

# 2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度鏡面創成



東京電機大学 工学部 先端機械工学科  
教授 森田晋也  
morita@mail.dendai.ac.jp

## 本日の内容

1. 超精密加工法による光学素子開発事例
2. 机上計測を用いた超精密加工法
3. 光学シミュレーションを利用した光学素子加工技術
4. 2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度鏡面創成

## 講演者の自己紹介：森田晋也



所属  
 ・東京電機大学 工学部 先端機械工学科  
 ・ナノ精度加工研究室 2015年開設

専門  
 ・超精密・ナノ精度加工  
 ・光学素子製造技術  
 ・中性子線利用技術

経歴  
 ・1996~2002 東京大学工学部精密機械工学科 樋口研究室  
 ・2002~ 理化学研究所 (素形材工学研究室・VCAD・RAPなど)  
 ・2015~ 東京電機大学 准教授  
 ・2016~ 同大学 教授

主な研究テーマ

- 自由曲面光学素子・微細光学素子のための超精密加工技術
- 微細光学素子を用いた分光/Hyper Spectral Imaging素子開発
- 離散的2次元面パッチによる形状処理
- X線、レーザー、中性子光学系の製作手法
- 超精密加工を用いた金属組織・欠陥観察 (Additive Manufactured金属、ハイテン・DP鋼など鉄鋼組織)
- Additive Manufacturingによる人工臓器生成法
- 画像処理AI利用など

学生募集資料より抜粋

Q.どんなことができるの? →

- ・光学装置 (カメラ/望遠鏡/内視鏡/...) 高精度化・低コスト化
- ・新しい光学デバイスで見えなかったものが見えてくる
- ・新しい産業・医療の創出の可能性!

色の認識  
 ・人間は3種のセンサー(赤/緑/青)によって色を感知  
 ・カメラも同様に3色のセンサーで認識  
 ・光のスペクトルは連続的(400~700nm:可視光)

分光による色情報取得  
 ・3色ではとらえきれない物質・状態を感知できる

A. 宇宙の遠い星の光から生命誕生の謎が解ける?!

内視鏡でガンが直接見える?!

微細光学素子による分光イメージング素子開発  
 ナノ精度加工されたゲルマニウム層結晶分光素子 (GIGIMCSP Ge Immersion crystal) 分光による生命発生の観察  
 赤外線分光イメージングのための微細光学素子開発 (研究)

参考文献: 朝田博幸他, 2014 Hirahara et al. SPIE, 8450, 2012  
 50,000色(A/A/A)の分光観測に成功 (仮称論文) 金属製顕微鏡でレーザー天体観測  
 全量大気内のCO<sub>2</sub>を観察 → 地球大気にはない状態であることを発見

TEL: 070-7567-0136  
 E-mail: morita@mail.dendai.ac.jp

## 光学素子形状の分類

- 形状複雑度
- 低
- ・平面・球面
  - ・軸対称非球面
  - ・非軸対称非球面・自由曲面
- 高
- ・微細形状光学素子:
    - フレネルレンズ, 回折格子, 反射防止ナノ構造など

## 光学素子の形状と加工法

● 光学素子の形状と加工法

- ・平面: 通常では回転・公転式研磨機で研磨する
- ・球面: オスター型研磨機やカーブジェネレータなど、研磨機とレンズを多方向に動かして研磨する
- ・軸対称非球面: 超精密加工機で軸対称非球面を加工するには、2軸同時制御が必要である
- ・非軸対称非球面 (自由曲面): 超精密加工機で3軸以上の同時制御が必要である

平面形状加工: slurry, workpiece, rotation, polishing pad, evolution

球面形状加工: shift motion, polishing pad, workpiece (spherical lens), rotation

軸対称非球面形状加工: main spindle, axis-symmetric/aspherical surface, cutting tool, cutting path

自由曲面形状加工: cutting tool, cutting path, non-axisymmetric surface, X, Y, Z

## 超精密加工における計測

- ・超精密加工においては、**超高精度な計測装置により、三次元表面性状(形状・表面粗さなど)を計測・評価することが不可欠**
- ・計測装置は、多くの場合、超精密加工装置と同等以上の費用をかけて整備されている
- ・最先端の超精密加工装置の運動精度は、超高精度な形状計測装置に匹敵しており**被加工物を加工装置上で計測できれば多くのメリット**がある
- ・しかしながら、従来は加工装置に取り付けられ、一体的に運用できる高性能な測定プローブ、計測システムは存在していなかった

## 三次元表面性状計測法 (ISO 25178)

方式	特徴	製品例	分類
▶ 面で測定 ・基準器によるフリンジテスト ・レーザー干渉計	<b>高精度・高速</b> <b>球面・平面が主な対象</b> (スタイリング等にて非球面測定可能な装置も)	AMETEK ZYGO Verifire AMETEK ZYGO NewView	位相シフト式干渉法 垂直走査型低コヒーレンス干渉法
▶ 点で測定 ・接触式プローブ	<b>高傾斜角を計測可能</b> <b>傷がつく可能性がある</b> <b>摩擦による測定誤差の可能性</b>	Panasonic UA3P	触針走査法
・非接触式光プローブ	<b>非接触・傷をつけない</b> <b>スタイラス径補正が不要</b> <b>高傾斜角の鏡面は測定が困難</b>	三鷹光器 NH3 Keyence CL-3000*	点合焦式輪郭曲線法 (ポイントオートフォーカス) 色収差変位測定式

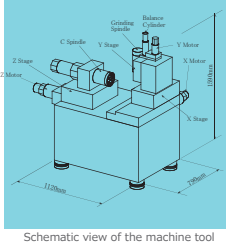
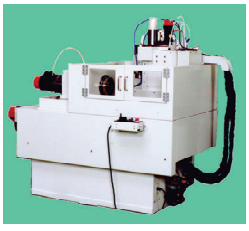
## 加工機上計測のメリット

- ・加工装置上で形状を評価できるため、**迅速に補正加工を実施**することが可能。
- ・**被加工物の着脱時の誤差が発生しない**ため、より高精度な加工を達成することが可能となる。
- ・加工と計測を融合させ自動化させることにより、工具形状や位置の計測も可能で**段取り時間を短縮**できる。
- ・ワークを取り付けた時の傾きや形状誤差を知ることができるため、**エアークットを短縮**できる。
- ・**加工装置の運動精度を容易に検証**できる。

## 加工機上計測の事例紹介

- ・触針式機上形状測定プローブ
  - ▶ 空気軸受け+ルビースタイラス=低圧接触プローブ
- ・非接触測定プローブ
  - ▶ ポイントオートフォーカス式
  - ▶ 色収差変位測定式

# 4軸制御超精密加工装置 ULG-100CH<sup>3</sup> (東芝機械) 1997年

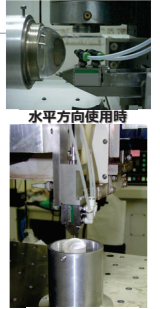
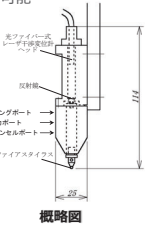


<b>Linear Axis</b>
X,Z-axis: Ultra-high precision V-V roller guide
Y-axis: Ultra-high precision V-V roller guide with pneumatic back-up
Motion range: X:300mm Y:75mm Z:150mm
Scale unit: Laser hologram scale (Mitutoyo)
Resolution: 10nm (non-contact)
Max speed: 1000mm/min (10nm mode)
<b>C spindle</b>
Ultra-high precision pneumatic spindle
Rotary encoder resolution: 1/10,000 deg (position control mode)
Resolution: 10nm (non-contact)
Maximum rotation speed: 3000 rpm (constant speed mode)
<b>Grinding Spindle</b>
Ultra-high precision pneumatic spindle
Max speed: 20,000 rpm
<b>Controller</b>
FANUC 15MB (1m compatible)
Controllable axis: ? (X, Y, C, A, B, C +1)
<b>Auxiliary units</b>
Constant Temperature Enclosure: 23°C±0.1°C
Grinding fluid coolant supply: 23°C±0.1°C
Air supply: 6kg/cm <sup>2</sup> 23°C±0.1°C
Vibration isolation: multi-layered rubber

Schematic view of the machine tool

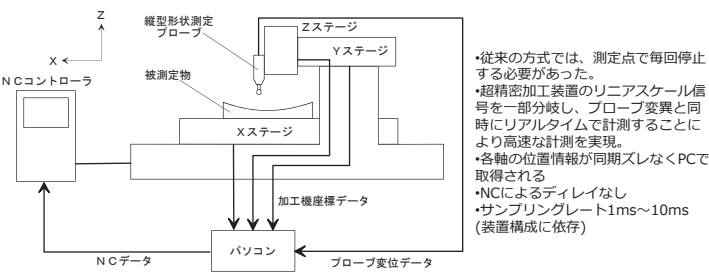
# 触針式机上形状測定プローブ

- ・四角形断面をもつ特殊小型エアースライド
- ・エアースライドの可動部重量が非常に小さく高速測定が可能
- ・推力調整機構を持つ特殊スライド構造
- ・自重キャンセル機能により垂直、水平双方で使用可能。
- ・光ファイバー干渉計によりコンパクトなヘッドを実現



鉛直方向使用時

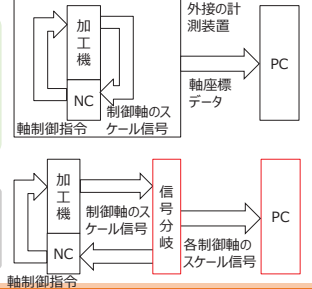
# 机上計測のためのリアルタイム位置計測システム (RPCS: Real-time position capturing system)



- ・従来の方式では、測定点で毎回停止する必要があった。
- ・超精密加工装置のリニアスケール信号を一部分岐し、プローブ変位と同時にリアルタイムで計測することにより高速な計測を実現。
- ・各軸の位置情報が同期スレなくPCで取得される
- ・NCによるディレイなし
- ・サンプリングレート1ms~10ms (装置構成に依存)

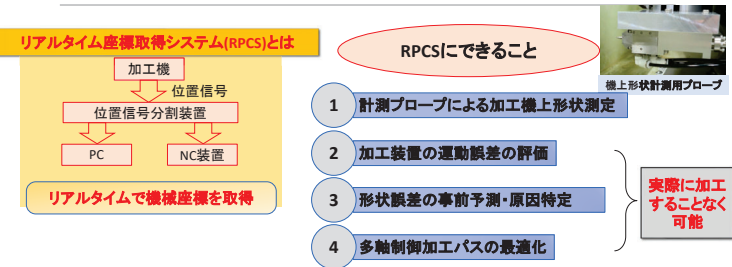
# RPCSとは？

- ・従来の座標取得方法
- ・NCコントロールの直接アクセスはできない(非公開情報)
- ・非同期方式で外接の計測装置を付けて座標を取得する。
- ・NCの機能を使って軌跡データをレコーディングする。
- ・取得データの記録密度、精度、時間の遅れなどの制限が存在する。
- ・加工中の軌跡取得が困難である。



- ・本研究で提案する座標取得手法 (RPCS)
- ・制御軸の信号を分岐させスケール信号をリアルタイムで直接取得する。
- ・時間的な遅れがほとんどなく、データの記録密度、精度が高い。
- ・外接の計測装置は必要なく、加工中にも取得できる。

# RPCSの活用法



- RPCSにできること
- 1 計測プローブによる加工机上形状測定
  - 2 加工装置の運動誤差の評価
  - 3 形状誤差の事前予測・原因特定
  - 4 多軸制御加工パスの最適化
- 実際に加工することなく可能

### 机上計測プローブ 触針式机上形状測定 プローブ

理化学研究所 守安氏により考案

- ・四角形断面をもつ特殊小型エアースライド
- ・エアースライドの可動部重量が非常に小さく高速測定が可能
- ・推力調整機構を持つ特殊スライド構造
- ・自重キャンセル機能により垂直、水平双方で使用可能
- ・光ファイバー干渉計によりコンパクトなヘッドを実現

外観

概略図

### 加工装置 超精密加工機 ULG-100DH<sup>3</sup>(東芝機械)

- ・4軸制御 (XYZC軸)
- ・直動軸はV-Vの超精密ころ軸受け案内, 1nm分解能, リニアモータ駆動
- ・ワーク主軸は超精密空気軸受け, 1/10,000<sup>2</sup>分解能

形状誤差再現性 約±10nm  
理化学研究所 山形氏による検証

### 机上計測プローブ 非接触レーザ式プローブ (三鷹光器)

- ・ポイントオートフォーカススキャン法。
- ・分解能 1nm
- ・小型: 超精密加工装置上に搭載可能
- ・レーザスポット径は0.4μm程度→水平方向分解能が高い, 微細形状測定に効果的
- ・連続フォーカス方式に対応し高速測定が可能
- ・高傾斜角45°

外観

### 加工装置 超精密加工機 NIC-200 ほか (ナガセインテグレックス)

- ・5軸制御 (XYZBC軸)
- ・直動軸は油静圧案内, 10nm分解能, リニアモータ/油静圧ねじ駆動
- ・ワーク主軸は超精密空気軸受け, 1/10,000<sup>2</sup>分解能

超精密机上計測システムの評価

サブミクロンのうねり (中間周波数形状) 測定・大型ワーク (~300mm) の計測・補正加工が可能。

### 机上計測システムの構築

- ・被測定物 (オプティカルフラット) とレーザ変位計のプローブを設置した状態と写真(左)。
- ・プローブコントロールを設置した写真(右)。

被測定部: 被測定物形状と軸変位データ  
測定部: 机上計測用プローブと軸変位座標データ  
データ解析部: PCでデータまとめと解析処理

位置捕捉とプローブ変位のトリガー遅延は、OMMシステムの精度に影響を与えた。

キャプチャーのクロック周期が1MHzであることから、この遅延は約1μsと見積もられた。このため、トリガー遅延による位置誤差は、送り速度100 mm/minで約1.6 nmと推定された。

### Y軸の微小ステップ駆動実験結果

- ・青色は工作機械のY位置  $Y_M$
- ・赤色はプローブの変位  $Y_P$
- ・1nmのステップモーションの結果 (水色:  $Y_M$ の5点移動平均、ピンク:  $Y_P$ の5点移動平均)。

微小ステップ駆動例 (5sごとに静止)

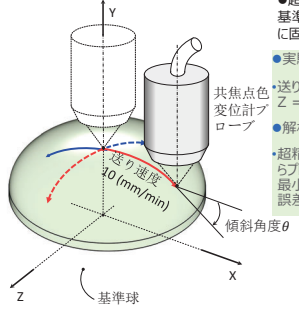
(a) ステップ間隔 100 nm (b) ステップ間隔 10 nm (c) ステップ間隔 1 nm

- ・ステップ間隔 100, 10 nm 範囲内ではレーザ変位計の出力から判断すると、ステップ状に反応していると考えられる。
- ・ステップ間隔 1nm では明確なステップ状の反応は見られないもののほぼ出力に追従していると考えられる。

- プローブのプロファイル測定精度検証では、プローブの測定精度と測定可能な傾斜角について検証を行う。
- 超高精度3次元形状測定装置UA3Pを校正できる最も信頼性の高い基準球（窒化ケイ素ボール 半径5.55675mm）は超精密加工機のB軸に固定され計測を行う。

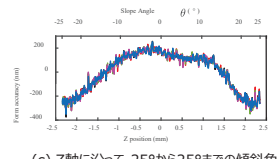
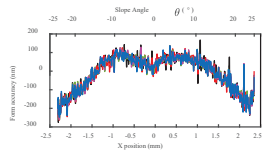
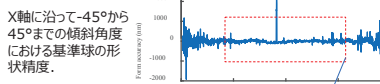
●実験条件

- 送り速度は10 mm/min. 傾斜角度 (θ) の測定範囲は ±45°、X または Z = ±3.929 mm に相当する。
- 解析方法として
- 超精密加工機の位置データとプローブの変位を同期して取得し、Y 位置データからプローブの変位データを減算してプロファイルデータを作成した。測定データは、最小二乗法を用いて、指定された半径の基準球を持つ円曲線にフィットさせた。誤差データは、測定データからフィットした円データを差し引くことで得られた。



参考データ:  
UA3Pによる基準球の評価結果  
測定傾斜 ±30°: ±0.05μm  
±45°: ±0.10μm  
±60°: ±0.30μm

- 共焦点色変位計は、大きな開口数の集光レンズを持ち、測定可能な傾斜角が大きい大きな開口数の集光レンズを持ち、測定可能な傾斜角は ±45° (メーカーデータシートによる) であるが、傾斜角が大きい場合や鏡面の場合には、測定の安定性や精度が低下する可能性がある。
- 測定角度が ±25° 以下の場合、プロファイル精度は ±300nm である。
- 測定角度が ±15° 以下の場合、測定結果は基準球の形状精度に対応している。X軸とZ軸のプロファイル精度は ±100nm である。



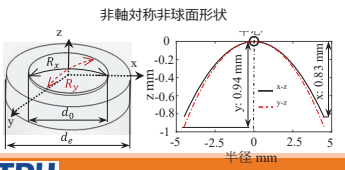
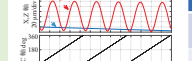
(b) X軸に沿って-25°から25°までの傾斜角の基準球を5回測定したときの形状精度

(c) Z軸に沿って-25°から25°までの傾斜角の基準球を5回測定したときの形状精度

3軸同時超精密加工における中間周波数加工誤差のリアルタイム座標取得(RPCS)を用いた原因究明

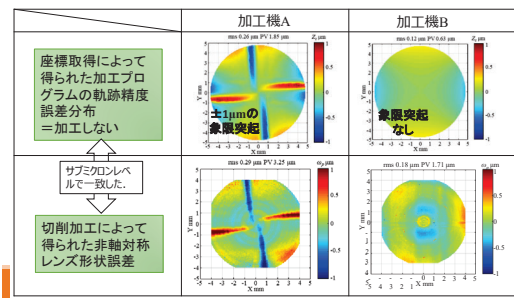
- RPCSを用いた運動精度評価法を、2種類の超精密加工機(A,B)で非軸対称非球面形状をXYZ3軸同時制御加工する。
- 加工軌跡精度と被加工物の形状精度を比較し、定量的検討を行う。

回転同期型3軸同時制御加工プロセス



項目	加工機Aの仕様	加工機Bの仕様
運動軸	V-Vローラーガイド (X,Z軸) V-V対称ガイド (Y軸)	V-Vローラーガイド (X,Z軸) V-V対称ガイド (Y軸)
駆動軸	ACサーボ	リニアモーター
駆動方法	ボールねじ駆動	リニアモーター駆動
ストローク	Y軸300mm X軸150mm Z軸150mm	Y軸400mm X軸150mm Z軸150mm
駆動分解能	50nm	5.1nm
制御	分散駆動式 空気軸受け	分散駆動式 空気軸受け
繰り返し精度	1/10000°	1/100000° (R.L.制御)
防塵	機密ボックス内	空気ろ過式 防塵装置

3軸同時超精密加工における中間周波数加工誤差のリアルタイム座標取得(RPCS)を用いた原因究明



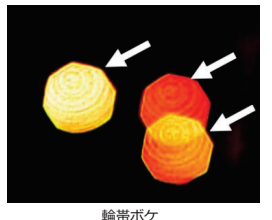
- 【まとめ】RPCSによる座標キャッチャーデータから算出された軌跡偏差は、最終的な被加工物の形状誤差をおおむね再現しており、特に象限突起等の影響による加工誤差はよく再現できていることが判明した。
- 一致していない点は、
- 制御系に起因すると思われる偏差
  - 姿勢変化
  - 機械的な真直度の影響
  - 被加工物のチャッキングによる変形など

形状誤差計測データに基づく光学機能の評価手法

- 形状計測データから光学機能を予測できれば、効率のよい光学素子製造プロセスが可能となる
- ここでは**金型加工時の微小なうねりによる光学機能が劣化する例として、「一眼カメラ非球面レンズの形状誤差と輪帯ボケ」**を対象とする

非球面レンズの製造と輪帯ボケ

- 非球面レンズの大量生産には、超精密旋盤で加工した金型で素材をプレス成形する「モールドレンズ」などの製造方法が一般的である。
- 研削・切削加工で発生する「うねり」が、レンズの最終的な製品としての性能に影響を与える。→ボケ像にできる「輪帯ボケ」
- レンズではナノメートルレベルの誤差であっても、輪帯ボケの発生などの目に見える影響が出てしまう。



輪帯ボケ

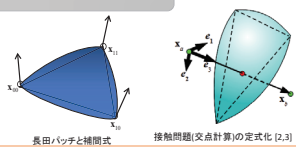
[1]Nagata, T., Comput. Aided Geom. Des., 22 (2005), 327-347 [2]浜他, 日本機械学会論文集(A), 72, 714(2006), 60-67, [3]長田 東京大学大学院博士論文

長田パッチ<sup>[1]</sup>による形状表現

- 長田パッチ
  - 2005年に長田が提案[1]
  - 多角形メッシュの頂点座標と法線ベクトルのみから決まるパラメトリック2次曲面(パッチ)
  - 隣接パッチ間の連続性が確保可能な巧みな定式化
  - シャープなエッジの表現も可能

$$f(\eta, \zeta) = c_{00} + c_{10}\eta + c_{01}\zeta + c_{20}\eta^2 + c_{11}\eta\zeta + c_{02}\zeta^2 + c_{30}\eta^3 + c_{21}\eta^2\zeta + c_{12}\eta\zeta^2 + c_{03}\zeta^3$$

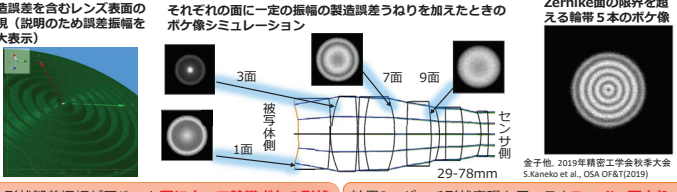
$$0 \leq \eta \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1$$



長田パッチと補間式 接触問題(交点計算)の定式化 [2,3]

一眼カメラの製造過程に起因する輪帯ボケシミュレーション

- 長田パッチを用いて、29-78mm(標準ズームレンズ)の各レンズ面に同様な形状誤差がある場合のボケ像への影響をシミュレーションした。



結果1: 形状誤差振幅が同じでも面によって輪帯ボケの形状や強さが異なる、輪帯ボケの感度の強弱が存在する。 結果2: パッチ形状表現を用いるとZernike面より多く輪帯ボケのシミュレーションが可能。

内容

1. はじめに
2. 2自由度リニアエンコーダ
3. 補正システム
4. ダイヤモンド旋削実験
5. MSFうねり減少効果の評価
6. 結論

# 超精密光学素子の製造技術



## Manufacturing Process

- 工作機械による形状創成プロセス
- 超精密切削
  - 超精密研削
  - etc.

- 表面仕上げ加工
- 遊離砥粒研磨
  - 磁性流体研磨(MRF)
  - イオンビーム研磨
  - etc.

- 成形による量産
- 樹脂成形
  - ガラス成形
  - etc.

工作機械の軌跡精度 → MSFうねり (中間周波数形状:  $0.1 \sim 10 \text{ mm}^{-1}$ ) として性能に影響

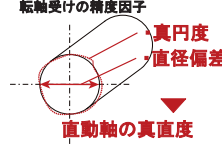
VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# 超精密加工機の軌跡精度誤差要因

超精密非球面加工機(芝浦機械)



高剛性  
シングルナノメートルレベルの高精度



被削物

MSFうねり

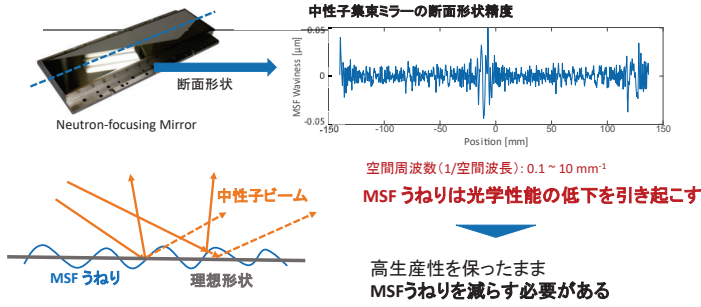
回転方向

真直度誤差

切削工具

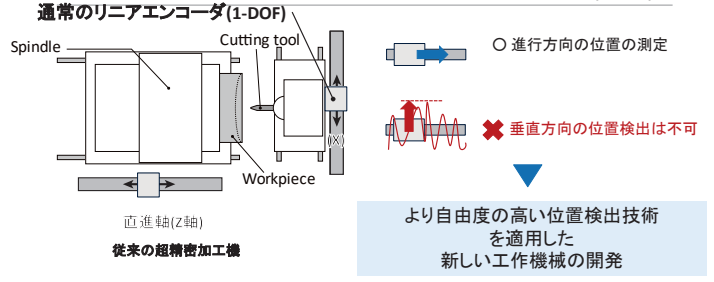
VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# 光学鏡面上のMSFうねりの影響



VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

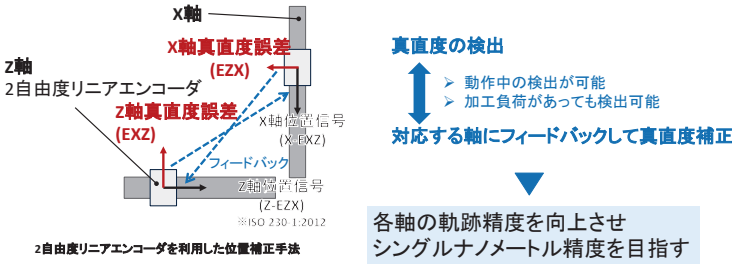
# 本研究の目的



VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

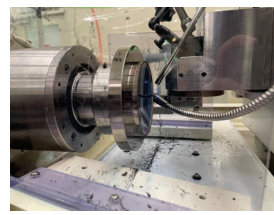
# 本研究の目的

## 2自由度リニアエンコーダ



VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# 本研究の目的

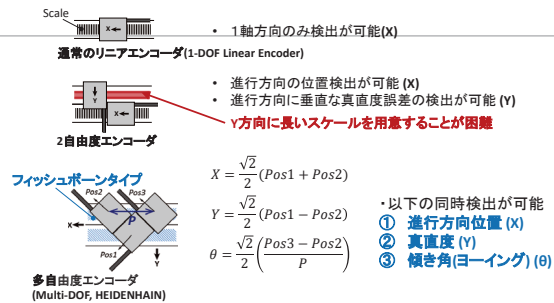


- 2種類の球面レンズ形状の加工
- 補正あり (With compensation)
  - 補正なし (Without compensation)
- MSFうねりの発生状況の比較を行う

2軸加工によるダイヤモンド旋削加工による効果実証

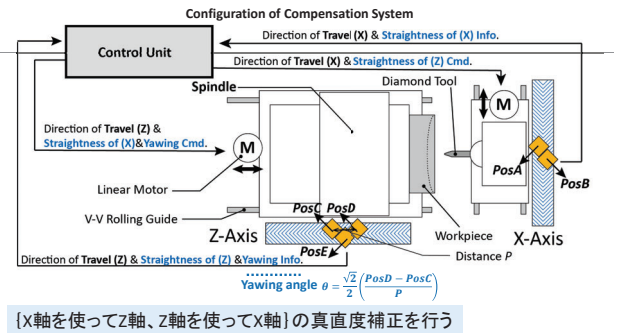
VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# 2自由度エンコーダ



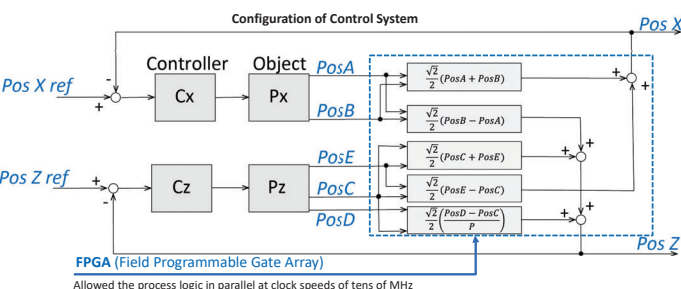
VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# 2自由度エンコーダを用いた超精密旋盤の構成



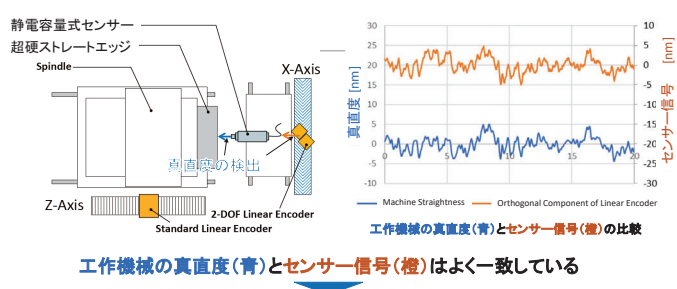
VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# 制御システムの構成



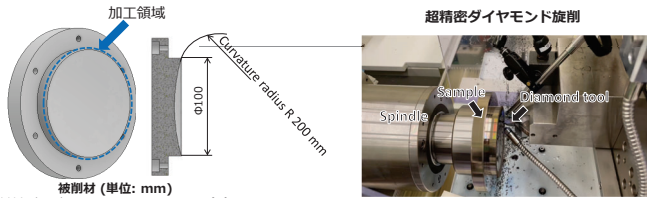
VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# 真直度の確認



VCADシステム研究会光学素子分科会2自由度リニアエンコーダによるリアルタイム真直度補正を適用した超精密加工機による高精度研削機

# ダイヤモンド切削実験



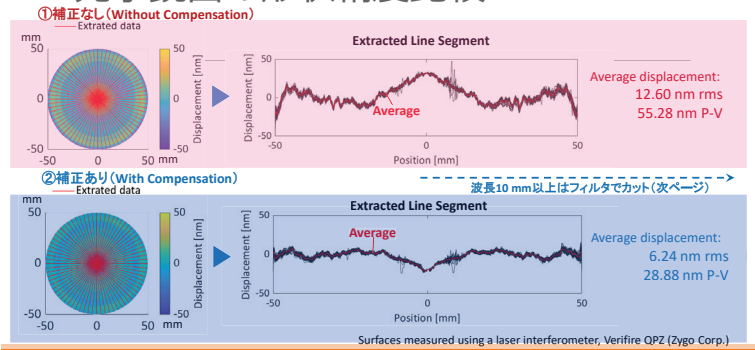
被削材 (単位: mm)  
材料: 無電解Ni-PめっきされたAl-Mg合金

工作機械  
超精密加工機  
ULC-100F(S) (芝浦機械)  
分解能: 0.1 nm (直動軸)  
単結晶ダイヤモンド工具  
先端R 1.00 mm

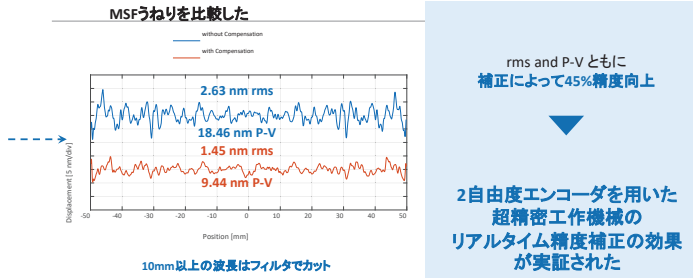
送り速度  
1 mm/min  
主軸回転速度  
1000 min<sup>-1</sup>  
理論表面粗さ  
0.125 nm (p-v)

- 2種の被削材を用意
- 補正なし (Without compensation)
  - 補正あり (With compensation)

# 光学鏡面の形状精度比較



# 光学鏡面の形状精度比較



# 結論

- 2自由度リニアエンコーダを使用した超精密加工機用の新しい補正システムを導入。
- ダイヤモンド旋削の比較実験を行い、補正あり、補正なしの2つの球面光学面を作製した。
- 補正ありの光学面は、補正なしの光学面に比べ、振幅が45%減少した。
- この補償システムの有効性が、高精度の球面作製において実証された。

## 今後の展望

- 補償係数の検討と補償方法の検討
- 各種超精密工作機械や自由曲面光学部品製造への本補償システムの広範な応用