光学標準尺を基準とする精密ねじ研削の研究*

—マイクロコンピュータの応用—

大 塚 二 郎** 関 根 文 太 郎** 金 定 裕 之***

A Study of Thread Grinding Using
an Optical Standard Scale
—Application of Microcomputer—

Jiro OTSUKA, Fumitaro SEKINE
and Hiroyuki KANESADA

This paper presents the process of obtaining the leadscrew of high pitch accuracy in thread grinding. Leadscrews used for machine tools or length measuring machines often act as a standard scale. They are often ground after hardening. With the development of NC machine tools, their high level

precision is needed. This paper describes the improvement of the control system by applying micro computer to the correction device of the table feed error in the thread grinding machine and the discussion of the table feed error and the lead error of the ground workpiece screw by use of Fourier analysis. As the result, the leadscrew with high pitch accuracy can be obtained.

Key words: optical standard scale, micro computer application, high pitch accurate leadscrew, error correction device, thread grinding machine.

1. 緒 言

工作機械や測定器の送り伝達や位置決め装置においては、親ねじ-ナットによる送り機構が広く利用されているが、最近の数値制御技術を応用した機器の発達や精密測定器の精度向上に伴い、送り機構のもととなる親ねじにも高い精度が要求されるようになって来た。

一般に親ねじは、旋盤によるねじ切り後、耐摩耗性を与えるためねじ山の表面を焼入れ硬化させ、ねじ研削盤により研削仕上される。その後、更に高い精度が必要な場合には、ハンドラッピングが行われるが、この作業においては非常に高度な熟練と手間、および費用を要するので、研削終了の時点で、必要な精度を得ることが望ましい。

従来、累積ピッチ誤差の減少に関して研究が行われ¹⁾、また酔歩誤差に関して、研削盤のテーブル送り誤差を、修正制御して正しいテーブル送りを得ながらねじを研削し、比較的高い精度のねじが得られている²⁾。

しかし、この方法はねじ研削盤において、サンプリングに伴い制御系に遅れが生じ、真に正しいテーブル送りは得られていなかった。本研究では、その遅れを取り除くために、従来の装置にマイクロコンピュータを導入してサンプリング制御系の改善を図り、ねじ研削盤のテーブルを理想的に送る方法を試みる。また、実際にねじを研削し、従来の方法と比較して累積ピッチ誤差と酔歩

誤差がどの程度減少するかを調べる。

2. 現在までの研究と本研究の概要

2.1 現在までの研究

ねじ研削盤における酔歩誤差の発生要因として表1のようなものが考えられている。

これらに対し、仲野ら³⁾は、酔歩誤差の発生原因を実験的に追求し、表1の1および3、すなわち歯車列の回転伝達誤差を含むテーブル送り誤差と、主軸センタ系による影響がかなり大きいという結論を得た。その結論を筆者らは、フーリエ解析を用いて理論的に解明した。またその結論のうちのテーブル送り誤差に着目し、これを修正して主軸の回転に比例した正しいテーブル送りを得るために、次のような新しいテーブル送り機構を考案、製作した。これを図1に示す。

主軸の回転角 θ に対する理想的なテーブル送り量を X_0 とすると

表1 リード誤差の原因

リ ー ド 誤 差	
累積ピッチ誤差	酔 歩 誤 差
1. テーブルの姿勢変化や真直度	1. 主軸と親ねじを結ぶ歯車列の回転伝達誤差に起因するテーブル送り誤差
2. ねじ研削盤の親ねじに固有なピッチ誤差	2. 親ねじの酔歩によるテーブル送り誤差
3. 研削熱などによる工作物の熱変形	3. 主軸センタの振れと出入り
4. 摩擦熱による親ねじの熱膨張	4. 研削条件等によるもの

* 原稿受付 昭和55年11月29日。昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和55年9月28日）にて発表。

** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所（横浜市緑区長津田町4259）

*** 日本電気（株）（府中市四谷5-41-1）

A: テーブル微細送り機構, X : テーブル送り量, P : 工作物のピッチ, θ : 回転角

図1 従来のテーブル送り機構

図2 テーブルの修正原理

$$X_0 = \frac{P\theta}{2\pi} \quad (P \text{ は工作物のピッチ}) \quad (1)$$

実際のテーブル移動量を X とするとテーブル送り誤差 ΔX は

$$\Delta X = X_0 - X \quad (2)$$

となる。この演算された誤差 ΔX は研削盤に付属の NC 装置でパルスモータ用のパルスに変換される。パルスモータの回転でテーブル微細送り機構により、親ねじに対しテーブルが ΔX だけ移動する。すなわち、テーブルの

粗い送りは親ねじで行い、微細送りは付属のパルスモータを含んだテーブル微細送り機構で行う。そのテーブル送り機構により実際にねじを研削した結果、ねじ部長さ約 100 mm のねじで、累積ピッチ誤差 $1.5 \mu\text{m}$ 、酔步誤差 $2.5 \mu\text{m}$ 以内という比較的高い精度のねじを研削し得た。

しかし、その機構はサンプリング時間が長いこと、および図 2(a) のごとく区間 $[R_{i-1}]$ で生じる誤差 ΔX_i を次の区間 $[R_i]$ で修正するために、テーブルの移動動作が後追いのになり、制御系に遅れが生じ、完全に正しいテーブル送りが得られたとは言えず、遅れにより酔步誤差が図 2(b) の二点鎖線のようにまだ残ってしまっていた。

2.2 本研究の概要

本研究では前述の遅れをなくするために、次のようなテーブル送り機構を考えた。

図 2(a) を参照して、区間 $[R_{i-1}]$ で生じるテーブル送り誤差 ΔX_i を区間 $[R_i]$ で修正する。すなわち、第 1 回目は従来の修正方法で修正をしながらテーブルを送る。その時同図において、修正時 i でのテーブル送り誤差 ΔX_i を区間 $[R_i]$ で修正することにより生じるテーブル送り誤差 $(i+1)$ 時の修正値 ΔX_{i+1} を、第 2 回目のねじ研削時の区間 $[R_i]$ の補正值とする。

機構の概略を図 3 に示す。前記のように、前区間のテーブル送り誤差を今区間で修正することにより生じた今区間でのテーブル送り誤差を補正值として、マイクロコンピュータに記憶しておく。そして、第 2 回目にねじ研削する時には、今回区間 $[R_i]$ で生じたテーブル送り誤差と補正值 (第 1 回目のねじ研削時に区間 $[R_{i+1}]$ で生じたテーブル送り誤差) を加えたものを真の修正値としてテーブル送りをする。つまり第 1 回目の送りをもとに、第 2 回目のテーブル送りの時に、修正により生じる誤差 (すなわち補正值) を予測して、従来の修正方法による遅れを取り除く。

3. 実験装置

本研究のテーブル送り機構を実現するための各装置について述べる。装置は、ねじ研削盤、テーブル送り誤差検出器、機械的制御部分、および電気的制御部分から成っている。図 4 に実験装置を示し、以下に各々の説明をする。

3.1 ねじ研削盤

本研究に使用したねじ研削盤は、工大・三井エキセロ型精密ねじ研削盤で、パルスモータによるテーブル送り

A: テーブル微細送り機構, X: テーブル送り量, P: 工作物のピッチ, θ : 回転角
図3 テーブル送り機構

図4 実験装置

修正装置を内蔵する。また、工作物の研削熱による変形を防止するため、精密に温度コントロールされた研削液を、工作物全体にかけるオイルシャワー方式の冷却装置を備えている。

3.2 テーブル送り誤差検出器

テーブル送り量の検出には、日本光学工業の光電式リニアエンコーダを用いた。これには次の特徴がある。

- ・熱的安定性に優れ、経年変化に対する問題はほとんどない。
- ・磁気スケールのように、モータ、電磁石、マグネットスタンド等の影響を受けない。
- ・スケールの熱膨張率が鋼と同じなので、実際にねじを研削する場合、スケールと工作物の温度が同じならば、ねじ研削盤の親ねじの熱膨張により発生する

ピッチ誤差は問題にならない。

- ・分解能は $1\mu\text{m}$ でスケール単体の誤差は $1.3\mu\text{m}$ 以内である。

3.3 機械的制御部分

図3のA部にあたり、パルスモータと、それにより駆動されるテーブル微細送り装置から成る。装置は、遊星歯車減速機と差動ねじから成り、パルス1発でテーブルを親ねじに対し $0.035\mu\text{m}$ 移動するようになっている。

3.4 電氣的制御部分

この部分は、パルスモータコントロールユニット、ディテクタ、累積誤差演算カウンタ、マイクロコンピュータ、およびパルスモータ駆動回路の4つの要素より成り立つ。

3.4.1 ディテクタ

光電式リニアエンコーダからの出力を $1\mu\text{m}$ 1パルスの方向性を持つパルス列に変換する。

光電式リニアエンコーダの出力波形は、1ピッチ $8\mu\text{m}$ の正弦波であり、これをシュミットトリガを使って波形整形し方形波とする。そして信号を8分割し、方向弁別も合わせて行う。

3.4.2 累積誤差演算カウンタ

これは、主軸の回転を基準としたテーブル送り誤差を演算する装置である。

主軸と同軸上に取付けられた回転割出し円板とフォトセンサの組合わせにより主軸の回転を θ 。(本研究では 36°) ずつ検出し、割出し信号を作り出す。その信号を起動として、図5を参照して、メインカウンタにお

号を起動として、図5を参照して、メインカウンタにお

MC: メインカウンタコントロール信号, SC: サブカウンタコントロール信号, ZC: 累積カウンタコントロール信号

図5 累積誤差演算カウンタのブロック図

いて、測定区間の設定値（本研究では、主軸の回転を 10 等分しており工作物のピッチ 5 mm を 10 で除して設定値は 500 μm となる）より、ディテクタからのカウントパルスをクロックとして減算してゆき、次の主軸からの割出信号が来るとカウンタの残りの値をその区間での誤差としてサブカウンタを經由して、累積カウンタの累積値に加算する。

3.4.3 マイクロコンピュータ

本研究で用いたマイクロコンピュータは、Z-80 CPU の“KAIZER Z-80 SUPER BASIC SYSTEM”で、ソフトウェアは 12 K-BASIC、メモリーには 20 K バイトの RAM、S-100 規格のパスラインを持つ。このマイクロコンピュータは次のような働きをする。

- i) 果積誤差演算カウンタのBCD出力を読み込み、10進数に変換する。
 - ii) メモリーより、前回のテーブル送り誤差を読み出す。
 - iii) i), ii)で得られた値を演算し、今回の修正値を算出する。
 - iv) 修正値の正負符号の反転を検知し、テーブル微細送り装置のバックラッシュを加えた値をBCDコードに変換し、パルスモータ駆動回路へ送り出す。
 - v) i)で読み込んだ今回のテーブル送り誤差をメモリーに書き込み記憶する。
 - vi) 修正値と実際のテーブル送り誤差より、次回に行うテーブル送り時の補正値を演算し、メモリーに記憶する。
- i)~v)は、テーブルの修正送りをしながら

ら行われ、vi) は、テーブルをもどすときに実行される。

なお vi) について述べると、図 2(a) を参照して、修正時点 i での累積リード誤差 ΔX_i 、補正値を RX_i 、実際の修正値を RZ_i とすると

$$RZ_i = -(\Delta X_i + RX_i) \quad (3)$$

である (ただし従来の方法で修正した時だけは, $RX_i = 0$ である).

各時点において RZ_i だけ修正しながら研削していく。もし、 RZ_i の修正を行っても $i+1$ の時点で、累積のテーブル送り誤差が $\Delta X'_{i+1}$ となり、0 にならなかった場合には、第 2 回目以降の研削時に、新たに補正值 RX'_i (次回) $= \Delta X'_{i+1}$ (今回) $+ RX_i$ (今回) として、式 (3) の RX_i

図6 本修正方法の流れ図

に代入した RZ_i' だけ、テーブル送り量を修正しながら研削して所定の寸法になるまで研削を繰り返す。前述の動作 (i)~vi)) を得るための流れ図を図 6 に示す。

3.4.4 パルスモータ駆動回路

パルスモータ制御回路と、研削盤附属のパルスモータドライバにより構成される。タイミングパルスが送られると、その時の入力端子にあるBCDコードの値が読み込まれ、必要なテーブル移動量を得るため、修正値に29(1 μ m テーブルを動かすのに必要なパルス数)が乗じられ、その積の数だけ、電圧レベル変換されたパルスがパルスモータドライバに送られる。

図7 テーブル送り誤差

4. 実験および考察

以上述べたテーブル送り機構により, 実際にねじを研削し, テーブル送り誤差と研削されたねじのリード誤差について考察する。

4.1 テーブル送り

本修正方法により得られたテーブル送り誤差と, 無修正, 従来の修正の場合のテーブル送り誤差を図7に示す。ここで, 実験条件は次の(1)~(3)のとおりである。

- (1) 主軸の回転数は, マイクロコンピュータの処理時間とパルスモータ及びテーブル微細送り装置の応答時間を考慮して 6 rpm とする。
- (2) 修正回数 (サンプリング間隔) は主軸 1 回転につき 10 回とする ((1) を考慮して得られる, 安定した送りをテーブルに与えるための修正回数である)。
- (3) 送り誤差の測定は, 光電式リニアエンコーダで 1 μm 単位で行う。

図7のテーブル送り誤差より明らかなように, 従来の修正方法(b)に比べて本修正方法(c)では, テーブル送り誤差が改善されている。従来の修正方法では, テーブル送り誤差が $\pm 2 \mu\text{m}$ あり, かなりの周期的な成分を含んでいるのに対し, 本修正方法では $\pm 1 \mu\text{m}$ であり従来の方法の約 1/3 の出現率で, 周期的なものは見い出せない。

4.2 ねじ研削

本修正方法により, 実際にねじを研削する。研削条件は表2に示すとおりである。工作物は材質 SCM 415 を焼入れしたものであり, 外径 50 mm, ねじ部長さ 294 mm, ピッチ 5 mm の台形ねじで

表2 研削条件

砥石	WA 80 J 8 V
砥石周速	1 800 m/min
主軸回転数	6 rpm
目立て条件	単石
	切込み 20 μm
	リード 60 $\mu\text{m}/\text{rev}$
修正装置の行きもどり差	2 μm
テーブルの移動方向	ヘッドストック→テールストック
工作物	SCM 415 (HRC 50, 浸炭)
	外径 50 mm, 30° 台形ねじ
	ピッチ 5 mm, ねじ部長さ 294 mm
	センタ穴研削仕上

ある。仕上の研削代は半径で 6.25 μm であり, 研削回数は 4~5 回程度である。

図8に研削されたねじのリードを, 各々レーザ干渉親ねじリード測定器⁴⁾で測定した結果を示す。同図(a)のリード誤差では, 累積ピッチ誤差は 4.0 μm あり, 酔歩誤差は 5.5 μm である。従来の修正方法で研削されたねじのリード誤差(b)では, 累積ピッチ誤差 1.5 μm 以内, 酔歩誤差 2.5 μm 以内, 本研究の修正方法で研削されたねじのリード誤差(c)では, 累積ピッチ誤差 1.3 μm 以内, 酔歩誤差 2.3 μm 以内である。修正をしない場合に比べて, ねじに現れる累積ピッチ誤差と酔歩誤差は, 約 1/2 から 1/3 に減少していることがわかる。本研究の修正方法が従来の修正方法より若干高精度に研削されているが, 図7(a)および(b)のテーブル送り誤差ほど顕著な差は見られない。

そこで, フーリエ解析を用いて, リード誤差に関して周期的な誤差を算出した。その結果を図9に示す。従来の修正研削時, 同図(a)では親ねじの回転に同期した 13 次前後に, 係数は小さいが依然ピークが存在しており, 従来の修正研削の方が周期的なリード誤差を含んでいる

図8 研削されたねじのリード誤差

図9 研削されたねじのリード誤差の調和解析

ことがわかる。本研究の修正研削時、同図(b)では、その周期成分が除去されている。

5. 結 言

本研究により得られた結論は次のとおりである。

- (1) ねじ研削盤のテーブル送りに対して行われている従来のサンプリング制御系の遅れを取り除いた新しい制御系を、マイクロコンピュータの導入により実現した。
- (2) 上記の制御系によるテーブル送り機構によってねじを研削した結果、無修正の場合ねじ部長さ100 mmにつき累積ピッチ誤差 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 、酔歩誤差 $5.5\text{ }\mu\text{m}$ あったものが、累積ピッチ誤差 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 以内、酔歩誤差 $2.3\text{ }\mu\text{m}$ 以内という高精度なねじを研削し得た。

参 考 文 献

- 1) 山本 晃ほか：マスタねじ研削盤の試作研究，日本機械学会論文集，**41**，352 (1975) 3633.
- 2) 野村武彦ほか：光学標準尺を基準とする精密ねじ研削に関する研究，日本機械学会論文集，**46**，410 (1980) 1309.
- 3) 仲野雄一ほか：精密ねじ研削に関する研究——ねじ研削における酔歩の原因，日本機械学会論文集，**43**，368 (1977) 1462.
- 4) 山本 晃ほか：レーザ干渉ねじリード測定機の実用化，精密機械，**41**，9 (1975) 919.

情 報

(p. 1108 より続く)

しかし、無人化工場の実現はもちろん、高度自動化生産システムづくりは、まだ緒についたばかりといってよく、これが産業界に広く普及、定着していくためには、まだまだ解決しなければならない技術的課題、社会的問題も山積している。

たとえば技術的問題としては、知覚機能を備えた高度な産業用ロボットや高性能なセンサの開発、さらにはセンサを含むハイレベルの計測技術体系の確立、CAD/CAM (コンピュータ利用の自動設計・製造) システムやGT手法などの生産システムへの導入——などがある。

また、社会的な問題では、自動化がもたらす工場労働の質的、量的変化の問題、さらには親企業と下請けメーカとの関係や途上国との国際分業、技術移転といった産業構造面への影響があげられる。

なかでも労働へのインパクトは今後大きな問題を引き起こす要素を含んでおり、現実には自動化が進んでいる工場では現場労働者の職種転換や配置転換問題、夜間無人運転職場での監視要員の確保問題などが顕在化している。

このため今後一層の自動化、無人化を進めていくためには技術的課題の克服と同時に、自動化がもたらす社会

的、産業構造的影響の度合いを勘案しながら、工場オートメーションをスムーズに軟着陸させる配慮が必要で、それには自動化に対する国民的レベルの広範で基本的なフィロソフィの確立が急務であると指摘している。

また、今回の工場オートメーション調査研究では、実際に生産現場で稼動している最新の自動化生産システム7つを取り上げ、ケーススタディしており、東芝タンガロイのケースでは労働者から自動化の影響やその受け止め方を直接にヒアリングして「働く側からの自動化ニーズ」をさぐる興味深い試みも行っている。取り上げた導入事例は富士通ファナック 富士工場のFMS、ブラザー工業瑞穂工場と東芝タンガロイ川崎事業所のDNCライン、第二精工舎、スター精密、加藤スプリング製作所の専用自動機ライン、それに経営者夫婦プラス従業員1名の典型的な「三ちゃん工場」である嶋田工業所の産業ロボット導入事例の合計7つである。

業種業態や生産品目の種類と数量の違いから各社各様の自動化の実態が浮き彫りにされており、昨今の工場オートメーションの幅と広がりをはかめるうえで興味深いケーススタディといえる。

(服部 敏夫)