総形ドレッシングを要しないボールねじ研削法*

鍵和田 忠男^{*1}, 原 田 宏 幸^{*2}

Method for Ball Screw Generation without Form Dressing

Tadao KAGIWADA and Hiroyuki HARADA

This paper deals with the development of a method for ball screw generation. The method is based on a generation process that uses a standard shaped grinding wheel, instead of a form grinding process that uses a form dressed grinding wheel, and requires no extensive form dressing process. In a newly developed thread generation system, the wheel axis is set three dimensionally at the computed optimum angle of inclination, consisting of the tilt and swivel angle components of the planned ball screw and grinding wheel. The optimum angle of inclination that gives the minimum geometrical error is determined by a numerical simulation of the generation process with the aid of a computer. Through the aid of a computer assuming several geometrical shapes of grinding wheel and generation experiments, it is shown that the present ball screw generation method is effective.

Key Words: Grinding, CAM, Generating Motion, Rolling Bearing, Dressing, Ball Screw Generating, Form Grinding, Form Dressing, Simulation, Optimization

1. 緒 言

ボールねじのねじ溝の仕上げには通常は総形研削が用いられ、砥石をねじ溝形状に合せて総形ドレッシングをする必要がある。ボールねじ溝の断面形状は二つの円弧からなる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過程が必要である。またこうして研削されたねじ溝の断面形状は、ねじ溝のねじれに起因する砥石の干渉により目的のねじ溝形状とは一致しない。これらの難点は、ボールねじの加工に総形研削を用いることに起因している。

そこで本研究においては、総形研削によらずにボールねじを加工する方法の開発を試みた。すなわち研削されるゴシックアーチとは形状が本質的に異なる普通形状砥石を用い、ボールねじ工作物と砥石の相対運動によってボールねじを研削する方法である。この研削法によると複雑な総形ドレッシング過程は不要であり、市販の砥石をそのまま用いるか、あるいは JIS に規定された簡単な縁形状にドレッシングするだけで十

分である。また砥石とねじ溝の干渉をも考慮した研削シミュレーションに基づいて工作物と砥石の最適な相対運動を与えるから、砥石形状とねじ溝形状の条件によっては総形研削によるものよりも目的ねじ溝形状に近いボールねじが研削される可能性もある。

著者の一人⁽¹⁾⁻⁽³⁾はこれまでに、総形ドレッシング不要のコンピュータ支援によるねじ研削法の開発を行っており、この研削法の基本原理を発展させることによりボールねじの研削が可能となる。

本論文では、本研削法の原理を説明し、種々の形状の砥石を想定したコンピュータ支援の結果と研削実験および形状精度の測定を通じて本研削法が可能であることを示し、また誤差判定の方法の改善による有効精度の向上について述べる。

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 に示した。砥石は普通形状であり、図 1 は 12 号さら形を想定した例である。砥石軸 z_s は傾き角 j_0 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、砥石軸の傾き

* 原稿受付 1995 年 7 月 14 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)。^{*2} 正員、北海道大学大学院。

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ところが、通常のねじ研削法に用いられる総形研削と異なる点である。そして仕上げ形状が、角度 j_G, ψ と距離 L に基づく工作物と砥石の相対運動のみならず、使用する砥石形状の双方によって決定されるところが、除去加工における成形と異なる点である。

砥石軸の傾き角 j_G と旋回角 ψ は、4章で述べ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規準とした極値探索からなるコンピュータ支援によって決定される^{(1)~(3)}。シミュレーションにおいてボールねじの半径方向の砥石の切り込み深さ D_c をあらかじめ設定するが、砥石の原点 O_s と軸 z の距離 L はこの D_c から次式で決定される。

$$L = \frac{d}{2} - D_c + R_s \cos \psi \dots \dots \dots (1)$$

ただし d はボールねじ工作物の外径であり(図3参照)、 R_s は砥石の外半径で $z_s=0$ における値である(図6参照)。

研削装置の外観を図2に示した。通常のねじ研削盤には旋回角 ψ を与える装置がなく、また改造によってそれを付加するための空間的余裕もない。そのためこ

こでは砥石軸の三次元設定が可能なボールねじ研削用の砥石台を新たに設計・製作し、これをはん用旋盤の移動台に取付け、この砥石台に市販のエアマータ駆動の研削ユニットを取付けて、全体で研削装置とした。

3. ボールねじ溝の目的形状

ボールねじ溝の形状・寸法は任意であるが、イメージを得やすくするために具体的な寸法を含めて示す。ここでは入手が容易な外径および厚さが比較的大きい砥石を用いる関係で、鋼球径の大きいボールねじを目的形状とし、ねじ軸の呼び外径 $d=50$ mm、リード $l=12$ mm、鋼球径 $D_a=7.938$ mm、鋼球の中心円径 $d_m=51.5$ mm の1条右ねじを例として取上げた。これらの数値は JIS⁽⁴⁾ において規定または選択される。また適合係数 $\gamma=0.55$ 、接触角 $\alpha=45^\circ$ とした。ねじ溝形状を図3に示したが、相対寸法は誇張してある。この諸元に基づく寸法値を表1に示した。図3および表1中の R, d_2, d_b, d_1, w_{2j} は他の数値から以下の幾何学的関係により決定される。

Table 1 Specifications of ball screw to be generated

Nominal shaft diameter, d	50mm
Lead, l	12mm
Ball diameter, D_a	7.938mm
Ball center diameter, d_m	51.5mm
Conformity factor, γ	0.55
Contact angle, α	45°
Radius of gothic arch, R	4.366mm
d_2	45.887mm
d_b	43.562mm
d_1	43.348mm
w_{2j}	73.348mm

Fig. 1 Diagram of the grinding configuration

Fig. 2 Grinding device with lathe and grinding head

Fig. 3 Dimensions of ball screw to be generated

Fig. 4 Location of generatrix in each type of thread

$$R = \gamma D_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$d_2 = d_m - D_a \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$d_b = d_m - D_a \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$d_1 = d_m + D_a(2\gamma - 1) \cos \alpha \\ - D_a \sqrt{4\gamma^2 - (2\gamma - 1)^2 \sin^2 \alpha} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$w_{2j} = \frac{D_a}{2} \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (6)$$

図4に示したようにボールねじに関しては文献(1)で定義した2形を発展させたねじ形状ではなく、本来の2形を目的形状とすべきだから、図3の目的形状を接触点(軸半径 $r_p = d_2/2 = 22.944$ mm)における溝直角断面(リード角 $j = 4.76^\circ$)上において定義する。ゴシックアーチである目的ねじ面の高さ $F_{zj}(r_p)$ は軸半径 r_p の関数として

$$F_{zj}(r_p) = \sqrt{R^2 - \left(r_p - \frac{d_2}{2} - R \cos \alpha\right)^2} \\ - \left(R - \frac{D_a}{2}\right) \sin \alpha, \quad \left(\frac{d_1}{2} \leq r_p \leq \frac{d}{2}\right) \quad \dots\dots (7)$$

で求められる。これが4章で述べるシミュレーションの精度判定の規準として用いられる。

4. コンピュータ支援による

砥石傾き角の決定

4.1 シミュレーション 最深軌跡法による研削のシミュレーションはすでに用いてきているので^{(1)~(3)}、その要点を最小限に説明する。ボールねじ工作物と砥石をそれぞれ円柱座表系(r - θ - z)および(r_s - θ_s - z_s)で表し、ボールねじ面上の一点 p を両座標系により、

$$z = \frac{\theta l}{2\pi} + f_{zp} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$z_s = (z + z_c) \cos j_A - r \sin \theta \sin j_A \quad \dots\dots\dots (9)$$

と与える。ここで f_{zp} はボールねじ面形状を与える未知数である。 z_c は z 方向の切込みを表す定数で後に式(13)で決定されるがここでは仮に零とおく。 j_A は式(11)の θ_A とともに、 j_G と ϕ から $\sin j_G = \sin j_A \cos$

Fig. 5 Judge of error

θ_A , $\sin \phi = \sin j_A \sin \theta_A / \cos j_G$ によって変換される角度である(図1参照)。次に使用する砥石の作業面の輪郭形状を

$$z_s = f_1(r_s), \quad (0 < r_s \leq R_s) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で与える。式(10)は一般形で表したが、用いる砥石によって具体的に定義される。また幾何学的関係から次式が得られる。

$$r_s^2 = (L \cos \theta_A - r \cos \theta)^2 + \{L \sin \theta_A \\ - (z - R_s \sin \phi) \tan j_A - r \sin \theta\} \cos j_A\}^2 \\ \dots\dots\dots (11)$$

ある半径 $r = r_p$ について式(8)~(11)を連立させて f_{zp} を θ の関数として与え、 θ の変化に対する f_{zp} の最大値 $f_{zp}(r_p)$ が研削点における値である。各 r_p における $f_{zp}(r_p)$ を結んだ曲線がねじ面の z 方向の相対の高さを与える。以上が最深軌跡法の要点である。

z 方向の相対的高さ $f_{zp}(r_p)$ から、2形における z 方向の絶対の高さ(位置を規定したねじ面⁽³⁾)を次式で与える。

$$z_H(r_p) = -f_{zp}(r_p) - z_c, \quad \left(\frac{d_1}{2} \leq r_p \leq \frac{d}{2}\right) \\ \dots\dots\dots (12)$$

ここで z_c は式(9)においてかりに零としていたものであり、ボールねじ面については鋼球の接触点において $z_H(d_2/2) = -w_{2j}/\cos j$ を実現すべく次式で与える。

$$z_c = -f_{zp}\left(\frac{d_2}{2}\right) + \frac{w_{2j}}{\cos j} \quad \dots\dots\dots (13)$$

次に溝直角断面上のねじ面の高さ $f_{zj}(r_p)$ を次式で与える。

$$f_{zj}(r_p) = \frac{z_H(r_p)}{\frac{l}{2\pi r_p} \sin j + \cos j}, \quad \left(\frac{d_1}{2} \leq r_p \leq \frac{d}{2}\right) \\ \dots\dots\dots (14)$$

これが誤差判定の対象となる。

4.2 誤差判定 通常のねじ面においては高さ誤差として目的ねじ面の高さとシミュレーションにおけるねじ面の高さの z 方向の差を用いたが、ボールねじ

面は円弧であるから、ねじ面の法線方向の差として求めるのが妥当である(図5)。図5において軸半径 r_p におけるねじ面の O_a からの距離 $R'(r_p)$ が

$$R'(r_p) = \sqrt{\left\{f_z(r_p) + \left(R - \frac{D_a}{2}\right) \sin \alpha\right\}^2 + \left\{r_p - \left(\frac{d_2}{2} + R \cos \alpha\right)\right\}^2}, \quad \left(\frac{d_1}{2} \leq r_p \leq \frac{d}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

で求められ、それを用いて高さ誤差 $e_H(r_p)$ が

$$e_H(r_p) = R - R'(r_p), \quad \left(\frac{d_1}{2} \leq r_p \leq \frac{d}{2}\right) \quad \dots\dots (16)$$

で求められる。そして誤差判定の範囲(通常は $d_1/2 \leq r_p \leq d/2$)における $e_H(r_p)$ の最大値を最大高さ誤差 e_{HMAX} として判定値とする。

4.3 砥石軸の最適傾き角の探索 4.2節までのシミュレーションと誤差判定を通じて、傾き角 j_c と旋回角 ψ に対する最大高さ誤差 e_{HMAX} が求められる。この j_c と ψ 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_c と ψ を最適傾き角として決定する。極値探索法としては、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方法として以前に開発し⁽⁵⁾用いてきた^{(1)~(3)}極点取

込み法を用いている。この詳細については省略する。

5. コンピュータ支援の結果

5.1 砥石形状と加工精度 はじめに通常のねじの研削に用いてきた^{(1)~(3)}12号さらに形砥石(外径 $D_s = 100$ mm, 底角 $\beta = 23.0^\circ$, 縁厚さ $U = 0.8$ mm)の円すい面[図6(a)]による研削を想定したコンピュータ支援の結果について示す。図3の寸法に基づいて砥石軸切込み深さを $D_c = 3.3$ mm とした。結果として砥石軸の傾き角 $j_c = 23.5^\circ$ と旋回角 $\psi = -3.9^\circ$ が選択された。図7はコンピュータ支援の結果であり、溝直角断面におけるボールねじ面の形状を示す。中央の円弧は鋼球を表し水平の破線は接触点の半径位置を表す。研削されるボールねじ溝形状はゴシックアーチに似ているが、目的形状のゴシックアーチとは大きく異なっている。高さ誤差 $e_H(r_p)$ の分布は図示していないが、ねじ外径 $r_p = d/2 = 25$ mm において最大高さ誤差 $e_{HMAX} = 0.217$ mm(値は負)でありまた接触点近傍の $r_p = 23.68$ mm において $e_H(r_p) = +33.8 \mu\text{m}$ となっており、ボールねじの精度としては不十分である。これは砥石の外径を小さくした縁形状を円形に近いものにする事で改善されることが予想される。そこで外径 $D_s = 30$ mm, 厚さ $T = 5$ mm, 縁形状 F の1号平形砥石[図6(b)参照]による研削を想定した結果を図7と同様に示したのが図8である。研削されるボールねじ溝形状はゴシックアーチにより近づき、ねじ外径 $r_p = d/2 = 25$ mm において最大高さ誤差 $e_{HMAX} = 0.110$ mm(値は負)であり、12号さら形砥石の場合の約半分改善されている。しかし接触点近傍の $r_p = 23.68$ mm において $e_H(r_p) = 33.4 \mu\text{m}$ であり誤差がほとんど改善されおらず、十分な精度ではない。

このことから、砥石の外径を小さくした縁形状を円形に近いものにする事でボールねじ溝の全体の形状はゴシックアーチに近づくが、それが接触点近傍の精度の向上には必ずしも結びつかないことがわかる。

(a) Type 12 dish wheel

(b) Type 1 plain wheel

Fig. 6 Dimensions of grinding wheels

Fig. 7 Simulated profile of ball screw by Type 12 dish wheel ($D_s = 100$ mm, $\beta = 23.0^\circ$), $D_c = 3.3$ mm specifications of ball screw are in Table 1 optimum angles of inclination, $j_c = 23.5^\circ$, $\psi = -3.9^\circ$

Fig. 8 Simulated profile of ball screw by Type 1 plain wheel ($D_s = 30$ mm, $T = 5$ mm, edge shape F), $D_c = 3.3$ mm specifications of ball screw are in Table 1 optimum angles of inclination, $j_c = 20.6^\circ$, $\psi = 3.6^\circ$

Fig. 9 Advanced type judge of error

一方、小外径の砥石は入手が比較的困難であり、またスピンドルの太さにも制限が生じる。そこで他の方法による精度の改善法について検討する。

5・2 精度の改善法 4・2節における誤差判定は $d_1/2 \leq r_p \leq d/2$ のすべての範囲について行った。しかし接触点位置から外れるに従ってボールねじ面と鋼球のかんげきは大きくなり、形状誤差による接触状態への影響は小さくなる。したがって離れた位置の誤差の評価を小さくすることによって誤差判定におけるむだをなくし、接触点付近の精度を上げることが考えられる。

図9はその一方策を示すが、ゴシックアーチ上に接触点を含む一定領域 $\alpha_l \leq \alpha_p \leq \alpha_u$ を設定し、この範囲内では誤差判定を式(16)と同様に行う[式(16)']。ただし α_p はゴシックアーチの中心角であり、 r_p から

$$\alpha_p = \cos^{-1} \left(\cos \alpha + \frac{d_2}{2R} - \frac{r_p}{R} \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

によって変換される。この範囲の外側においては誤差の評価を小さくすることにし、図9に示されるようにゴシックアーチ上の $\alpha_p = \alpha_l$ および $\alpha_p = \alpha_u$ における接線を考え、仕上げ面がゴシックアーチと接線に挟まれる場合には、誤差を無視することにする。O_a から接線までの距離 $R_v(r_p)$ は

$$\begin{aligned} R_v(\alpha_p) &= \frac{R}{\cos(\alpha_l - \alpha_p)}, \quad (\alpha_p < \alpha_l) \\ R_v(\alpha_p) &= \frac{R}{\cos(\alpha_u - \alpha_p)}, \quad (\alpha_p > \alpha_u) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (18)$$

で与えられるから、これを用いて、

$$\begin{aligned} e_H(r_p) &= 0, \\ [R \leq R'(r_p) \leq R_v(\alpha_p) \wedge (\alpha_p < \alpha_l \vee \alpha_p > \alpha_u)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (19)$$

とする。仕上げ面が接線よりも深い場合には、誤差を接線との距離として次式で与える。

$$\begin{aligned} e_H(r_p) &= R \left[1 - \frac{R'(r_p)}{R_v(\alpha_p)} \right], \\ [R'(r_p) > R_v(\alpha_p) \wedge (\alpha_p < \alpha_l \vee \alpha_p > \alpha_u)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (20)$$

(a) normal to the surface at the contact point (b) seen from the grinding wheel axis

(c) simulated profile of ball screw

(d) distribution of improved error in height

Fig. 10 Simulation of grinding by Type 1 plain wheel ($D_s=65$ mm, $T=5$ mm, edge shape F), $D_c=3.18$ mm specifications of ball screw are in Table 1 optimum angles of inclination, $j_c=20.1^\circ$, $\psi=-4.2^\circ$

接触点を含む一定領域 $\alpha_l \leq \alpha_p \leq \alpha_u$ の場合および創成面がゴシックアーチよりも浅い場合においては式(16)と同様に扱い、次式とする。

$$\begin{aligned} e_H(r_p) &= R - R'(r_p), \\ [R'(r_p) < R \vee (\alpha_l \leq \alpha_p \leq \alpha_u)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (16)'$$

以上の誤差判定法を用いた結果を図10に示す。想定した砥石は実際の研削に用いる $D_s=65$ mm、厚さ $T=5$ mm、縁形状 F の1号平形砥石である。砥石切込み深さは本節の最後に述べる最適値 $D_c=3.18$ mmを用いた。結果として砥石軸の傾き角 $j_c=20.1^\circ$ と旋回角 $\psi=-4.2^\circ$ が選択された。図10(a)は接触点における法線方向の透視によるボールねじ面の等高線図である。等高線の形状からボールねじ面が凹状に仕上げられていることがわかる。図10(b)は砥石軸方向の透視

Fig. 11 Photograph of generated ball screw
specifications of ball screw are in Table 1
Type 1 plain wheel ($D_s=65$ mm, $T=5$ mm,
edge shape F) $D_c=3.18$ mm, $j_c=20.1^\circ$, $\phi=-4.2^\circ$

による等高線であり、下部の円弧は砥石の外周を、また連続した小円は研削点を表す。研削点の位置から、ボールねじ面が砥石の外周から縁にかけての部分によって研削されていることがわかる。図 10(c) は溝直角断面におけるボールねじ面の形状である。図 7, 8 に比較して全体がより滑らかなゴシックアーチに近づき、特に接触点付近から内側においてそれが顕著である。図 10(d) は高さ誤差 $e_H(r_p)$ の分布である。接触点から離れた位置においては式 (19) の効果で $e_H(r_p)=0$ の部分が存在し、またこれの効果によって接触点を含む一定領域 [図 10(d) の破線の内側] における高さ誤差が改善され、最大高さ誤差が半径位置 $r_p=23.38$ mm において $e_{H\text{MAX}}=3.8\text{ }\mu\text{m}$ (値は負) となっている。ボールねじ溝の形状精度に関する規定は特に見あたらないが、JIS⁽⁴⁾ のねじ軸の支持部軸線に対するねじ溝面の半径方向円周振れを参考にすると、 $d=50$ mm に対しては $7\text{ }\mu\text{m}$ (C0 級) $\sim 17\text{ }\mu\text{m}$ (C5 級) であり、これの約 $1/2 \sim 1/4$ の誤差であり、十分な精度である。そこで 6 章に述べる研削実験ではこの条件を用いた。

砥石の縁形状および j_c, ϕ の存在によって真実の砥石切込みは一般に設定した D_c よりも大きくなるから、必ずしも $D_c=(d-d_1)/2$ である必要はない。また切込みの過不足は結果として誤差の大小に反映されるから、これによる判断が妥当である。図示はしていないが、 $D_c=3.16$ mm で $e_{H\text{MAX}}=4.3\text{ }\mu\text{m}$ 、以下同様に 3.18 mm で $3.8\text{ }\mu\text{m}$ 、3.20 mm で $4.4\text{ }\mu\text{m}$ 、3.22 mm で $4.5\text{ }\mu\text{m}$ の結果を得ており、これから $D_c=3.18$ mm を採用した。

6. 研削実験と形状精度の測定

5・2 節の結果に基づいて研削実験を行った。砥石の保護のため切削による荒加工を行った後に、図 10, 11 に示した寸法の WA 砥石によって研削した。本研削法

Fig. 12 Thread section of generated ball screw

においては 1 行程においてボールねじ溝の片側が研削されるから、1 行程の終了後にボールねじ工作物を軸方向に反転させてから、もう片方を研削する。

研削されたボールねじの外観を図 11 に示すが、ねじ溝断面が図 10(c) のような円弧に近い形に仕上がっていることがわかる。また研削されたボールねじの形状精度を形状解析システムによって測定した。図 12 は測定された溝直角断面の形状であるが、図 10(c) のコンピュータ支援結果とよく一致していることがわかる。また解析された形状精度は、接触点近傍の曲率半径 $R=5.403$ mm (左側), $R=5.653$ mm (右側), 接触角 $\alpha=45.93^\circ$ (左側), $\alpha=46.12^\circ$ (右側), 鋼球の中心円径 $d_m=51.545$ mm である。 d_m は表 1 の目的寸法 $d_m=51.5$ mm と極めてよく一致している。 α も目的寸法 $\alpha=45^\circ$ によく一致している。 R は表 1 の目的寸法 $R=4.366$ mm と比較的大きく異なるが、これは表面形状の差を 200 $\sim$ 300 倍に拡大して反映するためであり、形状誤差を表すものではない。図 10(c) の結果から計算される $R=5.424$ mm とはよく一致している。

以上のように研削されたボールねじ面は、コンピュータ支援による形状および目的形状とよく一致しており、本研削法が有効であることがわかる。

7. 結 論

本論文では総形研削によらずにボールねじを加工する方法を提案し、その有効性を示した。その結果、複雑なドレッシング過程は不要であり、市販の砥石をそのまま用いるか、あるいは JIS に規定された簡単な縁形状にドレッシングするだけで十分であることがわかった。

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、大学院生 妹尾英樹 (現：月島機械)、同飯田重幸の各氏に深謝する。また有益なご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 6 および 7 年度文部省科学研究費一般研究 (B) (06452155) の助成を得て実施したことを明記

し関係各位に深謝する。

文 献

(1) 鍵和田忠男, 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, 機論, 58 545, C(1992), 283-288. (2) Kagiwada, T., Computer Aided Thread Grinding without Form Dressing, <i>JSM E Int. J., Ser. C</i>, 37 1(1994),	217-223. (3) 鍵和田忠男, 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における砥石干渉のチェックシステム, 機論, 60 572, C(1994), 1440-1445. (4) JIS B 1192-1987. (5) 鍵和田忠男・金内忠彦, 研削における工具・被削材の寸法挙動(第2報, 半径差比較法のパソコンによる自動化), 機論, 52 480, C(1986), 2294-2300.
-