

令和6年度 機械知能・航空実験II A班

ファイナ1 センサの自律校正法

東北大学 機械知能・航空工学科
ファイナメカニクスコース 高・松隈研究室

学籍番号 C2TB1505

千葉 匠

共同実験者 シダーサダヌコンダ，川口朋也，蔦森公亨，
吉村悠太

実験日 2024年12月11日

提出日 2024年12月18日

連絡先 chiba.takumi.s4@dc.tohoku.ac.jp

目次

1	実験の背景と目的	2
2	自律校正の原理	2
3	実験装置	4
4	実験方法	4
4.1	ノイズレベル及びドリフトの測定	4
4.2	自律校正実験	5
4.3	自律校正計算	5
5	実験結果と考察	6
6	課題	9
6.1	(1) 異なるセンサによる自律校正	9
6.2	(2) レバー倍率の誤差による影響	9
6.3	(3) センサの平均感度に誤差があった場合の影響	9

1 実験の背景と目的

精密測定において、より良い正しいものを基準にした比較測定によって精度を保証することが基本となる。しかし、入手しうる基準を超えた測定精度を達成するためには、基準に頼らずに自律的に精度を向上させる技術が重要となる。実験対象とした静電容量型変位センサは、10nm より高い分解能を有する比較的安定した使いやすい変位センサであるが、分解能の限界近くでは線形誤差が無視できない程大きくなる。本実験では、変位センサの線形誤差を自律的に校正する手法について学ぶとともに、各種センサ、測定器を正しく使用するための知識の習得や比較測定と基準の関係についての理解を深めること、変位センサに含まれる線形誤差を調べることを目的とする。

2 自律校正の原理

図 1 に自律校正を行う装置校正を示す。同じセンサを 2 つ用意し、変位を与えるレバーを用意する。この時支点から z の位置に校正するセンサ B を配置し、 nz の位置に基準とするセンサ A を配置する。すると基準側の変位は被校正側の n 倍となる。

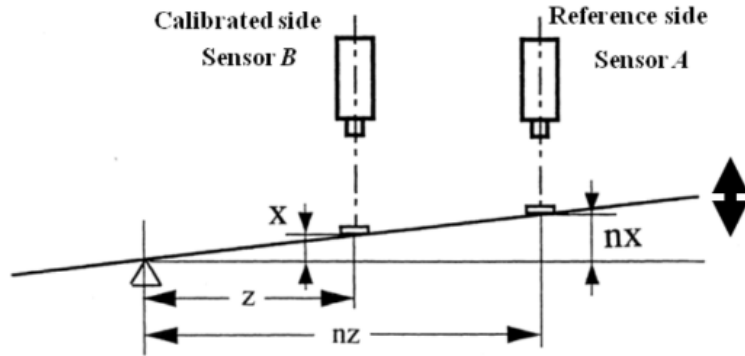


Fig.1: Autonomous calibration device configuration.

図 2 に校正の step1($n = 2$) を示す。まず基準側のセンサ A で平均感度から変位 X_{Mea} を求める。True curve を仮定すると誤差 e_{A0} は次式で求められる。

$$e_{A0} = X_{True} - X_{Mea} \quad (1)$$

次に X_{Mea} の値を用いてセンサ B の校正を行う。被校正側の変位は基準側の $1/n$ であるから誤差 e_{B1} は次式で求められる。ここで変位が基準側の $1/n$ になることから、レバー

を動かすことで基準側では n 回の測定を行うことになる.

$$e_{B1} = \frac{X_{True}}{n} - \frac{X_{Mea}}{n} = \frac{e_{A0}}{n} \quad (2)$$

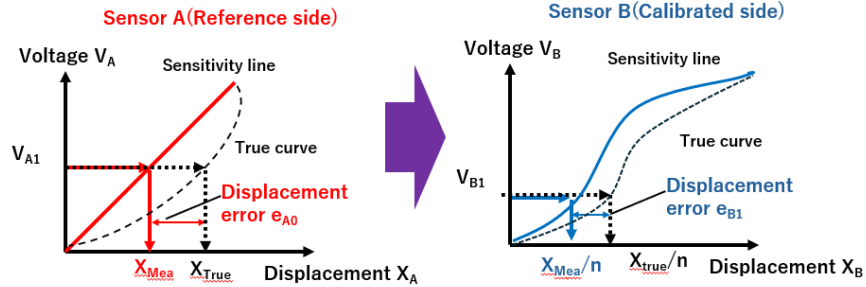


Fig.2: Calibration of sensor B by sensor A(step1).

図 3 に校正の step2($n = 3$) を示す. センサ A と B の位置を入れ替え, センサ B を基準側とする. センサ B の校正曲線から誤差は式 (2) で求められる. 次にセンサ B の X_{Mea} を用いて, センサ A の校正を行う. 誤差 e_{A2} は次式で求められる.

$$e_{A2} = \frac{X_{True}}{n} - \frac{X_{Mea}}{n} = \frac{e_{B1}}{n} = \frac{e_{A0}}{n^2} \quad (3)$$

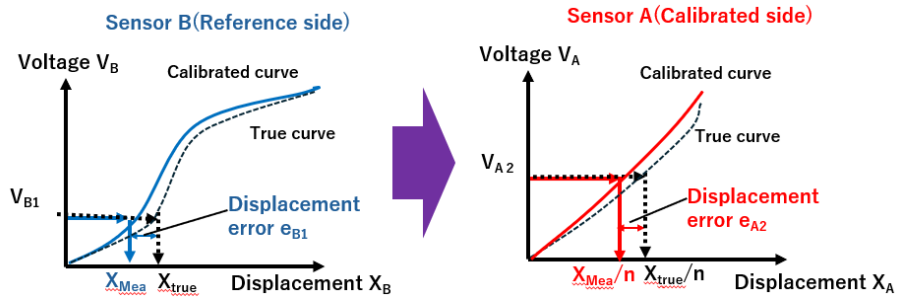


Fig.3: Calibration of sensor A by sensor B(step2).

以上の手順を k 回繰り返すと, 誤差 e_{Ak-1} , e_{Bk} は次式で求められる.

$$e_{Ak-1} = \frac{e_{A0}}{n^{k-1}} \quad (4)$$

$$e_{Bk} = \frac{e_{A0}}{n^k} \quad (5)$$

このように k が大きくするにつれて誤差が小さくなっていることが分かる. これが自律校正の原理である.

3 実験装置

図4に変位センサとレバー系からなる実験装置の概略を示す．校正しようとする2本の変位センサはそれぞれ一軸ステージ1, 2に載せられる．ステージを動かすことによって，変位センサのレバーに対する位置が調整できる．またレバーはマイクロメータヘッド3によって駆動される．なお，それぞれのステージやマイクロメータヘッドは手動で操作した．

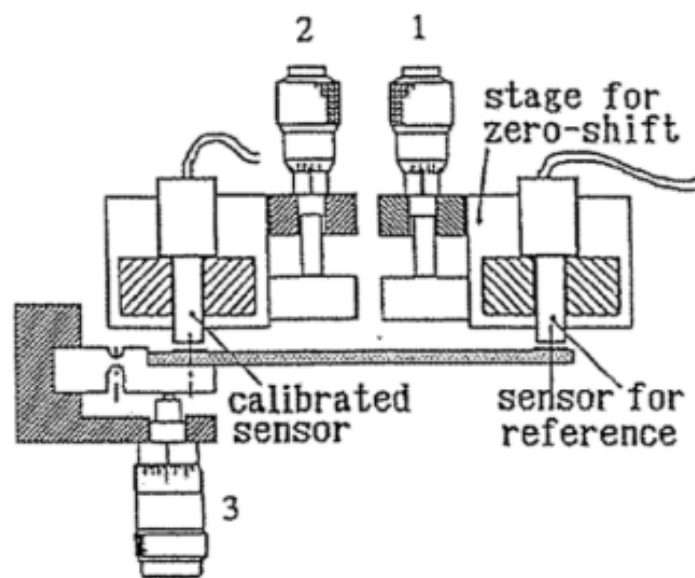


Fig.4: Schematic diagram of experimental apparatus.

4 実験方法

4.1 ノイズレベル及びドリフトの測定

ノイズレベルはシステムの分解能の限界と深く関係があり，実験中のドリフト量は測定結果の不確かさに影響する．そこで自律校正実験に先立ち，ノイズレベルとドリフト量を測定した．また，温度の影響を見るためにセンサ近傍の温度変化も同時に記録した．

4.2 自律校正実験

100 μm の測定範囲を持つ静電容量型変位センサの校正曲線を、2 μm ごと、50 点で表現した。実験装置にてこの倍率は $n = 5$ である。まず、センサ A を基準にセンサ B の校正を行い、つぎにセンサ B を基準にセンサ A の校正を行った。

自律校正実験は以下の手順で行った。

1. センサ A が基準側にセンサ B が被校正側にセットされていることを確認した。
2. 基準側、被校正側の変位センサの読みが-9.5 になるようにステージ 1, 2 を動かしした。
3. その後、マイクロメータヘッド 3 を回し、はりに曲げを与えてゆく。基準側変位センサ出力電圧を-8, -6, \dots , +8, +9.5V と 2V ずつ変化させ、その度に「測定ボタン」をクリックし、被校正側と基準センサの出力を同時に取り込んだ。ただし、最後ははりとセンサの衝突を防ぐため、+9.5V とした。
4. 基準側のセンサが 9.5V に達したら基準側ステージ 1 を用いてはりから離す向きに動かし、基準側センサの出力電圧を最小値 (-9.5V) まで戻した。調整が終わったら「測定ボタン」を押した。
5. 被校正側の全範囲にわたる読みを取るまで、(2)-(4) を繰り返す。なお、変位センサ A の読みから変位を求めるには分かっている校正曲線を使った。
6. 次にセンサの位置を入れ替えた。センサ B を基準側に、センサ A を被校正側に配置した。
7. センサを入れ替えた直後は出力が安定しないため、安定性を確認するためドリフト測定を行った。
8. (2)-(5) を繰り返した。

4.3 自律校正計算

このプログラムでは (1)-(8) プロセスを、実際にデータを取ることなく、計算だけで繰り返した。すなわち、得られた校正曲線を使って、一つ前に得られた校正曲線の横軸 (入力値) の値を修正して、新しい校正曲線を得る。この新しい校正曲線をまた、前の校正曲線の横軸の修正に使う。線形誤差が収束するまでこの修正を繰り返した。自律校正計算は以下の手順で行った。

1. デスクトップにあるショートカット (自律校正演算) をダブルクリックした。
2. 自律校正演算が立ち上がったら、「実行ボタン」をクリックした。
3. 「変位センサ A ファイルパス」及び「変位センサ B ファイルパス」に自律校正実験の結果を保存したファイル名を入力した。
4. 「実験結果の表示」ボタンを押して、自律校正実験で求めた変位センサ A, 変位センサ B の校正曲線及び、線形誤差がそれぞれ表示した。
5. 切り替えスイッチが「変位センサ B の校正」を選択していることを確認した。
6. 「演算ボタン」をクリックした。
7. 変位センサ B の自律校正演算による校正曲線及び、線形誤差が表示される。
8. 切り替えスイッチをクリックし、「変位センサ A の校正」を選択した。
9. 「演算ボタン」をクリックした。
10. 線形誤差のグラフが収束してゆくことを確認した。結果が収束し、線形誤差のグラフが生じなくなるまで (5)-(9) を繰り返した。

5 実験結果と考察

基準 A による B の校正時のドリフト測定の結果を図 5 に示す。変位計 A の変位は負の方向に傾くように変化したが、変位計 B はほとんど変位していなかった。基準 B による A の校正時のドリフト測定の結果を図 6 に示す。変位計 A は変位 0.060mm/div でほぼ一定だったが、変位計 B は負の方向に傾くようなグラフとなった。

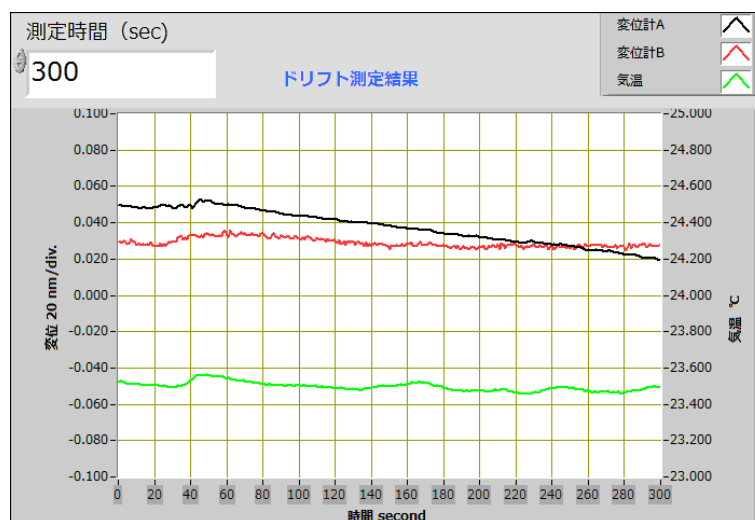


Fig.5: Temperature drift measurement results(Calibration of B with reference A).

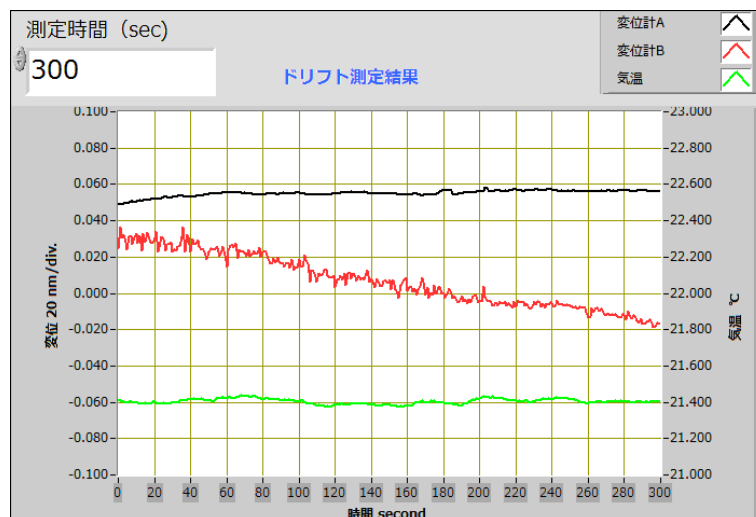


Fig.6: Temperature drift measurement results(Calibration of A with reference B).

図 7 に測定した校正曲線と室温のグラフを示す。

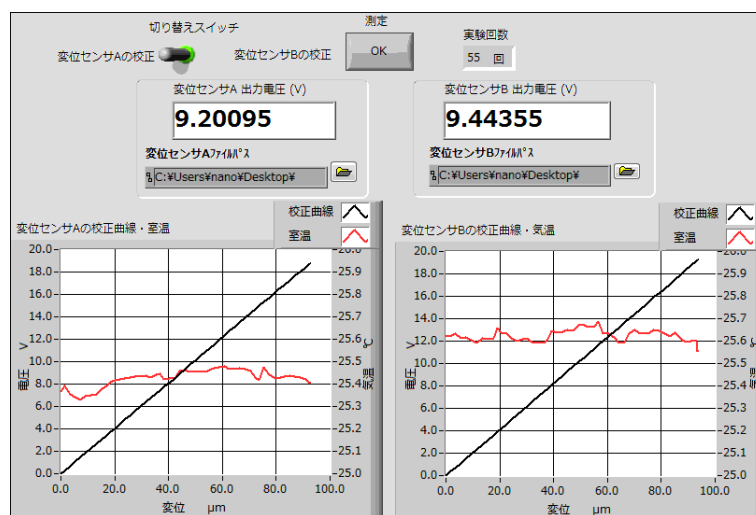


Fig.7: Calibration curve and room temperature measurement results.

図 8 には、演算により得られた校正曲線と線形誤差のグラフを示す。線形誤差はグラフが重なっており、実験で求めた結果と 5 回目の結果のみが表示されている。このことから誤差が収束しており、得られた校正曲線は有効であると考えられる。図 8 において式 (4), (5) は $k=12$, $n=5$ である。演算 5 回目の値が真の値に十分近いと考えると、演算 5 回目の線形誤差の絶対値の平均はおよそ $0.1\mu\text{m}$ であるから、期待される校正曲線の誤差は以

下のように概算できる．

$$e_{A12} = \frac{e_{A0}}{5^{12}} = \frac{0.1}{5^{12}} \approx 4.1 \times 10^{-10} [\mu m] \quad (6)$$

次に再現性について考察する． $n=5$ であるから， $20\mu m$ ごとに同じような波形が繰り返して現れるはずである．しかし，図 8 において波形にはばらつきが大きく，再現性は低いものと考えられる．再現誤差の原因としては，温度変化によるドリフトや，レバーの変形，振動，回路のノイズ，センサの値が画面上に表示されるまでの遅れ等が考えられる．演算 5 回目の線形誤差の最大絶対値はおよそ $0.2\mu m$ であることを用いて，期待される校正曲線の誤差を以下のように概算した．

$$e_{A12} = \frac{e_{A0}}{5^{12}} = \frac{0.2}{5^{12}} \approx 8.2 \times 10^{-10} [\mu m] \quad (7)$$

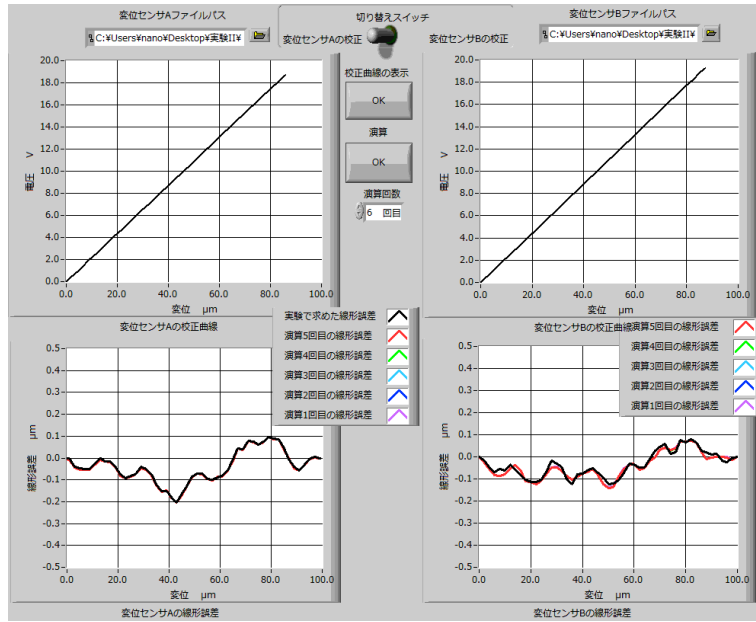


Fig.8: Graphs of calibration curves and their linear errors due to arithmetic operations.

温度の影響について考察する．図 5, 6 から温度がほぼ一定にもかかわらず，変位計の値が変化しており，最大で $0.040\mu m$ の変化がみられる．図 7 では，図 5, 6 のときよりも大きい温度変化が見られていることから，さらに大きいドリフトが生じさせていることが想定され，校正曲線の再現性・精度に影響を及ぼしていると考えられる．

6 課題

6.1 (1) 異なるセンサによる自律校正

測定範囲が異なるセンサを用いて今回の自律校正原理を用いる場合を考える．この場合でも，レバーの角度変化を調整することでそれぞれの測定範囲を補うことができ，校正原理を適用することができる．測定精度が異なるセンサを用いる場合を考えると，式 (4)，式 (5) が同様に成り立つことから，校正原理を適用することができる．

6.2 (2) レバー倍率の誤差による影響

レバー系の倍率 n に誤差 Δn があった場合の影響を考察する．式 (4)，式 (5) に Δn 考慮すると，それぞれの誤差は以下ようになる．式 (8)，式 (9) から，レバー倍率の誤差は，校正曲線の誤差の収束速度に影響を与えることが分かる．レバー倍率の誤差の影響を抑えるためには， n を大きくすることで， Δn の影響を相対的に小さくすることが有効であると考えられる．

$$e_{Ak-1} = \frac{e_{A0}}{(n + \Delta n)^{k-1}} \quad (8)$$

$$e_{Bk} = \frac{e_{A0}}{(n + \Delta n)^k} \quad (9)$$

6.3 (3) センサの平均感度に誤差があった場合の影響

まず step1 における電圧誤差 E_{A0} は次式で求められる．

$$E_{A0} = V_{TrueA} - V_{A0} = V_{TrueA} - S_A x_{Mea} \quad (10)$$

次に step2 における電圧誤差 E_{B0} は次式で求められる．

$$E_{B0} = T_{TrueB}\left(\frac{x_{Mea}}{n}\right) - S_A \frac{x_{Mea}}{n} = E_{A0} \quad (11)$$

stepk における電圧誤差 E_{Bk} は次式で求められる．

$$E_{Bk} = T_{TrueB}\left(\frac{x_{Mea}}{n}\right) - V_{Bk} = \frac{E_{A0}}{n^k} \quad (12)$$

以上から平均感度の誤差は自律校正により，減少していくことが分かる．倍率誤差は Δn の大きさが測定誤差の収束速度に影響を与えていたのに対し，平均感度の誤差は電圧誤差の収束速度が測定誤差の収束速度に影響すると考えられる．

参考文献