える。図 4 に見られるように \$R - r_{p0}\$ は設定した \$D_c\$ とはわずかに異なる。

5. シミュレーションされたねじの精度の検定

1形(スクルーヘリコイド⁽¹⁾)を目的とする場合には、4章で求められた $f_{zp}(r_p)$ と軸平面上で直線である目的のねじ面とを比較する。両者の高さの基準を有効半径 R_p におけるものとして、高さ誤差 e_H を

$$e_H = \{f_{zp}(r_p) - f_{zp}(R_p)\} - (r_p - R_p) \tan \alpha_a \quad (r_p = r_{p0} \sim R) \quad (8)$$

で求める。ここで α_a は軸平面上の圧力角である。

3形(フライス切りヘリコイド)は不完全な2形(チェイズドヘリコイド)と考えることができる。さらに2形自体も、図5に示したように歯溝直角平面上におけるねじ面の形が直線であるが歯直角平面上においては直線ではなく、また歯直角圧力角がバイトの圧力角と異なるため⁽³⁾理想的なねじ形状とはいえず、本研究においては2形を発展させた理想的なねじ形状を目的ねじ形状の一つとした。これは図5に示したように、ピッチ線に垂直な平面上におけるねじ面の形が直線となるようにする。この平面と $r = r_p$ のねじ面の交点の θ 座標を θ_{zi} とすると、この平面上におけるねじ面の高さ $f_{zi}(r_p)$ は、軸平面上での高さ $f_{zp}(r_p)$ から次式で変換される。

$$f_{zi}(r_p) = [\theta_{zi}P/(2\pi) + \{f_{zp}(r_p) - f_{zp}(R_p)\}]/\cos j \quad (9)$$

ここで θ_{zi} は次式の幾何学的関係から決定される。

$$r_p \sin \theta_{zi} + [\theta_{zi}P/(2\pi) + \{f_{zp}(r_p) - f_{zp}(R_p)\}]\tan j = 0 \quad (10)$$

そして高さ誤差 e_H を1形の場合と同様にして、

$$e_H = \{f_{zi}(r_p) - f_{zi}(R_p)\} - (r_p - R_p) \tan \alpha_n \quad (r_p = r_{p0} \sim R) \quad (11)$$

で求める。ここで α_n は歯直角圧力角である。

式(8)または式(11)の e_H について $r = R - H_1 \sim R$ における $|e_H|$ の最大値を最大高さ誤差 $e_{H\max}$ とする。

一方、 $f_{zp}(r_p)$ または $f_{zi}(r_p)$ の半径方向の差分から

Type 1 (Screw helicoid) Type 2 (Chased helicoid) Developed type 2 in present investigation

図5 種々のねじ面形状の規定法

各半径における圧力角を求め、それぞれ目的の圧力角 α_a または α_n との差を各半径における角度誤差 e_A とし、 $r = R - H_1 \sim R$ における $|e_A|$ の最大値を最大角度誤差 $e_{A\max}$ とする。ただし $e_{A\max}$ は、らせん形工具⁽⁴⁾等の場合に用いるもので、ここでは用いていない。

以上で傾き角 j_G と旋回角 ψ の組合せに対する最大高さ誤差 $e_{H\max}$ が決定される。また必要に応じてこのときのねじ面の形状を等高線で表示する。

6. 傾き角 j_G と旋回角 ψ の最適な組合せの探索

j_G と ψ を独立変数、 $e_{H\max}$ を従属変数として極値探索を行い、最大高さ誤差 $e_{H\max}$ の最も小さな値を与える組を、傾き角 j_G と旋回角 ψ の最適な組合せとして求める。ただし j_G, ψ の代わりに4章のシミュレーションで直接に用いられる j_A と θ_A を独立変数として用い、最適な組合せが探索された後で式(5)によって j_G と ψ に変換する。

極値探索の方法としては、確実に最小(最大)値を探索でき、しかもアルゴリズムが簡単な極値探索法として以前に開発した極点取込み法⁽⁵⁾を用いた。この方法の手順(2独立変数の場合)を以下に示す。

(1) J_A, θ_A の初期値 J_{A0}, θ_{A0} およびその増分値の初期値 $\Delta j_A, \Delta \theta_A$ を適当に設定する。 Δj_A と $\Delta \theta_A$ は適当に大きいほうがよい。

(2) J_A について $J_{A0} - \Delta j_A, J_{A0}, J_{A0} + \Delta j_A$ の3個、また θ_A について $\theta_{A0} - \Delta \theta_A, \theta_{A0}, \theta_{A0} + \Delta \theta_A$ の3個の、合計9個の点について計算を行い、そのうちの $e_{H\max}$ に最小値を与える点 (j_{Am}, θ_{Am}) を見いだす。

(3-1) $J_{Am} = J_{A0}$ かつ $\theta_{Am} = \theta_{A0}$ 、すなわち最小値を与える点が、9個の点で形成される四角形の中央に位置するならば、 $\Delta j_A, \Delta \theta_A$ を0.5倍して、(2)を繰返し、一定回数で終了する。

(3-2) 点 (j_{Am}, θ_{Am}) が、9個の点で形成される四角形の辺または頂点上に位置するならば、これを新たに点 (j_{A0}, θ_{A0}) とし、 $\Delta j_A, \Delta \theta_A$ はそのままで、(2)を繰返す。ただし先の(2)において既に計算されている4または6点については計算を省略できる。

以上の方法で、7章に示す具体例について探索の過程を図示したものが図6である。図中の曲線は等最大高さ誤差線である。四角形に付した数字は収束の過程を表し、上記(3-1)の場合は数値を増加させ、上記(3-2)の場合は同じ数値に「'」を付してある。全15回中の7回め以降は図示していないが、最小値が確実に探索されていることがわかる。

7. 結 果

本ねじ研削法の有効性を示す例として、メートル台形ねじ Tr 52×12 (圧力角 15°, 有効径 45.6 mm, ピッチ 12 mm) を, 12 号さら形砥石 (直径 100 mm, 底角 23.0°) で研削した. JIS の規定により $d_1=38.246 \sim 39.000$ mm だから式 (1) による砥石切込深さは $D_c=6.5 \sim 6.877$ mm であり, ここでは $D_c=6.8$ mm とした. 以上に基づくコンピュータ支援の結果, $j_A=11.7^\circ$, $\theta_A=-47.2^\circ$ すなわち最適砥石軸角として傾き角 $j_c=7.9^\circ$ と旋回角 $\psi=-8.6^\circ$ が選択された. 収束の過程はすでに図 6 に示したとおりである. 選択された傾き角 $j_c=7.9^\circ$ は, このねじの進み角 $j=4.8^\circ$ とは大きく異なり, また砥石の底角と旋回角の和 $(\beta+\psi)=14.4^\circ$ も圧力角 $\alpha=15^\circ$ と近くはあるが異なっている. このことから 3 形研削とは明らかに別の形態の研削が行われることがわかる.

図 7 は最適砥石軸角におけるシミュレーションの結果を示したもので, (a) は砥石軸方向から透視したときの等高線図であり, 中央部の 5 個の点は $\theta=-180, -90, 0, 90, 180^\circ$ における z 軸上の中心点を示す. 両端の点の間の距離 2.485 mm が $j_A=11.7^\circ$ を表している. $\theta_A=-47.2^\circ$ (右下) の方向に砥石の中心があり, 円弧は砥石外周の一部を表す. 連なった小円はねじの各半径における研削点を表す. ほとんどの研削が砥石の円すい面で行われ, 谷径の部分がわずかに砥石外周の狭い範囲で削られていることがわかる.

図 7 (b) は高さ誤差 e_H と角度誤差 e_A の分布を示したものである. ほぼピッチ円を境にして外周側でわずかに凹, 内周側でわずかに凸になっているが, 最大

高さ誤差 $e_{H\max}=0.16 \mu\text{m}$ は研削面の粗さよりも小さな値であり, 極めて高精度のねじ研削であるといえる. さらにこれは図 9 に示す 3 形研削による $e_{H\max}=5.52 \mu\text{m}$ をはるかにしのぐ精度である.

こうして実際に研削されたねじの外観を図 8 に示した.

本ねじ研削法との比較のため, 同じメートル台形ねじ Tr 52×12 を通常のねじ研削である 3 形研削した場合のシミュレーションを行った. この場合は 2 章における (4) の極値探索を行わずに一組の j_c と ψ におけるシミュレーションを行えばよい. そして j_c をねじの進み角 4.8° とし, ψ を零とすればよい. また砥石の底角 β を圧力角 15° にする. なお砥石の直径は図 7 と同じにした. このときの高さ誤差 e_H と角度誤差 e_A の分布を図 9 に示した. 3 形研削におけるねじ面の形状が

(a) 砥石軸方向から透視した等高線図

図 6 極点取込み法による極値探索の過程

(b) 高さ誤差 e_H と角度誤差 e_A の分布

図 7 最適砥石軸角 $j_c=7.9^\circ$, $\psi=-8.6^\circ$ におけるシミュレーションの結果
 Tr 52×12 ($\alpha_n=15^\circ$, $R_P=45.6$ mm, $P=12$ mm)
 12 号さら形砥石 (直径 100 mm, $\beta=23.0^\circ$) $D_c=6.8$ mm

図 8 研削されたメートル台形ねじ Tr 52×12

図 9 3 形研削のシミュレーションにおける高さ誤差 e_H と角度誤差 e_A の分布
 Tr 52×12 ($\alpha_n=15^\circ$, $R_P=45.6$ mm, $P=12$ mm)
 $j_c=4.8^\circ$, $\phi=0^\circ$
 ねじ研削用砥石 (直径 100 mm, $\beta=15.0^\circ$)
 $D_c=6.8$ mm

全体に凸であることが e_H の分布に現れている。2 形を発展させたねじを基準にした場合の最大高さ誤差は $e_{H\max}=5.52\ \mu\text{m}$ であり、これは先に示した本ねじ研削法における値の 34.5 倍である。

本ねじ研削法のもう一つの特徴は、通常の方法では研削が困難な、より小さな圧力角を持つねじの研削が可能であることである。これを実証するために、図 7 と同じ Tr 52×12 の圧力角のみを 7° に変更したものを同じ 12 号さら形砥石で研削した。図 10 に示したように e_H の凹凸も、最大高さ誤差 $e_{H\max}=0.22\ \mu\text{m}$ も図 7(b)におけるよりも大きく、圧力角の減少による精

図 10 最適砥石軸角 $j_c=6.9^\circ$, $\phi=-16.8^\circ$ におけるシミュレーションの結果
 Tr 52×12 の圧力角を変更したもの ($\alpha_n=7^\circ$, $R_P=45.6$ mm, $P=12$ mm)
 12 号さら形砥石 (直径 100 mm, $\beta=23.0^\circ$) $D_c=6.8$ mm

度の低下が認められる。しかし図 9 の 3 形研削に比べて 25 倍の精度である。

8. 結 言

本論文では総形ドレッシングを必要とせず、目的のねじ形状に依存しない普通形状砥石を用いるコンピュータ支援ねじ研削法を提案し、その有効性を示した。その結果、総形ドレッシングは必要でなく、しかも 3 形研削よりも高い精度のねじが得られることがわかった。さらに通常の方法では研削が困難なより小さな圧力角を持つねじも、本研削法によると高い精度で研削できることがわかった。

本研究の遂行に当たり実験等に協力いただいた修士課程学生、山崎正礼君 (現、安田生命) および城戸勉君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) ねじ便覧, (1966), 9, 日刊工業.
- (2) 両角・岸, 精密機械, 48-4 (1982), 503.
- (3) JIS B 1723-1977.
- (4) 鍵和田・金内, 機論, 51-466, C (1985), 1381.
- (5) 鍵和田・金内, 機論, 52-480, C (1986), 2294.