

三次元座標測定機によるピニオンカッタの測定*

劉 宗 先*¹, 田 村 久 司*²
川 崎 一 正*², 三 留 謙 一*³

Measurement of Pinion Type Cutter Using Coordinate Measuring Machine

Zongxian LIU, Hisashi TAMURA,
Kazumasa KAWASAKI and Ken-ichi MITOME

A method for inspecting a pinion type cutter using a coordinate measuring machine (CMM) is proposed. In this method, the cutting edge profile of the cutter is indirectly measured as the intersecting curve between the flank of tool and the cutting face. Left and right side flanks of the cutter are considered to be the tooth surfaces of two different involute helical gears. The coordinates of a large number of points on the tooth surface and the face are measured with CMM. The tooth surface and the face are estimated from the measured data by the method of least squares. The cutting edge profile is calculated from the estimated tooth surface and the face. While the cutting edge profile is moved helically along a helinx of an imaginary gear which should be generated by the ideal cutter, it forms the tooth surface of the imaginary gear, and a pressure angle of this gear can be calculated. Pressure angle error of the pinion cutter is the imaginary gear's one.

Key Words: Measurement, Machine Element, Pinion Type Cutter, Gear, Cutting Edge Profile, Equivalent Helical Gear, Pressure Angle, Coordinate Measuring Machine, Method of Least Squares

1. 緒 言

JIS B 4356 にインボリュートピニオンカッタの測定法が定められているが、カッタとして最も重要な切れ刃形測定法が示されていない。切れ刃形がカッタ切れ刃側面逃げ面とすくい面との交線であることを測定法に取り入れることができなかつたためと思われる。また、JIS に定めるピニオンカッタ測定法はインボリュート歯車のそれを準用したもので、切れ刃側面逃げ面を歯車歯面とみなしているだけで、この点でもカッタ測定法として不満が残る。

ピニオンカッタの理論切れ刃形は、基準歯形⁽¹⁾によって定められる仮想歯車歯面と切れ刃すくい面との交線になる。そして、この理論切れ刃形と横逃げ角とから切れ刃側面逃げ面が決められるべきであろう。しかし、この側面逃げ面の工作が困難なために、代替面として工作が容易なインボリュートねじ面を用いているが、このような近似ピニオンカッタでも、その設計、

製作過程は体系化されているとはいえないようである。そこで著者らの一人は、代替逃げ面であるインボリュートねじ面が円すい形インボリュート歯車歯面であることに着目して、近似ピニオンカッタの設計、製作過程を体系化し、一つのシステムを構築した⁽²⁾。

ピニオンカッタの設計、製作が体系的に進められれば、それを補完する意味においても、また、上述のJIS 測定法の改善においても、ピニオンカッタ測定の体系化が必要になろう。本研究は、三次元座標測定機(以下、三次元測定機という)を用いることによってピニオンカッタの体系的測定が簡単に可能になることを明らかにしたものである。測定は偏心、ピッチ誤差、カッタの圧力角誤差、そして転位係数の順に行われ、いずれも間接測定される。

2. 基本的な考え方

ピニオンカッタ切れ刃側面逃げ面は、通常表歯面、裏歯面と呼ばれているが、本研究ではカッタ中心から大端部より小端部を見て右側逃げ面を右歯面、左側逃げ面を左歯面と呼ぶことにする。また普通のピニオンカッタは左・右歯面ともインボリュートねじ面であるが、左・右歯面の圧力角とねじれ角はそれぞれ異なっている。よって、図1に示すように、ピニオンカッタ

* 原稿受付 1998年3月2日。

*¹ 正員, 新潟大学大学院 (☎ 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050)。*² 正員, 新潟大学工学部。*³ 正員, 山形大学工学部 (☎ 992-0038 米沢市城南 4-3-16)。

E-mail: kawasaki@eng.niigata-u.ac.jp

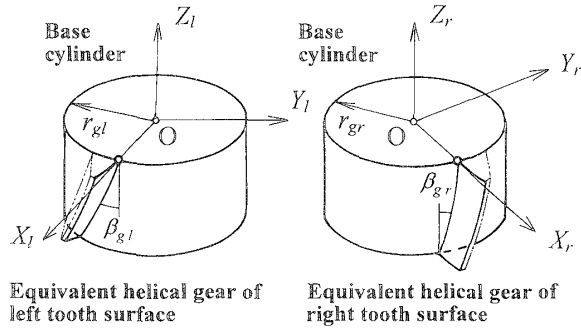


Fig. 1 Equivalent helical gears

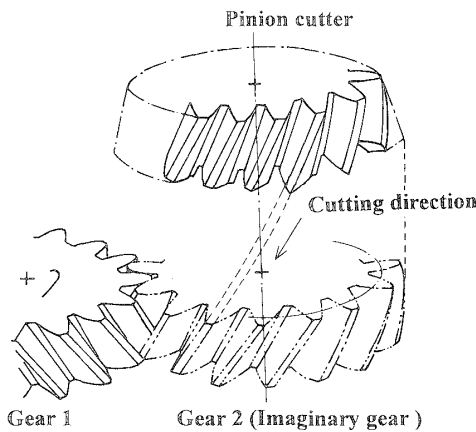


Fig. 2 Gear cutting by pinion cutter

左・右歯面を区別して考えると、それらは片側歯面しかもたないはずば歯車と考えることができる。これらを左・右歯面相当はずば歯車⁽³⁾ということにする。さて、左・右歯面相当はずば歯車の基本諸元を求めるために、左・右歯面を三次元測定機で測定し、既報⁽⁴⁾の方法で基本諸元を推定する。そして、推定した相当はずば歯車について、偏心、累積ピッチ誤差を求める。次に、カッタすくい面を三次元測定機によって測定し、すくい面の位置・姿勢を推定する。そして、推定したすくい面と左・右歯面相当はずば歯車との交線であるカッタの切れ刃形を計算する。この切れ刃形をピニオンカッタが作り出そうとしている仮想歯車(図2)のねじ線に沿ってねじ運動させ、その形成する曲面が、仮想歯車歯面であると考え、この仮想歯車歯面は計算上の歯面であることから、歯形誤差がなく、圧力角誤差のみがあることになる。

3. 相当はずば歯車の基本諸元⁽²⁾

図2に示すように、歯車1は被削歯車、歯車2は歯車1とかみあう歯車でピニオンカッタによって実現される仮想歯車である。この仮想歯車の基本諸元は、

- z₀: 歯数 (ピニオンカッタの歯数)
- m_n: 歯直角モジュール (これには誤差がない)

- α_n: 歯直角圧力角
 - β₀: ピッチ円筒上のねじれ角
- である。これより
- 2r₀: ピッチ円直径 = m_nz₀ sec β₀
 - α_s: 正面圧力角 tan α_s = tan α_n sec β₀
 - 2r_g: 基礎円直径 = m_nz₀ cos α_s sec β₀
 - β_g: 基礎円筒上のねじれ角
 - tan β_g = tan β₀ cos α_s

となる。

この仮想歯車から左・右歯面相当はずば歯車の基本諸元を求める。まず、ピニオンカッタ切れ刃の基本諸元について

- ε_l: 左歯面ピッチ円筒上での横逃げ角
- ε_r: 右歯面ピッチ円筒上での横逃げ角
- γ: 歯直角方向すくい角
- σ: 刃付き角

を定めると、相当はずば歯車のねじれ角は

$$\beta_l = \text{左歯面のピッチ円筒上のねじれ角} = \beta_0 + \epsilon_l$$

$$\beta_r = \text{右歯面のピッチ円筒上のねじれ角} = \beta_0 - \epsilon_r$$

となる。これより、左・右歯面の正面圧力角 α_{sl}, α_{sr} は

$$\left. \begin{aligned} \tan \alpha_{sl} &= \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_0} \\ &+ \left\{ \tan \gamma \cos \sigma - \frac{\tan \alpha_n \sin \sigma}{\cos(\beta_0 - \sigma)} \right. \\ &\quad \left. - \tan \gamma \sin \sigma \tan(\beta_0 - \sigma) \right\} (\tan \beta_l - \tan \beta_0) \\ \tan \alpha_{sr} &= \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_0} \\ &+ \left\{ \tan \gamma \cos \sigma - \frac{\tan \alpha_n \sin \sigma}{\cos(\beta_0 - \sigma)} \right. \\ &\quad \left. - \tan \gamma \sin \sigma \tan(\beta_0 - \sigma) \right\} (\tan \beta_0 - \tan \beta_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

左・右歯面の基礎円筒上のねじれ角 β_{gl}, β_{gr} は

$$\left. \begin{aligned} \tan \beta_{gl} &= \tan \beta_l \cos \alpha_{sl} \\ \tan \beta_{gr} &= \tan \beta_r \cos \alpha_{sr} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

左・右歯面の基礎円筒直径 2r_{gl}, 2r_{gr} は

$$\left. \begin{aligned} 2r_{gl} &= m_n z_0 \cos \alpha_{sl} / \cos \beta_l \\ 2r_{gr} &= m_n z_0 \cos \alpha_{sr} / \cos \beta_r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

式(1)~(3)より、左・右歯面相当はずば歯車の諸元 α_{sl}, α_{sr}, β_{gl}, β_{gr}, r_{gl}, r_{gr} が決まる。

4. 歯面とすくい面の数式表示

左・右歯面相当はずば歯車はそれぞれ異なったものであるから、歯車歯面を別々に数式表示しなければならない。

4-1 右歯面相当はずば歯車歯面の数式表示 図3に示すように、相当はずば歯車中心軸すなわちピニ

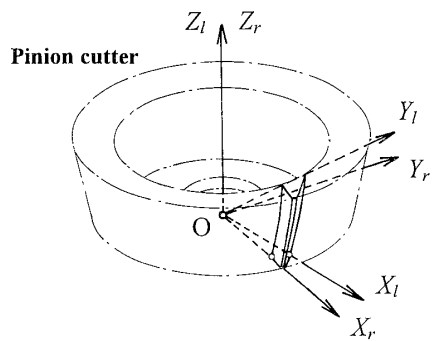


Fig. 3 Coordinate systems of left and right tooth surface

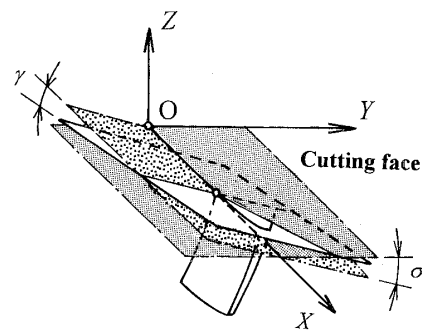


Fig. 5 Cutting face of pinion cutter

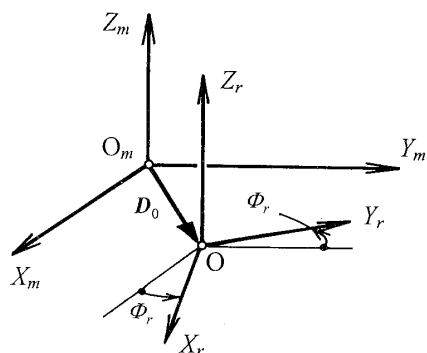


Fig. 4 Relationship between coordinate systems

オンカッタ中心軸（偏心を考え、カッタ取付穴中心軸と異なるものとする）とカッタ底面（小端面）との交点を原点 O とし、 O と歯車の基礎円筒上のインボリュート曲線の起点とを通る直線を X_r 軸、歯車中心軸を Z_r 軸とする歯車歯面に固着した座標系 $O-X_r Y_r Z_r$ を設定する（図 1 参照）。そして、 $O-X_r Y_r Z_r$ で右歯面相当はすば歯車歯面を列ベクトル $X_r=(X_r, Y_r, Z_r)^T$ で示すと、 ψ と θ を歯面表示パラメータとして⁽⁴⁾、

$$\left. \begin{aligned} X_r(\psi, \theta) &= r_{gr}\{(\cos \psi + \psi \sin \psi) \cos \theta \\ &\quad - (\sin \psi - \psi \cos \psi) \sin \theta\} \\ Y_r(\psi, \theta) &= r_{gr}\{(\cos \psi + \psi \sin \psi) \sin \theta \\ &\quad + (\sin \psi - \psi \cos \psi) \cos \theta\} \\ Z_r(\theta) &= r_{gr} \theta \cot \beta_{gr} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

歯面 X_r の単位面法線列ベクトルを $N_r=(N_{xr}, N_{yr}, N_{zr})^T$ とする。

三次元測定機にピニオンカッタをセットする。そして、歯面 X_r を三次元測定機の座標系で表示する。図 4 に三次元測定機の座標系 $O_m-X_m Y_m Z_m$ と $O-X_r Y_r Z_r$ との関係を示す。三次元測定機の Z_m 軸は鉛直で、カッタ取付穴の軸と一致しているものとするが、ピニオンカッタの偏心を考えると、原点 O は、 X_0, Y_0 を未知数とする列ベクトル $D_0=(X_0, Y_0, 0)^T$ で示される位置にあることになる。また、 X_m 軸と X_r 軸とを

一致させることができないから、この二軸のなす角を未知なる角 Φ_r で表す。これより $O_m-X_m Y_m Z_m$ での右歯面相当はすば歯車歯面 X_r' とその単位面法線列ベクトル N_r' は次のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} X_r' &= C(\Phi_r) X_r + D_0 \\ N_r' &= C(\Phi_r) N_r \\ C(\Phi_r) &= \begin{bmatrix} \cos \Phi_r & -\sin \Phi_r & 0 \\ \sin \Phi_r & \cos \Phi_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5) \\ D_0 &= (X_0, Y_0, 0)^T \end{aligned} \right\}$$

4.2 左歯面相当はすば歯車歯面の数式表示

左歯面相当はすば歯車歯面を、歯車中心軸を Z_l 軸とする歯車歯面に固着した座標系 $O-X_l Y_l Z_l$ で表示し、それを列ベクトル $X_l=(X_l, Y_l, Z_l)^T$ で示すと、 ψ' と θ' を歯面表示パラメータとして⁽⁴⁾、

$$\left. \begin{aligned} X_l(\psi', \theta') &= r_{gl}\{(\cos \psi' + \psi' \sin \psi') \cos \theta' \\ &\quad - (-\sin \psi' + \psi' \cos \psi') \sin \theta'\} \\ Y_l(\psi', \theta') &= r_{gl}\{(\cos \psi' + \psi' \sin \psi') \sin \theta' \\ &\quad + (-\sin \psi' + \psi' \cos \psi') \cos \theta'\} \\ Z_l(\theta') &= r_{gl} \theta' \cot \beta_{gl} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

歯面 X_l の単位面法線列ベクトルを $N_l=(N_{xl}, N_{yl}, N_{zl})^T$ とする。

相当はすば歯車軸は、その左・右歯面が創成されたときのカッタブランク回転軸であるから、右歯面から定めた歯車軸と左歯面から定めたそれはほとんど変わらないと考えてよい。このことを考慮に入れて X_l, N_l を $O_m-X_m Y_m Z_m$ で表示し、それを X_l', N_l' とすると

$$\left. \begin{aligned} X_l' &= C(\Phi_l) X_l + D_0 \\ N_l' &= C(\Phi_l) N_l \\ C(\Phi_l) &= \begin{bmatrix} \cos \Phi_l & -\sin \Phi_l & 0 \\ \sin \Phi_l & \cos \Phi_l & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (7) \\ D_0 &= (X_0, Y_0, 0)^T \end{aligned} \right\}$$

4.3 すくい面の数式表示 ピニオンカッタすく

い面は、図5に示すように、カッタ軸直角断面に対して刃付け角 σ 傾いているだけではなく、それと直角方向にすくい角 γ 傾いている⁽²⁾。しかし、これらの傾き角 σ, γ は、それを表示するときの座標系によって異なったものになる。本研究の場合、 X 軸方向が未知のため σ, γ の傾いている方向を特定することができない。そこで、すくい面を数式表示するために、まず、図3の $O-X_r Y_r Z_r$ において、 $X_r Y_r$ 面に一致する平面 S' を考え、その S' 上に座標系 $O-X_s Y_s Z_s$ を設定する。この状態で $O-X_s Y_s Z_s$ は $O-X_r Y_r Z_r$ に一致しているものとする。平面 S' を u, v をパラメータとして、列ベクトル $S'=(u, v, 0)^T$ で表す。次に、図6(a)に示すように、 S' を Y_r 軸まわりに角度 η 回転したのち、 Z_r 軸まわりに角度 ϕ 回転した状態の S' を S'' とし、 S'' がすくい面 S に平行になるとする。 S は一般に O を通らない[図6(b)]。そこで、 S と Z_r 軸との交点を O_s とし、 O と O_s との距離を l とする。角度 ϕ, η と距離 l は未知であり、これらはすくい面の三次元座標測定によって決定されるものである。 $O_m-X_m Y_m Z_m$ ですくい面 S を示すと

$$S(u, v) = C(\Phi_r) \left\{ C(\phi) B(\eta) S'(u, v) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix} \right\} + D_0$$

$$B(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & \sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix}$$

$$C(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

.....(8)

ここに、 ϕ は Z_r 軸に関して、 η は Y_r 軸に関してそれぞれ右まわりを正とする。すくい面 S の単位面法線列ベクトルを $n=(n_x, n_y, n_z)^T$ とする。

5. 誤差検出法

5.1 偏心とピッチ誤差 ピニオンカッタの偏心と累積ピッチ誤差の検出は、既報⁽⁴⁾の方法で行われる。ピニオンカッタ全右歯面を一点ずつ測定し、右歯面の基本諸元を用いて、偏心 D_0 を検出する。ついで偏心を考慮して、累積ピッチ誤差を求める。また、この D_0 を用いて、左歯面の累積ピッチ誤差を求める。

5.2 相当はすば歯車歯面の推定 ピニオンカッタの偏心と累積ピッチ誤差を求めた後、相当はすば歯車歯面を推定する。任意の1枚の右歯面を選び、刃先の丸味部分を避けて、できるだけその歯面全体に及ぶ

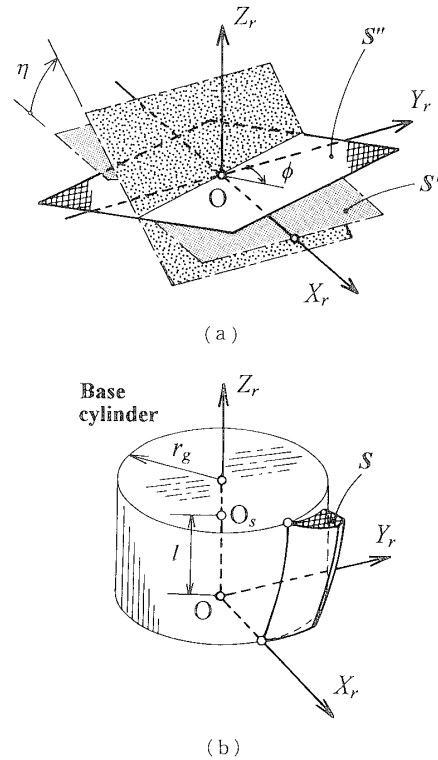


Fig. 6 Cutting face in the coordinate system of CMM

ように歯面上の多数点(n 個)の座標測定を行う。測定値 M_{ri} と歯面 X'_i は次の関係にある。

$$M_{ri} = X'_i(\phi_i, \theta_i; \alpha_{sr}, \beta_{gr}, \Phi_r) + RN'_i(\phi_i, \theta_i; \alpha_{sr}, \beta_{gr}, \Phi_r) \quad i=1, 2, \dots, n$$

.....(9)

ここに、 R は三次元測定機の球状測子半径である。既報⁽⁴⁾の数値計算法によって、式(9)から歯面 X'_i の正面圧力角 α_{sr} と基礎円筒上のねじれ角 β_{gr} および角 Φ_r を推定する。推定した α_{sr} と β_{gr} を式(5)の第1式に代入すれば、それは ϕ, θ を歯面表示パラメータとする $O-X_r Y_r Z_r$ における右歯面の式となる。歯面 X'_i の式も同様にして求められる。

5.3 すくい面の推定 すくい面について、平面全体に及ぶように多数点の座標測定を行うと、測定値群 $M_{si}(i=1, 2, \dots, n)$ を得る。一方、式(8)のすくい面 S において、角度 ϕ, η 、距離 l が未知であることと、 u と v がすくい面表示パラメータであることとを考慮して M_{si} と S の関係を示せば

$$M_{si} = S(u_i, v_i; \phi, \eta, l) + Rn(\phi, \eta) \quad \text{.....(10)}$$

式(10)から最小二乗法によって ϕ, η, l を求めることができる。求めた ϕ, η, l を式(8)に代入すれば、 u と v をパラメータとする $O_m-X_m Y_m Z_m$ におけるすくい面の式を得る。

5.4 ピニオンカッタの圧力角誤差 左・右歯面相当はすば歯車歯面 X'_r, X'_l とすくい面 S を推定した

後, X'_r, X'_l と S との交線として, ピニオンカッタの切れ刃形を計算する. X'_r, X'_l は

$$\left. \begin{aligned} X'_r(\psi, \theta) &= S(u, v) \\ X'_l(\psi', \theta') &= S(u', v') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

これより, 右歯面について $u=u(\psi), v=v(\psi), \theta=\theta(\psi)$ が, 左歯面について $u'=u'(\psi'), v'=v'(\psi'), \theta'=\theta'(\psi')$ が求められる. ψ はインボリュート曲線の展開角であるから, ψ, ψ' の値を漸増(減)すれば切れ刃形曲線が求められる. すなわち, 左・右切れ刃形曲線は, 列ベクトル $X_{cl} \equiv (X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl})^T = S\{u'(\psi'), v'(\psi')\}$, $X_{cr} \equiv (X_{cr}, Y_{cr}, Z_{cr})^T = S\{u(\psi), v(\psi)\}$ で求められる. このときの ψ の範囲は, r_b をカッタの歯元円半径, r_k を歯先円半径とすれば, 半径 $r_b < \sqrt{X_{cl}^2(\psi) + Y_{cl}^2(\psi)} < r_k$ である.

本測定法では, すくい面と左・右歯面相当はすば歯車との交線として切れ刃形曲線を求め, その交線を仮想歯車のねじ線に沿ってねじ運動させたときに得る曲面を仮想歯車歯面と考えている. したがって, 仮想歯車歯面は, 計算上のインボリュートねじ面となるから, 理想歯面からの出入り量を意味する歯形誤差は検出できない. 歯面の圧力角誤差が検出できる.

さて, カッタ右切れ刃形が形成する仮想歯車右歯面を列ベクトルで表し, X_k とすると,

$$\left. \begin{aligned} X_k(\psi, \rho) &= C(\rho)X_{cr}(\psi) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \rho \\ h &= r_0 \cot \beta_0 \\ C(\rho) &= \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho & 0 \\ \sin \rho & \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここに, ρ は Z_r 軸をねじ軸とする切れ刃形曲線のねじ運動に関する回転角, h はその換算ピッチである. さて, 切れ刃形とカッタピッチ円筒との交点を P_r とし, 点 P_r における X_k の単位法線列ベクトルを $n_k = (n_{kx}, n_{ky}, n_{kz})^T$ とする. また, 点 P_r とカッタ中心 O とを結ぶ直線の方角を示す単位列ベクトルを $n_g = (n_{gx}, n_{gy}, n_{gz})^T$ とする. さらに, n_k, n_g を軸直角断面上へ投影した列ベクトルをそれぞれ n'_k, n'_g とする(図7). そして, n'_k, n'_g とのなす角を α_k とすると, α_k は次式で求められる.

$$\left. \begin{aligned} n'_k \cdot n'_g &= |n'_k| \cdot |n'_g| \cos \alpha_k \\ n'_k &= (n_{kx}, n_{ky}, 0)^T \\ n'_g &= (n_{gx}, n_{gy}, 0)^T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

角度 α_k の余角が仮想歯車のピッチ円上の軸直角圧力角 α_{sr} となる. これと設計値 α_s とを比較すること

によって, 右切れ刃形圧力角誤差 $\Delta\alpha_r$ を得る. 同様にして, 左切れ刃形圧力角誤差 $\Delta\alpha_l$ を得る.

5.5 転位係数

ピニオンカッタのと転位係数 x_s は, 切削運動する切れ刃形曲線の形成する仮想歯車左・右歯面の円弧歯厚から求めることができる. 5.4節で求めた左・右切れ刃形と仮想歯車ピッチ円筒との交点 P_l, P_r の座標をそれぞれ $(X_{l0}, Y_{l0}, Z_{l0}), (X_{r0}, Y_{r0}, Z_{r0})$ とする. そして, 交点 P_l を仮想歯車のピッチ円筒上のねじ線(ねじれ角 β_0) に沿って $Z=Z_{r0}$ 平面に投影した投影点を P'_l とし, その座標を (X_a, Y_a, Z_{r0}) とする. X_a, Y_a およびねじの進み $(Z_{l0}-Z_{r0})$ に対する回転角 ρ_d は, 次式で求められる.

$$\left. \begin{aligned} Z_{l0} - Z_{r0} &= r_0 \rho_d / \tan \beta_0 \\ X_a &= X_{l0} \cos \rho_d - Y_{l0} \sin \rho_d \\ Y_a &= X_{l0} \sin \rho_d + Y_{l0} \cos \rho_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

二点 P'_l, P_r 間の円弧歯厚 S_{0s} を計算する.

$$\left. \begin{aligned} S_{0s} &= 2r_0 \sin^{-1}(L/2r_0) \\ L &= \sqrt{(X_a - X_{r0})^2 + (Y_a - Y_{r0})^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

一方, 転位係数 x_s の仮想歯車の円弧歯厚⁽⁵⁾ は,

Table 1 Basic dimensions of pinion cutter

Module	m_n	3 mm
Number of teeth	z_0	40
Pressure angle	α_n	20°
Helix angle	β_0	29° 56' 38"
Side relief angle	ϵ_l, ϵ_r	2°
Sharpening angle	σ	29° 57'
Rake angle	γ	5°

Table 2 Basic dimensions of equivalent helical gear

		Left	Right
Module	m_n	3 mm	3 mm
Number of teeth	z_0	40	40
Pressure angle	α_{sl}, α_{sr}	23° 22' 37"	22° 32' 56"
Basic helix angle	β_{gl}, β_{gr}	29° 47' 13"	26° 6' 1"
Base circle dia.	$2r_{gl}, 2r_{gr}$	127.12 mm	127.90 mm

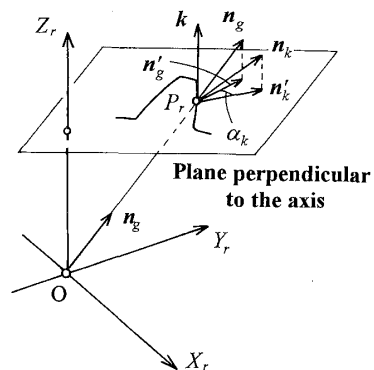


Fig. 7 Relationship of normal of the cutter

Table 3 Results of measurement

Number of measurement	1		2		3	
	Results	Δt	Results	Δt	Results	Δt
Eccentricity	3.3 μm	1.6 μm	4.1 μm	2.1 μm	4.4 μm	2.0 μm
Accumulative pitch error	7.4 μm		8.6 μm		10.6 μm	
Pressure angle error of left and right tooth surface	$\Delta\alpha_{sl}$ 0.4 min. $\Delta\alpha_{sr}$ -0.2 min.	1.3 μm 1.5 μm	1.2 min. -0.2 min.	1.2 μm 1.1 μm	1.6 min. -0.3 min.	1.4 μm 1.1 μm
Helix angle error of left and right tooth surface	$\Delta\beta_{gl}$ 0.1 min. $\Delta\beta_{gr}$ 0.9 min.	1.3 μm 1.5 μm	0.2 min. 1.3 min.	1.2 μm 1.1 μm	0.3 min. 1.7 min.	1.4 μm 1.1 μm
Position and posture of cutting face	ϕ -1.14 rad. η 0.53 rad. l 16.3 mm	1.0 μm	-1.14 rad. 0.53 rad. 16.3 mm	1.1 μm	-1.14 rad. 0.53 rad. 16.3 mm	1.1 μm
Pressure angle error	$\Delta\alpha_l$ 1.1 min. $\Delta\alpha_r$ -4.3 min.	—	1.2 min. -4.4 min.	—	1.1 min. -4.4 min.	—
Shifting coefficient of profile x_s	0.004	—	0.004	—	0.003	—

$$S_{0s} = (\pi/2 + 2x_s \tan \alpha_s) m_s \dots\dots\dots (16)$$

式(15), (16)よりピニオンカッタの転位係数 x_s が求められる。

6. ピニオンカッタの測定

表1に測定したピニオンカッタの基本諸元を示す。表2に相当はすば歯車の基本諸元を示す。測定には半径 $R=0.997 \text{ mm}$ の球状側子を用いた。また、日時を改めてピニオンカッタを三次元測定機にセットし直し、多数回測定した。そのうちの三回の測定結果を表3に示す。

6.1 偏心と累積ピッチ誤差 ピニオンカッタ右歯面を選び、一つの歯面につき1点ずつ40枚の全歯面について測定した。そして、その測定値群からカッタの偏心と累積ピッチ誤差を求めた。

6.2 相当はすば歯車歯面の推定 任意の1個の刃について、右歯面および左歯面上で刃先の丸味部分を避けて無作為に25点の座標を測定し、右歯面および左歯面相当はすば歯車の基本諸元を推定した。

6.3 すくい面の推定 相当はすば歯車歯面を推定した後、すくい面について無作為に25点の座標を測定し、すくい面を推定した。

6.4 ピニオンカッタの圧力角誤差 相当はすば歯車歯面とすくい面を推定した後、ピニオンカッタの圧力角誤差 $\Delta\alpha_l, \Delta\alpha_r$ を計算した。

6.5 転位係数 求めた切れ刃形のピッチ円筒上の点の座標を用いて、転位係数 x_s を計算した。

測定結果をまとめて表3に示す。本研究では、座標測定値群によく一致するような理論歯面を推定することを基本にしているが、一般に、その理論歯面と各測

定値は一致せず、わずかに残差が生じる。各残差の絶対値の平均的な値を適合精度⁽⁴⁾ (標準偏差) と称し、表3ではそれを Δt で表した。表3からわかるようにすべての測定項目について、 Δt が約 $2 \mu\text{m}$ 以下で小さく、かつ、測定結果の繰返し性もよいことから、三次元座標測定機によるピニオンカッタの測定が可能であることがわかる。

7. 結 言

三次元座標測定機によるピニオンカッタの測定法を示した。

本研究では、ピニオンカッタ切れ刃側面逃げ面が円すい形インボリュート歯車であることに着目して、それを左・右歯面相当はすば歯車と名付け、その歯車について、偏心・累積ピッチ誤差をまず検出し、つづいて左・右歯面(切れ刃側面逃げ面)を推定した。一方、ピニオンカッタすくい面を推定し、これと切れ刃側面逃げ面との交線として切れ刃形曲線を求めた。そして、切れ刃形曲線から仮想歯車歯面の式を導き、その歯面の圧力角誤差と転位係数を求めた。本法はピニオンカッタの間接測定法である。

三次元座標測定機によるピニオンカッタ測定の可能性は、測定実験によって確かめられた。

文 献

- (1) JIS B1701-1973.
- (2) 三留謙一, 機論, 48-430, C(1982), 860-867.
- (3) 三留謙一・ほか2名, 機論, 62-595, C(1996), 1087-1092.
- (4) 田村久司・ほか2名, 機論, 63-606, C(1997), 572-578.
- (5) 石川二郎, 改訂機械要素(2), (1976), 175, コロナ社.