



# 精緻な幾何学モデルを基礎とした 空間精度の測定と補正 — 工作機械と産業用ロボットのケーススタディ

茨木創一 広島大学 [ibaraki@hiroshima-u.ac.jp](mailto:ibaraki@hiroshima-u.ac.jp)

Oct 11, 2019 第7回CMIシンポジウム@東京大学 生産技術研究所

# 概要



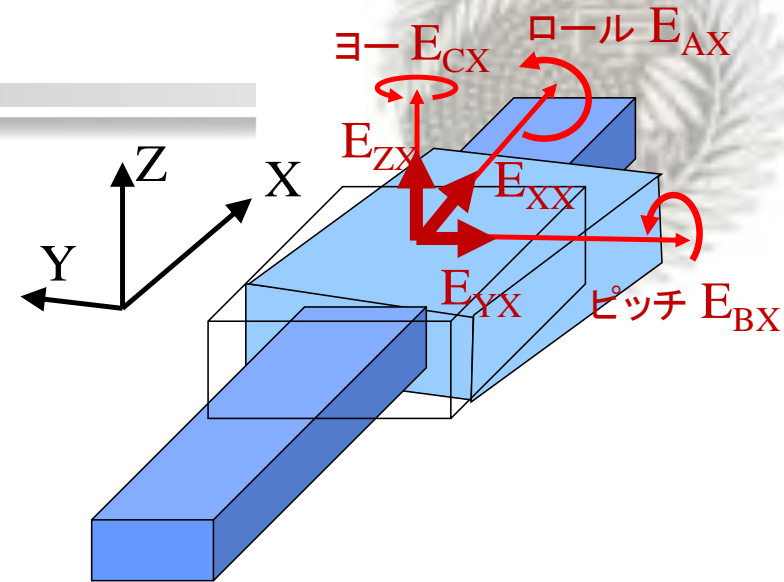
1. 工作機械の従来の精度測定と，空間精度測定の実例
2. モデルベースの誤差キャリブレーション：工作機械
3. モデルベースの誤差キャリブレーション：産業用ロボット



# 1 工作機械の従来の精度測定と、空間精度 測定の実例

# 直進軸の6つの誤差とは？

- 1つの直進軸は、3つの位置誤差、3つの姿勢誤差を持つ。



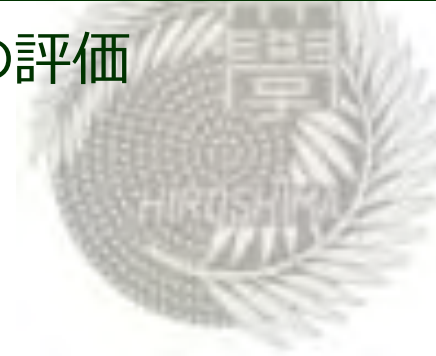
記号 [A1]	説明
$E_{XX}$	直線位置決め偏差
$E_{YX}$	真直度偏差 (Y 方向)
$E_{ZX}$	真直度偏差 (Z 方向)
$E_{AX}$	ロール (X 周り)
$E_{BX}$	ピッチ (Y 周り)
$E_{CX}$	ヨー (Z 周り)

## 誤差運動を表す記号 (ISO 230-1規格)

$E_{ZX}$

誤差の方向 (A~CはX~Z回りの姿勢誤差, X~Zは並進誤差)

どの軸の誤差か

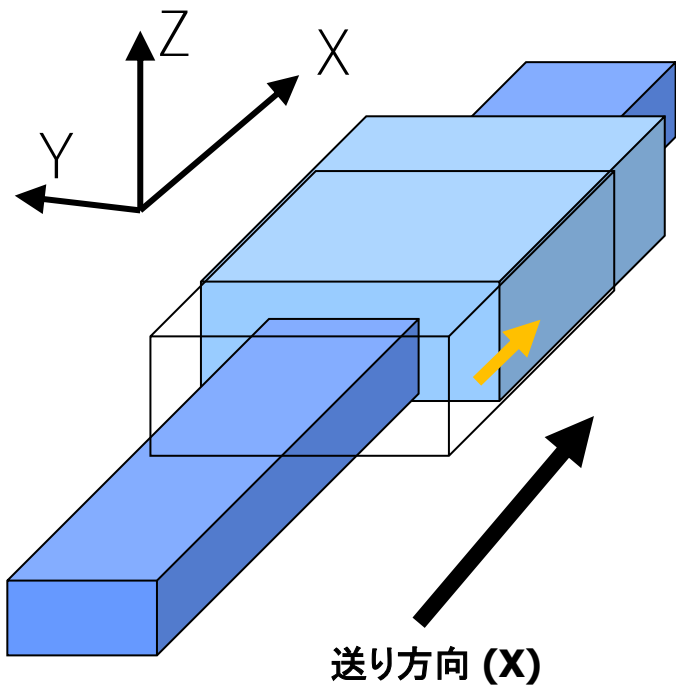


# 工作機械メーカーが行う，工作機械送り系の運動精度の評価

誤差	代表的な測定器	規格(例)
位置決め誤差	レーザ干渉計	ISO 230-2: 2006
真直度	直定規・変位センサ	ISO 10791-1: 1998
直角度	直角定規・変位センサ	ISO 10791-1: 1998
角度偏差	オートコリメータ	ISO 10791-1: 1998
輪郭運動誤差(円弧試験)	ボールバー	ISO 230-4: 2005
対角線試験	レーザ干渉計	ISO 230-2: 2006
回転軸の運動精度	アーティファクト・変位センサ	ISO 230-7: 2007
熱変位	アーティファクト・変位センサ	ISO 230-3: 2007

\* これらの試験の多くは，ISO 230-1:2012にも記述されている。

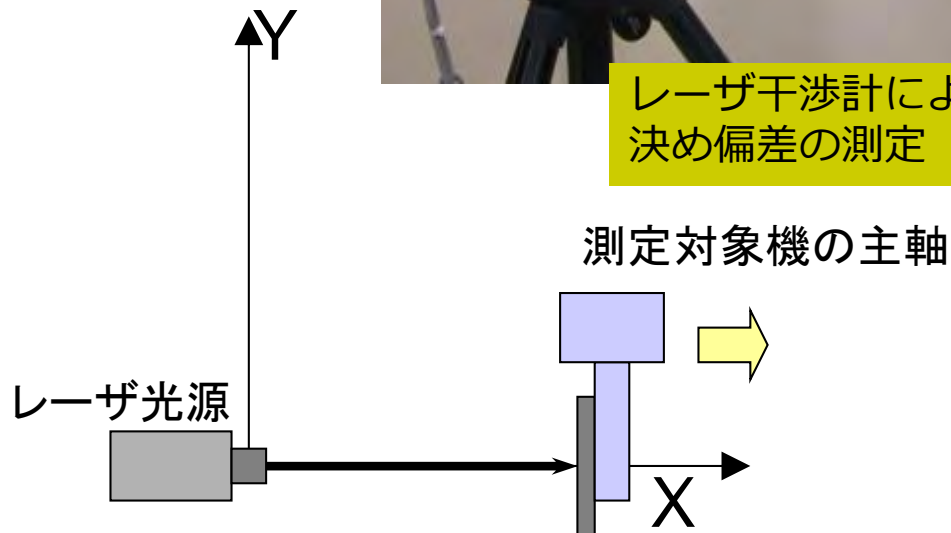
# ① 直進位置決め偏差の測定



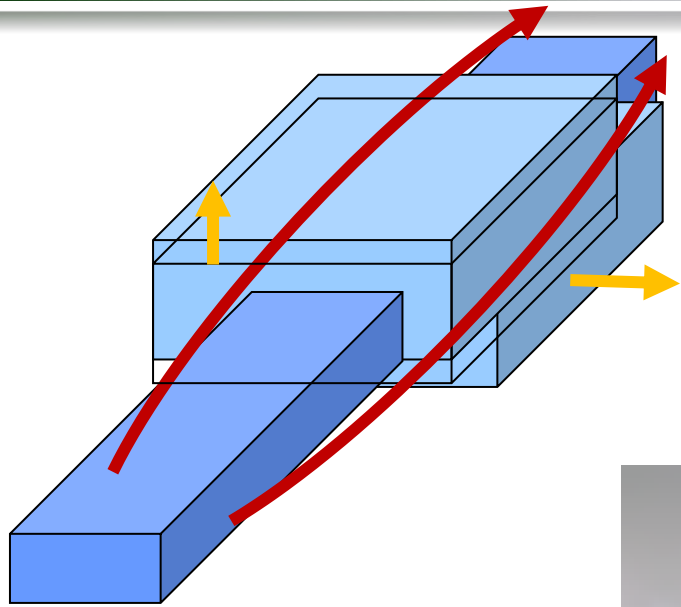
直進位置決め  
偏差  $E_{XX}$



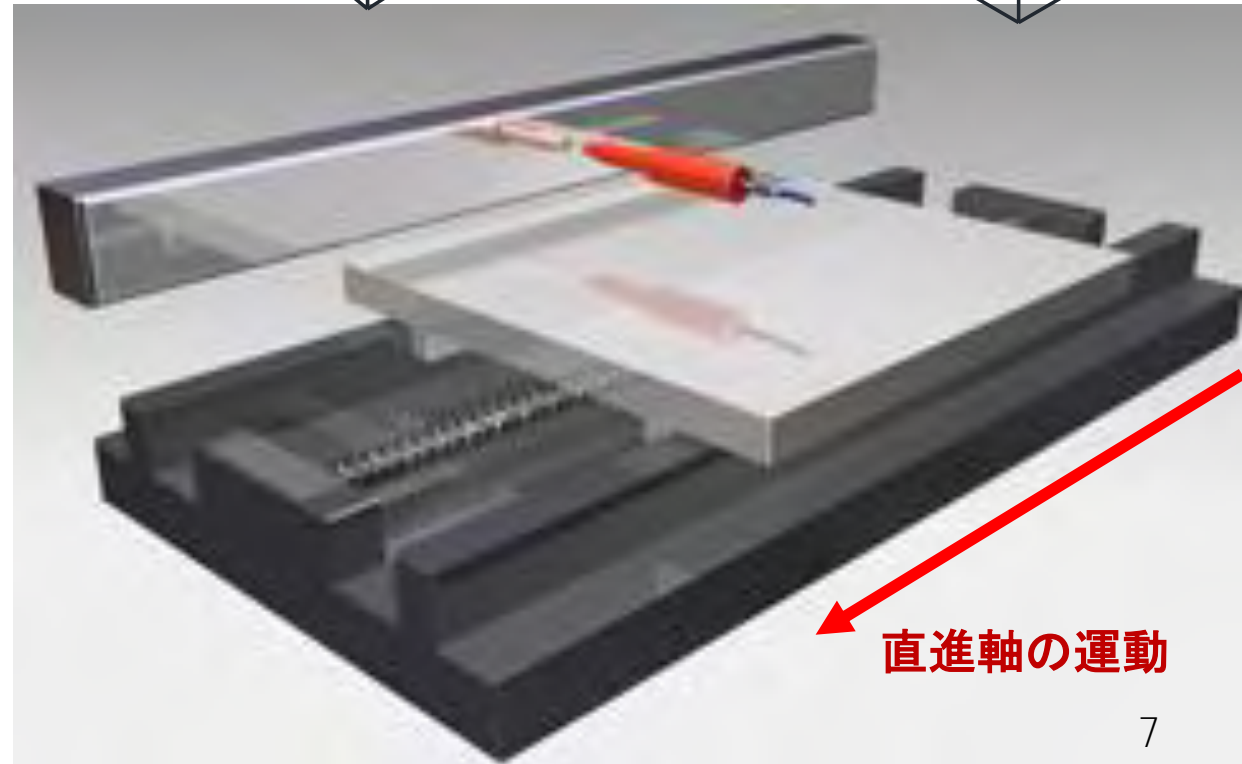
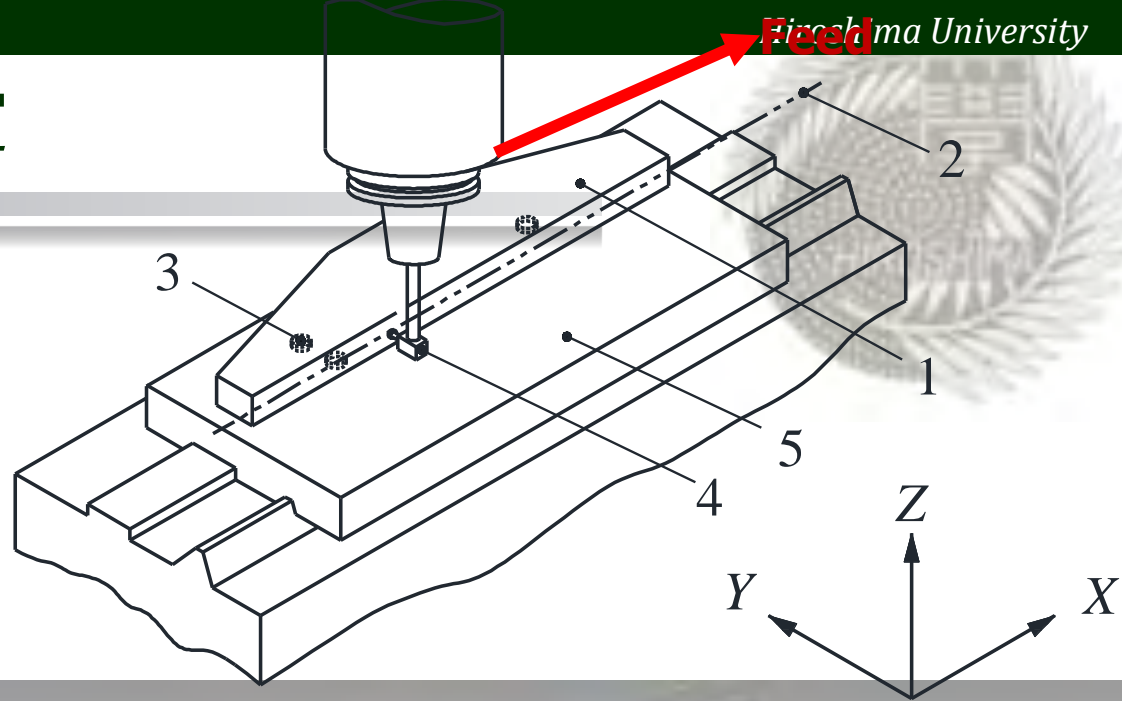
レーザ干渉計による直進位置  
決め偏差の測定



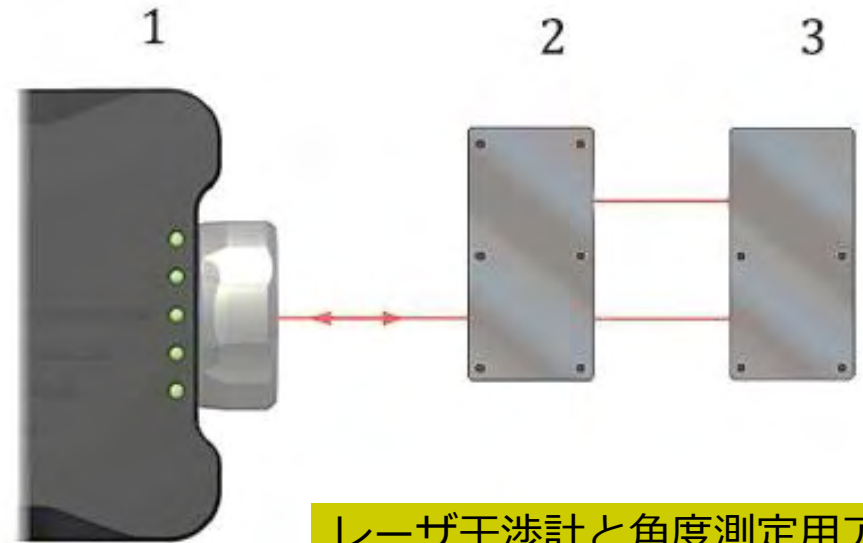
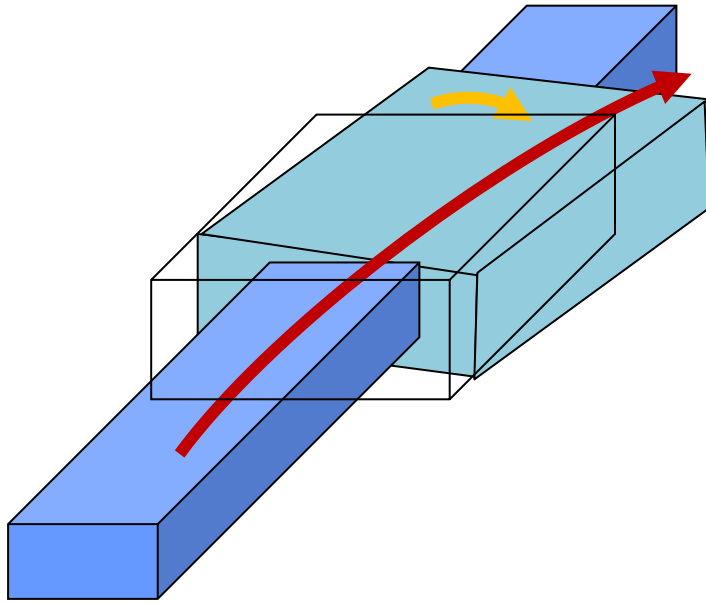
## ② 真直度偏差の測定



真直度偏差  
 $E_{YX}, E_{ZX}$



### ③ 姿勢偏差（ヨー・ピッチ・ロール）の測定



レーザ干渉計と角度測定用アクセサリによる姿勢偏差の測定

姿勢偏差  $E_{CX}$



水準器



# 工作機械送り系の一般的な運動精度測定



- 従来の工作機械の精度検査は、**1軸ずつ行うのが基本**
- それぞれの軸について、誤差を**ひとつずつ、独立に測定**していく
- また、一つの測定は、ある一つの箇所でのみ行うことが一般的



## 茨木の研究：工作機械の空間精度の測定

茨木の研究  
(空間精度の測定)

可動領域全体で、  
任意の指令位置に  
対する、工具端の  
3D位置誤差  
( $x, y, z$ )を評価する

可動領域





# 測定例

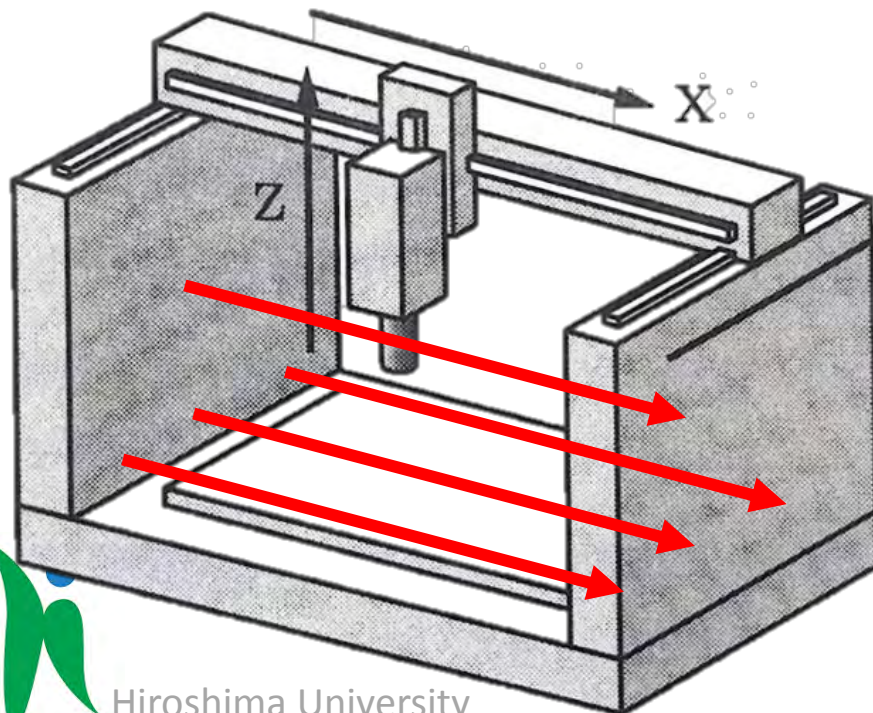
- 実際に，工作機械の運動誤差が，場所によってどのように変わるかを測定してみた例を示す。
- 使用した測定器：6自由度レーザ測定システム．直進軸の6つの誤差を，一度に測定することができる。



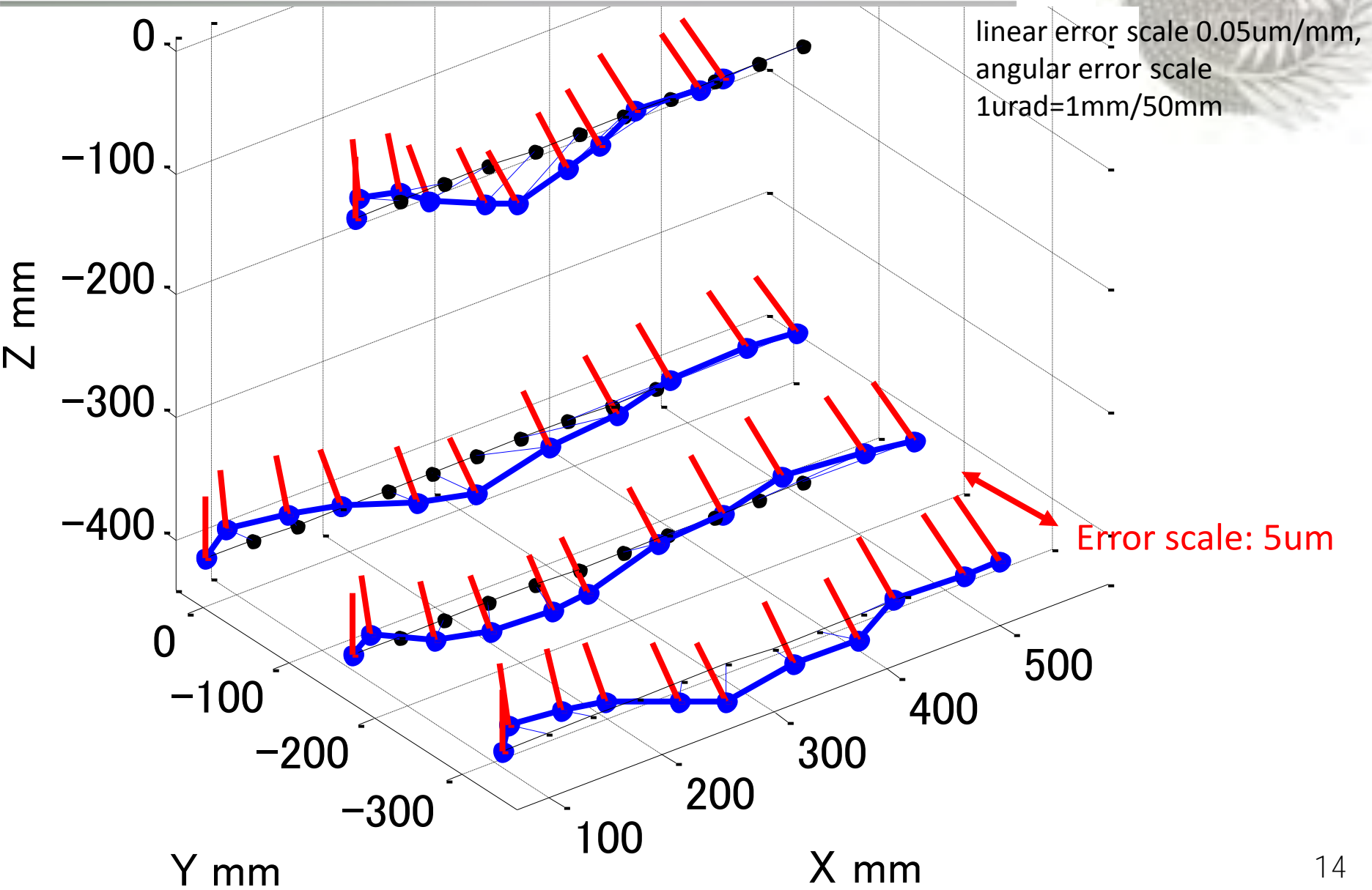
XD Laser by API

# 測定例：複数の位置でX軸の6誤差運動を測定

- 異なるY,Z位置で, X軸を駆動し, 6つの誤差運動を測定.



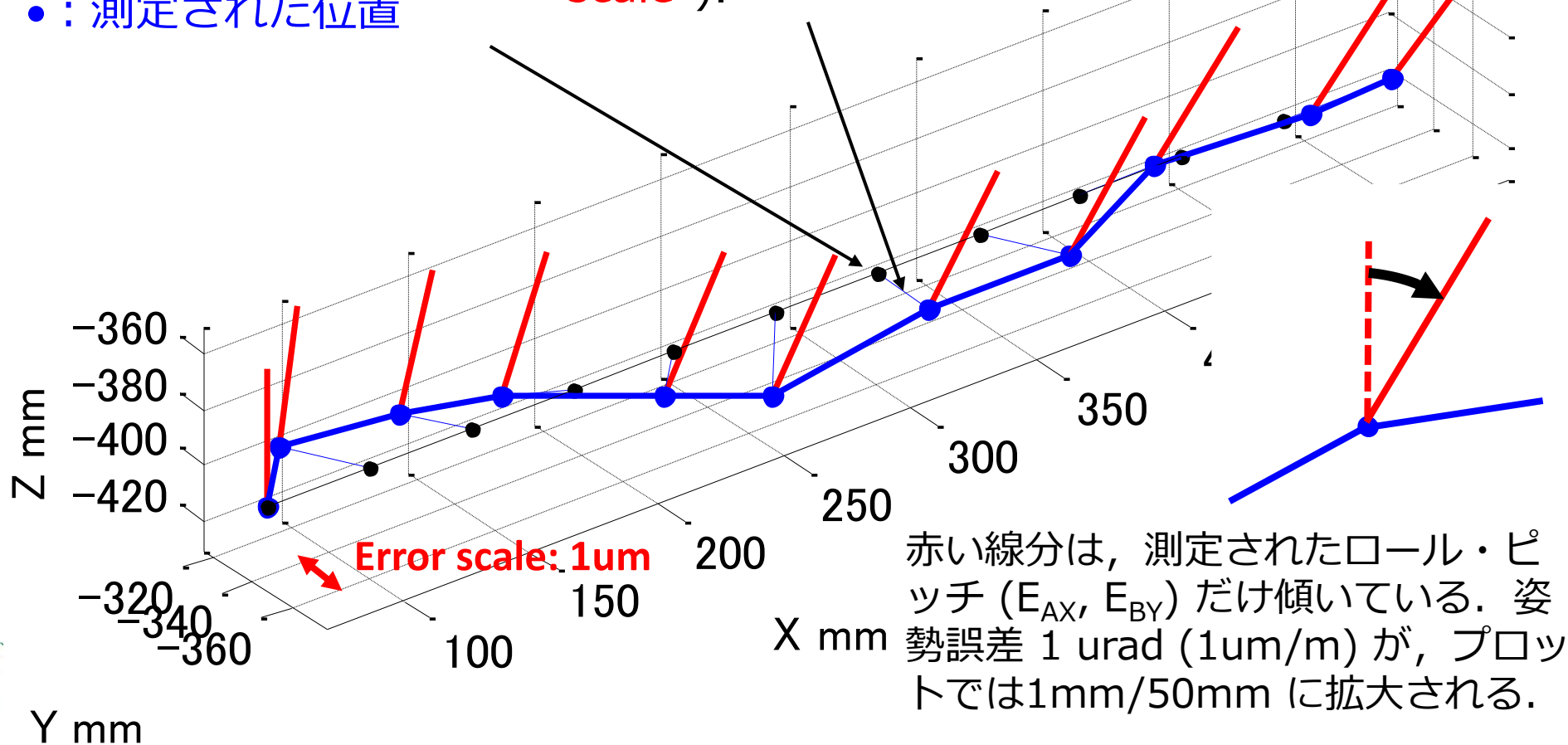
## 測定例：4本の線でX軸の6誤差運動を測定



# 測定結果の見方

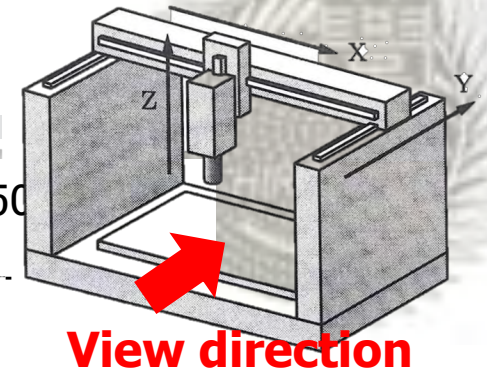
- : 指令位置
- : 測定された位置

測定した ( $E_{XY}$ ,  $E_{YY}$ ,  $E_{ZY}$ ) を3次元ベクトルで表す。誤差は20,000倍に拡大して表示 ("Error scale")。

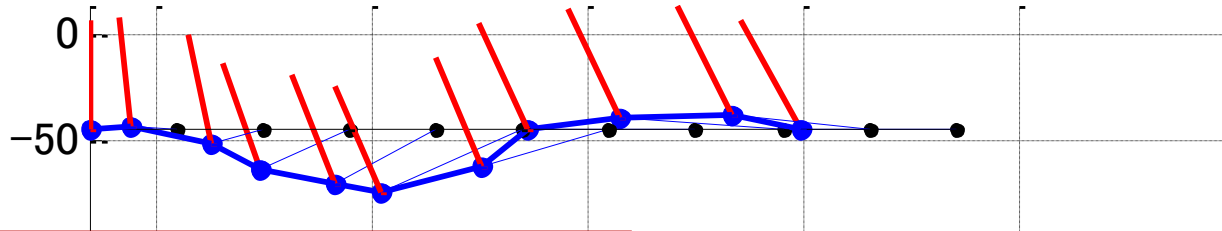


Y mm

# XZ面への投影：観察できること



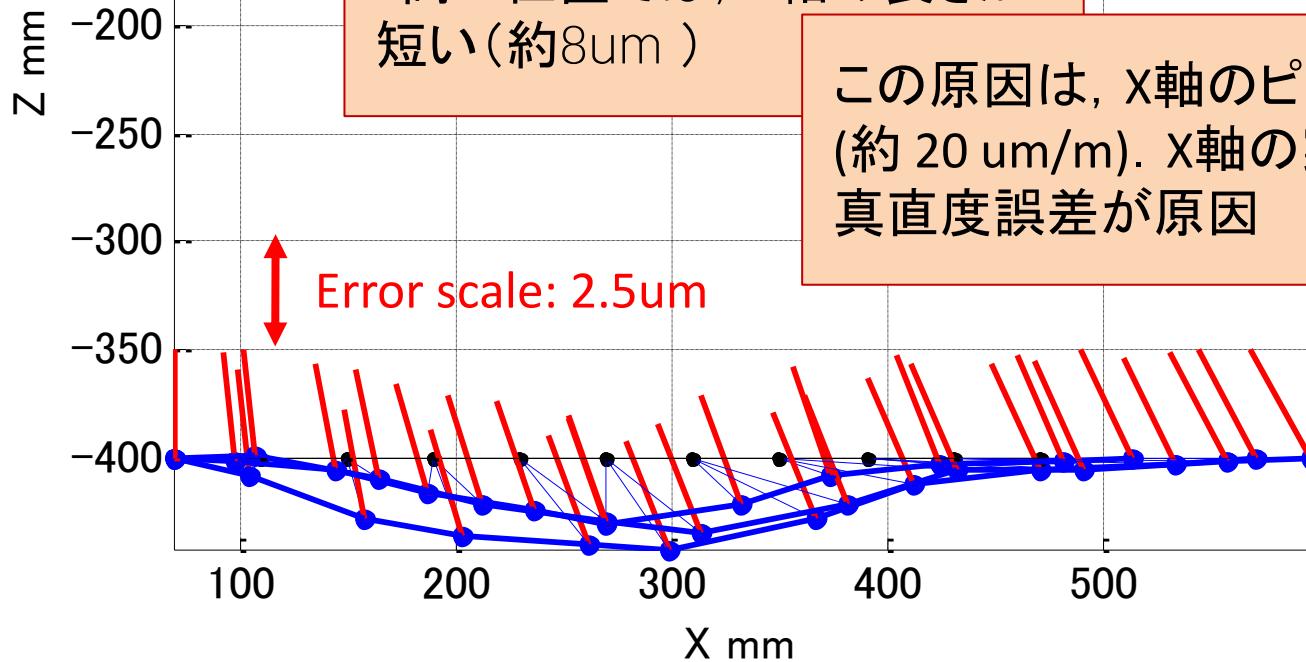
linear error scale 0.05 $\mu$ m/mm, angular error scale 1 $\mu$ rad=1mm/50



X軸にはZ方向真直度誤差が  
る(約2 $\mu$ m)

Z高い位置では, X軸の長さが  
短い(約8 $\mu$ m)

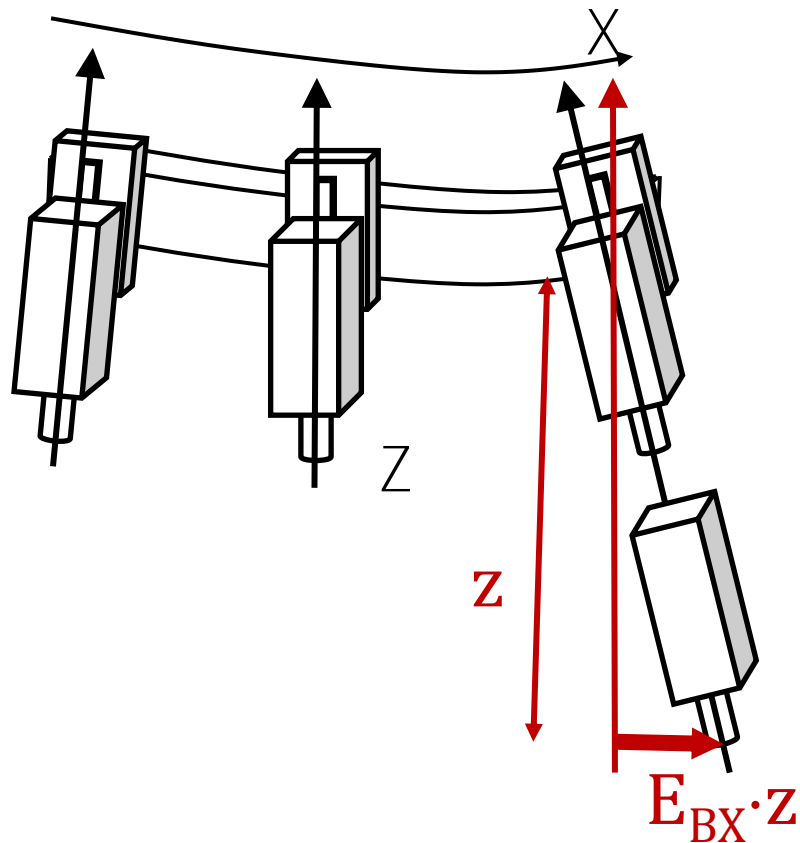
この原因は, X軸のピッチング  
(約 20  $\mu$ m/m). X軸の案内の  
真直度誤差が原因





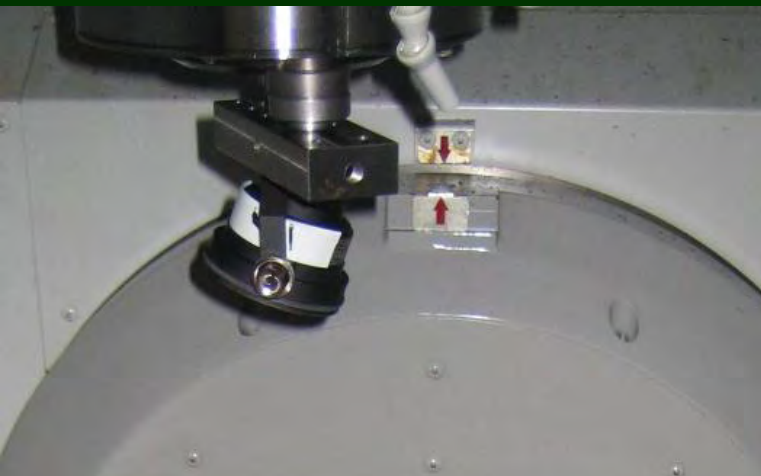
原因：X軸のピッチングがX位置決め誤差に及ぼす影響

$E_{BX}$  (X軸のピッチング)



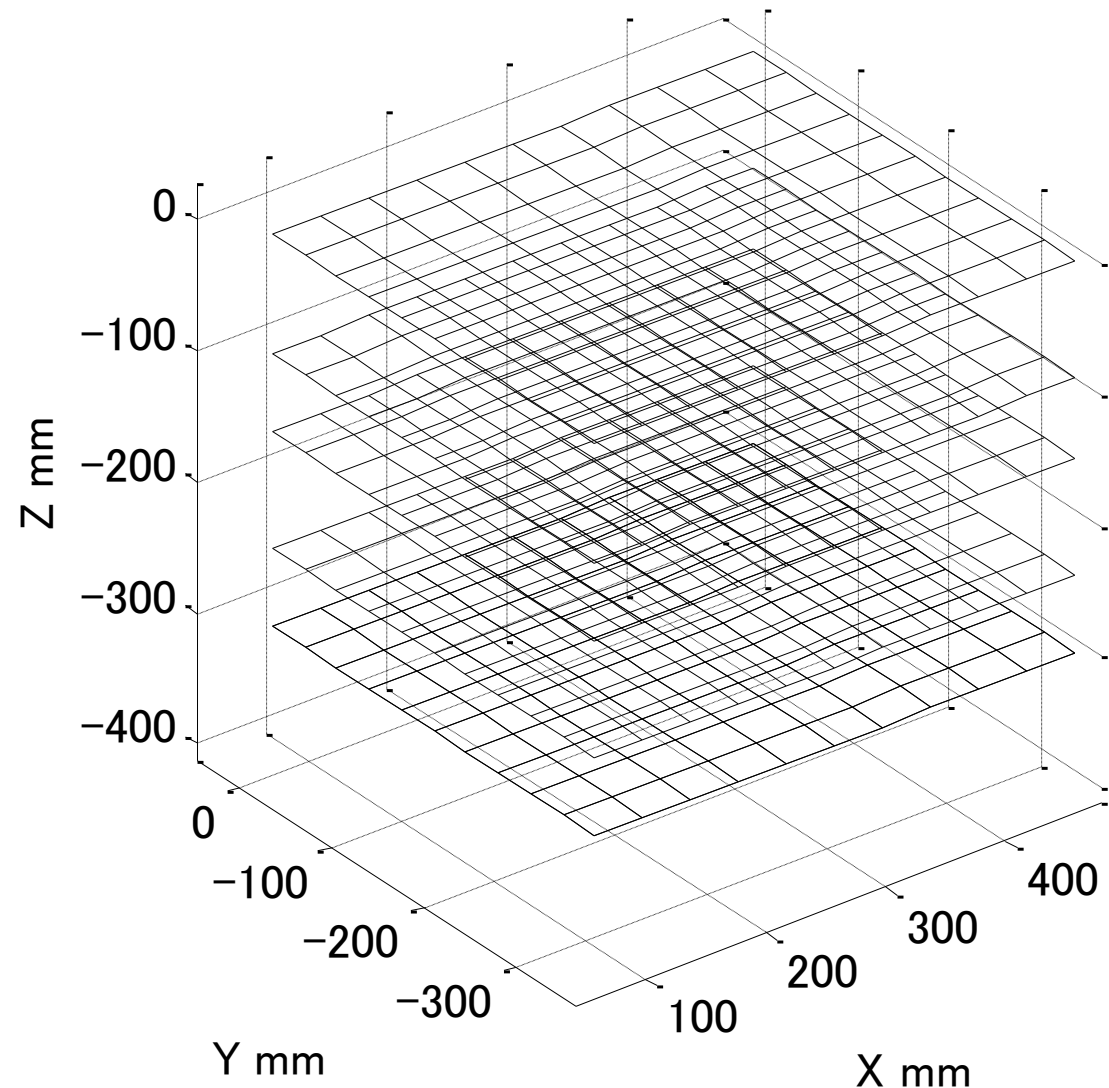


## 2 モデルベースの誤差キャリブレーション： 工作機械



## 空間誤差補正の仕組み（例：ファナック社「3次元誤差補正」）

- 可動領域全体を網羅する格子の、格子点ひとつひとつの指令点  $(x, y, z)$  に対し
- 補正量を表す3次元ベクトル  $(e_x, e_y, e_z)$  を設定する
- 格子点の間の補正量は、補間により計算する



# 幾何学モデルの役割

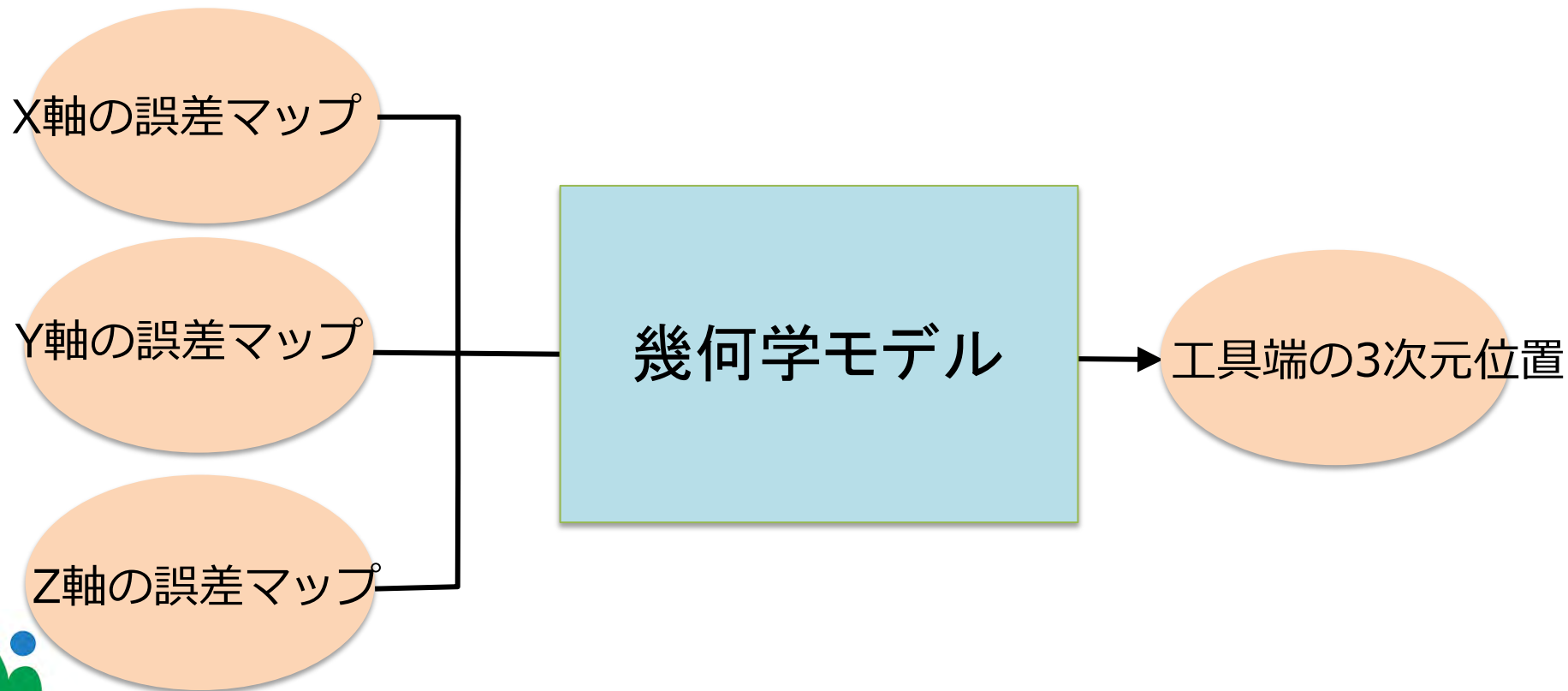
- 全ての格子点で、実際に機械の3次元位置決め誤差を計測することは、（理想的ではあるが）現実的には難しい。
- X, Y, Zの各軸には、6つの誤差がある。それらが重畳されて、工具端における位置誤差( $e_x, e_y, e_z$ )が生じる。
- 各軸の6つの誤差と、工具端の位置誤差の関係を記述するモデルを、工作機械の幾何学モデルと呼ぶ。
- 各軸の6つの誤差が既知であり、幾何学モデルがあれば、任意の指令位置 ( $x, y, z$ ) に対して、位置誤差( $e_x, e_y, e_z$ )を予想できる。→補正マップが構築できる

# 幾何学モデルへの入力と出力



原因

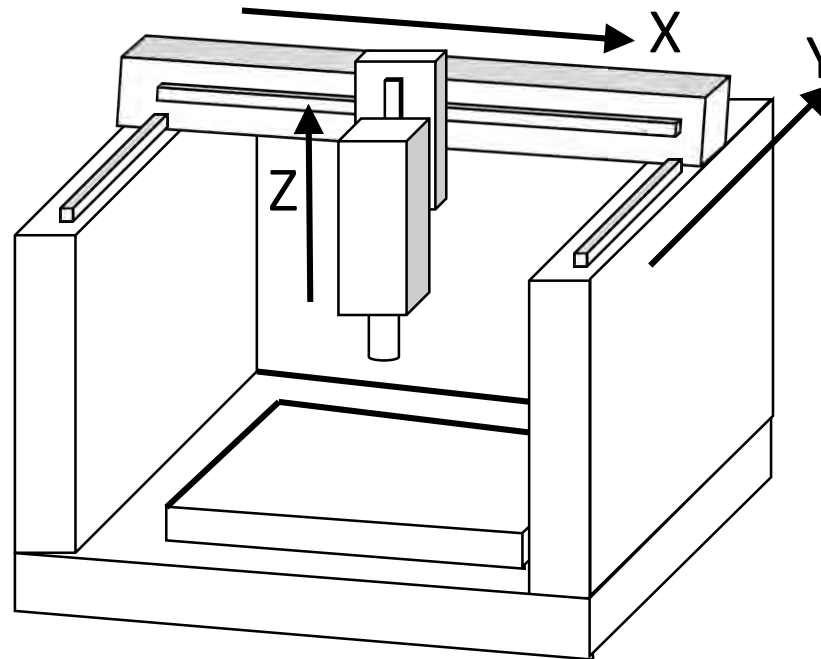
結果



# 幾何学モデルの数式：例



- この軸構成を持つ機械の幾何学モデルは.....



## 幾何学モデルの数式：例

誤差運動を表す記号 (ISO 230-1規格)

 $E_{ZX}$ 

誤差の方向 (A~CはX~Z回りの姿勢誤差, X~Zは並進誤差)

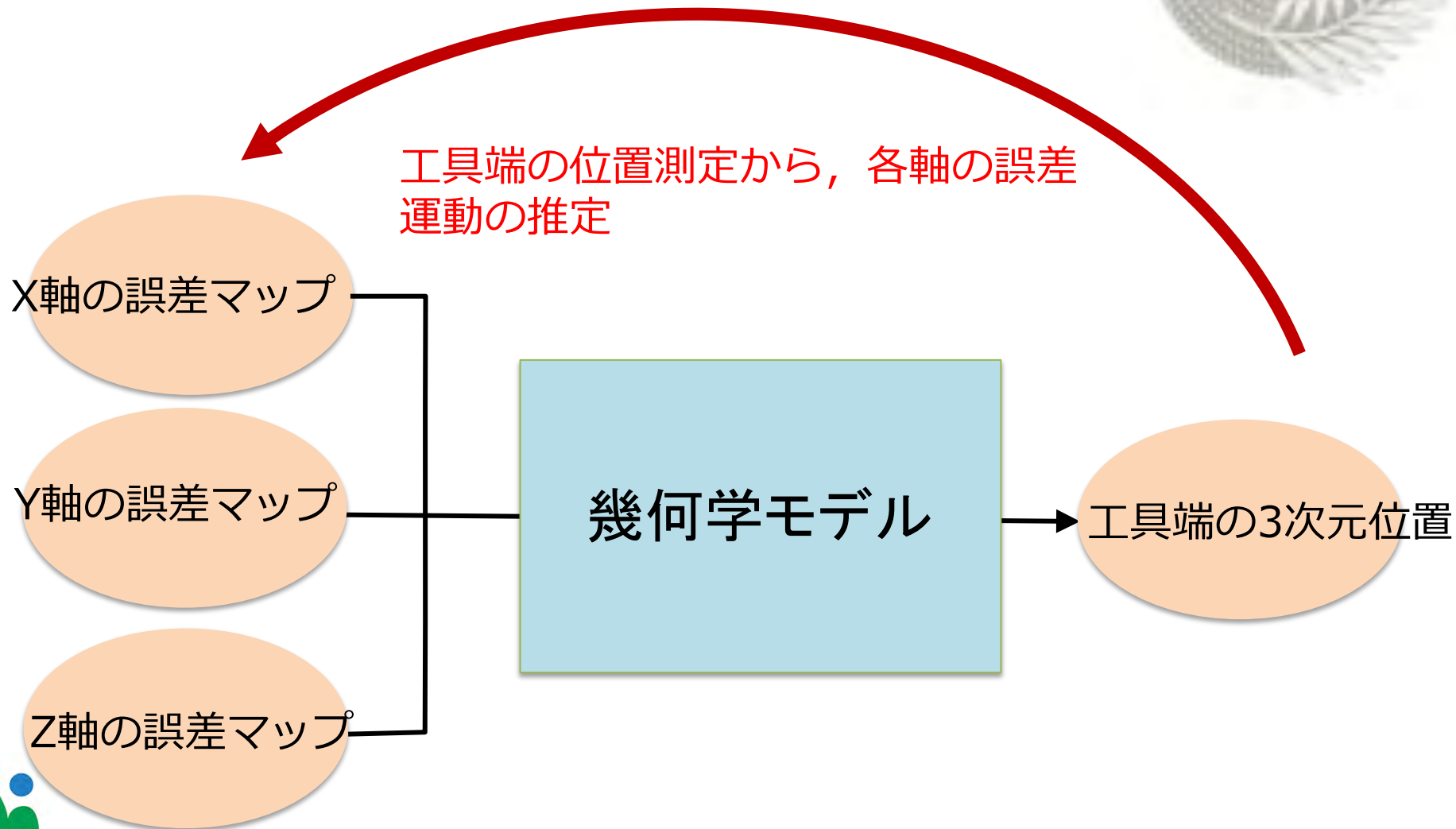
どの軸の誤差か

各軸の誤差

工具端の3次元位置・  
3次元姿勢

$$\begin{aligned}
 e_x(x, y, z) &= E_{XX}(x) + E_{XY}(y) + E_{XZ}(z) + (E_{B(0X)Z} + E_{BX}(x) + E_{BY}(y)) \cdot z \\
 e_y(x, y, z) &= E_{YX}(x) + E_{YY}(y) + E_{YZ}(z) - (E_{A(0Y)Z} + E_{AX}(x) + E_{AY}(y)) \cdot z \\
 &\quad + (E_{C(0X)Y} + E_{CY}(y)) \cdot x \\
 e_z(x, y, z) &= E_{ZX}(x) + E_{ZY}(y) + E_{ZZ}(z) - E_{BY}(y) \cdot x \\
 e_a(x, y, z) &= E_{AX}(x) + E_{AY}(y) + E_{AZ}(z) \\
 e_b(x, y, z) &= E_{BX}(x) + E_{BY}(y) + E_{BZ}(z) \\
 e_c(x, y, z) &= E_{CX}(x) + E_{CY}(y) + E_{CZ}(z)
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

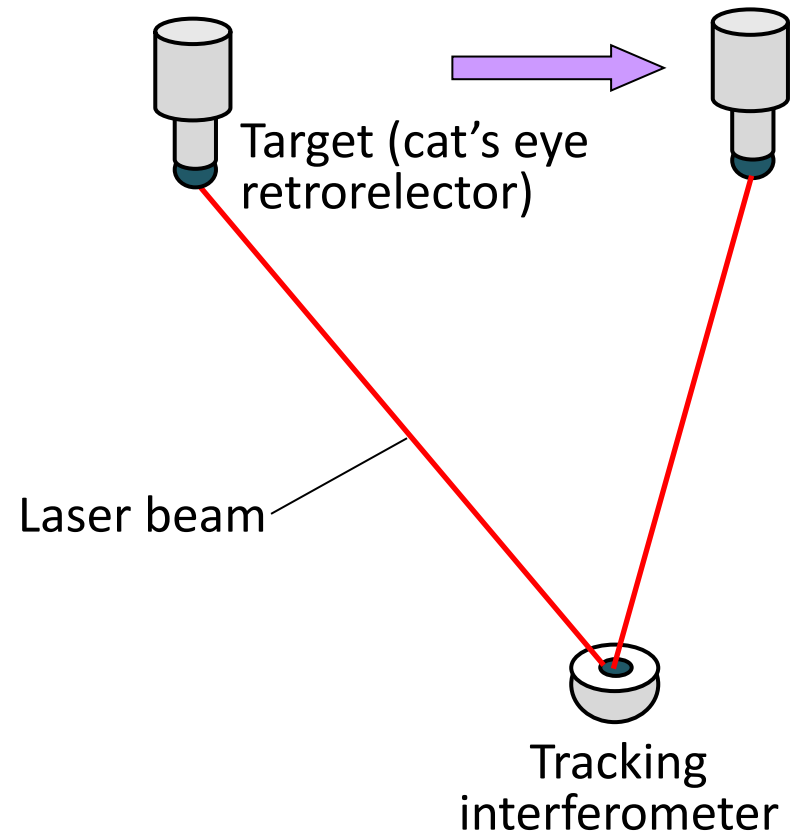
## 幾何学モデルの応用：モデルベースの誤差キャリブレーション





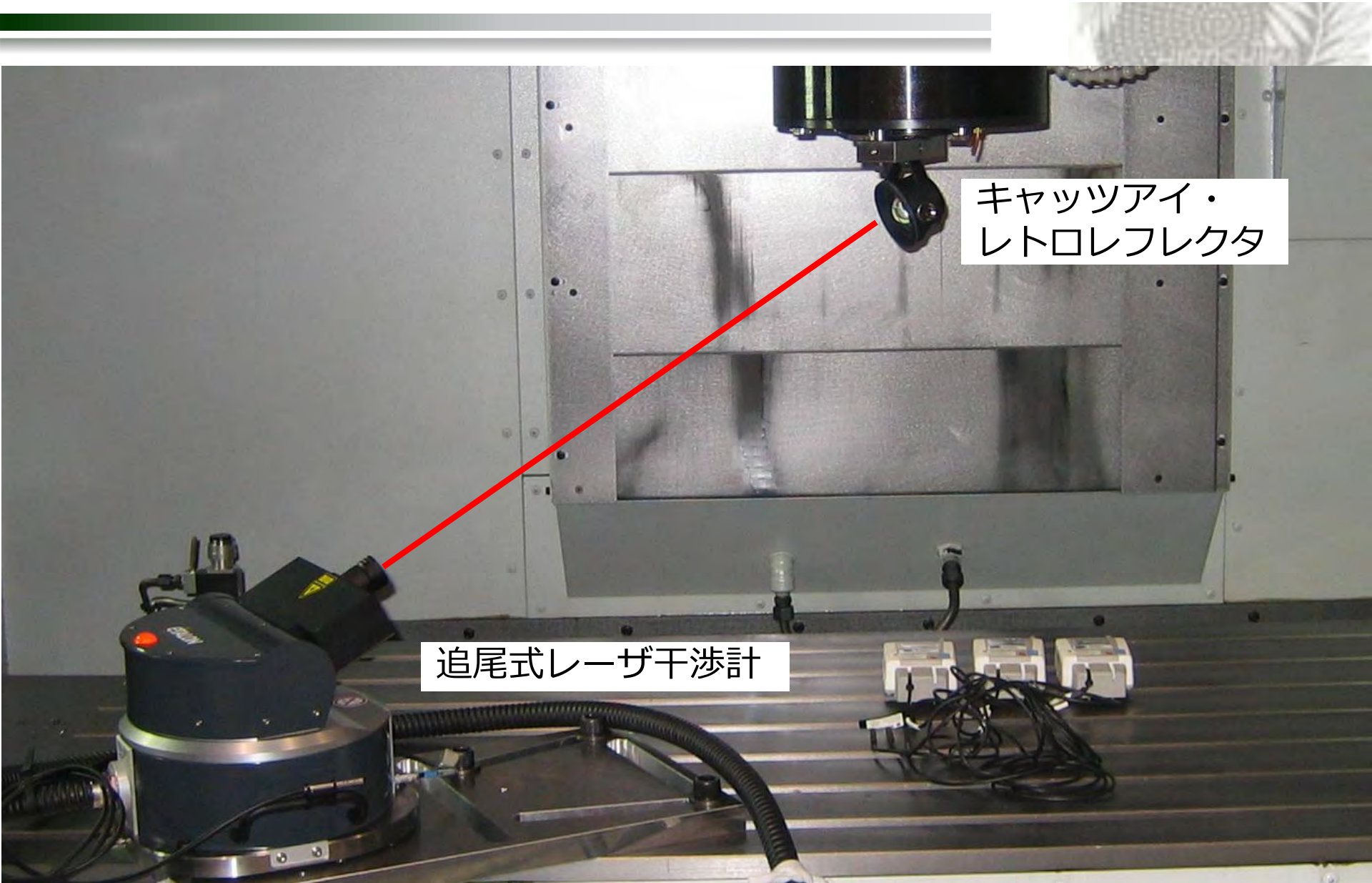
## 応用例① レーザトラッカを用いた誤差キャリブレーション

- レーザトラッカとは：レーザ干渉計に対し，対象を自動追尾するように，レーザ方向を制御する機構を付けた測定器



Example tracking interferometer:  
Etalon's LaserTRACER

# 市販のレーザトラッカ (Etalon LaserTRACER)



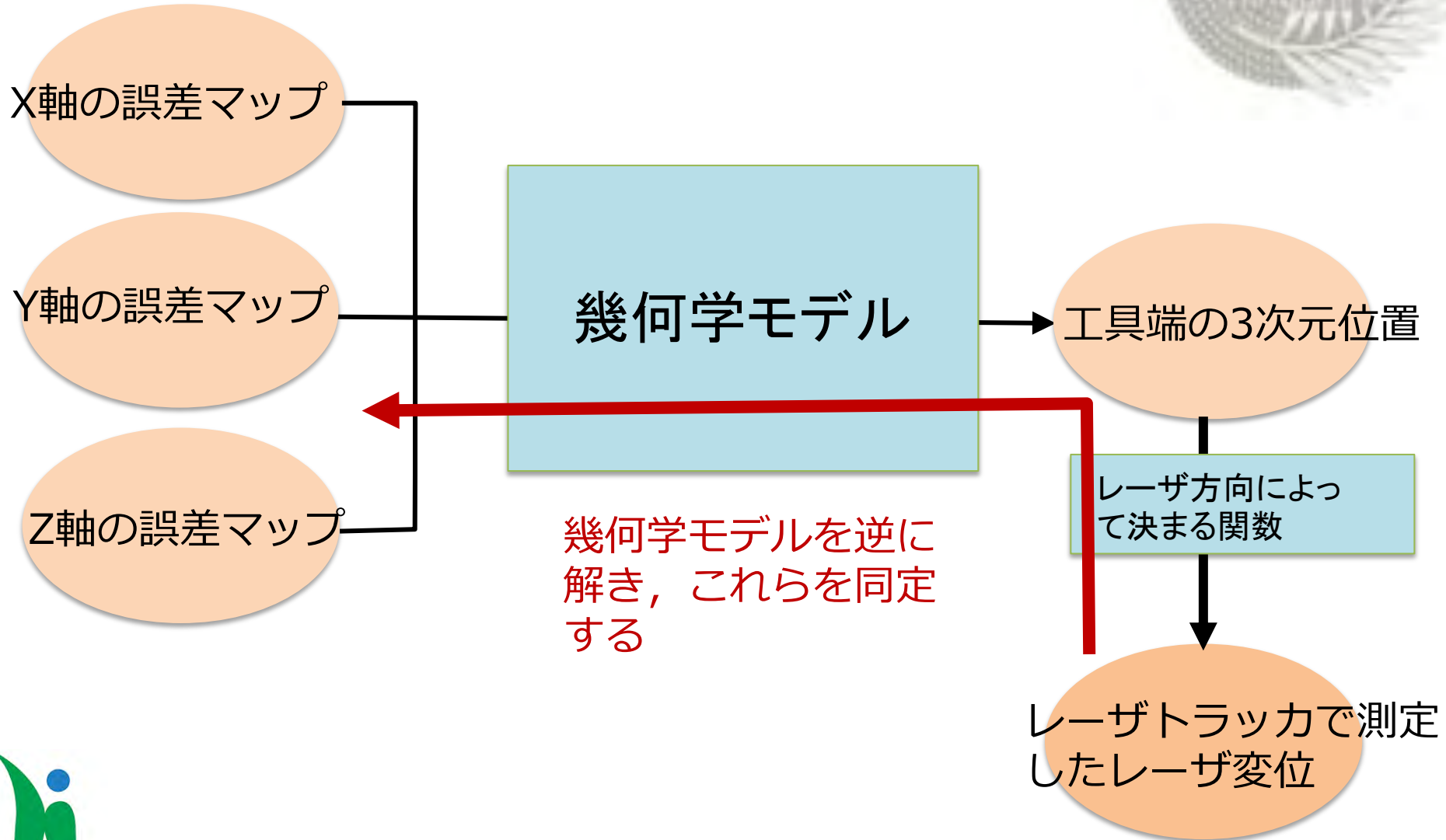
キャッツアイ・  
レトロレフレクタ

追尾式レーザ干渉計

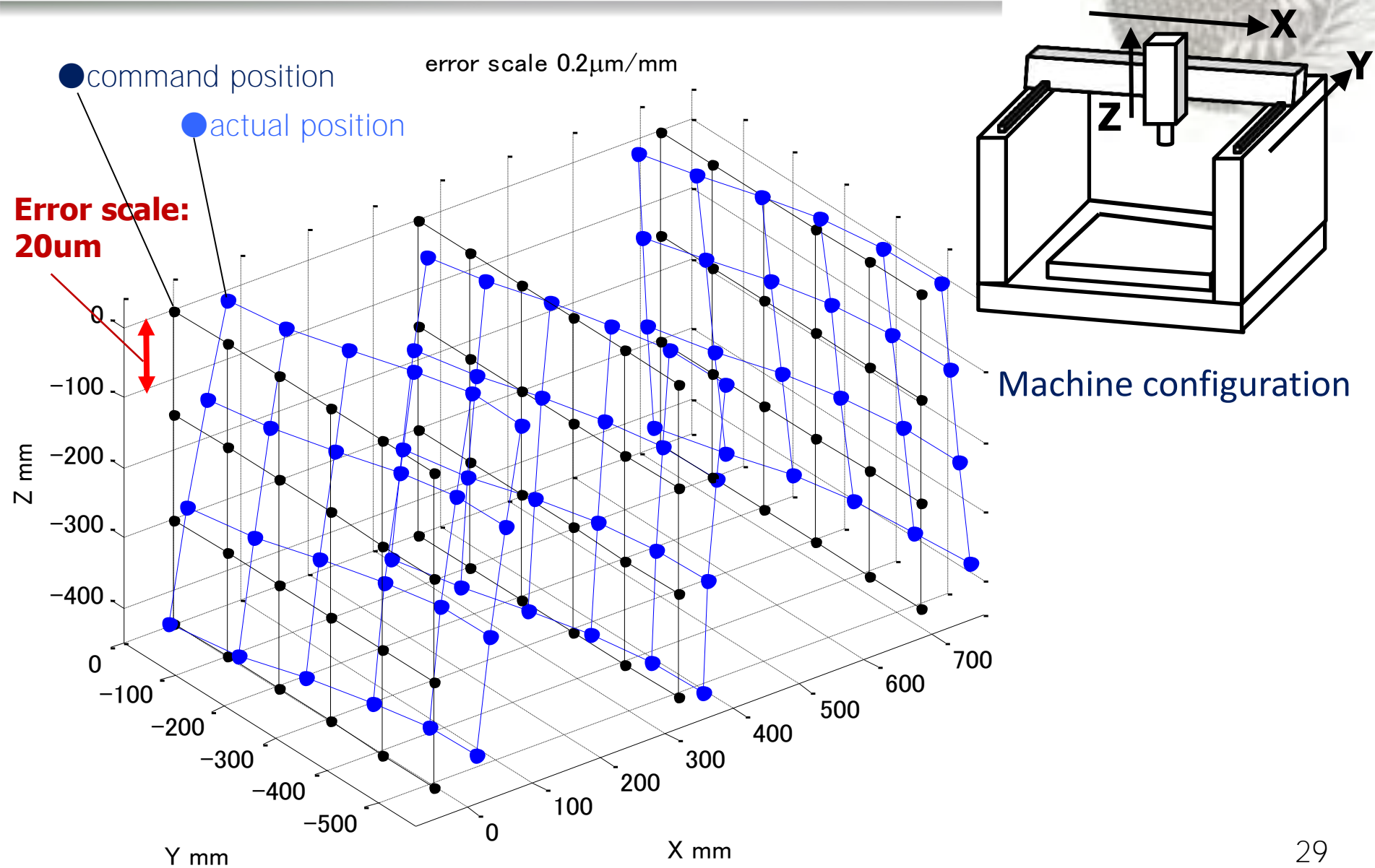
測定の様子：トラックカ位置を複数変えて，測定を繰り返す



# トラックの測定値から各軸の誤差を同定



## 測定例：同定した各軸の誤差から計算した「3次元誤差マップ」





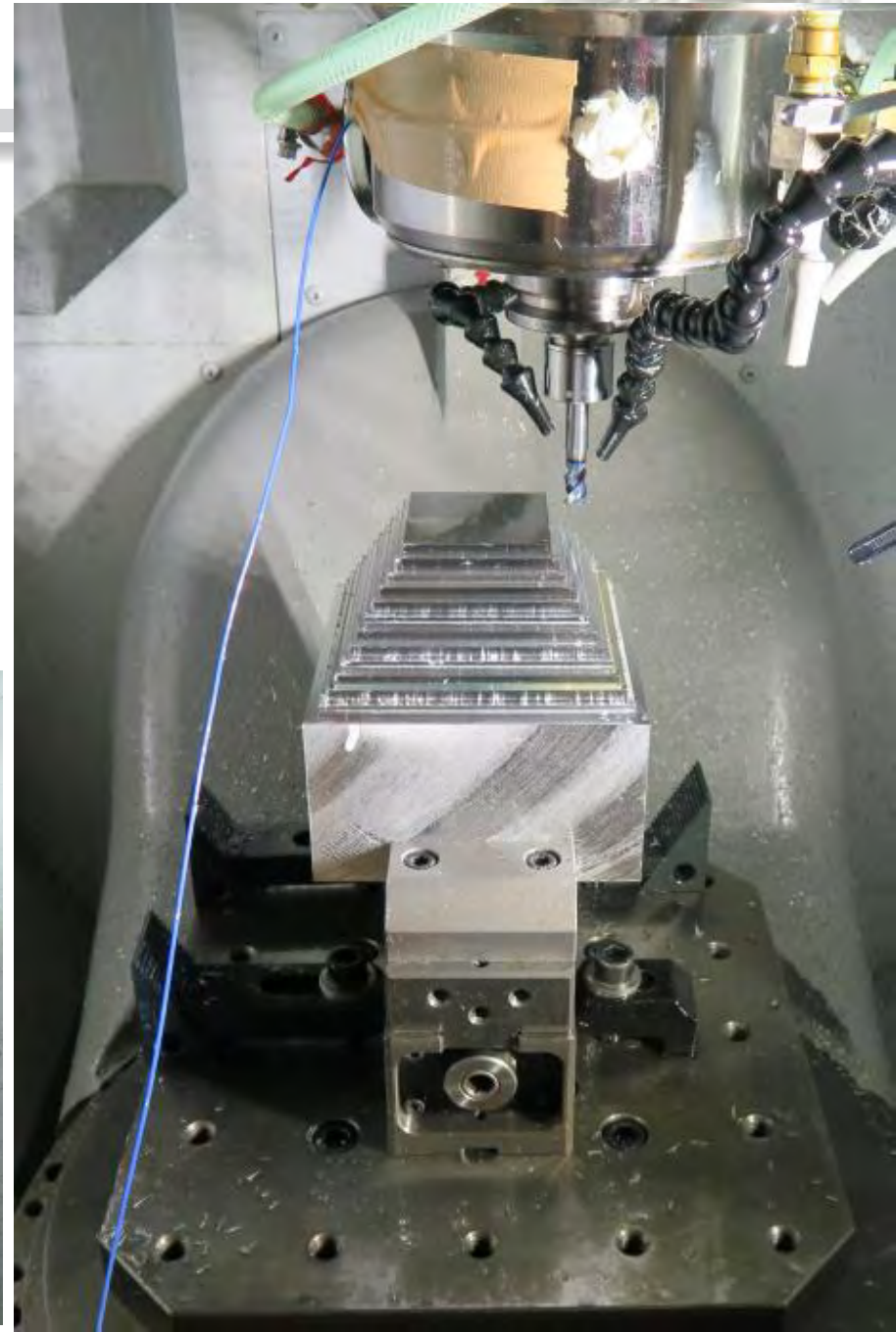
## まとめ：モデルベースの誤差キャリブレーション：工作機械 (レーザトラッカを用いた誤差キャリブレーション)

- 3辺測量の原理を使えば、レーザトラッカを用いて全ての点の3次元位置を測定することができる。しかし、前ページの誤差マップは、そのように測定したわけではなく、各軸の6つの誤差を同定し、そこから間接的に計算したものである。
- 3辺測量の原理では、レーザトラッカから反射鏡までの距離だけを計算に使う。レーザ光の向きを計算に使う一般的なレーザトラッカと比べて、測定精度は、工作機械の精度キャリブレーションに使えるほど高いと考えている。
- ただし、この方法には実用的な課題も多い（価格が高い、1台しか使えなければ、繰り返し測定が必要で時間がかかる、……）
- 「主軸端の3次元位置の『一部』を測定し、幾何学モデルを逆に解くことで、各軸の誤差運動を全て同定する」というアプローチは、他にも様々なアイデアが考えられる。

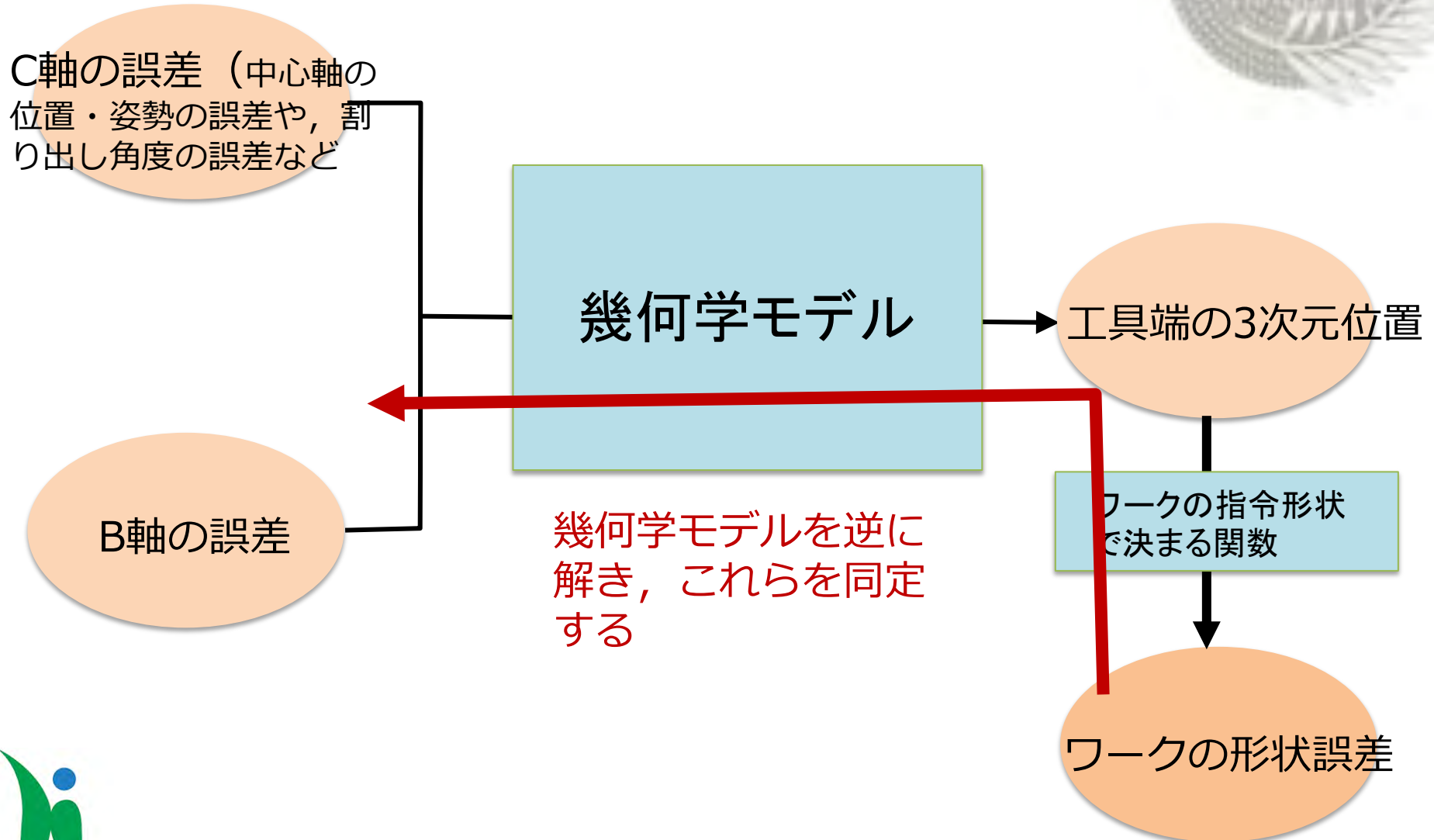
## その他の研究例①

5軸加工試験から，5軸工作機械の誤差要因を評価する

- 加工試験法は，日本工作機械工業会と協力し，ISO 10791-10規格に提案している。



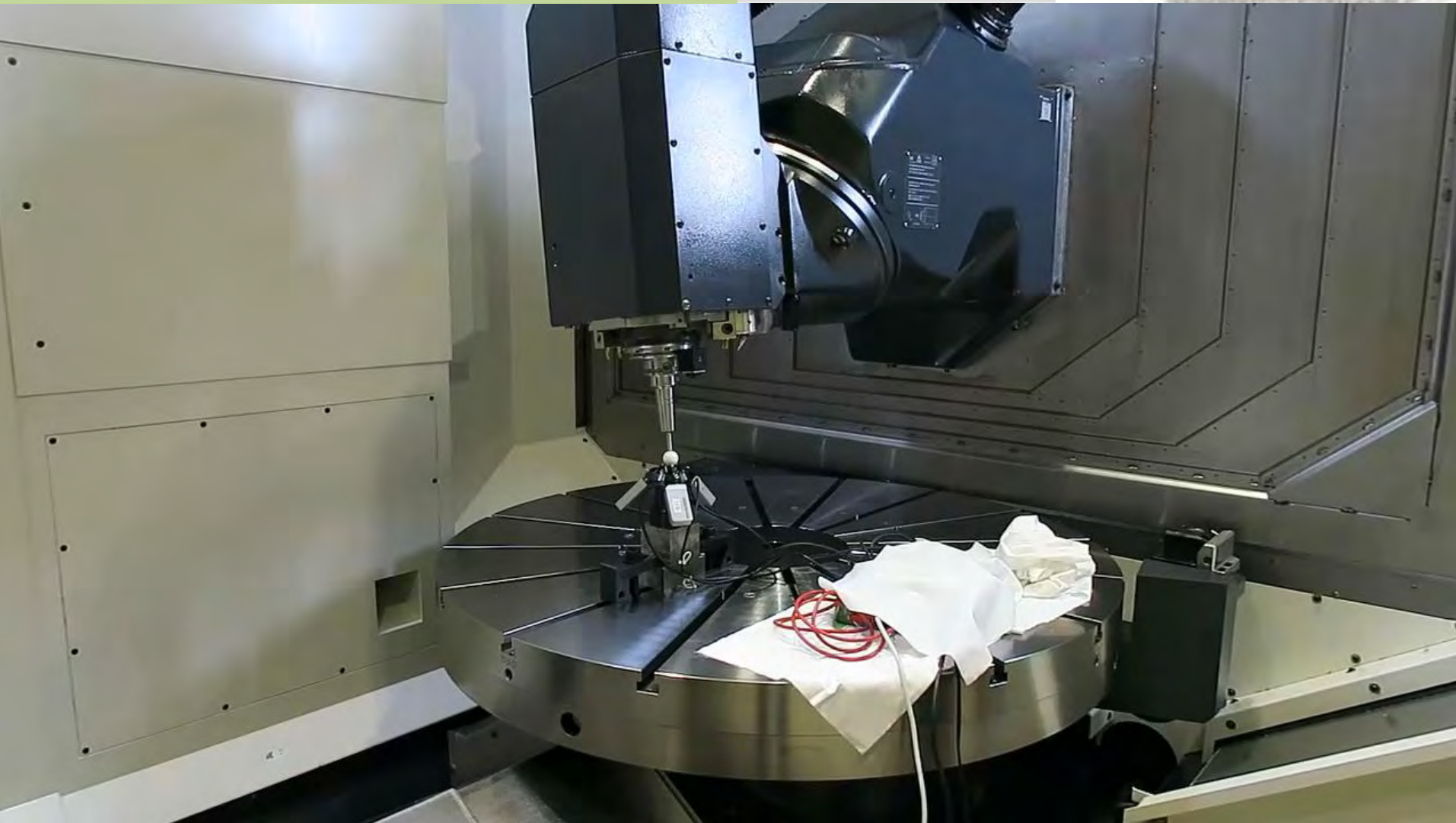
# 幾何学モデルを使った誤差原因診断





## その他の研究例②

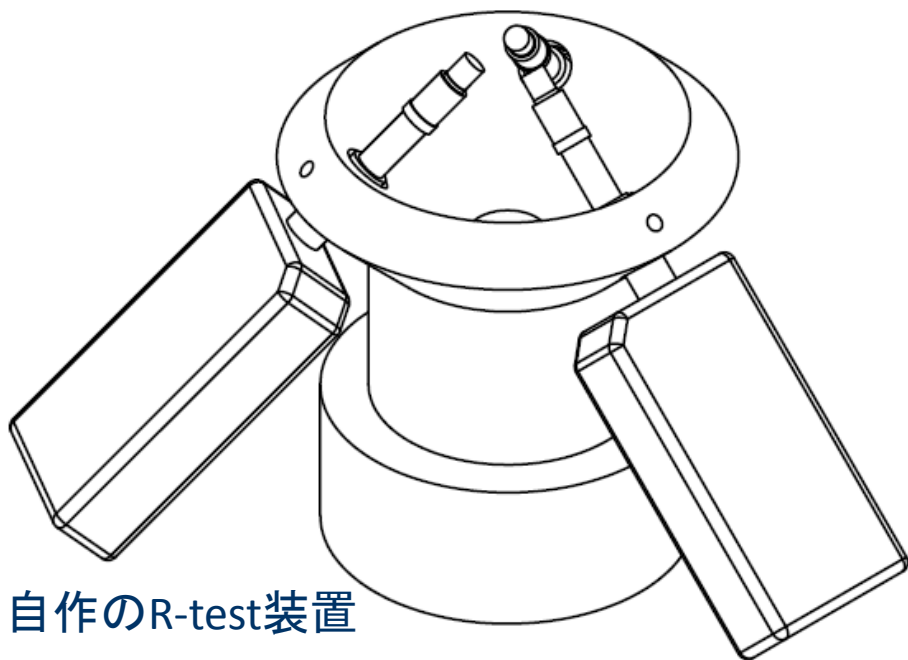
## 5軸加工試験の「R-test」測定



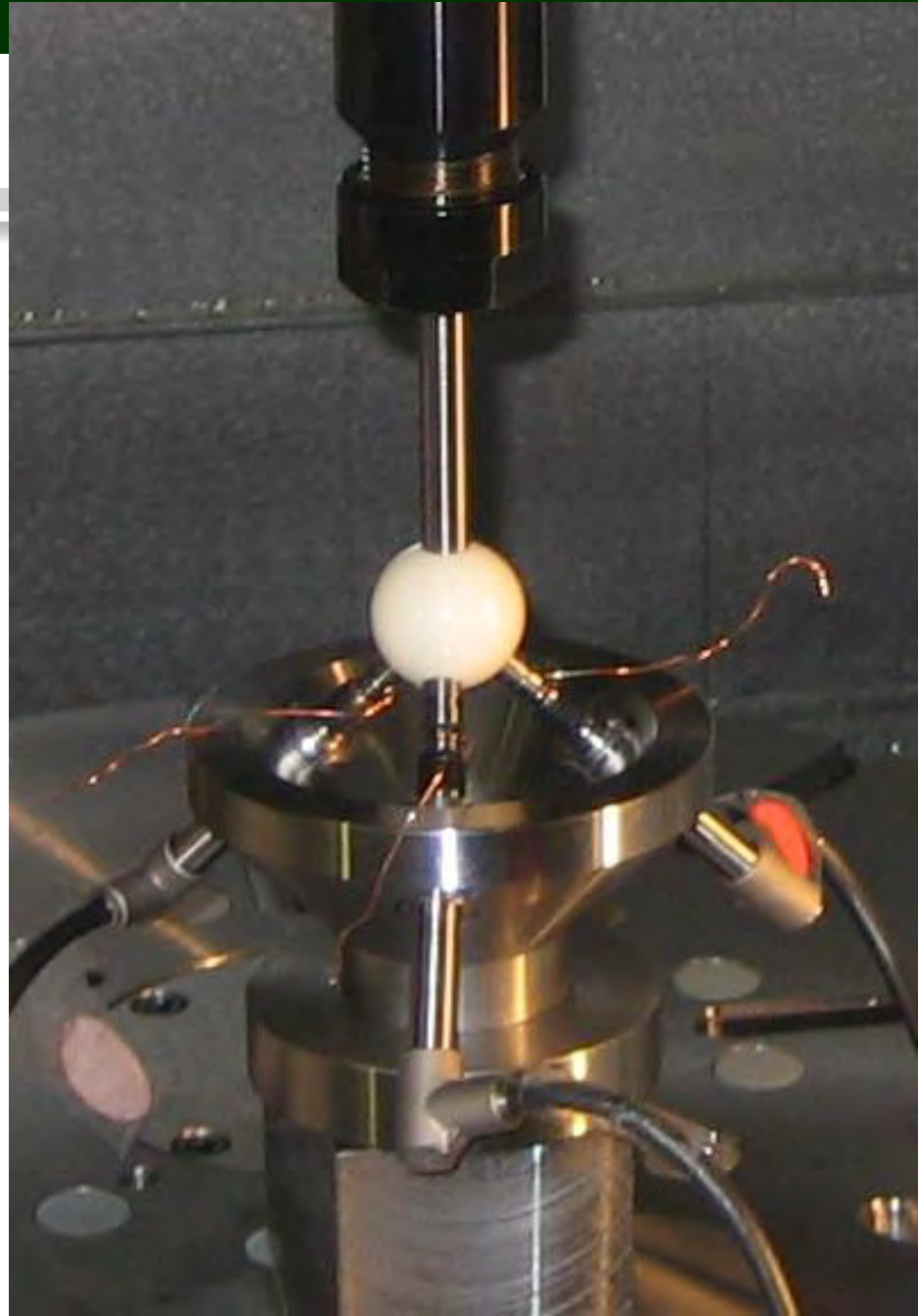
- B軸動的R-test測定 (F2,000 deg/min) .  
B軸は45度傾いた旋回軸

# R-testとは

- 主軸に取り付けられた基準球の変位を, 3つの接触式変位センサで測定
- センサの方向が既知なので, 3つの変位センサの変位を, 球のXYZ変位に変換可能



自作のR-test装置



自作のR-test装置

## R-test測定の解析ソフトウェアの開発

茨木が開発，福田交易株式会社から販売している（“FKDシステム”）.  
機能：

- R-test測定の実施（NCプログラムの作成），準備（センサ方向の同定など）
- R-test測定結果の3次元表示
- 工作機械の誤差原因の定量的分析（「誤差マップ」の同定）
- 補正データの出力

## FKDシステム ver.1

旋回軸を持つ工作機械の  
誤差補正が可能!!

5軸制御加工機や微細加工機の運動精度を高めるためには、多軸の運動誤差や、直立で等が生じる共振誤差を測定し、原因を把握することにより、補正を正しく実施することが重要です。

## FKDシステムの特徴

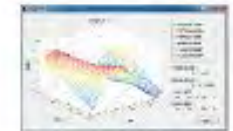
- 初心者でも容易に測定から補正まで実施可能。
- 測定は、ISO 230-1に準拠した測定法であるR-testを用います。ISO/FDIS 10791-6(国際規格として2015年頃に発行予定)に規定された測定も行えます。
- FKDシステムでは、指令位置に対し、変換位置の変化量を視覚的に運動誤差として把握できます。
- テーブル旋回型、主軸旋回型の5軸加工機に対応。
- 独自開発されたFKDシステム内で誤差マップを作成し、空調誤差補正データが作成できます。



測定結果表示例



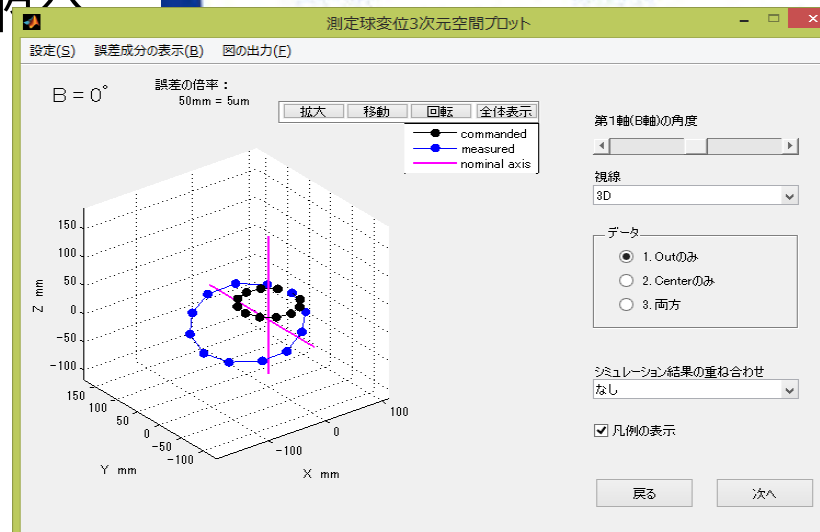
誤差パラメータ表示例



CNCへ入力する補正量を視覚的に表示した例

## 主な機能

## 動作環境



311 FAX 03-5565-6016  
421 FAX 05-6944-0241  
421 FAX 052-322-2384  
341 FAX 082-277-8199  
011 FAX 046-228-6812  
311 FAX 076-292-2510  
500 FAX 092-505-4591



### 3 モデルベースの誤差キャリブレーション： 産業用ロボット



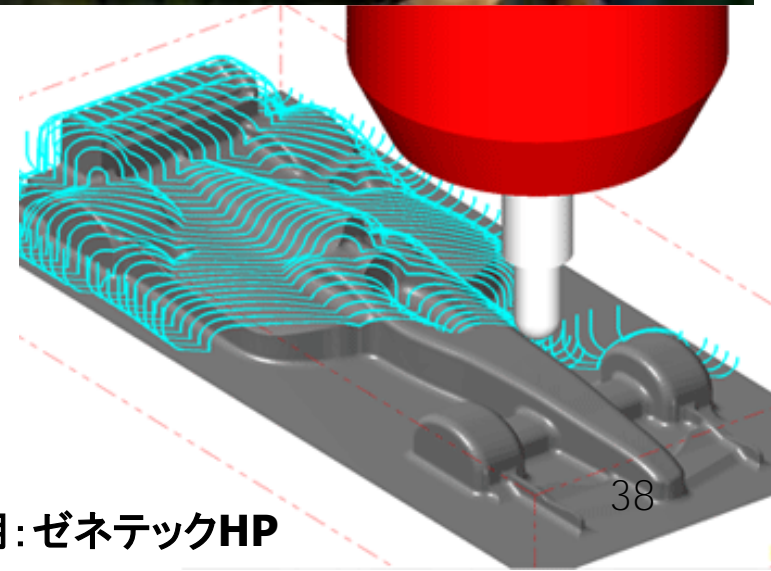
# 背景



- 産業用ロボットは、発展途上国でも人件費が上昇しつつあり、工場の自動化が進められていることを背景に、**世界的に市場が拡大**している。国内でも、労働力減少に対応するため、工場の自動化は今まで以上に進められ、産業用ロボットはその中心を担うだろう。
- 現状の主な用途： 搬送（ピック&プレース）、塗装、溶接、組み立て、バリ取り、バフ研磨、……

# 産業用ロボットの用途拡大のための課題

- 産業用ロボットは、「**ティーチング**」でプログラムされる。  
ティーチングとは、人間が手動でロボットを動かして、その動作を覚えさせること。
- これは、時間と手間がかかる。
- 一方、工作機械を「**ティーチング**」でプログラムする人はいない。  
加工物の3Dモデルから機械の動きをコンピュータがプログラムする。
- この一つの原因は、工作機械に比べて、**産業用ロボットの精度が低いこと**



# 研究の狙い

- 産業用ロボットは元々、同じ運動を高い精度で繰り返せること（運動の再現性）だけが求められ、「3次元空間内の指令点に位置決めしたとき、どれだけ正確にその点に位置決めされるか」という「絶対的な」位置決め精度は重視されてこなかった。
- 産業用ロボットの「絶対的な」位置決め精度を可動領域全体であるレベル以上に保証することができれば、ロボットのアプリケーションは大きく広がるのではないかと？
  - ティーチング作業の短縮
  - 最終的には、ティーチングレスで、3Dモデルを使って完全に動作プログラミング
  - 機械加工（切削，研削，研磨）など、高い精度が求められる、ロボットの新しいアプリケーション

# レーザトラッカを用いたスカラ型ロボットの空間精度の測定

ライカ社  
レーザトラッカ  
AT-960LR



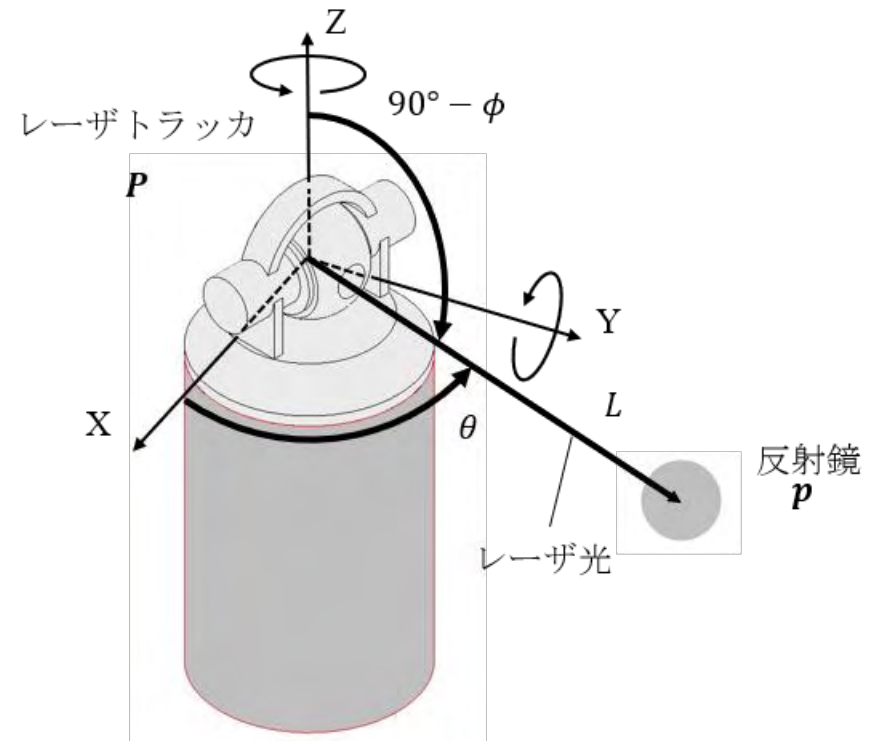


# レーザトラッカとは

- レーザの向きを計測することで，1回の測定で反射鏡の3次元位置を測定できるレーザトラッカ

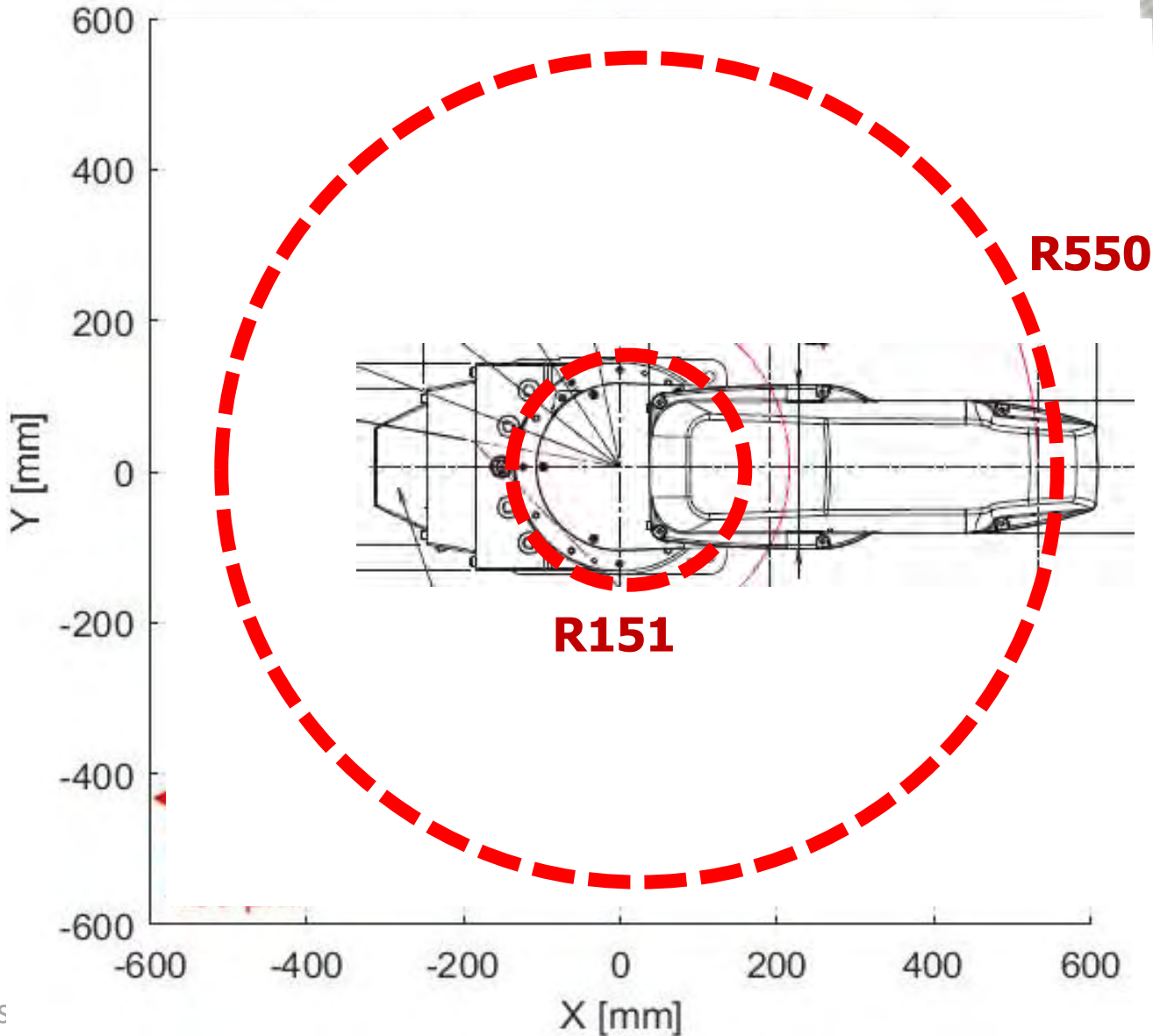


レーザ長さ $L$ ，レーザの向き ( $\theta$ ,  $\phi$ ) を測定し，反射鏡の3次元位置 $P$ を算出する



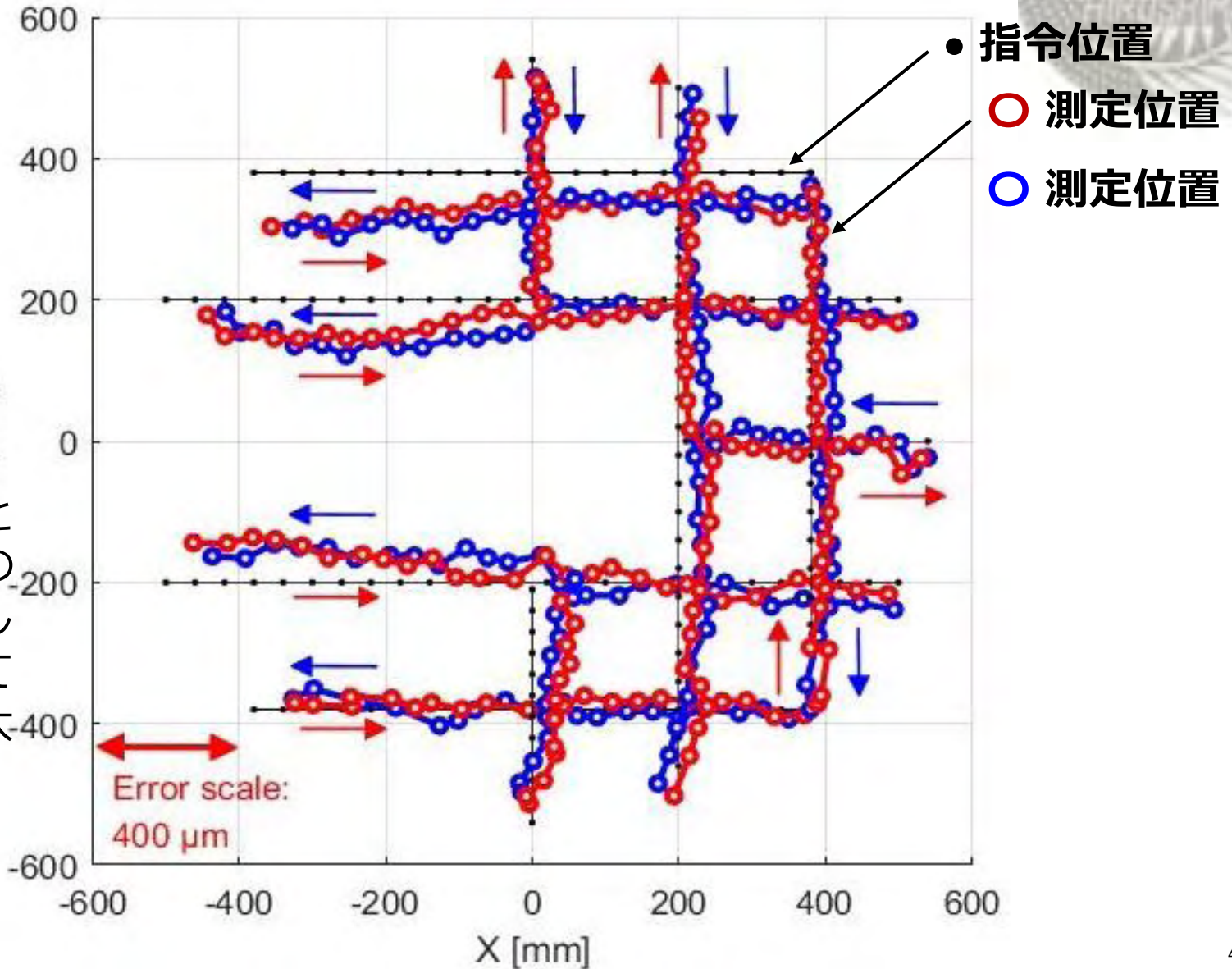
レーザトラッカ (ライカ AT-960 LR)

## 測定した2次元「誤差マップ」 — 測定範囲

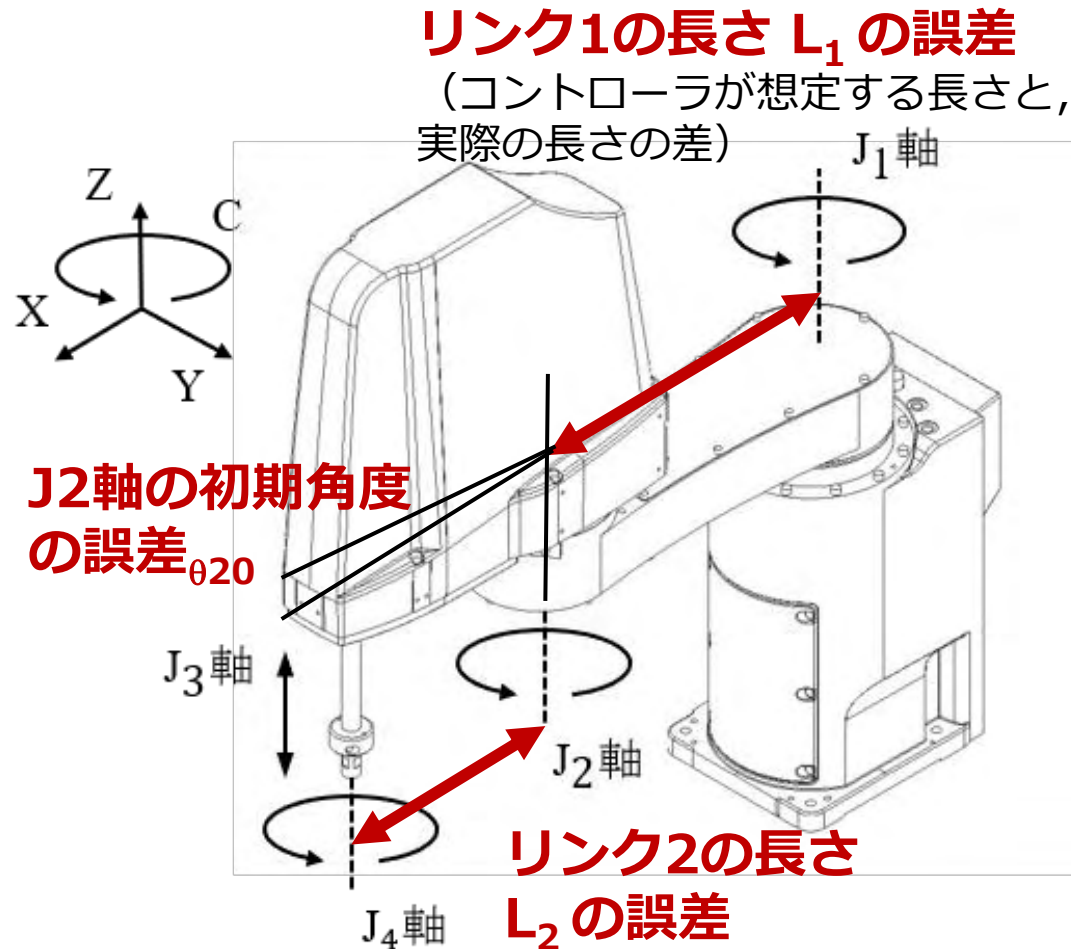


# 測定した2次元「誤差マップ」

指令位置と  
測定位置の  
差は拡大して  
表示して  
いる。拡大  
倍率は→

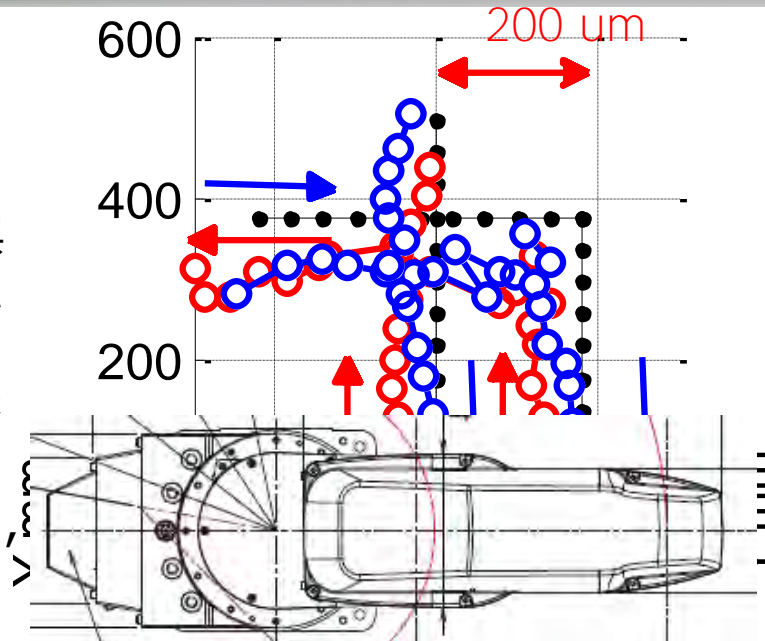
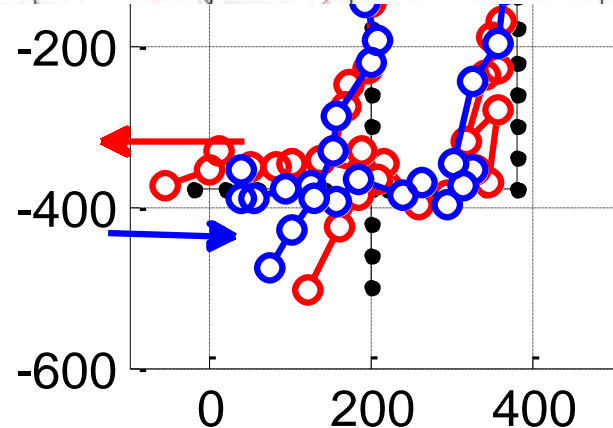
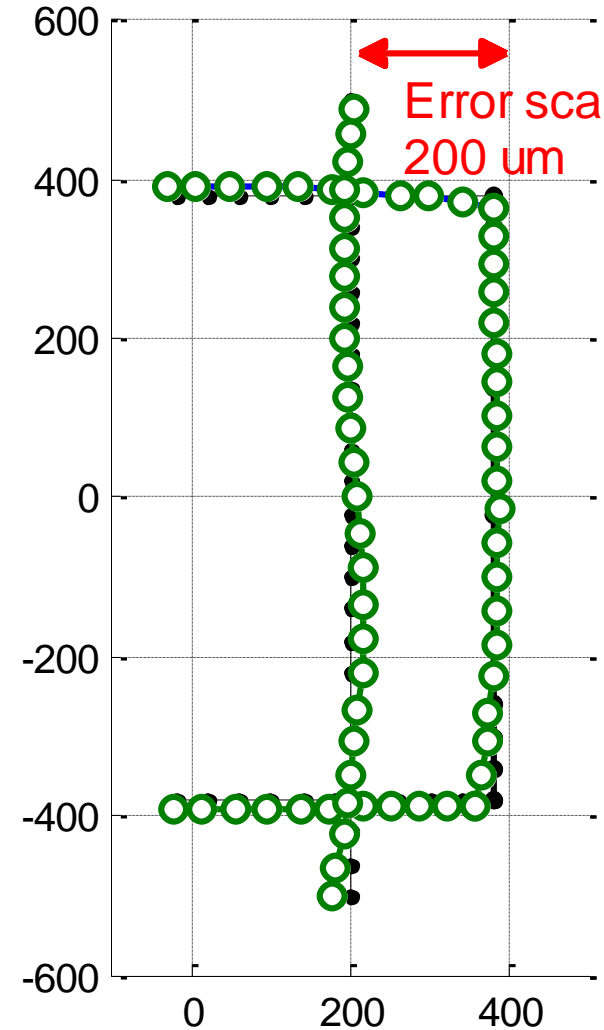


## 従来のロボットキャリブレーションが考える誤差原因



# 従来のロボットキャリブレーションでロボットの精度が改善できるか？（実験例）

Error scale:

200  $\mu\text{m}$ Error scale:  
200  $\mu\text{m}$ 

トラックで実測 X mm

同定した誤差からシミュレーション X mm

■ リンク長の誤差, J2軸初期角度の誤差を測定し, それを手先の2次元位置決めに及ぼす影響をシミュレーションした (右図, 緑)

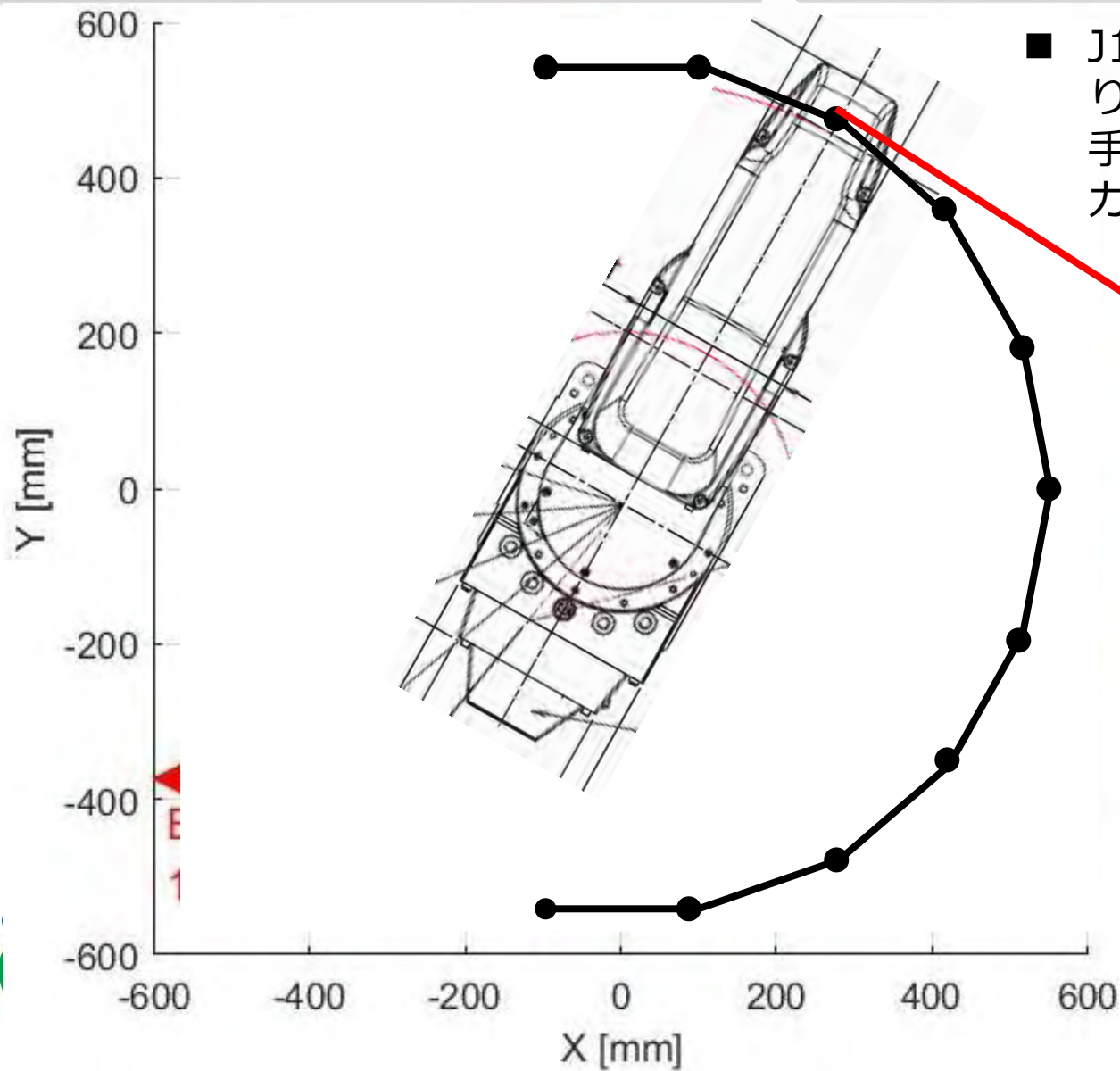
■ トラックで実測した軌跡 (左図) と比べると, これらの誤差以外の影響が大きいことが分かる

## 我々の基本的なアイデア：より精緻なロボットのモデル

- 例えばJ1軸を，指令角度  $\theta_1$  に割り出したとき，実際には  $\Delta\theta_1$  だけ角度誤差がある。
  - この誤差は，一定値ではなく，指令角度  $\theta_1$  の関数のはず。
  - ロボットの軸は，バックラッシュの影響が大きいいため，回転方向 (+ or -) の関数となるはず。
- 同様の誤差は，J2軸にもある。

どのようにして，各軸の角度位置決め偏差を測定すればよいか？

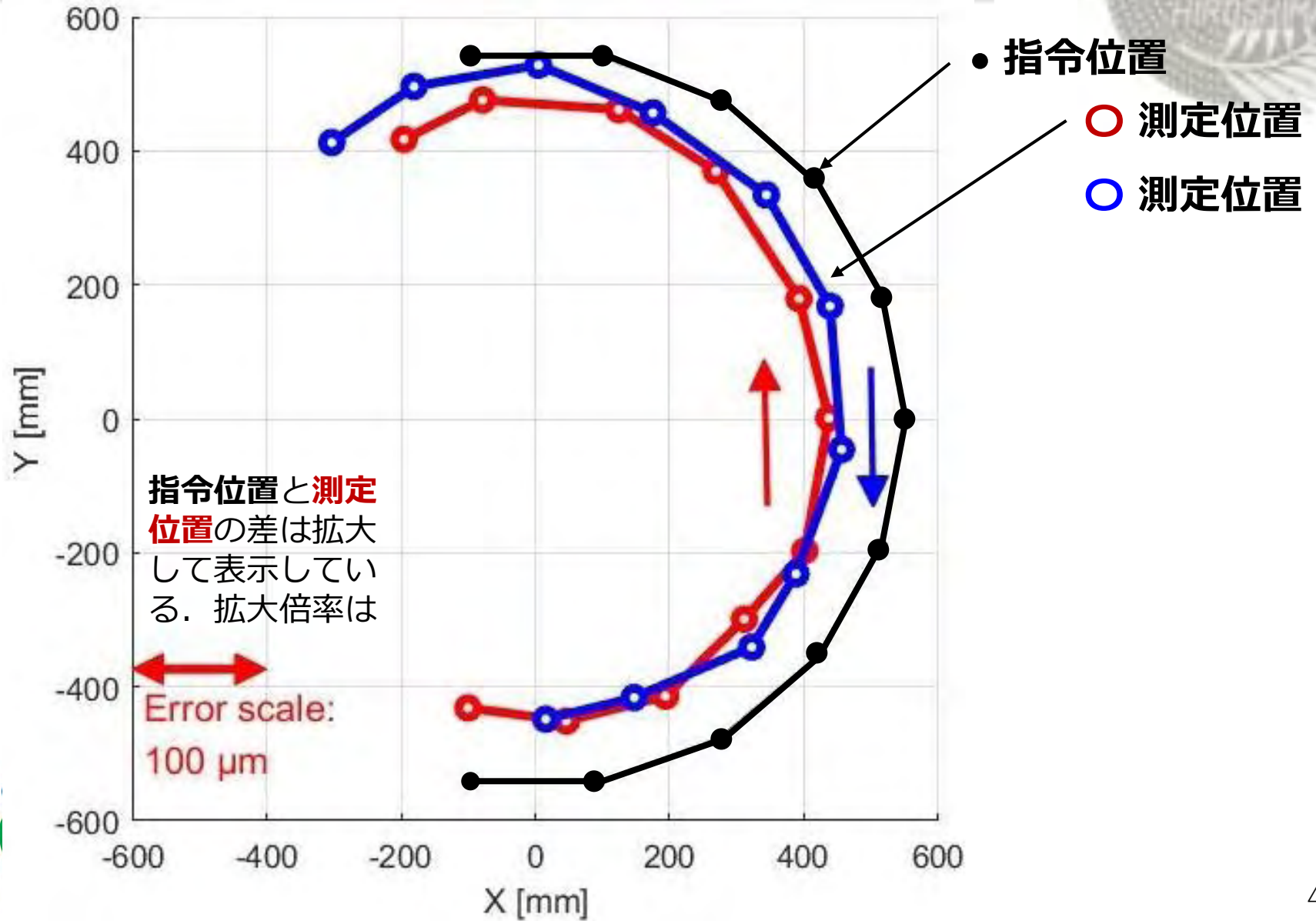
# 測定法① J1軸の測定



■ J1軸のみを一定角度毎に割り出し、停止時のロボット手先位置を、レーザートラッカで測定。往復で測定

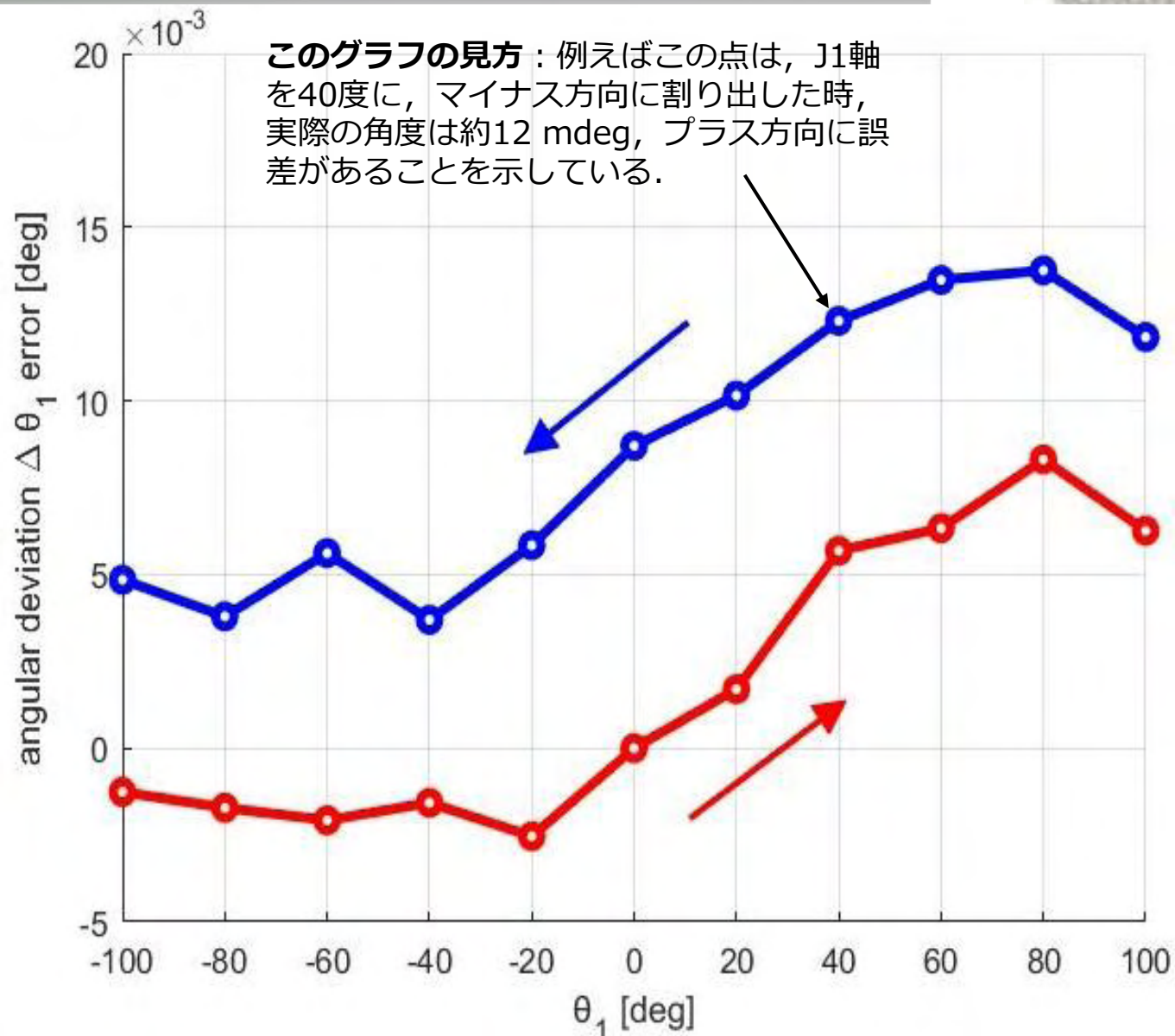
レーザートラッカ

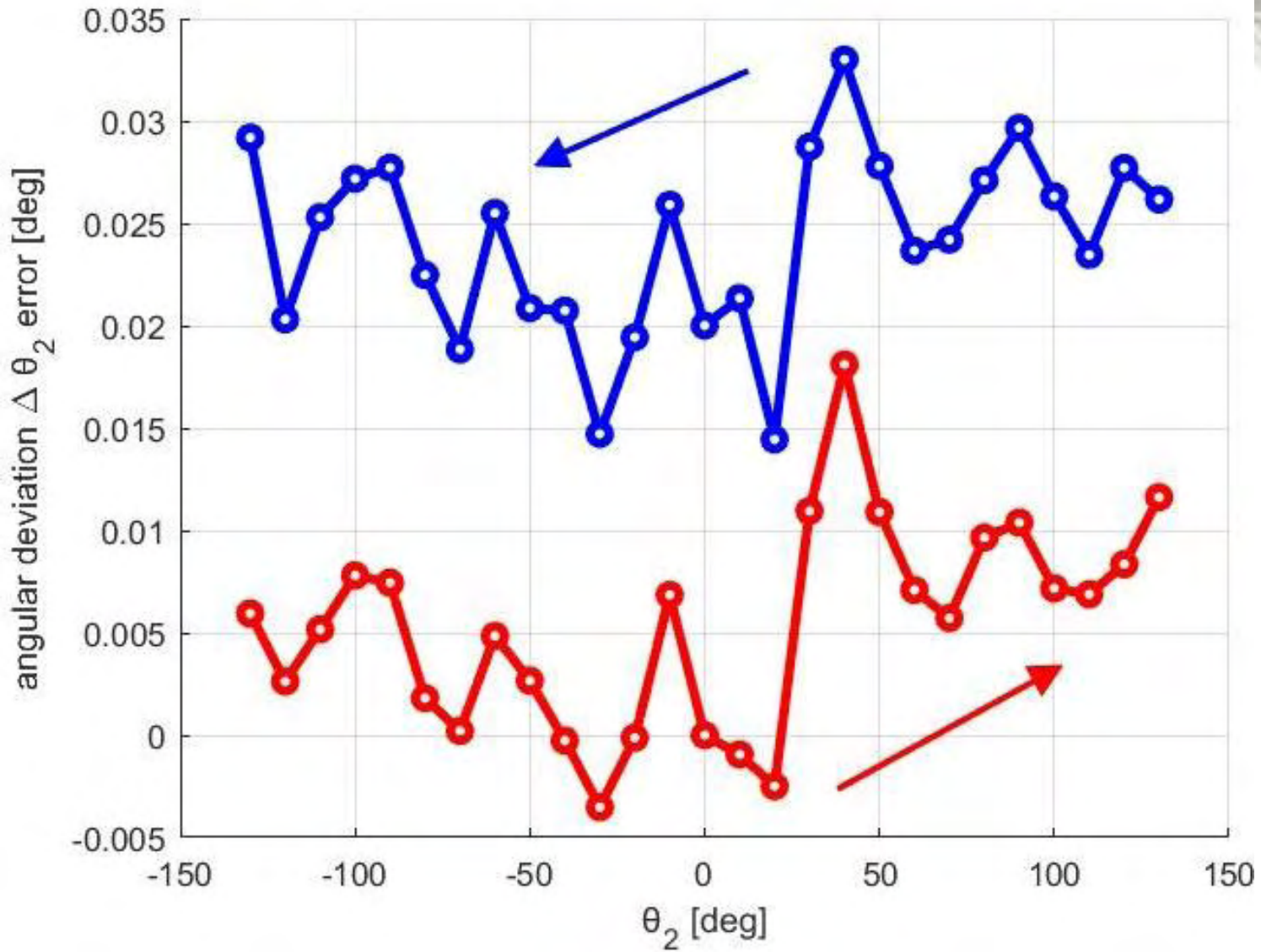
## 測定法① 測定結果 (J1軸割り出し時の手先位置)





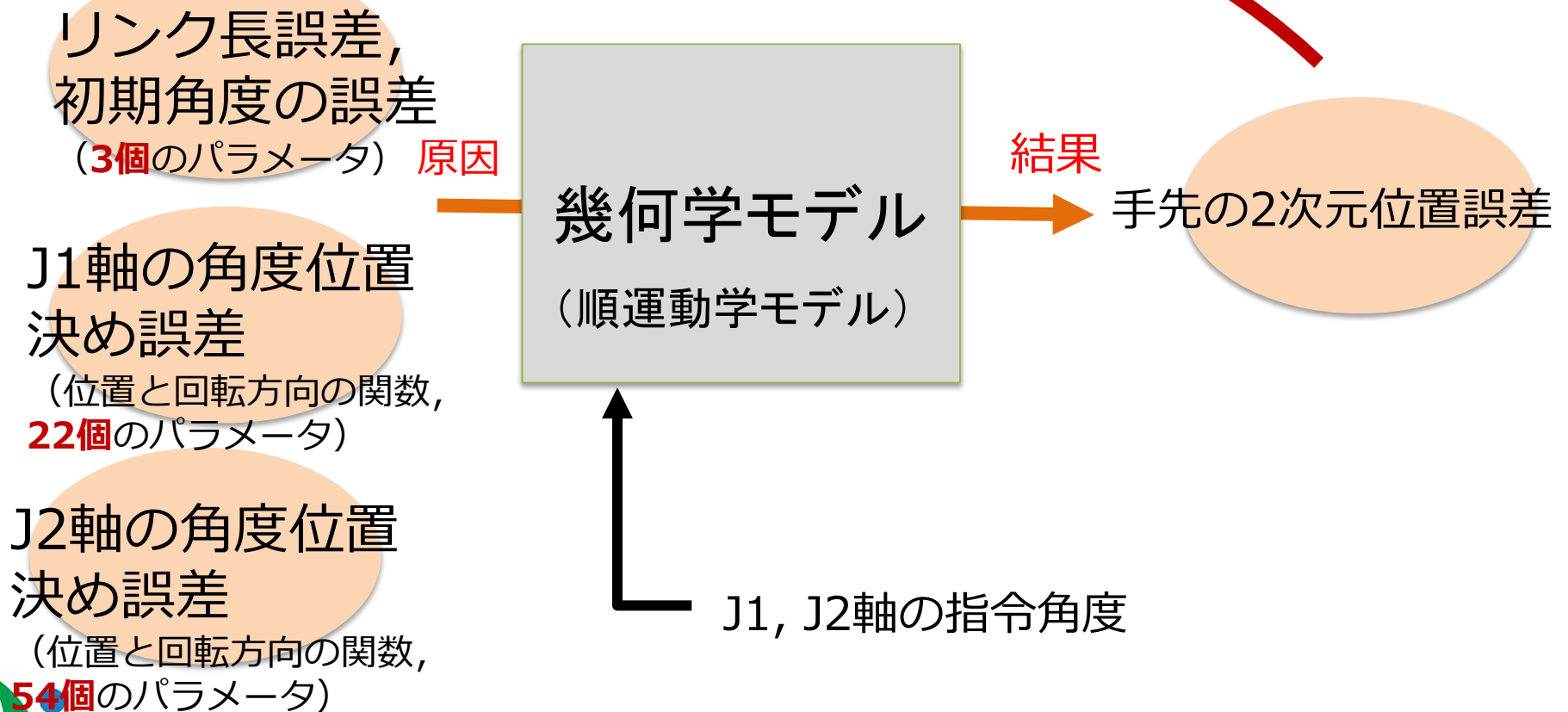
## 測定法① J1軸の角度位置決め偏差の同定結果



測定法② **J2軸**の角度位置決め偏差の同定結果

## 「精緻な幾何学モデル」の提案

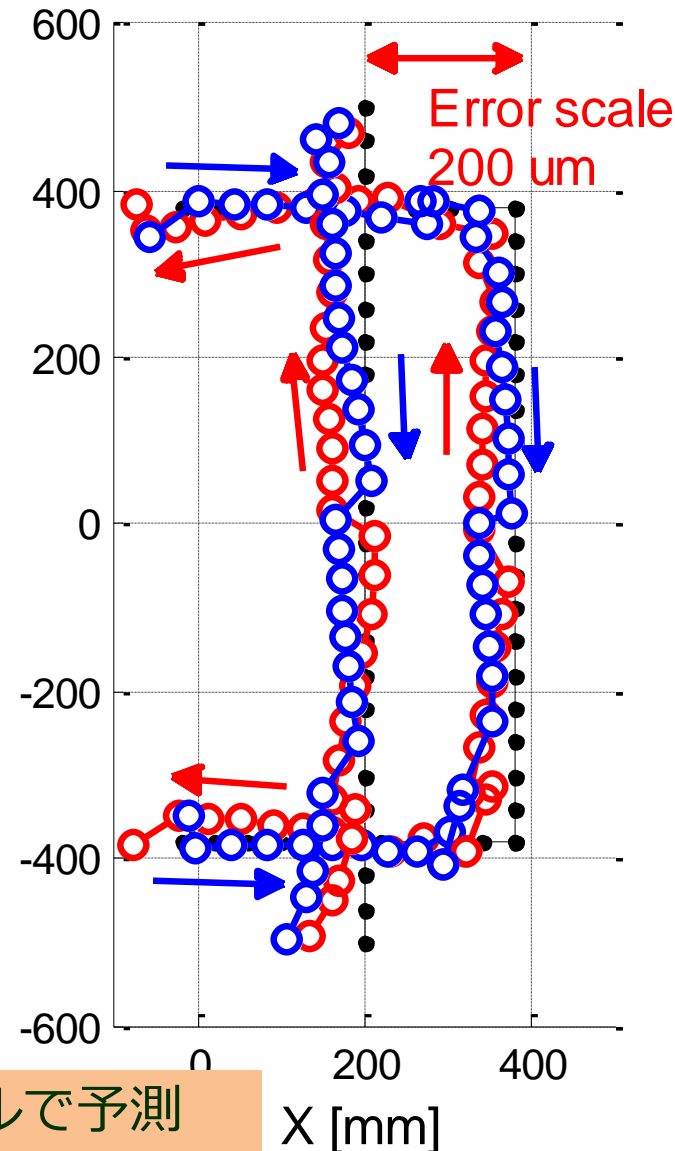
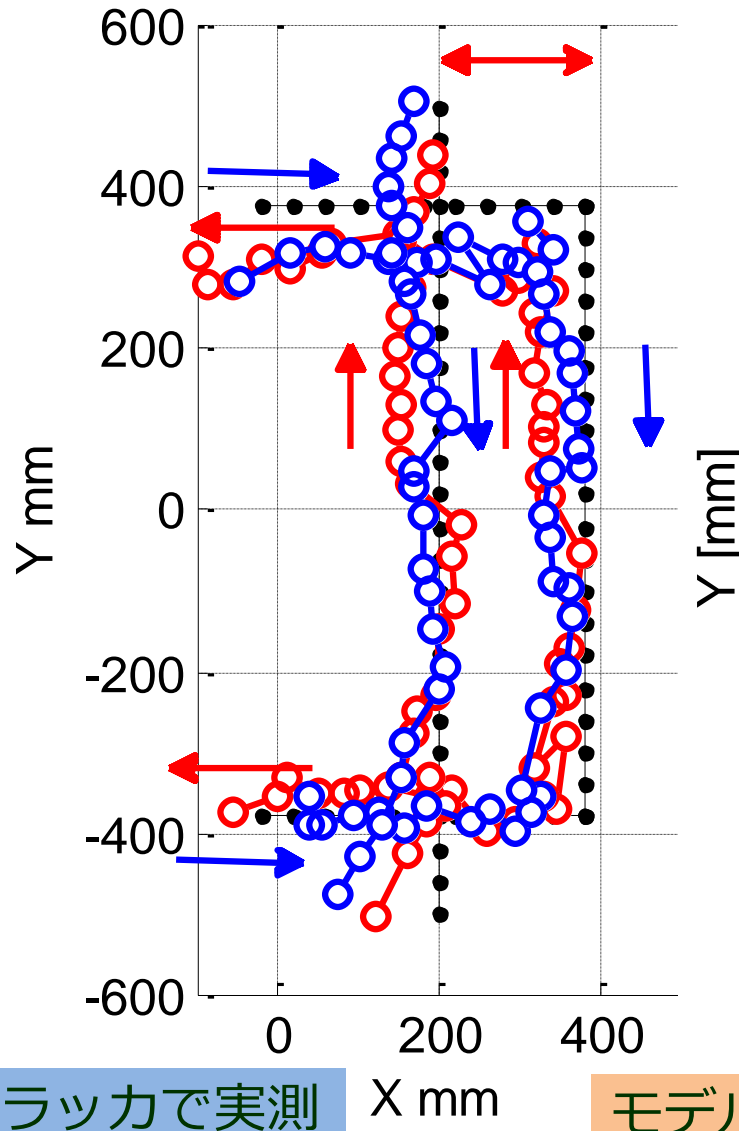
手先の位置測定から、各軸の  
誤差の推定



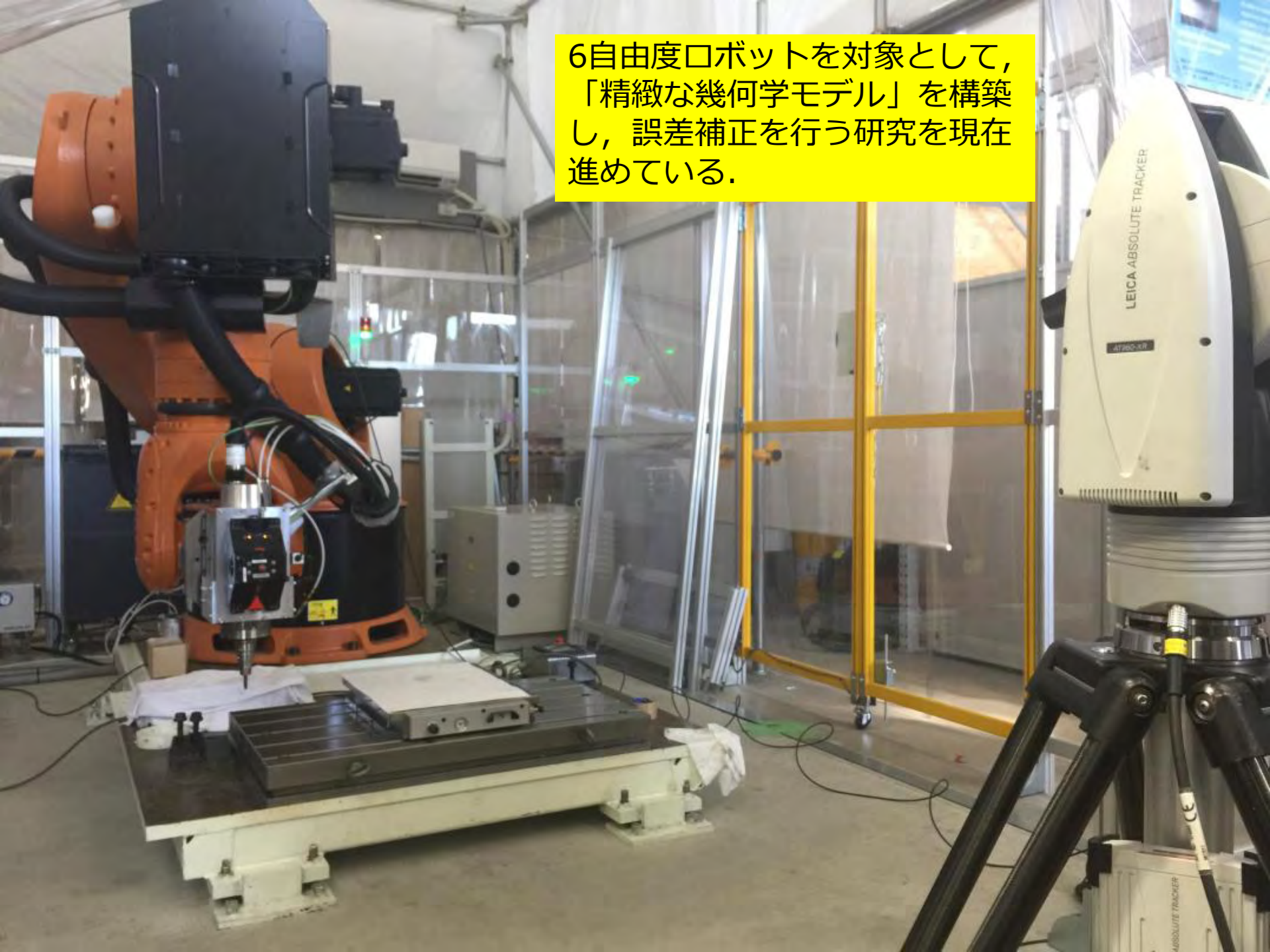
# 「精緻な幾何学モデル」による誤差の予測



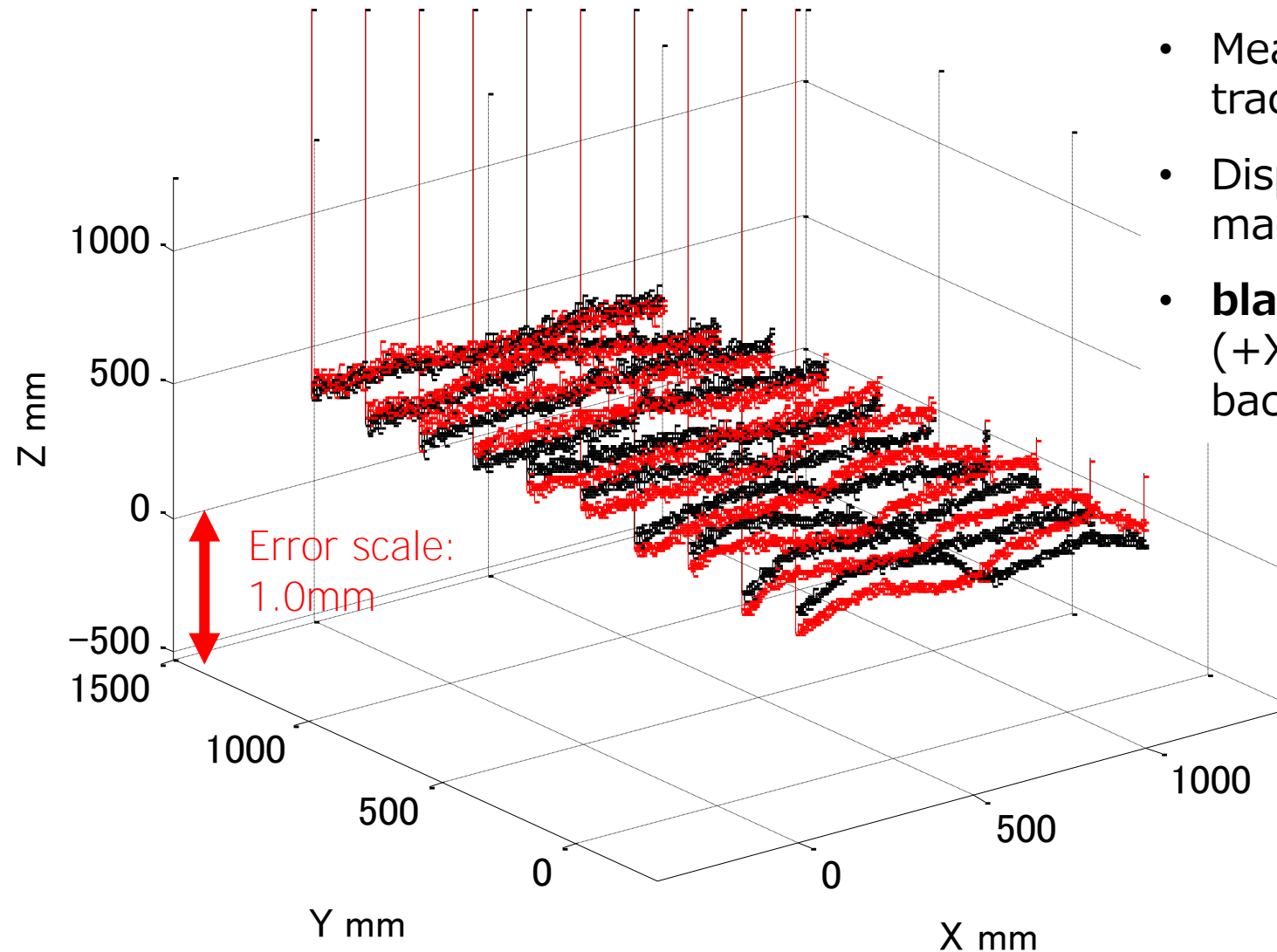
- J1, J2軸の角度位置決め偏差を含んだ、「精緻な幾何学モデル」によって誤差を予測した (右図)
- トラックで実測した軌跡 (左図) に近い。
- 可動領域内の任意の軌跡に対し、この程度の精度で誤差が予測できる。



6自由度ロボットを対象として、「精緻な幾何学モデル」を構築し、誤差補正を行う研究を現在進めている。

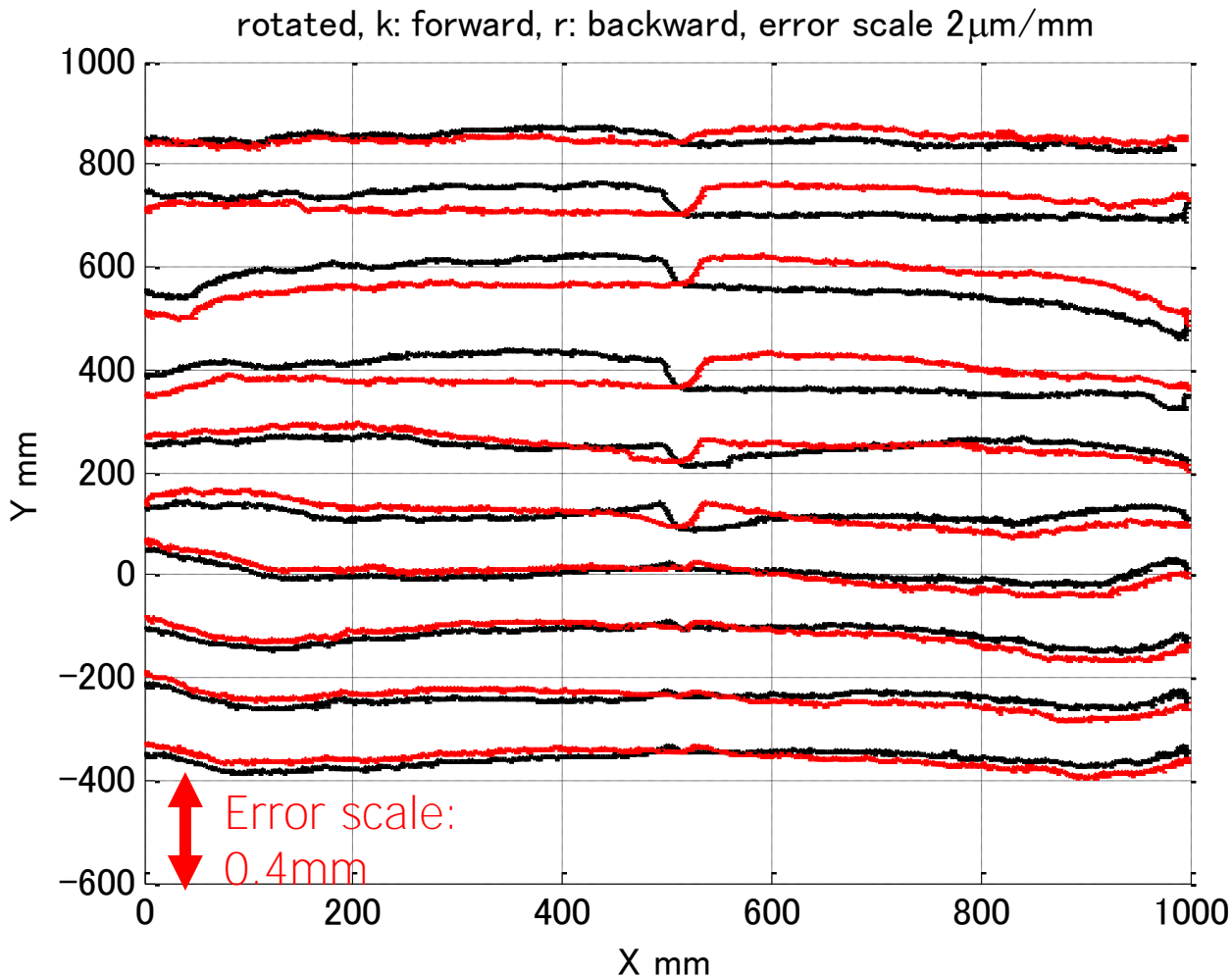


## 測定例 : X: 1m×Y: 1mの範囲で測定したz方向位置誤差

rotated, k: forward, r: backward, error scale 2 $\mu$ m/mm

- Measured by laser tracker
- Displacement in Z is magnified 500 times
- **black:** forward (+X $\rightarrow$ -X), **red:** backward

# 測定例 : X: 1m×Y: 1mの範囲で測定した真直度(Y方向)誤差



- Straightness error in Y directions
- **black**: forward (+X $\rightarrow$ -X), **red**: backward



# まとめ

- 工作機械の精度検査は、ひとつひとつの軸の、ひとつひとつの誤差運動を、独立に測定していくのが基本である。
- それに対し、機構の幾何学モデルを逆に解いて、「主軸端の3次元位置の『一部』を多数の点で測定することで、各軸の誤差運動を全て同定し、工作機械の『精緻な』幾何学モデルを構築する」というアプローチを研究している。
- この考え方を、産業用ロボットに拡張し、ロボットの全ての軸の角度位置決め誤差を「誤差マップ」化し、精緻な幾何学モデルを構築する研究を進めている。
- ロボットの絶対的位置決め精度を、工作機械と同等まで高めることは困難だろうが、可動領域全体であるレベルよりも上であることを保証できれば、ロボットの用途を大きく広げることができると考えてる。