自律校正法によるロバストなセンシング技術*

清野 慧**

Robust Sensing in Metrology with In-Situ Self-Calibration / Satoshi KIYONO

Key words: calibration, self-calibration, in-situ calibration, displacement sensor, nano-metrology

1. はじめに

製品の許容公差がミクロン、サブミクロンになり、それを保証する精密測定にはナノメートルレベルの精度が要求される場合が増えつつある。この領域での精密測定には今まで以上のロバスト性が求められ、しかもその実現に困難が増している。例えば精密な形状計測において、加工へのフィードバックという観点からは加工と計測における加工物の保持を含めた環境の同一性が必要となり、さらに、その加工物を目的のシステムに組み込む環境での変形を含めた形状が評価できなければならない。

精密計測のロバスト性にとって考慮すべき事項は、測定対象、測定の基準、両者を比較する際のセンサの安定性である。測定基準に関しては、測定が加工機上で行われることからその基準の確からしさをどのように保証するかが問題であり、センサにとっては校正結果を使った補正を含めた安定性が課題になる。本稿では、高精度が要求される機上測定を念頭に置いた精密計測にとってのセンサの校正法をロバスト性の観点からまとめる。

2. センサの校正の必要性和その要求精度¹⁾

図1は変位センサの校正曲線の例を示す。一般に市販されているセンサは図1の平均的感度を示す直線とそのばらつきの幅が知らされるだけで、図の校正曲線の詳細（平均感度からの偏差で、以下では線形誤差と呼ぶ）は不明である。ところが、機械の基準となる真直形状や真円形状の精密測定には、平均感度よりもこの線形誤差が重要な意味をもつことが多い。それは、平均感度がスケールファクタ

として作用し、真直形状の誤差評価にはあまり影響がないのに対し、線形誤差が加算的に影響するためである。

図2は線形誤差の影響を模式的に示したもので、測定に用いられたセンサの出力範囲に含まれる線形誤差が真直形状に和として加わることになる。

例えば、測定対象に対する走査方向の傾斜のためにセンサ出力が $1\mu\text{m}$ の幅で変化し、その範囲に 10nm （出力範囲の1%）の線形誤差があると、その 10nm が真直形状に和として加わることになる。この場合は、形状精度が高くなるほどその影響が重大になる。したがって、形状測定に用いるセンサを性能いっぱいまで使うには、ユーザが線形誤差を校正し、補正する必要がある。

真円度測定における3点法、真直度測定における2点法など、複数の変位センサを用いて走査運動の誤差を取り除く方法においては、校正誤差の影響はより顕著であることが知られている²⁾³⁾。この場合、複数のセンサに共通の公称感度がスケールの役割を果たし、個々の校正誤差（平均感度誤差と線形誤差を合わせたもの）の差が加算的に2点法、3点法の差動出力に影響する。

3. 精密形状測定とセンサの校正

3.1 高精度基準との比較校正

変位センサの従来の校正法は、より確かな変位センサと

図1 校正曲線の例

* 原稿受付 平成15年7月15日

** 正会員 東北大学大学院工学研究科（仙台市青葉区字青葉01）

1972年京都大学大学院工学研究科博士課程修了、工学博士。研究内容：知的ナノ計測手法、サーフェスエンコーダ、ソフトウェアデータによる機上計測。

図2 線形誤差のもたらす影響

の比較校正である。基準として用いられる最も精度の高い変位検出器として結晶格子の間隔をX線干渉計で読みとるシステムが実用されている⁴⁾。

測定機に組み込まれて変位計を校正するには、校正され値付けされた段差試料などが、測定範囲の一部を代表する一種の平均感度を校正するのに使われる。この場合、一般に線形誤差は校正されない。

3.2 自律校正法¹⁾

3.2.1 一对のセンサ

図3は同程度の精度を有する一对のセンサによる自律校正法を示す⁵⁾。最初に基準に使うセンサの平均感度を既知とする。被校正側センサAの変位がレバーで n 倍される位置に校正側センサBを配置して、センサBでセンサAの入力変位を評価することで校正すると、センサBの未知の線形誤差が $1/n$ 倍されてセンサAの校正結果に含まれることになる。この第1回の校正結果を得た後、両センサの配置を逆にして同様の校正をすると、センサBの校正曲線が得られ、その結果には、当初未知であったセンサBの線形誤差が $(1/n)^2$ 倍されて含まれる。この校正データを使って、直前のデータを修正することができ、その修正を繰り返すと両センサについて正しい校正結果が得られる。

3.2.2 校正曲線の導関数の測定⁶⁾

図4は単独のセンサの自律校正法を示す。センサのターゲットを圧電素子1 (PZT1) で全校正範囲にわたって移動し、各点での出力をとる。そのとき、圧電素子2 (PZT2) の一定入力電圧をオン、オフして一定変位 D を与えると、各点で Z_i と $Z_i + D$ の入力に対する出力、 V_i , V_{i+} が得られる。したがってこの出力の差と D の比から校正曲線の逆関数 $f^{-1}(V)$ の導関数が得られる。

図5はこれらの方法で得た校正結果の例を示す。両者

図3 2つのセンサによる自律校正原理

図4 単独センサの自律校正法

図6 その場校正法の原理

図5 自律校正結果の比較

図7 単独センサの校正とその場校正

はよい一致を示している。すなわち、いずれの方法をとるにしても、線形誤差が未知であったための不確かさは1/10程度には低減されることがわかる。

3.2.3 計測のためのデータによるその場校正⁹⁾

形状測定機に組み込んだ変位センサの校正をするには、この導関数を求める手法が有効である。その手順では、図6に示すように、一度形状測定をした後、試料あるいは変位センサを形状高さ方向に D だけシフトして再度測定する。同じ x の位置での1回目と2回目のセンサ入力の差は D であり、2回のセンサ出力の差で D を除すと、 $D/\{V_1(x) - V_2(x)\}$ の形で微係数が求まる。求まった微係数を V の値の小さい順に並べれば先の図4と同様の導関数が求まり、これを積分すれば校正曲線がその場で得られる。つまり、この手法によれば、形状測定の繰り返し性を確認するとともに、その繰り返し誤差とほぼ同程度のレベルでセンサの線形誤差の補正值を得ることになる。なお、この場合、2回の測定における走査運動誤差 $E(x)$ の違いは無視している。

図7は図4の方式と、図6の方式で容量型変位センサを校正した結果で、両者が十分よい一致をみているといえる。

4. 校正法による不確かさの違い

4.1 校正結果の不確かさ

上述の各種校正法の不確かさを定量的に表すことは難し

い。ここでは、nm 領域での使用を前提にしたセンサに限って定性的な比較を行ってみる。センサの有する不確かさをもたらす要因には、未知の線形誤差、分解能、センサの不安定性がある。校正結果の不確かさには、どれだけ詳細に線形誤差が同定できるかということにかかっているため、上述の各種の校正法による結果の不確かさは定性的に図8のように表される⁹⁾。対のセンサによる自律校正では、センサ交換のための再取付け、レバーの支点のわずかな移動などが線形誤差の同定における不確かさの要因となる。図4の単独センサの自律校正システムでは、 D の一定性が結果を左右する。段差試料で D を与えれば、段差を測定するたびにたいいていの場合必要になる横方向の走査の繰り返し性が、圧電素子 (PZT) などのアクチュエータで D を与えるときには、その繰り返し精度が重要な不確かさの要因になる。形状測定データを使うその場校正法では、図中の3つの要因が分離できないが、他の場合との比較のため分けて示した。したがって、この場合の線形誤差の項は測定の走査運動の繰り返し誤差が主な不確定要因になる。

これら自律的な校正法の不確かさの大きさに関する順位は必ずしも一般性があるわけではないが、校正データを得るだけが目的の場合、高精度の基準を用いた比較校正の確からしさに勝るものはない。

しかし、一般のユーザにとって、校正の目的はその結果を計測データの補正に用いることであり、補正に用いる際

図8 校正結果の不確かさのレベル

図9 補正結果の不確かさのレベル

の校正データの確からしさこそ重要になる。

4.2 補正結果の不確かさ

形状測定結果の補正が目的であれば、センサの校正後にそれを補正に使うまでの経過時間、校正システムから測定システムへセンサを移設するときの取り外し、センサの移動、センサの取り付けに伴う不確かさの要因増加を考慮しなければならない。それを追加して、補正の確からしさを定性的に評価すると図9のように表される。

比較校正の場合、時間経過も、センサの移動距離も一番大きくなり、センサの取り付け状態も変化する可能性が高い。これに対して、一対のセンサの校正は計測システムと

同じ環境で実施でき、単独センサの自立校正では、場合によっては計測システムに取り付けたままのセンサを校正できる。さらに、その場校正になると計測システムでのセンサ出力そのものから、センサの線形誤差の補正結果が得られる。また、たとえどのように確かな校正データによる補正ができて、計測結果の確からしさはその繰り返し誤差の大きさを超えることはできない。したがって、測定結果の確からしさをいうなら、図9のその場校正以外の場合には、さらに測定の繰り返し誤差による不確かさも加わることになる。

走査誤差の繰り返し形状測定結果の信頼性の一つの限界であるとすれば、その場校正による線形誤差の補正がロ

図 10 2点法システムにおけるその場校正

バスト性の一つの限界を与える。

4.3 走査運動の繰り返し性を超えて

形状測定 of 繰り返し性を悪くする要因として、環境およびセンサの安定性の不足と、測定のための走査運動の繰り返し誤差がある。このうち、走査誤差の繰り返し誤差の影響のない方法として、2点法、3点法など複数のプローブを同時に走査して基準を計算で作り出すソフトウェアデータの利用が知られている。

しかし、上述のその場校正法が測定の繰り返し（主として、走査運動誤差の繰り返しに依存）に左右されるので、線形誤差の補正まで含めた場合の確からしさの向上にはつながらない。

そこで、走査の繰り返しを必要としないその場校正法が求められることになる。そのためには、2点法を例に挙げると、図 10 のように、2点法の測定を個々のプローブの縦方向シフトと組み合わせて、3回繰り返す方法がある³⁾。

理論上この方法で、走査運動誤差の影響を受けない2点法の形状測定の繰り返し性（主として偶然誤差に左右される）の限界まで、確からしさが高まることになる。

5. おわりに

精密測定の領域で、評価すべき形状誤差、比較対象となる計測の基準、比較に使うセンサの校正誤差がほぼ同レベルにあり、どれかを無視して他方を同定することができな

い状況が増えている。

このような状況は、ナノレベルの精度領域で特に生じやすく、この領域ではまた、高精度の基準との比較校正で得た校正結果が必ずしもそれによる形状測定結果の確からしさを高めてくれる保証はない。

したがって、費用対効果を考えるとき、形状計測のための補正に校正結果を必要とするユーザにとっては、その場校正法の利用価値が高くなる。

また、2点法、3点法などの能力を最大限に生かすためにも、それぞれの手法における繰り返し測定データに基づくその場校正法が有効である。

参考文献

- 1) S. Kiyono, et al.: In-situ self calibration of nano-metrological sensors and its uncertainty, Proc. of ISIST '2002, 18-22 Aug. Jinan, China (2002) 2-013-020.
- 2) 奥山栄樹ほか：複数の測定子を用いた真直度測定法における測定子校正誤差の不揃いの影響，日本機械学会論文集 (C)，**60**, 577 (1994) 3144.
- 3) 清野 慧：ソフトウェアデータの実用化に向けて，2003 年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集 (2003) 459.
- 4) D. G. Chetwynd, et al.: X-ray interferometer calibration of microdisplacement transducers, J. Phys. E: Sci. Instrum. **16**, (1983) 871.
- 5) 清野 慧ほか：変位計の線形誤差の自律校正法，精密工学会誌，**59** (1993) 2043.
- 6) 清野 慧ほか：幾何学量センサのその場自律校正法の研究，精密工学会誌，**63**, 10 (1997) 1417.
- 7) Shizou Zhang, et al.: An absolute calibration method for displacement sensors, Measurement, **29**, (2001) 11.