真空レーザ干渉計搭載 1.6 m 超高精度測長機の開発*

前田不二雄** 猿木義雄*** 境 久嘉† 青柳信一郎†† 久保哲彦†††

Development of 1.6m Ultra-High Precision Measuring System Using Vacuum Laser Interferometer/Fujio MAEDA, Yoshio SARUKI, Hisayoshi SAKAI, Shinichiro AOYAGI and Tetsuhiko KUBO

Key words: vacuum laser interferometer, measuring system, linear encoder, line standard, edge sensor, continuous measurement, uncertainty of measurement

1. は じ め に

近年、各種産業界の高度化にともない、基盤技術である長さ測定に対し、ナノメートルレベルの高分解能化・高精度化が要求されている。また、測長範囲についても1 m以上の長ストロークが要求されるようになっている。

これらの要求に対して、ミットヨはより精密に測長された実用標準を供給し産業界に貢献できるよう、長さの基準として使用されるリニアエンコーダ、リニアエンコーダ用スケール、標準尺などの校正・評価が可能な、1.6 mと世界最長ストロークを有する真空レーザ干渉計を搭載した超高精度測長機(社内呼称: Nano Master1600)を開発した。

この測長機は、弊社が培ってきた光波干渉型測長機技術¹⁾²⁾をベースに、飛躍的に不確かさを低減する目的でレーザ光路を真空にした真空レーザ干渉計、高速連続移動でも安定したエッジ検出ができるエッジセンサの開発などによ

り実現した。その結果、測長誤差要因を極力低減したことにより、現在の各国の国立標準研究機関と比べても最先端クラスの不確かさを1.6 mの長さで実現した。

以下に、本体部、エッジセンサ、レーザ干渉計を中心に測長機の特徴、測定結果例について解説する。

2. 測長機の特徴

2.1 測長機の構成、仕様

図1に測長機本体部の外観写真を示す。主な仕様は次の通りである(カッコ内は従来技術)。

- ・測定範囲: 1600 mm (1000 mm)
- ・測定分解能: 0.8 nm (8 nm)
- ・測定速度: Max. 20 mm/s
(ステップ&リピートまたは1 mm/s以下)
- ・データ取り込み速度: 25 000 点/s (1 点/s以下)
- ・スループット: 測定時間+データ処理 1 分以内
- ・本体外形寸法: W 2016×L 6454×H 2071
- ・本体質量: 約 14 t

この測長機は、弊社清原工場内の地下9 mの地下研究棟内³⁾に、本体部、電装システム部および真空排気システム部それぞれに独立の専用設置室を新設して設置した。ま

- * 原稿受付 平成 15 年 2 月 5 日
- ** (株)ミットヨ川崎研究開発センタ (川崎市高津区坂戸 1-20-1)
- *** 正 会 員 (株)ミットヨ川崎研究開発センタ (同上)
- † 正 会 員 (株)ミットヨつくば研究所 (つくば市上横場 430-1)
- †† (株)ミットヨ宇都宮事業所 (宇都宮市下栗町 2200)
- ††† 正 会 員 (株)ミットヨ宇都宮事業所 (同上)

前田 不二雄

1979 年横浜国立大学工学部金属工学科卒。(株)ミットヨ川崎研究開発センタセンサ技術開発部主席研究員

猿木 義雄

1972 年芝浦工業大学工学部機械工学第二学科卒。(株)ミットヨ川崎研究開発センタ商品開発部主席研究員

境 久嘉

1980 年信州大学工学部精密工学科卒。(株)ミットヨつくば研究所走査機構研究グループ主席研究員

青柳 信一郎

1980 年宇都宮大学工学部電子工学科卒。(株)ミットヨ宇都宮事業所マイクロコード工場設計二課課長

久保 哲彦

1982 年広島大学大学院工学研究科修了。(株)ミットヨ宇都宮事業所清原工場生産技術課主席

図1 測長機本体部外観写真(専用恒温ブースのパネルを外した状態)

図2 測長機の本体部構造

た、本体部はさらに専用恒温ブース内に設置し、ブース内部の温度変化は $0.04^{\circ}\text{C}/\text{日}$ 以下となっている。

測長機の基本構造は、アッペの原理に従ったテーブル移動型の光波干渉型測長機となっており、測定対象物が固定され連続移動するテーブルの移動量を、目盛を検出するためのエッジセンサまたはリニアエンコーダ用検出器からのトリガ信号を基に測長するようになっている。

なお、本稿では詳細の説明を省略するが、電装システム部は駆動制御を行う制御部、測定データの収集・処理などを行う専用のデータ処理部、温度や真空圧力などの環境モニタを行う各種外界センサなどで構成されており、また、真空排気システム部はロータリーポンプ、ターボ分子ポンプなどで構成されている。

2.2 本体部

図2に測長機の本体部構造を示す。本体部は、鋳鉄製の本体ベッド上に高精度に仕上げられたガイドレール（以下レール）が配置され、その上を静圧スラストエアベアリング（以下エアベアリング）で支持されたテーブルが移動する基本構造に、レーザ光路を真空にするための金属ベローズ（以下ベローズ）、ベローズ駆動系、干渉計用真空チャンバなどが付加配置された構造となっている。なお、測定対象物は、真空中にすると作業性が悪くなるだけでなく、測定対象物の膨張がありその補正も困難なため、大気環境とすることが必要である。

この伸縮可能なベローズを用いるシンプルな方法で 1.6 m という長ストロークのレーザ光路を真空化するためには、大気圧力およびベローズ伸縮にともなうテーブルへの駆動外乱を回避する必要がある。そのため、テーブル駆動機構とは別にベローズ駆動機構を設け両者を2軸同期制御する方式を採用するとともに、内外ベローズ間に適切な圧縮空気を満たすことによりベローズ内部の真空化にともなう影響を排除し、テーブル-ベローズ間、ベローズ-チャンバ間などの柔軟な連結を実現する2重ベローズを考案し採用した。

また、測長機の基本性能を左右するテーブルの幾何運動精度は、社内最高の卓越技能者“師匠（弊社における役職名）”により入念に仕上げられ、以下のような比類のない高精度案内が実現できている。

- ・レール水平方向真直度： $0.8\ \mu\text{m}/3450\ \text{mm}$

図3 エッジセンサの検出原理

- ・レール垂直方向真直度： $0.9\ \mu\text{m}/3450\ \text{mm}$
- ・テーブルピッチング： $0.1''/1650\ \text{mm}$ 以下
- ・テーブルヨーイング： $0.1''/1650\ \text{mm}$ 以下
- ・測定対象物取付け面真直度： $0.5\ \mu\text{m}/1600\ \text{mm}$

今回の開発では、さらに、本体各部の変形や温度・振動などの時間的、空間的な環境外乱などの影響を極力低減するため、以下のような設計上の配慮も行っている。

- ① レーザ干渉計の固定キューブコーナプリズムを目盛検出器との相対位置が変化しないように配置
- ② ブリッジ、テーブル、測定対象物の取付け治具など主要構成部品へ低膨張材料（線膨張係数が $1 \times 10^{-6}/\text{K}$ 以下の低熱膨張鋳鉄）を採用
- ③ 真空チャンバおよびその内部のレーザ干渉計用光学部品などの位置変動に対する配慮
- ④ FEM 解析による本体の構造解析、本体ベッドやレールの経時安定性、本体支持方法などへの配慮
- ⑤ 従来比約 5 倍の高剛性駆動ジョイント機構の開発
- ⑥ 96% 以上の回収能力をもつ高剛性排気回収型エアベアリングの開発などによるブース内温度変動の抑制

2.3 エッジセンサ

リニアエンコーダ用スケールや標準尺などの目盛位置を測定する場合、環境変化などの影響を最小限にするためには短時間で測定を行うことが重要である。今回の開発では、テーブルを $20\ \text{mm/s}$ で高速連続移動しても安定な目盛検出ができるようトリプルスリット方式のエッジセンサを新たに開発した。検出可能最小線幅は $2.5\ \mu\text{m}$ となっている。

図3に開発したエッジセンサの検出原理を示す。図の左上に示すような3本のスリット面上に目盛パターンを結像させると、目盛パターンとスリットの相対運動によりそれぞれのスリットで Sa, Sb, Sc で示すような受光信号の強度変化が得られる。これらを合成すると $\text{Sa} + \text{Sc} - 2 \times \text{Sb}$ で示すエッジ検出信号が得られ、そのゼロクロス点でレーザ干渉計の値を読み取ることで測定が行える。

図4 レーザ光路真空化の効果（真空時と大気開放時の任意120秒間におけるレーザ干渉計カウント値の比較例）

この方式の場合、それぞれのスリットでの光強度出力を直接合成できるため高速にエッジ検出信号を得ることができ、また、光量変化が生じてエッジ検出位置のシフトがなく光量変化に対してロバストといった特徴がある。なお、温度影響を避けるため、エッジセンサへの照明および受光信号の取り出しには光ファイバを使用し、別室の光源部、信号処理部と接続している。このエッジセンサによる目盛位置検出のばらつきは、専用評価装置を製作し評価した結果、標準偏差で2.3 nmと良好な結果が得られている。

2.4 レーザ干渉計

干渉計は、弊社製実用波長安定化 He-Ne レーザ (LIS-633 B) を光源（以下レーザヘッド）に使用し、直交偏光子により光束を分離するマイケルソンタイプの干渉計を構成した。また、温度環境への影響に配慮して、レーザヘッドおよび受光信号処理部は別室に設置し、本体干渉計部とは光ファイバにより接続した。

従来、このような測長機には、レーザ光路が大気環境のレーザ干渉計が使用されており、環境条件によりレーザ波長が影響を受けるため、環境条件のモニタを行い屈折率の補正を行っている。しかしながら、この方法では、環境条件の変化に対する外界センサのリアルタイム性や不確かさ、屈折率補正式の不完全さなどから、完全な屈折率の補正は困難であり、不確かさ低減の大きな課題となっていた。

前述の方法により、1.6 m という長ストロークでありながらレーザ光路を 10^{-3} Pa オーダで真空化しこの課題を解決したことが、この干渉計の最大の特徴である。

図4に干渉計部を真空にした場合と大気中の場合を本測長機により比較評価した結果を示す。真空中では実際の測定では影響のないテーブル位置のドリフト以外変動が見られない。一方、大気中では空気揺らぎによりカウント数が短時間に大きく変動（図では最大250カウント $\approx$ 200 nm相当）しており、リアルタイムに屈折率を補正することは困難であることがわかる。

なお、レーザ測長の基準となるレーザヘッドの波長は、JCSS (Japan Calibration Service System) 認定事業者である弊社つくばキャリブレーションセンタにて、独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センタ (NMIJ/AIST, 以下産総研) とトレーサブルな自社製よう素分子吸収線波長安定化 He-Ne レーザ⁹⁾により定期的に校正している。

図5 標準尺測定結果例

3. 測定結果例

3.1 エッジセンサによる測定結果例

図5に、本測長機により弊社標準尺 HL-500 (L=500 mm) の目盛をエッジセンサを使用し測定した結果を示す。測定条件は以下の通りである。

- ・線幅／測定ピッチ：4 μ m/5 mm
- ・測定位置：40～540 mm, 340～840 mm, 740～1240 mm, 1090～1590 mm の4箇所
- ・照明（エッジセンサ）：透過照明
- ・測定回数：計20回（4箇所の測定位置でセッティングおよび日を替え5回測定）

結果のグラフには、上記の条件で20回測定した時の平均値（ミットヨ測定結果）および各測定点での測定値の差を示す。また、同じ標準尺を National Institute of Standard and Technology (米国国家標準技術研究所、以下 NIST) で校正した結果およびミットヨ測定結果との差もあわせて示した。これらの結果から、各測定点での測定値の差の最大（以下最大差）が約55 nmと非常に良好であり、また、NISTの校正値（50 mm ピッチ）ともよく一致していることがわかる。

図6には、同様にリニアエンコーダ用スケール目盛をエッジセンサを使用し測定した結果を示す。なお、この図のグラフは、2回目以降の測定結果を+0.1 μ mずつシフトしてプロットした。

図6 リニアエンコーダ用スケール測定結果

図7 リニアエンコーダ測定結果例

- ・線幅/測定ピッチ：8 μm/16 μm
- ・測定長：1100 mm
- ・照明（エッジセンサ）：透過照明
- ・測定回数：セッティングおよび日を替え 5 回測定

この結果からわかるように、それぞれの測定結果は、細かな変動を含めよく一致しており、5 回測定における最大差は約 35 nm であった。

3.2 リニアエンコーダの測定結果例

図7に、弊社のセパレート型リニアエンコーダ LHS-21（測定長 325 mm）の測定結果を示す。

- ・信号周期/測定ピッチ：0.01 μm/10 μm
- ・測定回数：セッティングおよび日を替え 5 回測定

この測定結果も、同様に 5 回の測定における最大差で約 26 nm と良好な結果となっている。

エンコーダ測定については、エンコーダメーカーとして国際的に有名なドイツの DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH 社（ハイデンハイン社、以下 HH 社）と、HH 社製 270 mm ストロークのエンコーダを伸介器として使用した民間レベルで初めての国際比較測定も行っている。HH 社で使用した測長機は Physikalisch-Technische Bundesanstalt（ドイツ国立物理工学研究所、以下 PTB）とトレーサブルな 450 mm ストロークの測長機である。

比較結果の詳細については、Precision Engineering 誌に掲載される予定⁹⁾となっており本稿では省略するが、広範囲での両者の測定値の最大差が 27 nm、ショートレンジでの差は 1σ で 0.8 nm と良好な結果が得られている。

3.3 不確かさについて

このような測長機の測定・校正能力は不確かさにより表される。この測長機でも、測長に影響を与えるレーザ波長、測長システム、測定対象物および測定の再現性などの各要因の検討や多数の測定結果から不確かさを見積もった。

その結果、測長機単体の性能を示す測定対象物の要因を除く不確かさは式(1)のように見積もれた。ここで、 U は拡張不確かさ、 k は包含係数、 L は測定長である。

この不確かさは、式(2)に示した JCSS 認定機である弊社従来機の見積もりとの比較からもわかるように、レー

ザ光路真空化やテーブル連続移動による短時間測定など多くの技術的対応により飛躍的な低減が実現できており、現在の各国の国立標準研究機関と比べても最先端クラスのものとなっている。

また、測定対象物の要因を含む場合については、測定対象物そのものの要因、セッティングなどの測定技能の要因などが影響し一概にはいえないが、リニアエンコーダの一例を式(3)に示す。この不確かさをさらに小さくするよう追求を行っている。

$$U(k=2) = 9 \text{ nm} + (1.8 \times 10^{-8} \times L) \quad (1)$$

$$U(k=2) = 66 \text{ nm} + (16 \times 10^{-8} \times L) \quad (2)$$

$$U(k=2) = 10 \text{ nm} + (3.5 \times 10^{-8} \times L) \quad (3)$$

4. おわりに

今回の開発成果については、産総研主催の「デジタルスケール国際ワークショップ」、ドイツ PTB 主催の「159. PTB-Seminar」、IMEKO の「7th International Symposium on Laser Metrology」などで報告してきた⁶⁾⁷⁾。

PTB でもレーザ光路を真空にした光波干渉測長機が新たに開発⁹⁾され、標準尺を伸介器とした国家標準機関による国際比較も始められており⁹⁾、この技術は基盤技術としてますます重要になると考える。

今後も産総研をはじめとする関係機関との連携および比較測定を通じて、より信頼性の高い実用標準を供給し産業界に貢献できるよう努力する所存である。

参考文献

- 1) H. Noguti, et al.: The Development of an Interferometer for calibrating Linear Scales, Mitutoyo Technical Bulletin No.5, (1989) 26.
- 2) M. Sawabe, et al.: An Interferometer for Measurement of Grating and Index Scale, Progress in Precision Engineering, Proceedings of 6th IPES and 2nd IC on UME, Braunschweig, Germany, (1991-05), 308.
- 3) K. Yoshiike.: The Measurement Environment Nine Meters Underground, Mitutoyo Technical Information No. STD-008, (1990)
- 4) M. Ueda, et al.: calibrated Wavelength Results of Commercial Stabilized He-Ne lasers, Proceeding of 1997 National Conference of Standard Laboratory, USA, (1997-07) 775.
- 5) W. Israel, et al.: An international length comparison at an industrial level using a photoelectric incremental encoder as transfer standard, Precision Engineering, 27-2, (2003) 151
- 6) F. Maeda, et al.: Development of High Precision Line Scale Calibration System, Proceeding of 159. PTB-Seminar, Braunschweig, (2001-11) 36.
- 7) M. Sawabe, et al.: Development of the Vacuum Interferometric Comparator for Calibrating the Fine linear Encoders and Scales, Proceedings of 7th International symposium on Laser metrology, IMEKO TC14 and SPIE, Novosibirsk, Russia, (2002-09) Session 4.
- 8) J. Flugge, et al.: Concept of an Interferometric Length Comparator with Measurement Uncertainties in the Nanometer Range, Proceedings of the 1st euspen International Conference, Bremen, Germany, (1999) 227.
- 9) 黒澤富蔵：ナノメトロロジーの標準と国際比較、精密工学会誌, 68, 3, (2002) 338.