1112

単純形状基準器を用いた高精度歯車測定機の評価*
(球基準器を用いた歯形測定)田口 哲也^{*1}, 近藤 余範^{*2}**Evaluation of High Precision Gear Measuring Machine using Simple Form Artifact**
(Tooth profile measurement using sphere artifact)Tetsuya TAGUCHI^{*1} and Yohan KONDO^{*1} Osaka Seimitsu Kikai Co., Ltd. Engineering Department
Mikuriya 6-5-16, Higashiosaka-shi, Osaka, 577-0032 Japan

The high precision gears are strongly required for advanced motion and power transmission. And the improved evaluation technology for the precision gears is becoming indispensable. Moreover, the reliability of the measured value became important when the accuracy of the gear becomes high, and the establishment of the traceability system has been needed. For the establishment of the traceability system, the higher precision gear measuring machine (GMM) with lower uncertainty is expected to improve gear calibration uncertainty. For the purpose, we proposed a new concept of the high precision GMM from analyzing the problems of the conventional GMM, and we have developed a prototype of the high precision GMM using the direct drive mechanism. Then, the high measurement capability of the developed GMM was verified by the evaluation method using the gear artifacts such as involute, helix and pitch artifact. On the other hand, some new methods conducting GMM accuracy evaluation using simple shapes such as sphere and plane have been proposed as standards. Therefore, we tried a new evaluation method for tooth profile measurement using a sphere artifact whose sphere was treated as the tooth flank, and the high measurement capability of the developed GMM was verified by a new evaluation method. This paper describes about the evaluation results of the developed GMM for tooth profile measurement using sphere artifacts and discusses the effectiveness of the sphere artifact as a new artifact.

Key Words : Gear Measuring Machine, High Precision, Artifact, Calibration, Traceability**1. 緒 言**

自動車, 建設機械, ロボット等の分野では, 重要なサブシステムである動力伝達装置の低騒音化, 小型・軽量化, 高信頼化, 生産性向上などのニーズが強く, これらのニーズに応えるため, 動力伝達装置で最も広く使われている歯車の高精度化が強く求められている. そして, 高精度化した歯車の品質を評価および管理するためには測定技術の向上, すなわち歯車測定機の高精度化, 高効率化および機能向上が大きな課題となってきた. 歯車に関しては, 過去より多くの研究・開発が実施されて測定方法も規格化され, 歯車の幾何学的形状・寸法の精度を示す歯形誤差, 歯すじ誤差およびピッチ誤差の大小により歯車を等級分けする精度規格 (ISO1328-1, JIS B 1702-1) がある. しかし, 歯車の精度が高くなると, その測定値に対する信頼性が問題となり, 国家標準や国際標準によるトレーサビリティ体系の確立が必要になり, ドイツ, 米国, 日本ではそれぞれの国家計量標準研究所を中心に歯車校正システムの構築が進められて来た.

そこで本研究では, 従来の機構や検出システムを改良し, さらに空間誤差の校正・補正方法を開発して適用を図ることで, 歯車校正システムに組み込むのに十分な測定能力を持った高精度歯車測定機⁽¹⁾⁽²⁾を開発した. 本論文では, 単純形状の基準器を用いた評価方法の JIS 化を受け, 高精度歯車測定機を再評価した結果を報告する.

^{*1} 正員, 大阪精密機械株式会社 技術部 (〒577-0032 大阪府東大阪市御厨 6-5-16)^{*2} 正員, 独立行政法人産業技術総合研究所 計測標準研究部門 長さ計測科 長さ標準研究室
E-mail: t-taguchi@osk-corp.co.jp

2. 高精度歯車測定機の特徴

2・1 測定機の機構

図 1 は高精度歯車測定機の機構構成である。被測定歯車を回転させる主 (C) 軸と測定子を移動させるラジアル (X) 軸、タンジェント (Y) 軸、アキシヤル (Z) 軸の直交 3 軸から構成される。C 軸はエアスピンドルを採用して DD モータで直接駆動する。Y 軸と Z 軸は、測定時に駆動しながら測定するために応答性を重視し、共にガイドにエアスライドを採用してリニアモータで直接駆動する。X 軸は、歯形、歯すじおよびピッチ測定時に安定して静止している必要があるため、精度が高く高剛性のローラガイドを採用してリニアモータで直接駆動する。そして Y 軸スライダ上に検出器が設置され、その先端に取り付けられた測定子を板ばねによる軽い測定力で歯面に接触させた状態で測定を行う。その際、スライダの真直度の僅かな誤差や取り付け誤差が測定子の変位検出に与える影響を小さくするために、分解能 1.0[nm] のレーザ測長機を用いて、歯形 (インボリュート) アーティファクトや歯すじアーティファクトの歯面に接触した測定子の移動距離を直接測定する。その主な仕様を表 1 に示す。

Table 1 Major specifications of the developed high precision GMM

Maximum workpiece diameter	[mm]	260
Maximum weight on board	[kg]	50
Maximum measuring speed	[mm/s]	10
Resolution of rotary encoder	[pulse/rev]	19,200,000
Resolution of linear encoder	[μm]	0.01
Resolution of detector (LE)	[μm]	0.01
Resolution of laser interferometer	[μm]	0.001

Fig. 1 Composition of high precision GMM

2・2 検出器の直線性の校正

従来の歯車測定機では測定子の直線変位検出に差動変圧器等を用いていたが、計測・制御のリアルタイム性を向上させるために図 2 のようなリニアエンコーダによる変位検出システムを開発した。そして、計測精度をより向上させるためにはピッチング (Pitching) 等による影響も除去できるように可能な限り測定子に近い位置での変位計測が必要であるため、He-Ne レーザ光の波長を基準とする干渉法を利用したレーザ測長機を導入し、1[nm] の高分解能で測定子の距離を直接検出する光学系を組み込んだ。しかし、検出器部にたわみ等の誤差を生じると測定値に影響を受ける。そこで、その影響を調べるために、図 2 に示したように測定子先端をテストバーに左右から当て、スライダを 10[μm] ずつ移動させてスライドの変位 Δy 、検出器の変位 Δf およびレーザ測長機の変位 Δl を計測して解析した。図 3 にその検証結果を示す。ここで、測定子部や検出器によるたわみ ε_M を式 (1) で定義すると、検出器の変位量に比例してたわみ ε_M が生じており、 Δl とほぼ等しいことからそのたわみの大部分は測定子部で生じていると言える。そこで、たわみ補正係数を α とすると予測されるたわみ ε_P は式 (2) で表せる。

$$\varepsilon_M = \Delta y - \Delta f \quad (1)$$

$$\varepsilon_P = \alpha \cdot \Delta f \quad (2)$$

そして、式 (1) の実測値と式 (2) の予測されるたわみとの差 $\Delta \varepsilon$ ($= \varepsilon_M - \varepsilon_P$) は図 3 に示すようにほぼ 0 になることから、使用する測定子のたわみ補正係数 α を決定し、測定時の検出器の変位 Δf を用いて測定子の予測たわみ ε_P を算出し、レーザ測長機の変位誤差 Δl を補正することで精度の高い直線変位計測が可能である。

Fig. 2 Composition and verification of detector

Fig. 3 Deflection of stylus with ruby tip

2・3 ロータリエンコーダの偏心の校正

回転駆動系は、高精度な回転を実現するエアベアリングを DD モータによって直接駆動する機構としたが、その角度計測に用いるロータリエンコーダには、偏心等起因する角度誤差を低減させるために自己校正型ロータリエンコーダ⁽³⁾を採用した。ロータリエンコーダは通常 1 つの目盛り板と 1 つのセンサヘッドで構成されるが、自己校正型ロータリエンコーダの場合は図 4 のように複数個のセンサヘッドを等角度間隔に配置し、全てのセンサヘッドの信号を等分割平均法で処理することで回転軸中心に対する目盛り板の偏心およびスケール誤差の校正値を得ることができる。センサヘッドの数を n 、その配置番号を j ($=1, 2, \dots, n$)、目盛り板 1 回転の位相を i とした場合、それぞれのセンサヘッドが出力する角度信号には、角度偏差 $A_{i+2\pi(j-1)/n}$ が含まれている。ただし、各センサヘッドは同一の目盛り板を検出しているため、 $A_{i+2\pi(j-1)/n}$ ($j>1$) はそれぞれ基準とするセンサヘッド ($j=1$) の角度偏差 A_i に対して $360/n$ [°] 間隔ずつ位相がずれているだけである。直接には各角度信号から角度偏差を分離することはできないため、基準とするセンサヘッド ($j=1$) の角度信号との差を計算するとその差 $\delta_{i+2\pi(j-1)/n}$ は式 (3) のように角度偏差 $A_{i+2\pi(j-1)/n}$ だけで表せる。このとき n 個のセンサヘッドの平均値 μ_i は式 (4) で表せる。

$$\delta_{i+2\pi(j-1)/n} = A_i - A_{i+2\pi(j-1)/n} \quad (3)$$

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{i+2\pi(j-1)/n} = A_i - \frac{1}{5} (A_i + A_{i+2\pi/5} + A_{i+4\pi/5} + A_{i+6\pi/5} + A_{i+8\pi/5}) \quad (4)$$

Fig. 4 Layout of reading heads for Self-calibratable rotary encoder

Fig. 5 Measured deviations by 5 sensor heads

Fig. 6 Analyzed deviation as calibration curve

高精度歯車測定機では図4に示すようにセンサヘッドを5個 ($n=5$) 配置した. 図5に5個のセンサヘッドの1回転 (360°) の計測値から算出されるそれぞれの δ を示す. 次に, この5個の δ の平均値 μ_i は式(4)の右边で表せ, その結果を図6に示す. ここで, 等分割平均法から式(4)の右边第2項は, A_i の5次のフーリエ成分とみなすことができる. したがって, この構成では5の倍数次成分が十分小さければ平均値 μ_i は校正曲線とみなすことができる. 歯車測定機で問題となる測定機の偏心や倒れは1次成分および2次成分が支配的であり, それらを校正できることで効果が得られると判断し, $n=5$ とした.

3. 高精度歯車測定機の評価

3・1 球基準器の測定原理

球基準器⁽⁴⁾を用いた歯車測定機の評価では, インボリュート歯車の歯形測定手順に従って歯形用球の赤道をインボリュート形状とみなして歯形測定する. その球基準器の測定原理を図6に示す. ここで実測した歯形用球の半径 r_c , 歯形用球の中心距離 C , 設定したインボリュート基礎円半径 r_b , および測定子先端球の半径 r_p を用いて, 式(5)から式(8)に従ってインボリュート歯形と球(円)との形状偏差 δ_p を計算して理論曲線を求める. ここで, 表2の諸元を用いて計算した理論曲線と実測曲線を図7に示す. 最終的に, フィッティングさせた理論曲線と実測曲線との差から求まる偏差曲線を作成し, 精度評価範囲 (Evaluation range) において測定精度を評価する.

$$\tau = \cos^{-1} \left(\frac{r_b^2 + C^2 - r_c^2}{2r_b C} \right) \quad (5)$$

$$\beta = \varepsilon - \tau \quad (6)$$

$$T = \sqrt{(r_c + r_p)^2 - (C \cos \beta - r_b)^2} + C \sin \beta \quad (7)$$

$$\delta_p = T - r_b \varepsilon - r_p \quad (8)$$

Fig. 6 Form deviation δ_p between involute and sphere

Table 2 Dimensions of the sphere artifact

Measuring sphere radius	r_c [mm]	25.40000
Sphere center distance	C [mm]	46.00001
Stylus tip radius	r_p [mm]	1.99932
Base radius	r_b [mm]	45.75345

Fig. 7 Theoretical and measured curves

Fig. 8 Photograph of measurement appearance

3・2 球基準器を用いた繰り返し性

高精度歯車測定機の歯形測定精度は、表 2 に示す仕様の球基準器を使い、同一箇所を 10 回連続測定して繰り返し性を検証した。その球基準器の外観と測定の様子を図 8 に示す。測定効率も検証するため、測定速度は 3 種類 (1[mm/s], 5[mm/s], 10[mm/s]) について実施した。その他、サンプリング点数は 1000[points]、フィルタはカットオフ波長 0.25[mm] のガウシアンフィルタを用いてデータ処理した。図 9 は速度毎に 10 回分を重ねて表示した左歯面の測定結果である。その偏差曲線はインボリュート基準器より滑らかであり、精度評価範囲の P-P 値は約 0.2 [μm]p-p と小さく、定性的に高い繰り返し性が確認できた。次に、表 3 は精度評価範囲のデータを対象として平均からの偏差を使って算出した標準偏差であり、3 種類の測定速度に対する標準偏差をそれぞれ σ_1 , σ_5 , σ_{10} で表し、左右歯面について結果は全て 6σ で表している。各標準偏差は繰り返し性の目標値 (0.3[μm]以内) に対して十分小さく、測定速度の影響も少なく、定量的にも高い繰り返し性が確認できた。

しかしながら詳細に確認すると、インボリュート基準器では認識できなかった測定速度に依存して大きくなる約 0.1 [μm]の変化を転がり長さ約 1 [mm]の位置に確認できたとともに、全体的に僅かな 2 こぶの偏差が残った。

Fig. 9 Repeatability result of profile measurement for left flank by using the sphere artifact

Table 3 Standard deviations of profile measurement by using the sphere artifact

$6\sigma_1$ [μm]		$6\sigma_5$ [μm]		$6\sigma_{10}$ [μm]	
Left flank	Right flank	Left flank	Right flank	Left flank	Right flank
0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08

4. 結 語

JIS B 1757-2 に規定された球基準器を用いて開発した高精度歯車測定機の歯形測定精度を評価した結果、繰り返し性の目標値 (0.3[μm]以内) を達成し、インボリュート基準器と同等の高い繰り返し性を確認できた。さらに、球基準器の理論値との差が小さいことから球基準器の有効性が検証できたとともに高精度歯車測定機は歯車校正システムへ適用するのに十分な測定能力を持っていることが再検証できた。一方、球基準器の測定結果に存在する僅かな 2 こぶの偏差については検出器の変位の影響が残っていると思われる。その要因の一つとして検出器の直線性が考えられる。通常の歯形測定ではインボリュート理論により検出器の変位は小さいが、球基準器の場合は同じ測定方法においては大きな変位を伴う。この課題を解決する一つの方策として測定対象に合わせて検出器の変位が生じないように制御しながら計測する方法が有効であると考ええる。

文 献

- (1) 田口哲也, 明愛国, 下条誠, 金森哉吏, 梶谷誠, 竹田龍平, “超高精度歯車測定機の開発—直接駆動方式実験機の試作とその基本性能確認—”, 精密工学会誌, Vol. 77, No. 3 (2011), pp. 327-332.
- (2) Taguchi T., Ming A. and Shimojo M., “Development of High Precision Gear Measuring Machine”, Int. J. of Mechatronics and Automation, Vol. 1, Nos. 3/4 (2011), pp. 181-189.
- (3) Watanabe T., Fujimoto H. and Masuda T., “Self-calibratable rotary encoder”, J. of Physics: Conference Series, Vol. 13, Issue 1 (2005), pp. 240-245.
- (4) Kubo A., Kondo K., Takatsuji T., Haertig F., Komori M., Osawa S. and Naoi K., “Calibration system of involute tooth form checker using ball artifact”, Int. Conf. on Gears, VDI-BERICHTE 1904 (2005), pp. 505-521.