研 究

演 算 式 歯 形 測 定 器*

梶 谷 誠** 石 川 二 郎*** 今 井 聖****

A New Involute Tooth Profile Measuring System with Special-Purpose Computer

Makoto KAJITANI, Jiro ISHIKAWA, Satoshi IMAI

In this paper, a new method of tooth profile measurement is proposed. In this measuring method, the involute generating mechanism is not used. The principle of this method is that profile errors can be determined on a point-to-point basis by measuring the linear displacement of the tooth flank along a tangent to the base circle, and the angular displacement of the gear about its axis at the same time. This measuring system consists of two important elements: (1) the electronic digital readout circuit for linear and rotary measurements (using a linear optical grating and a rotary magnetic scale), and (2) the special-purpose digital computer. The computer computes the departure of the measured values from the theoretical values given by the relationship between the linear and rotary displacements. The main advantages of this method are as follows:

- (1) It is not necessary to carry out calibration with the master involute specimen.
- (2) For gears of different dimensions, the desired base circle radii can be selected by the preset switch operation on the panel of the computer.
- (3) The mechanical structure of the measuring system has been simplified. Therefore, if the scales of high accuracy are incorporated with the measuring system, the measuring accuracy will assuredly be enhanced.

1. 諸 言

歯車の歯形誤差は歯車の性能に大きな影響を及ぼす重要な要因の一つである。今日多くの種類の歯形測定器¹⁾が製作されているが、広く一般に使用されているのは、いわゆる基礎円板方式と基礎円調節方式である。基礎円板方式では、被測定歯車の基礎円直径に応じていちいち正確な基礎円板を製作し、偏心の生じないように取り付けねばならず、測定の準備に手数と費用がかかるのが欠点である。一方、基礎円調節方式は任意の基礎円直径に対して特別の準備を要せず便利であるが、リンク機構やカム機構を有する複雑な構造となり、製作や調整上の難点が多い。その上、マスターインポリュートを備え、定期的にチェックし、調整する必要がある。これら従来の歯形測定器は純機械的機構によって創り出される歯形創成運動を基準としており、そこにいろいろな問題点が含まれているようである²⁾。ところで、歯形曲線はある座標系の関数として表わすことができる。そこで、万能測

定顕微鏡や光学割出台などを用いて歯面の座標を実測し、理論値との比較から歯形誤差を求める方法が研究室などでは行なわれることがある³⁾。この方法は前述の歯形創成機構による方法に比べてより本質的な方法であるが、時間がかかり過ぎることなどから実用的とはいえない。本論文はこの原理を実用的な歯形測定器として実現するために新しく開発した歯形誤差測定システムについて述べたものである。この測定システムは

- 1) 直線変位と回転角を自動的に検出し、電気信号に変換するスケール部
- 2) 実測値と理論値を比較して誤差を算出する専用の演算部
- 3) 演算結果を記録し、誤差曲線を表示する記録計から構成されている。

試作機（演算式歯形測定器と名づける）では直線スケールとしてモアレ縞光学ユニット（オリンパス社製）を用い、角度検出用としては筆者らがソニー社との協力によって高精度化に成功した回転形磁気スケール^{3), 4)}を用いた。また、演算部は構成を簡単にするための考慮がはられ、新しい試みがなされている。

2. 測定原理

図1に示すように、歯車軸の回転角を θ 、インポリュ

*原稿受付 昭和45年5月6日。昭和43年度、44年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和43年11月1日、44年10月11日）にて発表。

**学生会員 東京工業大学大学院（目黒区大岡山 2-12-1）

***正会員 東京工業大学精密工学研究所

****東京工業大学精密工学研究所

*本文では歯形はすべてインポリュートとする。

ート歯面の基礎円接線方向の移動量を x , 基礎円直径を d_g とすると, 歯形が理想的なインボリュート曲線の場合次式が成り立つ.

$$x = \frac{d_g}{2} \times \theta \quad (1)$$

そこで, 被測定歯車について θ と x を測定し, 式(1)で与えられる理論値との差異を求めれば歯形誤差曲線が得られる. 図2はこの原理に基づいて開発した歯形誤差測定システムの概略図である. 図のように基礎円接線方向 (x 方向) に自由に動き得るスライドに固定された測定子が軽い測定圧で歯面に接触している, 歯車を回転させると歯面によって測定子は x 方向に移動し, その移動距離 x はスライド上に取り付けられている直線スケール (モアレ縞用光学格子) によって検出され, 電気的パルス信号に変換される. 同時に, 被測定歯車と同軸に取り付けられた回転形磁気スケールからは一定回転角度ごとにパルス信号が得られる. これらの各パルス信号はこの測定システムのために特に開発された専用の演算回路に導かれ, そこで直ちに歯形誤差分が算出される. 演算回路のデジタル出力は D-A 変換器によって直流電圧に変換され, ペンレコーダにより歯形誤差曲線として自記される. 被測定歯車の基礎円直径 d_g の変化に対しては, 後述するような定数 K の値を演算部のプリセットダイヤルに設定しておけばよい.

図1 インボリュート歯形の測定原理

図2 演算式歯形測定器の原理

図3 各スケールからのパルス列 (演算部入力パルス)

いま, 直線スケールおよび回転スケールの分解能をそれぞれ $a_\mu/1$ パルス, N パルス/1 回転とする. ただし, 回転形磁気スケールの出力パルスは減回路によって $1/J$ にまびかれた後に演算部に入る. 図3は演算部の入力における各パルス列の関係を示したもので, 回転スケールが角度 λ だけ回転する間に発生した直線スケールのパルスの数を x_i , 回転スケールパルスが n 個目に達したとき, すなわち歯車軸が角度 θ_n だけ回転したときの直線スケールの移動距離を $x_{m(\mu)}$ とすれば

$$x_m = a \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (\mu) \quad (2)$$

$$\theta_n = \lambda \times n = \frac{2\pi J}{N} \times n \quad (3)$$

となる. したがって, 角度 θ_n の位置における歯形誤差分 $\delta(\theta_n)$ は式 (1), (2), (3) の関係を用いて次式のように表わすることができる.

$$\delta(\theta_n) = x_m - \frac{d_g}{2} \times \theta_n = a \times \left\{ \sum_{i=1}^n x_i - K \times n \right\} \quad (\mu) \quad (4)$$

$$\text{ここで, } K = \frac{\pi}{aN} \times J \times d_g \times 10^3 \quad (5)$$

とする. 演算部では式(4)で表わされる演算が行なわれよう. しかるに, 式(4)をこの形式通りに実行すると, n の増加とともに, $\sum_{i=1}^n x_i$ と $K \times n$ の値がきわめて大きくなり, 演算回路が大きくなり複雑になる. ところが, 式(4)はつぎのように書き換えることができる.

$$\frac{\delta(\theta_n)}{a} = \frac{\delta(\theta_{n-1})}{a} + x_n - K \quad (6)$$

式(6)は加減算だけの演算であり, 各項の値は n に無関係にある限られた値をこえることはない. したがって, 実際の演算は式(6)に従うような演算回路の方があらゆる点で簡単となり実用的である.

なお, すでに明らかなように, この測定法では歯形誤差をサンプリング検出しており, そのサンプリング間隔は歯車軸の回転角 $\lambda = (2\pi J)/N$ ラジアン, かみあい線長さ方向で $K_{(\mu)}$ である. 歯形誤

差の測定では本来歯面の表面あらさまで検出しないものとすれば、サンプリング間隔をかなり大きくしても全体の誤差の評価には十分である。通常、歯形誤差曲線を 100 点でサンプリング検出する程度でよい。

3. 試作機の概要

3.1 試作機の構造

図 4 に試作した演算式歯形測定器の全体の写真を示す。被測定歯車を取り付ける主軸（両センタ）の下方の回転センタには回転形磁気スケールおよび駆動用歯車が同軸に固定されている。図 5 は測定子部を拡大して示したもので、モアレ縞用光学格子のガラススケールと測定子を取り付けられたスライドは V 溝の間にボールを入れた案内でがたなく軽くすべるようになっている。この測定子部はおもりによって歯車の任意の歯面に適当な測定圧をかけることができる。試作機の場合、スライドの摩擦抵抗も含めて実際に歯面にかかる測定圧を最小 20～

①被測定歯車 ②測定子部 ③回転形磁気スケール
④再生ヘッド ⑤演算回路 ⑥定数 K の設定ダイヤル

図 4 試作した演算式歯形測定器

①測定子 ②スライド ③モアレ縞用光学格子
④モアレ縞検出ヘッド

図 5 試作機の測定子部

表 1 試作機の仕様

測定モジュール 基礎円直径	$m=0.5\sim 20$ $d_g=15\sim 500$
直線スケール 分解能 有効長	$a=1\mu/1$ パルス 100 mm
回転形磁気スケール 分解能 (検出回路出力パルス)	(スケール上 2160/1 回転) $N=2160\times 4/1$ 回転

図 6 測定可能な歯車の範囲（直線スケール有効長 100 mm の場合）

30 g にすることができた。

表 1 に試作機の仕様を示す。一つの歯形を測定するのに必要な直線スケールの長さ、あるいは回転スケールの角度は、いわゆる歯形検査範囲³⁾によって決まる。図 6 は試作機の直線スケール（有効長 100 mm）によって測定可能な歯車の範囲を示している（図中斜線部分）。

3.2 各スケールの信号周波数と K の範囲

演算回路の設計仕様として、各スケールからのパルス周波数の範囲と定数 K の設定値の範囲を知る必要がある。直線スケールおよび回転スケールのパルス周波数（演算部入力における）をそれぞれ f_L , f_R とし、測定子の移動速度を v mm/sec とすると、次式の関係が成り立つ。

$$f_L = \frac{v}{a} \text{ (kHz)} \quad (7)$$

$$f_R = \frac{v}{aK} \times 10^8 \text{ (Hz)} \quad (8)$$

使用したモアレ縞ユニットの場合、 $a=1\mu/1$ パルスであるから、 v の最大値を 5 mm/sec とすれば、式 (7) より f_L の最大値は $f_{L\max}=5$ kHz となる。また、K の最小値を $K=20$ とすれば式 (8) より f_R の最大値は $f_{R\max}=250$ Hz である。

つぎに、K を表わす式 (5) において、 $a=1$, $N=4\times 2160$

図7 基礎円直径 (\$d_g\$) と定数 “\$K\$” の関係

(表1参照)とし、 d_g と K の関係を J をパラメータとして示したのが図7である。図から明らかなように、 J を適当に選ぶことによって、 K を 10^3 以下のある範囲内に選定できる。たとえば、 $J=2, 4, 8$ を使うことにより、 $d_g=15\sim 500$ に対して K を $20\leq K\leq 400$ に選ぶことができる。したがって、 K の設定桁数は小数点以上は3桁とし、3.3で述べる測定誤差との関係から小数点以下は2桁とすればよい。

3.3 測定誤差

この測定法の測定精度は本質的には各スケールの精度によってのみ決定される。ここで、各誤差要因をあげるとつぎようになる。

直線スケールの位置誤差 $\epsilon_{L(\mu)}$

直線スケールパルスの量子化誤差 $\epsilon_{L(\mu)} (< a_{(\mu)})$

回転スケールの角位置誤差 $\Delta\theta$ ラジアン

定数 K の設定誤差 ϵ_K

定数 K の値は式(5)によって計算されるが、この式は π を含むので実際は小数点以下適当な桁で4捨5入した値 K' を用いる。そこで

$$\epsilon_K = K' - K \quad (9)$$

とおく。以上の誤差要因が総合されたときの各サンプル点における測定誤差 $\epsilon(n)$ はつぎようになる。

$$\epsilon(n) = \epsilon_L(n) + \epsilon_q(n) + \frac{d_g}{2} \times \Delta\theta(n) + \epsilon_K \times n \quad (10)$$

式(10)の最終項($\epsilon_K \times n$)はあたかも圧力角誤差があるかのような測定誤差を生じる。2.でも述べたようにサンプリング点の数は $n_{\max}=100$ とし、 K' の値として K の小数点以下3桁目を4捨5入した値を用いると、 $|\epsilon_K| < 5 \times 10^{-3}$ であるから、圧力角誤差は $[n \times \epsilon_K]_{\max} \ll 1 \mu$ となる。また、回転形磁気スケールの誤差は全周にわたる角位置誤差が10秒程度のものが可能となっている⁴⁾。歯形測定の場合に使用する角度は普通 45° 以下であり、そ

$F_1 \sim F_3$: フリップフロップ, $M_1 \sim M_6$: モノマルチ,
 $G_1 \sim G_5$: プリセットゲート, R.C.: 可逆カウンタ
 I, II: AND ゲート, B.C.: 16進カウンタ

図8 演算部ブロック図

の間の角位置誤差は数秒以下とみなされる。直線スケールも使用範囲が短かく $\epsilon_L < 1 \mu$ を保証できる。以上のことから試作機の測定誤差は $|\epsilon(n)| \leq 1 \mu$ と考えられる

4. 演算回路

演算回路部の設計にあたって考慮した基本条件を列挙する。

- (1) $f_{L\max}=5 \text{ kHz}$, $f_{R\max}=250 \text{ Hz}$ (3.2参照)
- (2) 定数 K の設定部は小数点以下2桁を含む合計桁とする。(3.2参照)
- (3) 測定可能な誤差範囲は $-99 \mu \leq \delta \leq +99 \mu$ とする
- (4) 直線スケールパルス(x パルス)と回転スケールパルス(θ パルス)は互いに独立である。したがって両パルスが重なった場合の対策が必要である。
- (5) 各入力パルスの周波数は測定中も変動する。
- (6) リセット(全内容を零にする)後最初に θ パルスがきてから演算を開始する。

図8は上記の条件を前提とし、できるだけ簡単な構成となるよう工夫して設計された演算部のブロック図である。図9はこの演算部の動作を示すフローチャートである。つぎに、この演算回路の主な特徴について述べる。

(i) 定数 K の減算

定数 K の減算のためには、一般の計算器のようないわゆる演算回路を用いず、可逆カウンタの各桁の入力に、定数 K の各桁の数値に等しい数のパルスすることにする。以下にその方法を示す。図10のタ
 チャートに示すように、 θ パルスの直後にくる連続
 個の x パルスを4段のバイナリカウンタで構成する
 進カウンタ(B.C.)の入力とする。B.C.の各段の

図9 演算回路のフローチャート

図10 演算回路タイムチャート

(B₁~B₄)は独立した五つのプリセットゲート (G₁~G₅)に接続されている。このプリセットゲートはプリセットダイヤルを任意の数字 (0~9) に設定すれば、8421コードを10進数に変換する方法により、B.C.の各出力パルス(図10中星印の位置で発生する)の中から、設定した数

字に等しい数のパルスを選ぶことができる。このようにして各ゲートから出た減算パルスはモノマルチ (M₁~M₅)によって各桁に時間差を持たせて分配される。これは各桁の桁上げ入力との重なりを防ぐためである。以上の方法は3.2で述べたようにKは20 ≤ Kで、θパルス間隔の中にxパルスが16個以上は存在することが保証されていることにより可能となる。

(ii) xパルスとθパルスの重なりの影響を防ぐ対策

図9と図10に示したように、θパルス直後の最初のxパルスで、その直前の可逆カウンタの内容をレジスタにシフトする。xパルスはM₆で遅延され、前の内容がレジスタに移った後で可逆カウンタの新たな加算入力となる。このように、実際の動作はすべてxパルスに同期させているため、両パルスが同時に存在した場合も誤る心配はない。

(iii) 可逆カウンタ

この演算部の主要部は可逆カウンタである。図11は10進1桁の可逆カウンタのブロック図である。表2はこのカウンタに用いたコードを示す。やや特殊な5ビット

表2 5ビットコード

数 値	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅
0	1	1	1	1	1
-9	1	0	1	1	1
-8	2	0	0	1	1
-7	3	0	0	0	1
-6	4	0	0	0	0
-5	5	0	0	0	0
-4	6	1	0	0	0
-3	7	1	1	0	0
-2	8	1	1	1	0
-1	9	1	1	1	1

コードを採用したことにより、可逆カウンタの構成がかなり単純なものとなっている。カウンタ部は全体で10進5桁で、10⁰, 10¹, 10²の各桁は可逆カウンタ、10⁻¹, 10⁻²の各桁は減算カウンタである。減算カウンタは図11の可逆カウンタから加算ループを省いたものである。

(iv) キャリブレーションの方法

図11 可逆カウンタ

図12 キャリブレーションの方法

ペンオシロ記録紙上の感度を正確に知るためには図12に示すように、 x パルスと θ パルスを共通にし、 J を16以上に選べば、 $S=J-K(\mu)$ のステップが記録できる。たとえば、 $J=16$ 、 $K=015.00$ とすれば $S=1(\mu)$ となる。

以上で演算部の概略を説明したが、試作した演算回路はMOS型ICを主体にして製作した。表3は使用した主な素子の数である。

表3 使用した主な部品

MOS型IC	40 (個)
FET	19
トランジスタ	10
ダイオード	120
プリント基板 (115×145)	8 (枚)

5. 測定例

(a) 本測定器による測定
(b) 基礎円調節式による測定
(D.P.=10, $Z=32$, $\alpha_0=20^\circ$: $K=119.90$)
図13 測定例(i) 従来の測定器との比較

$m=5$, $Z=20$, $\alpha_0=20^\circ$, ホブ切り
図14 測定例(ii) (測定の再現性)

T.G. 2 ($m=5$, $Z=20$, $\alpha_0=20^\circ$, MAAG) $K=136.69$
図15 測定例(iii) 研削歯車

図13は従来の測定器(基礎円調節式)と本測定器による測定例を比較したもので、きわめて良い一致を示している。図14はホブ切り歯車の測定例で、測定の再現性を示すため同一の歯を2回測定したものである。再現性の点でも優れた結果が得られている。図15には研削歯車の測定例を示す。

6. 結 論

本論文の結果を要約すると

(1) 演算式歯形測定器と名づけた機械的歯形創成機構を有しない新しい歯形測定器を提案した。

(2) この測定法に基づき、直線スケールとしてモアレ縞光学格子、回転スケールとして回転形磁気スケールを使用した試作機の実験結果より、実用上きわめて有用であることを示した。

(3) この測定法に必要な比較的簡単に、小型な演算回路を開発した。

さらに本測定法の特徴をまとめると

(1) 長さと同転角という最も基本的な測定を基準とし、マスターインボリュートとの比較調整を必要としないので、最も普遍的な測定法と言える。

(2) 被測定歯車の基礎円直径の変化に対しては、それに応じた定数を演算部にダイヤルで設定すればよく、いわば電子式基礎円調節方式とも言え、設定誤差を生じない。

(3) 本測定法は機械的構造がきわめて簡単であるため、スケールの精度さえ選ばばきわめて高精度な測定も可能となり、また小形から大形に至る広範囲の歯車に適用できる。

謝 辞

試作機本体の製作に御協力頂いた大阪精密機械(株)小熊辰照氏に厚くお礼申し上げます。また、有益な助言と討論を頂いた東京工業大学精密工学研究所富井正男博士に心から感謝の意を表わしたい。

文 献

- 1) 林, 石川, 林: 歯形検査機の精度について, 精密機械, **36**, 8 (1970) 545.
- 2) 和栗明外: 歯車の設計と製作, 日本機械学会 (1956) 181.
- 3) 梶谷, 佐々木, 石川: 回転形磁気スケールについて (第1報), 精機学会東北支部講演会前刷 (1967-3) 17.
- 4) 梶谷, 佐々木, 石川: 回転形磁気スケールについて (第2報), 精機学会秋季大会前刷 (1967-11) 149.
- 5) たとえば内藤, 熊谷: 歯車の測定と検査機器, 日刊工業 (1965) 67.