

ナノメートル計測学 システム創成学科BISコース

2005年5月30日, 6月6日
東京大学工学系研究科精密機械工学専攻
高増潔

ISARA - Ultra Precision CMM (IBS)

- The products you make must meet your customer's specifications exactly. But can you also measure what you make? And do you dare guarantee the results down to the very nanometre? Standard measuring equipment usually does not suffice. Especially not where it concerns objects that are difficult to measure or difficult circumstances.
- ISARA is the most accurate three-dimensional CMM available on the market. In the measurement range of 100 x 100 x 40 mm a volumetric accuracy of 30 nm is achieved.



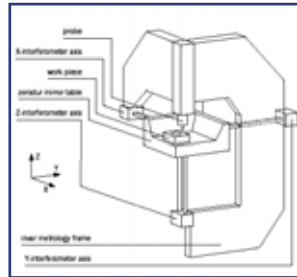
2005/5/30

ナノメートル計測工学2005年

2

Abbe principle

- To avoid parallax errors, a measuring system must be placed coaxially with the axis along which displacements are to be measured.
- This is known as the Abbe principle. In ISARA, the Abbe principle is fulfilled in all three coordinate axes over the entire measuring volume.
- This resulted in a system with a stationary probe and a moving product table. The position of this table is measured using three planemirror laser interferometers with compensation for temperature, air pressure and relative humidity.



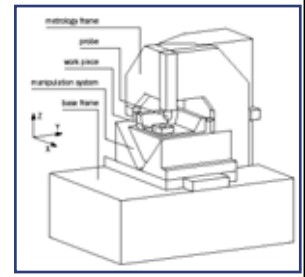
2005/5/30

ナノメートル計測工学2005年

3

Metrology and structural frame

- The requirements for the metrology and structural functions are completely different. ISARA achieves a substantial performance increase by applying different frames to perform these functions.
- While the metrology frame is optimized for positional stability of the measurement systems, the base frame handles the actuator forces. Deformations of the base frame have no influence on the measurement, due to the stress-free coupling between the two frames.



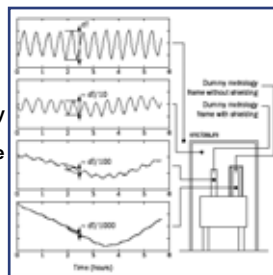
2005/5/30

ナノメートル計測工学2005年

4

Thermal sensitivity

- In general, thermal effects are one of the largest sources of non-repeatability in measuring machine accuracy. ISARA minimizes these effects by making use of the low-expansion materials Zerodur® and Invar® for the mirror table and the metrology frame.
- The measurement area is covered with an enclosure to minimize heat input from the environment of the machine (e.g. operators). A specially coated aluminum shielding filters out fast temperature changes before they can reach the metrology frame. Thanks to this optimized design, ISARA is able to reduce its thermal sensitivity to the nanometer level.



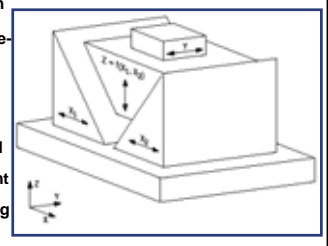
2005/5/30

ナノメートル計測工学2005年

5

Positioning accuracy

- The unique measuring principle of ISARA, where both the position of the product table and the probe deflections are measured with nanometer level accuracy, imposes relatively low positioning accuracy requirements on the product table. However, to ensure that a wide range of probes can be used with the system, ISARA still has sub-micron positioning capabilities.
- The dynamic behavior of the wedge-shaped stage design (patent pending) is superior to that of conventionally stacked designs, making it possible to achieve high servo bandwidths. To protect our delicate probes, the system will always stop within 10 μm at normal measuring speeds (1 mm/s). A special gravity compensator (patent pending) drastically decreases the power dissipation of the positioning table to less than 0,1 W per axis.



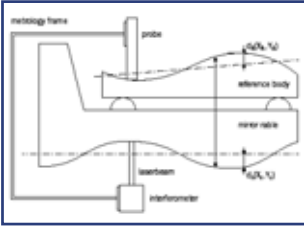
2005/5/30

ナノメートル計測工学2005年

6

Calibration

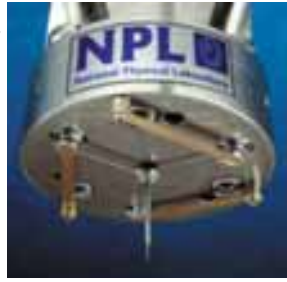
- A very important design aspect of ISARA is the ability to calibrate the metrology loop using the machine itself. Since the Abbe principle is fulfilled for all axes, geometric calibration only concerns the shape of the mirror table (flatness deviation and out-of-squareness).
- This is performed with a well-known reference body. All sensors and other measuring systems used in ISARA are calibrated and traceable to well-known international standards.



2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 7

Probe 1

- Three ultra precision capacitance probes are integrated into the probe body, used for determining the displacement of the aluminium discs connected to leafsprings holding the stylus. By using rigid body kinematics, the displacement of the stylus ball is computed from these three sensor readings.
- Typical characteristics of this probing system are:
 - Simple design
 - Low moving mass
 - Capacitance sensors
 - Isotropic stiffness in X, Y and Z
- This probe has been realised in collaboration with: National Physical Laboratory (NPL), Teddington, UK.



2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 8

Probe 2

- The suspension of the probing body is realised with 3 leafsprings, each containing 4 piezo-resistive strain gauges arranged in a Wheatstone bridge configuration. The change in resistance of these three bridges is a measure for the stylus ball displacement of the probe.
- Typical characteristics of this probing system are:
 - Small size
 - Extreme light weight: 20 mg.
 - Long term stability
- This probe has been developed with the section Precision Engineering of Eindhoven University of Technology, the Netherlands.



2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 9

ISARA Specifications

- Measuring volume 100 x 100 x 40 mm
- Maximum product mass 6 kg
- Machine measuring uncertainty
 - X & Y axis U1 = 15 nm
 - Z axis U1 = 25 nm
 - Volumetric U3 = 30 nm
- Main dimensions
 - Measuring machine
 - enclosure down 1100 x 1100 x 1700 mm
 - enclosure up 1100 x 1100 x 2200 mm
 - Control cabinet 550 x 800 x 1250 mm
 - Machine mass 800 kg

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 10

Probe

- Probe 1**
 - Stylus length 15 mm
 - Stylus ball diameter 300 µm
 - Measuring range XY: +/-20 µm, Z: -20 µm
 - Typical measuring force 0,2 mN
 - Resolution 3 nm
- Probe 2**
 - Stylus length 8 mm
 - Stylus ball diameter 500 µm
 - Measuring range 25 µm
 - Typical measuring force < 1 mN
 - Resolution 1 nm

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 11

測定の不確かさ

- 測定の不確かさ
- 不確かさの推定方法

不確かさが無いと？

- 測定の不確かさは、測定機の不確かさではない。
 - 測定機の不確かさは、測定の不確かさの1つの要素である。
 - いい測定機を使っても、環境が悪かったり、測定者が悪かったりすると、測定の不確かさは大きくなる。
- 測定結果に不確かさが無いと。
 - 測定結果 10.256 mm でも、測定方法や測定者を知らないと、
 - 10.256 mm ± 0.03 mm か
 - 10.256 mm ± 0.2 mm か
 - 10.256 mm ± 5 mm か分からない。

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 13

不確かさを含んだ判断

- 試験の成績
 - 採点の不確かさ ± 10点
 - 合格の基準 70点以上
- 合否の判断
 - 70点の学生も本当は50%は不合格である。
 - やさしい判断をした場合の責任は誰が取るのか？

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 14

測定の不確かさ

- 測定の結果に付随した、合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴付けるパラメータ。
 - 普通、±標準偏差×2を用いる。
 - 測定結果は最良の推定値になっていること。
 - 偶然的な効果および系統的な効果によるばらつきを含む。
- ある測定量の真の値が存在する範囲を示す推定値(古い表現)
 - 真の値が95%存在すると推定する範囲。
- 正規分布(ガウス分布)
 - ±標準偏差: 68%
 - ±標準偏差×2: 95%
 - ±標準偏差×3: 99.7%

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 15

不確かさの解析手順

- 測定・校正の手段を記述する。
- 数学モデルを構築する。
 - 式を書く、要因を列挙する、実験計画法を用いる。
- 測定値を補正する。
- 不確かさの成分を分析する。
 - AタイプとBタイプ、それぞれの大きさ、独立しているか。
- 合成標準不確かさの計算
 - $u_c = (u_i^2)^{1/2}$
- 拡張不確かさの計算
 - $U = k u_c$ (普通は $k = 2$)

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

$$U = k u_c \quad (k = 2)$$

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 16

不確かさの成分の大きさ

- Aタイプ
 - 統計的方法によって見積もる。
 - 独立な測定を n 回行い、標準偏差 s を求める。
 - $s^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)$
- Bタイプ
 - 統計的方法以外の方法によって見積もる。
 - 従来の技術情報による。
 - 今までの実験データ
 - 測定試料や計測器に関する知識・経験
 - 計測器の性能、仕様
 - 校正証明書や成績書記載のデータ
 - 引用したデータや定数の不確かさ

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 17

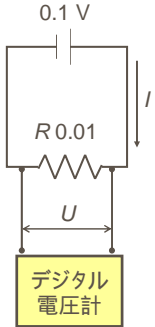
校正データの使い方

- 不確かさが書いてある場合
 - 拡張不確かさなら k で割れば標準偏差が求まる (k のデフォルトは2)
 - 標準偏差で示す場合もあるその値が標準偏差
- 範囲で書いてある場合
 - その範囲で分布が一樣ならルート3(1.73)で割れば標準偏差が求まる。
- 比率(%)で書いてある場合
 - 使用する値に比率をかけてからルート3で割る
- 一樣分布(矩形分布)
 - $s^2 = \int_{-a}^{+a} \frac{1}{2a} (x-0)^2 dx$
 - $= \frac{1}{2a} \int_{-a}^{+a} x^2 dx$
 - $= \frac{1}{2a} \left[\frac{x^3}{3} \right]_{-a}^{+a} = \frac{a^2}{3}$

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 18

電流測定(1)

- 測定回路
 - 電流*I* (約10A)を抵抗*R*(公称0.01 ;測定値0.001018)に流し、電圧降下*U*をデジタル電圧計で測定する。
 - DVMの入力抵抗は 10^9 以上、漏れ電流の補正は無視できる。
 - 測定量と入力量の関係
 $I = U/R$
- タイプAの不確かさ
 - 測定の繰り返しの不確かさ $S_{x_1}^2$
12回の測定で*U*の平均値と分散
平均: 100.03 mV
分散: 8.1×10^{-10} (V²) 標準偏差 0.028 mV



2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 19

電流測定(2)

- タイプBの不確かさ
 - DVMの誤差(メーカーの仕様) $S_{y_2}^2$
100 mVで0.045%なので、矩形分布を仮定して
 $1/3 \times (4.5 \times 10^{-5})^2$
分散: 6.75×10^{-10} (V²) 標準偏差 0.026 mV
 - 抵抗器*R*の校正値(購入時の校正表) $S_{y_3}^2$
測定の相対不確かさが 6×10^{-4} ($k=2$)なので
 $(0.01 \times 1/2 \times 6 \times 10^{-4})^2$
分散: 9×10^{-12} (Ω²) 標準偏差 3 μ
 - 温度の影響
DVMは補正されている。
抵抗器の温度による変化は無視できる。

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 20

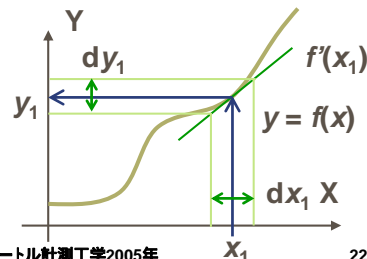
電流測定(3)

- 結果
 - 測定結果
 $I = U/R = 0.10003/0.010018 = 9.985$ A
 - 偏微分係数の計算
 $dI/dU = 1/R$
 $dI/dR = U/R^2$
 - 合成標準不確かさ u_c
 $u_c^2 = (1/R)^2 \times (S_{x_1}^2 + S_{x_2}^2) + (U/R^2)^2 \times (S_{x_3}^2)$
 $= 24.6 \times 10^{-6}$ (A²)
 $u_c = 5 \times 10^{-3}$ (A)
 - 拡張不確かさ u
 $u = 2 \times u_c = 0.01$ (A)
 - 測定結果の表現
9.985 ± 0.01 A

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 21

誤差の伝播(1)

- 測定モデルの関係
 - パラメータ *x* と測定結果 *y* の関係
 $y = f(x)$
 - パラメータが x_1 のときの誤差 dx_1 は、測定結果 y_1 に対して、 dy_1 の誤差となる。
 - $dy_1 = f'(x_1) dx_1$



2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 22

誤差の伝播(2)

- 誤差とその分散
 - 誤差は正負により打ち消しあったりする。
 - 分散(標準偏差の二乗)はそれぞれの誤差の二乗和で計算できる。
 - 互いに独立な場合
 - 独立でない場合は共分散を考慮する必要がある

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots)$$

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} dx_3 + \dots$$

$$s_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 s_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 s_{x_3}^2 + \dots$$

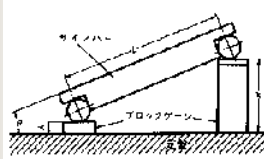

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 23

誤差の伝播(3)

- 簡単な例
 - 誤差 3 μm と誤差 4 μm のブロックゲージを2つくっつけると; 誤差は 5 μm
 - サインパー

$$L \sin \alpha = H - h = E$$

$$\alpha = f(E, L) = \arcsin\left(\frac{E}{L}\right)$$

$$s_\alpha^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial E}\right)^2 s_E^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 s_L^2$$



2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 24

誤差の伝播(4)

- サインバーの誤差
 - EとLの誤差比が定数の場合,
 - tan α が大きいと誤差が大きくなる.
 - α が45° 以下で使う.

$$s_\alpha^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial E}\right)^2 s_E^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 s_L^2$$

$$= \left(\frac{\partial \arcsin\left(\frac{E}{L}\right)}{\partial E}\right)^2 s_E^2 + \left(\frac{\partial \arcsin\left(\frac{E}{L}\right)}{\partial L}\right)^2 s_L^2$$

$$= \left(\frac{1}{L \cos \alpha}\right)^2 s_E^2 + \left(\frac{E}{L^2 \cos \alpha}\right)^2 s_L^2$$

$$= \left(\frac{\sin \alpha}{E \cos \alpha}\right)^2 s_E^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{L \cos \alpha}\right)^2 s_L^2$$

$$= \tan^2 \alpha \left(\left(\frac{s_E}{E}\right)^2 + \left(\frac{s_L}{L}\right)^2 \right)$$

$$y = \arcsin x$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{1}{\cos y} = \frac{\pm 1}{\sqrt{1-x^2}}$$

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 25

誤差の伝播(5)

- 積で表されるとき
 - 測定値 y が n 個の測定値 x_1, x_2, \dots, x_n のべき乗の積で表されるとき
 - それぞれの測定値の誤差の標準偏差 $s_{x_1}, s_{x_2}, \dots, s_{x_n}$ とし
 - べき乗を p_1, p_2, \dots, p_n とする.

$$y = x_1^{p_1} \cdot x_2^{p_2} \cdot \dots \cdot x_n^{p_n}$$

$$s_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 s_{x_2}^2 + \dots$$

$$= (p_1 x_1^{p_1-1} \cdot x_2^{p_2} \cdot \dots \cdot x_n^{p_n})^2 s_{x_1}^2 + \dots$$

$$= \left(\frac{p_1 y}{x_1}\right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{p_2 y}{x_2}\right)^2 s_{x_2}^2 + \dots$$

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 26

ノギスによる測定の不確かさ(1)

- 測定条件
 - 測定最大長が 150 mm, 最小表示値が 0.05 mm のノギスで, 公称値 50 mm の黄銅製円柱を測定.
 - 簡易空調の部屋で測定する. ノギスとワークは作業台でしばらく放置する.
- 不確かさの要因
 - ノギスの測定の不確かさ
 - 温度の影響による不確かさ
 - 20度からの温度偏差(20度から26度で測定)
 - 熱膨張係数の差の不確かさ(黄銅製のワーク)
 - 温度差の不確かさ(±0.2度程度)
 - ノギスの目盛の読取りによる不確かさ
 - スライダのガタによる不確かさ

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 27

ノギスによる測定の不確かさ(2)

- 不確かさの要因とその大きさ(標準偏差)
 - ノギスの測定の不確かさ
 - 規格から公差が ±0.05 mm なので, 0.029 mm. Bタイプ
 - 温度の影響による不確かさ
 - 式を立てて計算する. Bタイプ
 - 普通の環境では, 0.001 mm 以下で影響しない.
 - ノギスの目盛の読取りによる不確かさ
 - 実験結果では, 0.015 mm. Aタイプ
 - スライダのガタによる不確かさ
 - 角度を仮定すると, 0.005 mm. Bタイプ
- 合成標準不確かさ
 - 全て独立として, 二乗和を取ると, 0.033 mm
- 拡張不確かさ
 - $k = 2$ とすると, $U = \pm 0.07$ mm

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 28

比較測定における不確かさ

- 大部分の誤差は打ち消される.
- 不確かさの要因
 - 測定機の繰り返し, 直線性
 - 環境の要因(主に温度)
 - 標準の不確かさ(ブロックゲージ)



2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 29

長さ測定における不確かさ(まとめ)

- 比較測定をすると不確かさを小さくできる.
- よい環境できちんと測定すれば, 測定機器の精度および校正(校正に使った標準)が一番問題となる.
- 高精度の測定の場合は, 温度などの環境の要因が大きくなる.
 - 温度環境の変動(変動幅から温度の不確かさを求める)
 - 温度補正を行う場合は, 温度測定の不確かさと熱膨張係数の不確かさから温度補正の不確かさを求める
 - 長さ測定の標準温度は20 である.
- ISO 1 Geometrical Product Specifications (GPS) — Standard reference temperature for geometrical product specifications 1 Scope
This International Standard specifies the standard reference temperature for geometrical product specifications.
2 Standard reference temperature
The standard reference temperature for geometrical product specification is fixed at 20 .
- 複雑な測定機(ハイゲージ, 三次元測定機, 画像処理による測定機など)では, 測定戦略の影響が大きい.

2005/5/30 ナノメートル計測工学2005年 30