

ナノメートル計測学 システム創成学科BISコース

2005年7月4日
東京大学工学系研究科精密機械工学専攻
高増潔

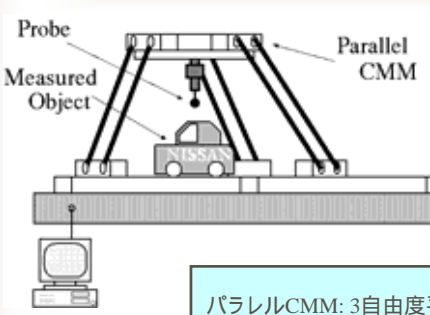
パラレルCMMの開発

ヒーハリスト



2005/7/04 3
ナノメートル計測工学2005年


パラレルCMMの基本概念



パラレルCMM: 3自由度平行移動
プローブシステム: 3自由度回転

2005/7/04 4
ナノメートル計測工学2005年

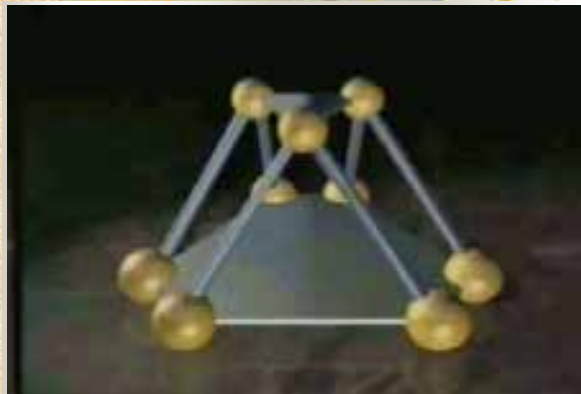
パラレルCMMの方式

	シリアル メカニズム	パラレル メカニズム
位置誤差	累積する	平均
剛性	低い	高い
質量	大きい	小さい
順運動学	簡単	難しい
逆運動学	難しい	簡単

2005/7/04 5
ナノメートル計測工学2005年

Hexapod



2005/7/04 6
ナノメートル計測工学2005年

三自由度パラレルCMMの概念

- xyz 三自由度機構
- リニアアクチュエータを土台に設置する
- パラレルクランク機構を用いる

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 7

Prototype 1とPrototype 2

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 8

磁気球面軸受の構造

3点指示 → ガタがない
 回転誤差 → 球の真球度による

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 9

Prototype of Parallel-CMM

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 10

パラレルCMMの機構解析

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 11

パラレルCMMの校正

Maximum error: 500 μm x 50
 Maximum error: 7 μm x 3000

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 12

Parallel Micro Milling Machine

- 3DOF Parallel Mechanism
 - Size: 100 mm x 100 mm x 100 mm
 - Resolution: 0.1 μm
 - Machining Range: 10 x 10 x 5 mm

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 13

小型パラレルミリングマシン

- 3自由度パラレルメカニズム
 - 100 mm 程度の大きさ
 - 0.1 μm 分解能
 - 加工範囲 10 mm x 10 mm x 5 mm 程度

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 14

Prototype of Parallel Milling Machine

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 15

Parallel Using 2D Linear Motor

Item	Value
Size of platen (mm)	900x900
Size of slider (mm)	L80xW80xH28
Maximum velocity	0.25m/s
Positioning accuracy	50μm

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 16

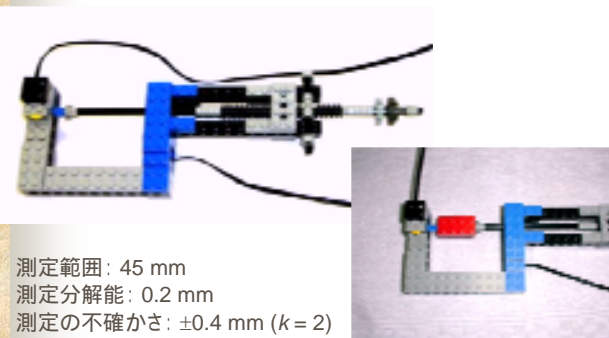
Cooperation by 3 Moving Trays

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 17

レゴを使った測定機の プロトタイプング

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 18

レゴマイクロメータ



測定範囲: 45 mm
 測定分解能: 0.2 mm
 測定の不確かさ: ± 0.4 mm ($k = 2$)

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 19

レゴ真球度測定機レゴミラースキャナー



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 20

レゴパラレルCMM



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 21

三次元測定機の測定の不確かさ



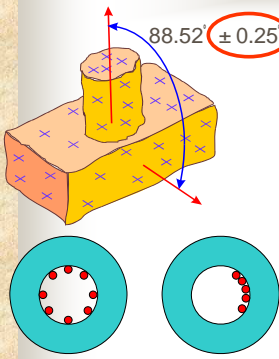
測定の不確かさ

- 測定の不確かさの分からない測定機はただの家具である。(Dr. Sartori)



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 23

座標計測における不確かさ



- 1点測定の不確かさ, 寸法測定の不確かさ
- 複雑な測定による測定結果の不確かさは, どのような関係か?
- 測定戦略の違い:
 同じ測定機, プロービングシステムで同じ測定物を測定しても不確かさは同じではない.

均等に8点で測定 一部を5点で測定

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 24

測定戦略の違い

- 同じ測定機で同じ測定物を測定しても、測定の不確かさは異なる

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 25

まとめ

- 機械産業で三次元測定機(CMM)は、重要で、不可欠な測定機である。
- 測定機は、必ず測定の不確かさを評価しなくてはならない。
- CMMは構造が複雑で、複数の点により計算によって測定結果を求めるため、測定の不確かさ評価が難しい。
- CMMの新しい不確かさ評価技術を確立し、ISO規格として普及させる。 パーチャルCMMの考え方をを用いる

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 26

校正用アーティファクト1次元

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 27

校正用アーティファクト2次元

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 28

校正用アーティファクト3次元

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 29

Zeiss校正

[Back](#)

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 30

ISO活動状況

ISO/TC 213: 製品の幾何特性仕様(GPS)
ISO/TC 213/WG 10: 三次元測定機

GPS


- 製品の幾何特性仕様 (Geometrical Product Specification)
- <http://www.ds.dk/isotc213/index.htm>



2005/7/04 ナノメートル計測工学

ISO/TC 213

- ISO/TC 213「製品の幾何特性仕様(GPS: Geometrical Product Specifications)」
 - 機械産業における、製品のマクロ、マイクロな幾何特性(寸法、幾何公差、表面)、測定機器、校正手法などに関する規格を担当している。
 - 測定の不確かさの概念に基づく、グローバル生産システムへの適応を目指している。
 - WG 10が三次元測定機に関連する規格を担当している。



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 33

ISO/TC 213の構成

- ADVISORY GROUPS
 - AG 1 Strategic planning
 - AG 2 Final auditing standards team
 - AG 11 Underlying global concepts
- WORKING GROUPS
 - WG 2 Datums and datums systems
 - WG 4 Uncertainty
 - WG 6 General requirements for GPS-measuring equipment
 - WG 7 ISO/DIS 2692
 - WG 9 Dimensional and geometrical tolerancing for castings
 - WG 10 Coordinate measuring machines
 - WG 12 Size
 - WG 14 Vertical GPS principles
 - WG 15 GPS extraction and filtration techniques
 - WG 16 Areal and profile surface texture
 - WG 17 Facilitation of GPS implementation

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 34


GPSの主な規格

- ISO/TR 14638:1995, GPS - Masterplan
- ISO 14253, GPS - Inspection by measurement of workpieces and measuring instruments -
 - Part 1: Decision rules for proving conformance...
 - Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS ..
 - Part 3: Procedures for evaluating the integrity of uncertainty ...
- ISO 14660, GPS - Geometrical features -
 - Part 1: General terms and definitions
 - Part 2: Extracted median line of a cylinder ...
- ISO/TS 17450, GPS - General concepts -
 - Part 1: Model for geometric specification ...
 - Part 2: Operators and uncertainties
- ISO/CD 14978, GPS - General concepts and requirement for GPS measurement equipment

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 35

CMMのための規格(ISO TC 213/WG 10)

- ISO 10360 Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)
- JIS B 7440 製品の幾何特性仕様(GPS) - 座標測定機(CMM)の受入検査及び定期検査
- ISO 15530 Geometrical product specifications (GPS) - Coordinate measuring machines (CMM); Techniques for determining the uncertainty of measurement



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 36

ISO 10360

- JIS B 7440 (2002, 2003) 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 座標測定機 (CMM) の受入検査及び定期検査
 - 第1部: 用語
 - 第2部: 寸法測定
 - 第3部: ロータリテーブル付き座標測定機
 - 第4部: スキャンニング測定
 - 第5部: マルチスタイラス測定
 - 第6部: ソフトウェア検査

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 37

Part 2

- ステップゲージを両方向測定する
 - 7箇所
 - 5種類の長さ
 - 3回づつ
 - MPE_E
- プローブのテスト
 - 25点測定

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 38

ロータリテーブル

- 2つの球を測定
 - 範囲に入っているか?

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 39

スキャンニング測定, マルチスタイラス測定

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 40

ISO 15530シリーズ

- その測定の不確かさを評価するISO 15530シリーズの規格化が重要な意味を持つ。
- ISO 15530シリーズは以下の6つの部から構成されている。
 - 15530-1: 用語 (Terms)
 - 15530-2: エキスパートによる判断 (Expert Judgment)
 - 15530-3: 比較測定による手法 (Substitution Method)
 - 15530-4: シミュレーションによる手法 (Simulation Method)
 - 15530-5: 経験的な予想 (Historical Estimation)
 - 15530-6: 校正されていない測定物を利用した手法 (Estimation using Uncalibrated objects)

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 41

ISO 15530-4

- 計算機シミュレーションにより測定の不確かさを推定する手法で、最も有力な手法と見なされている。
- ISO 15530の第4部の活動は1999年に開始され、2000年よりタスクフォースのグループが作られた
 - Dr. Shakarji (NIST: 米国標準研究所)
 - Dr. Schwenke (PTB: ドイツ標準研究所)
 - Prof. Takamasu (東京大学)
- ISO/TC 213/WG 10において、以下のドラフトが議論されている。
 - N409: ミラノ, 2000年9月
 - N426: ボルドー, 2001年1月
 - N454, N479: マドリッド, 2002年2月
 - N498, N499: オタワ, 2002年9月

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 42

座標計測における測定の不確かさのまとめ

- GUMとGPSに従う新しい規格体系を作っている.
- CMMはGPSにおけるキーとなる測定機である.
- 測定の不確かさはトレーサビリティを確保するのに不可欠である.
- 座標計測における測定の不確かさの推定は、国際的な貿易、機械工業などに不可欠な技術である.

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 43

バーチャルCMMの考え方

- バーチャルCMMの考え方
- バーチャルCMMの基本構成
- バーチャルCMMの課題とその対応

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 44

バーチャルCMMの基本的な考え方

- 誤差モデル
 - CMM本体の誤差モデル
 - プロービングシステムの誤差モデル
 - 環境の影響
- 測定戦略の影響
 - 実際の測定に対して、誤差モデルを適用
 - モンテカルロシミュレーション

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 45

不確かさの要因

- 三次元測定機本体の誤差
 - 幾何的な誤差, 繰り返し誤差
 - スケールの分解能
- プロービングシステムの誤差
 - 繰り返し誤差
- 環境の誤差
 - 温度の影響
 - 振動の影響
- 測定物
 - 固定方法, ハンドリング
 - 表面粗さ, 形状誤差
- 測定戦略

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 46

バーチャルCMMの基本構成と課題

CMM本体 測定戦略 不確かさの推定 標準化

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 47

バーチャルCMMにおける課題への対応

CMM本体の評価方法

- アーティファクトを用いた評価
- ホールプレートを実験用として提案
- アーティファクトの値付け

測定戦略の評価方法

- モンテカルロシミュレーションによる方法を提案
- 実際にソフトウェアを実装して評価

不確かさの推定の評価

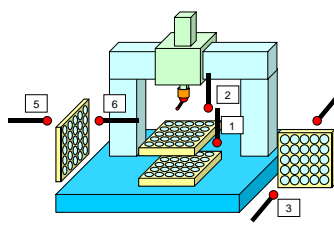
- 測定物を測定して評価する
- シリンダゲージ, 実際の測定物を測定する

標準化が必要

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 48

ボール/ホールプレート法

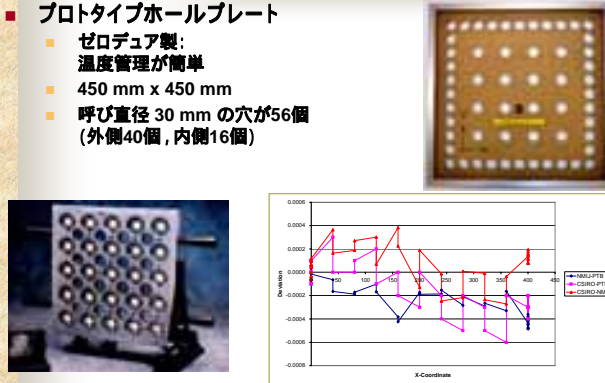
- ボール/ホールプレート法
 - 4つのボール/ホールプレートの位置: 6つの測定
 - 21のCMMの幾何誤差をソフトウェアで計算する
- 課題
 - アーティファクトの値付け: どの機関でも高精度で値付けられるか
 - ランドロビン計測
 - 値付けの方法の開発
 - レーザ干渉計付CMM



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 49

プロトタイプホールプレートの値付け

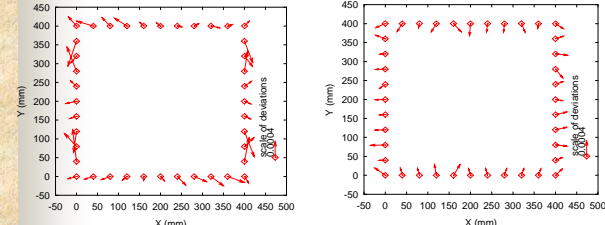
- プロトタイプホールプレート
 - ゼロデュア製: 温度管理が簡単
 - 450 mm x 450 mm
 - 呼び直径 30 mm の穴が56個 (外側40個, 内側16個)



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 50

NMLとPTBおよびNMIJとPTBの測定結果


- ランドロビン実験
 - NMLとPTBの測定結果の差は, 1.2 μm以内である.
 - NMIJとPTBの測定結果の差は, 0.5 μm以内である.
 - NMIJとPTBの測定結果の差は, X軸およびY軸におけるスケールの係数の違いのためと考えられる.



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 51

レーザ干渉計付CMM


- 2つのステップの校正
 - CMMによってボールの幾何学パターンが測定
 - ブロックゲージ/レーザ測長機で長さ標準を移す: 温度条件をそれほど考慮しなくてもよい
- 長さ標準
 - PTB, NMIJなどの研究所のみがレーザ干渉計を利用
 - レーザ干渉計付CMM
 - 干渉計の鏡の位置が違う
 - 測定結果はよく一致した.



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 52

新しいホールプレートの校正

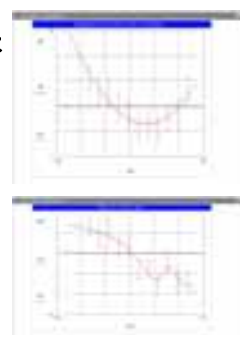
- 新しいホールプレート
 - ゼロデュア製
 - 600 mm x 600 mm
 - 44個の穴(外側のみ)
 - NMIJとPTBは, 0.01 μmで一致
 - 合成不確かさU(μm)

$$U = 2\sqrt{0.25^2 + (0.25L)^2}$$


2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 53

CMM本体の誤差評価

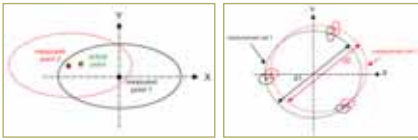
- ボール/ホールプレート法による評価
 - ホールプレートとKALKKOM(ホールプレート用ソフトウェア)を利用して, 三次元測定機本体の校正を行った.
 - 線形誤差は小さかった.
 - 回転誤差は重要である.
 - X軸のピッチング誤差: 8 μrad
 - X軸のヨーイング誤差: 5 μrad
 - Y軸のピッチング誤差: 6 μrad
 - Z軸のローリング誤差: 8 μrad
 - うまく評価できる



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 54

測定戦略の評価手法

- ソフトウェアの評価, 開発
 - Leitz社製CMM用のバーチャルCMMソフトウェア(PTBが開発)のインストールと評価
 - OzSim(NML)の開発とその理論的な評価
 - Matlabによるソフトウェア(TDU)の開発とその理論的な評価
 - 統計的な理論検証(UT)



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 55

バーチャルCMMの検証

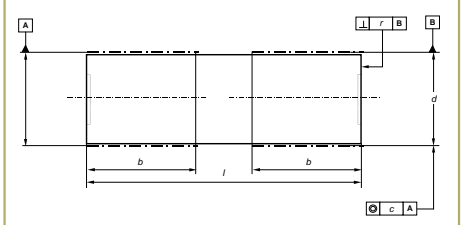
- 円筒(シリンダゲージ)を測定する(直径, 長さ, 同軸度, 直角度)
- 種々の条件(位置, プロービングシステム)における不確かさを評価



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 56

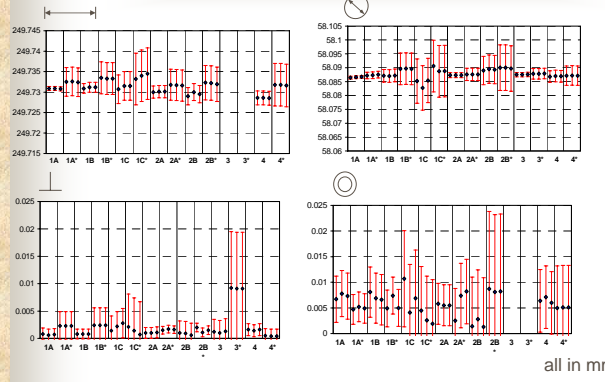
シリンダゲージの測定

- シリンダゲージ
 - 直径
 - 長さ
 - 直角度
 - 同軸度



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 57

測定の不確かさの計算結果




all in mm

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 58

実際的な測定物

- 種々のソフトウェア, 環境条件における測定の評価
 - Leitz用VCMMソフト, Matlabによるソフト(東京電機大学), OzSim(オーストラリア)
 - 真鍮と低熱膨張鋼鉄
 - ランドロビン測定を2002年から行っている.



2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 59

成績

- 成績は, 出席(50%以上が最低基準)とレポート1とレポート2
- レポート1
 - このホームページからたどると, 種々の雑誌のPDFファイルをダウンロードできる。(東大内からのみ)
 - <http://ejournal.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/>
 - 以下の2つの雑誌のどちらから, 適当な論文をダウンロードする. Nanotechnology Precision Engineering
 - 論文を読んで, 概要をA4で2~3枚にまとめる.(論文のコピーを添付すること)
- レポート2
 - トレーサビリティについて, 概要をA4で1枚にまとめる.
- 締め切り: 7月31日まで
- 提出先: 1階事務室の高増のポスト

2005/7/04 ナノメートル計測工学2005年 60