

Objetivo: calibración automática de patrones 2D

Mejoras:

- i. Proceso de calibración automático
- ii. Calibración en 2D
- iii. Rango de calibración hasta (100 x 100) mm
- iv. Reducción de incertidumbre: objetivo $u = 15 \text{ nm}$ (30 nm, $k=2$)

Procedimiento general:

- los motivos a calibrar se localizarán por microscopía óptica
- las medidas se harán por interferometría diferencial
(un espejo solidario al patrón y el otro solidario al objetivo óptico)



Arquitectura general del sistema

- i. **Sistema Base:** patas neumáticas activas, base y puente de granito soporte, amortiguación, apantallamiento
- i. **Sistema de Posicionado:** unidad XY, unidad Z, unidad 6 ejes
- ii. **Sistema Interferométrico:** láseres, interferómetros, espejos de alta planitud
- iv. **Sistema de Visión:** microscopio óptico, cámara
- v. **Sistema de Sensores:** lectura datos ambientales: T, P, H
- vi. **Sistema de Control y Calibración:** sw y hw para la automatización



TRITÓN

CEM

CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

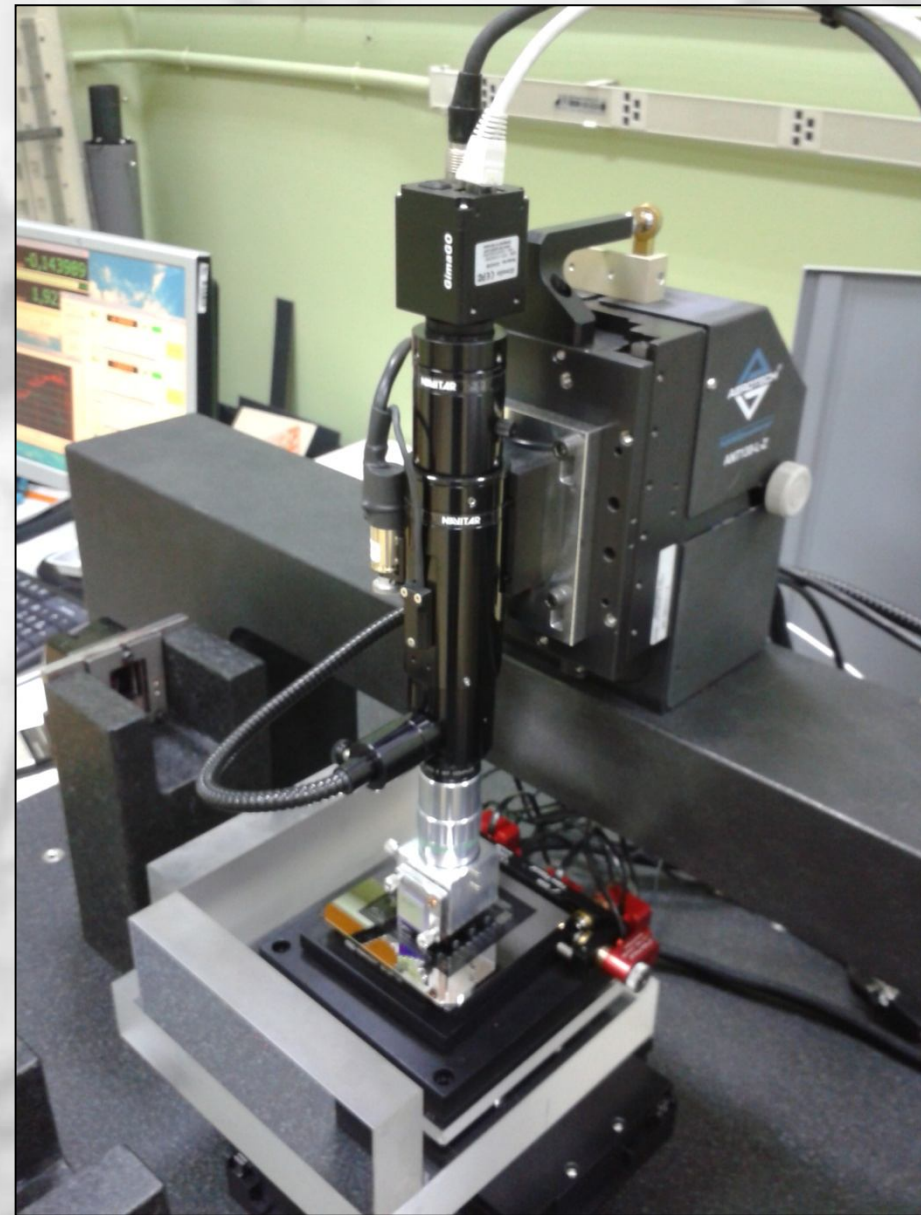
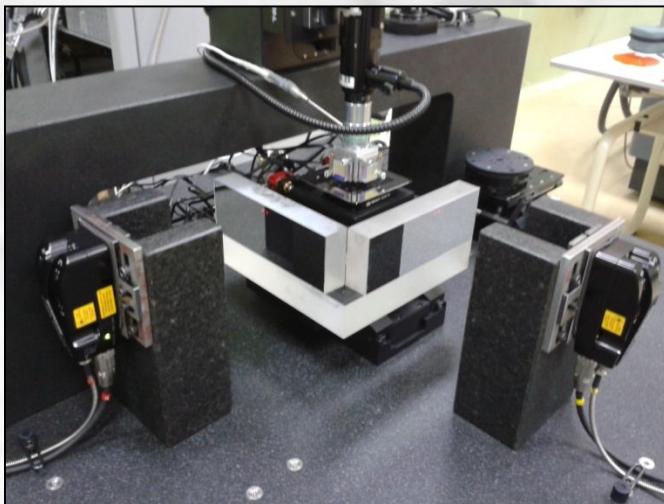
CEM · día Internacional de la Metrología · 2015

Sistema Interferométrico:

- láseres estabilizados, envío por fibra
- interferómetros diferenciales:
espejos en mesa XY y en objetivo
- espejos de elevada planitud ($\lambda/10$),
material de baja expansión (fused silica)

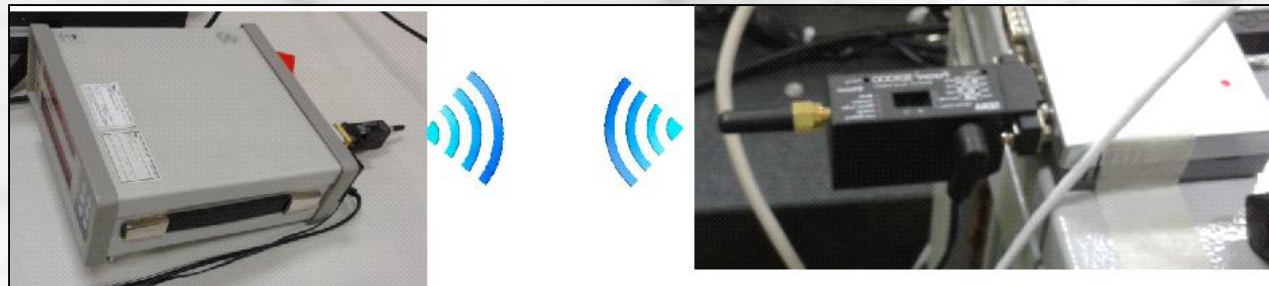
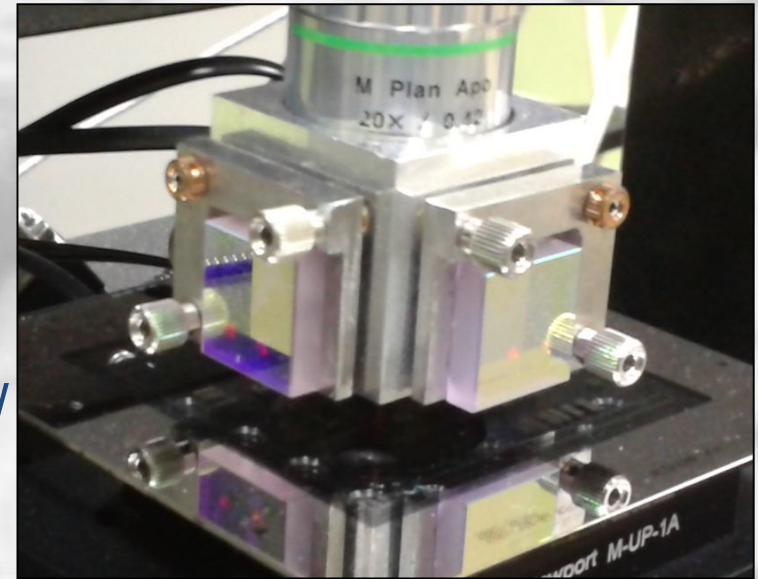
Sistema de Visión:

- microscopio óptico:
 - zoom motorizado 1:9 real
 - iluminación fría (coaxial al eje óptico)
 - objetivo infinity, alta calidad y gran WD
- cámara sensor CCD



Sistema de Sensores ambientales:

- determinación del índice de refracción en **tiempo real**
- estimación de efectos de dilataciones
- lectura **local** de temperatura en muestra y caminos ópticos láser
- lectura **remota** inalámbrica del sensor de presión
- lectura **remota** del sensor de humedad



1. Caracterizar el Sistema Interferométrico

- calibración λ láseres (envío por fibra directamente al peine de frecuencias)
- medida del índice de refracción en tiempo real,
- estabilidad térmica de los interferómetros,
- medida diferencia de fase, repetibilidad

2. Optimizar el alineamiento láseres con ejes desplazamiento

3. Caracterizar la cuadratura entre espejos de medida X e Y

4. Optimizar la cuadratura entre láseres y los espejos de medida

5. Caracterizar la planitud de los espejos de medida

6. Caracterizar las variaciones angulares en los desplazamientos: estimar el error de Abbe

7. Caracterizar la resolución y estabilidad del sistema de Visión

8. Calibración del campo de visión FOV

9. Optimizar la coincidencia del plano focal con la superficie del patrón

10. Caracterizar los errores de planitud de la mesa XY (afectan al FOV)

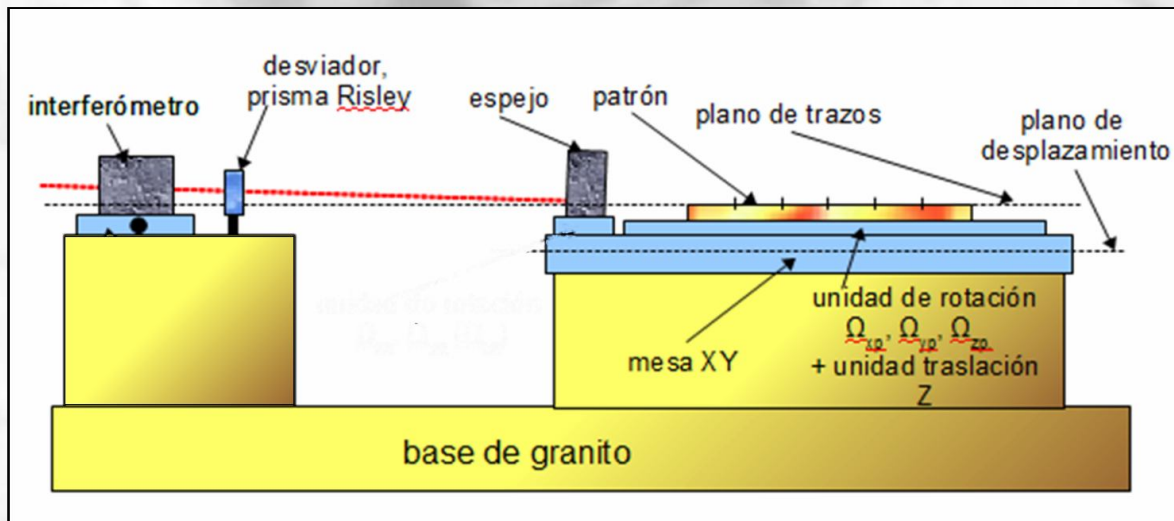
11. Protocolos para el alineamiento del patrón con ejes XY y autoenfoco

12. Otros...

- variaciones térmicas rápidas, y relajaciones mecánicas y térmicas lentas
- vibraciones mecánicas
- turbulencias

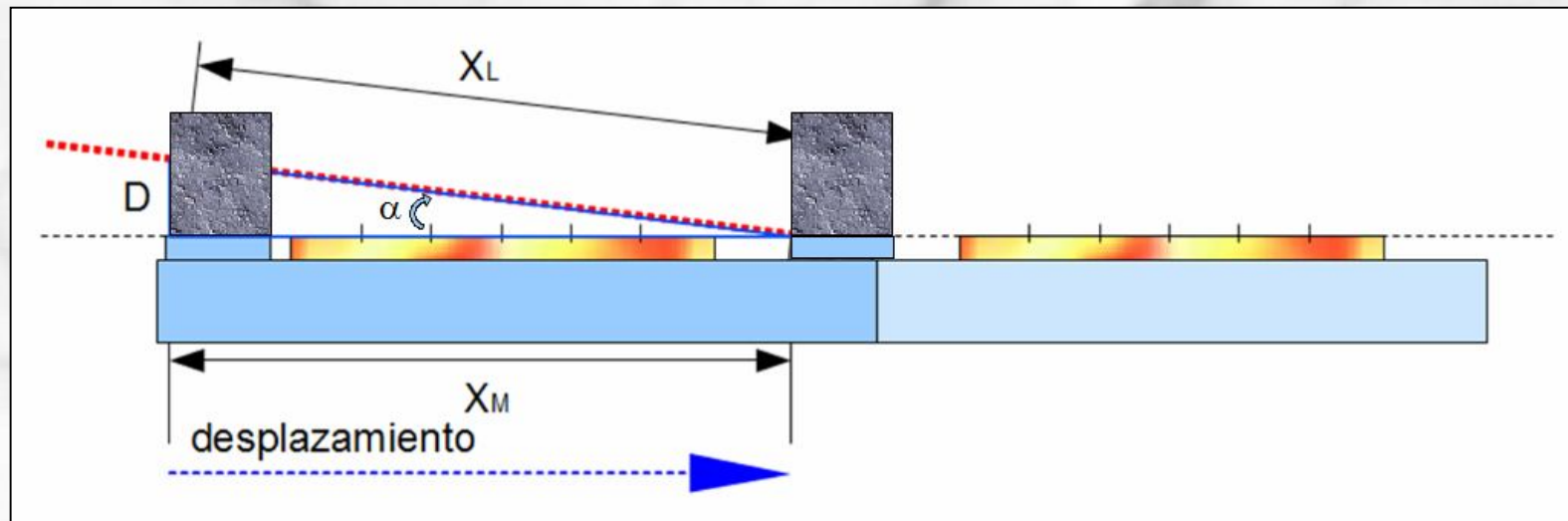


Errores de alineamiento entre el láser X el y eje de desplazamiento X



Error de coseno eje X

$$\Delta X_{\text{COSX}} = X_L - X = X_L \cdot (1 - \text{Cos}(\alpha))$$



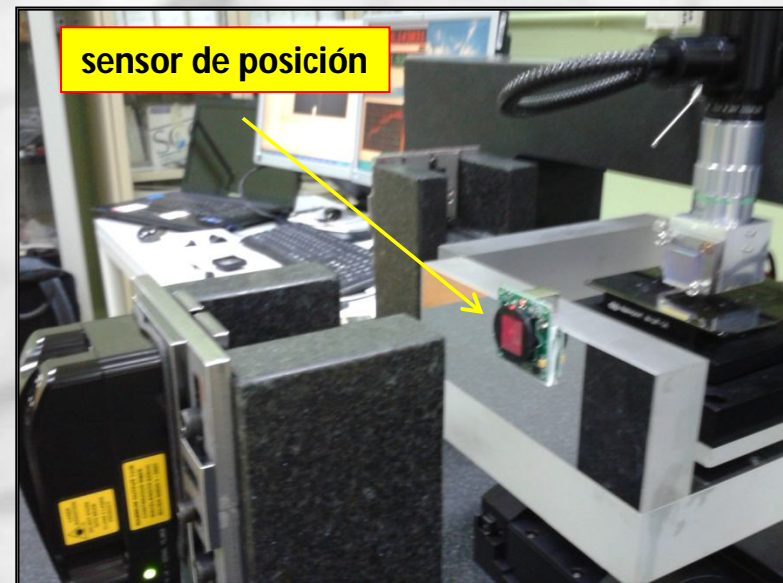
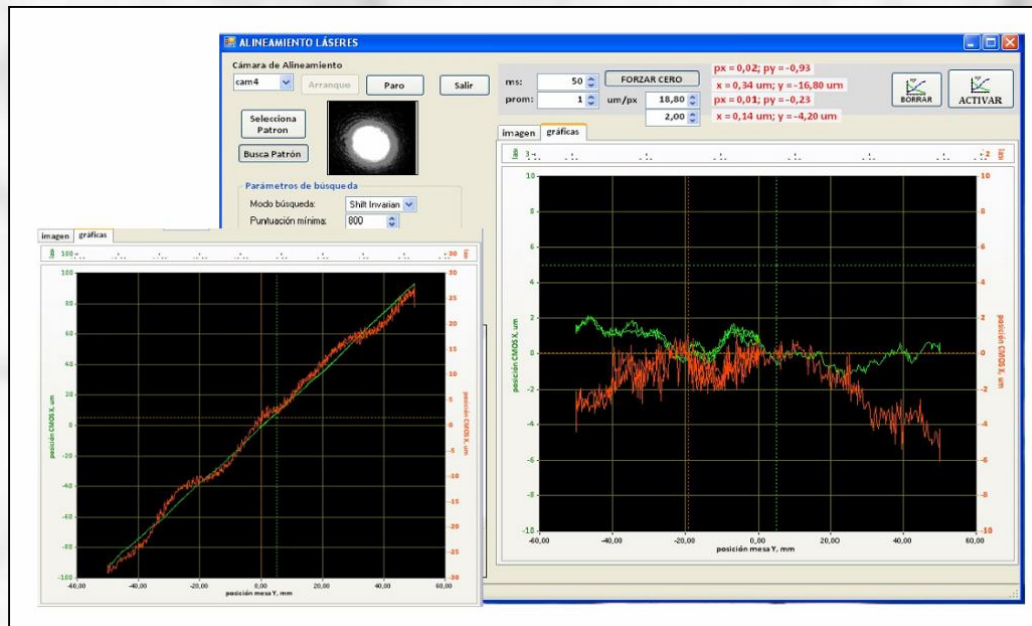
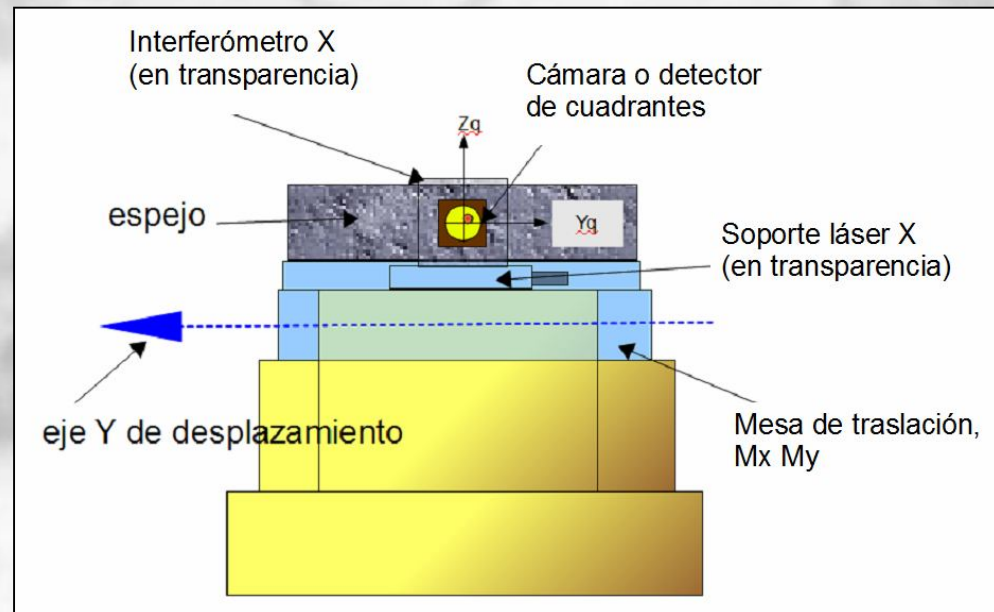
Minimizando los errores de alineamiento entre el láser X el y eje de desplazamiento X

Error de coseno eje X minimizado

$$\alpha \approx 10'' - 20''$$

$$\Delta X_{\cos X} \approx 5 \cdot 10^{-9} \cdot X$$

$$\text{Si } X = 100 \text{ mm} \rightarrow \Delta X_{\cos X} \approx 0,5 \text{ nm}$$



TRITÓN

CEM CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

CEM · día Internacional de la Metrología · 2015

Desviaciones de cuadratura entre los espejos de medida:
medida en el laboratorio de medidas angulares

$$\alpha_x \leq 0,3''$$

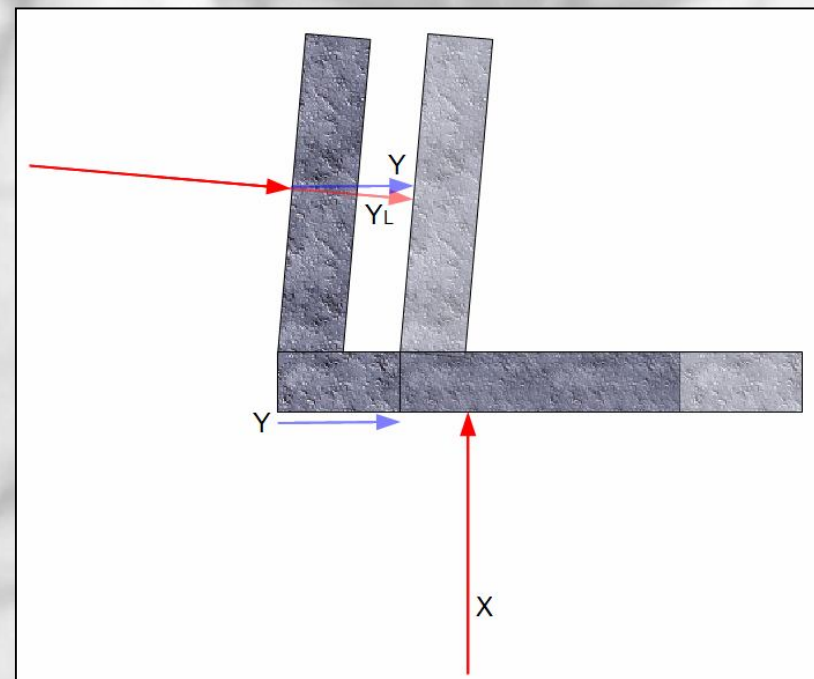
$$\alpha_y \leq 38,4''$$

Aunque son muy pequeñas, si no se mide y corrige por software

→ **error de coseno en el eje Y**

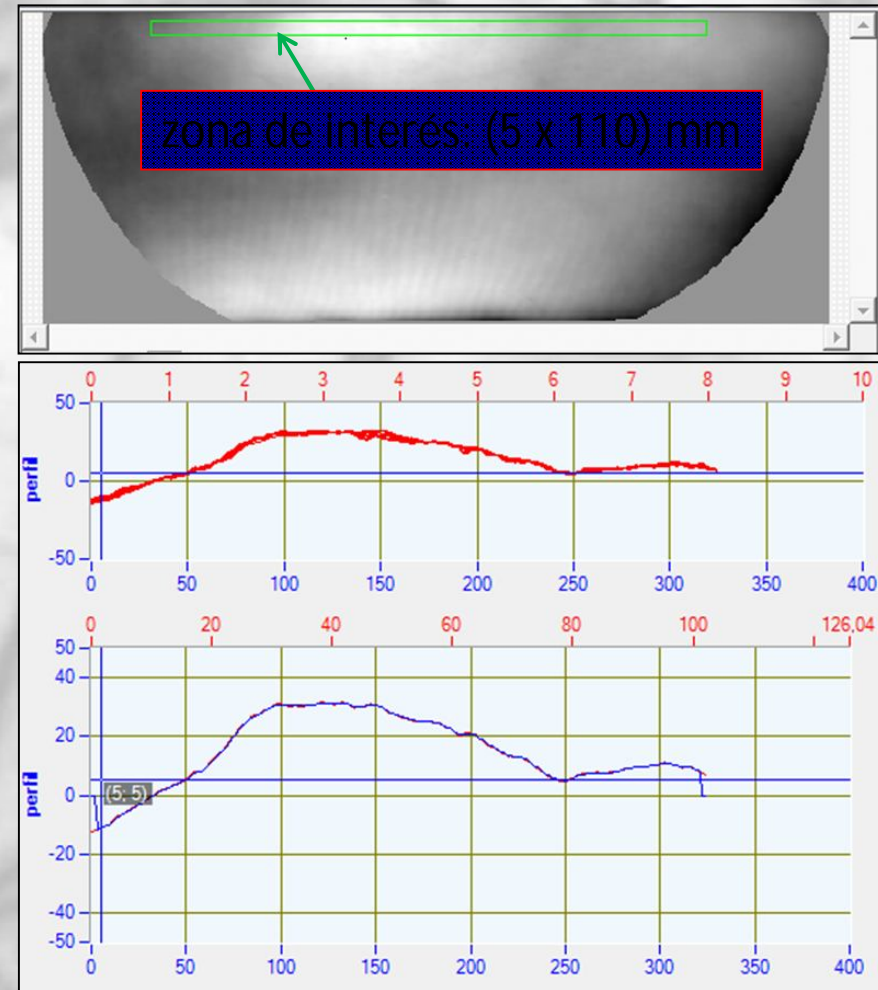
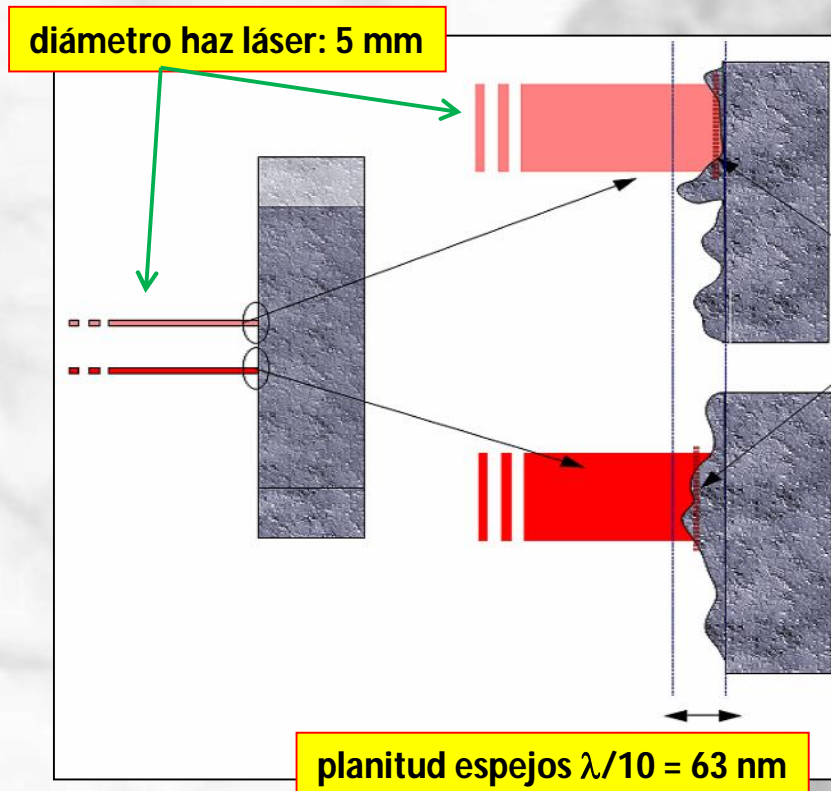
$$\Delta Y_{\text{cosy}} \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot Y$$

$$\text{Si } Y = 100 \text{ mm} \rightarrow \Delta Y_{\text{cosy}} \approx 1,5 \text{ nm}$$



¡La planitud de los espejos es muy importante!

- caracterizar la superficie de interés por interferometría Fizeau: ± 20 nm
- y corregir por software



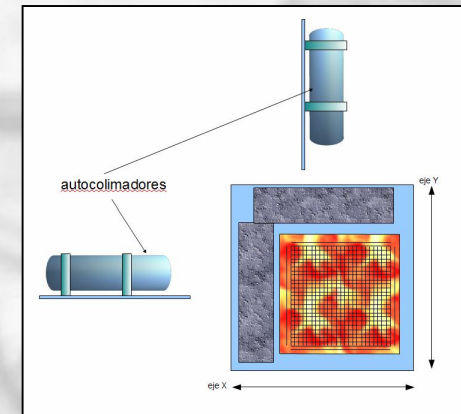
Desviaciones angulares medidas con autocolimador: $\alpha <$

5''

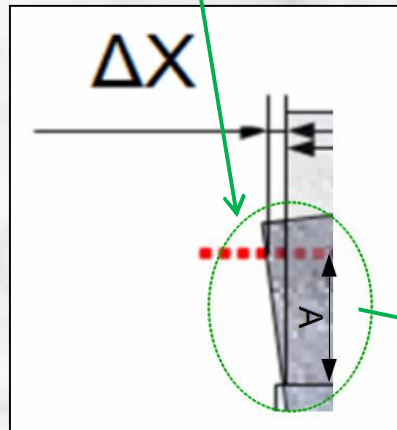
Afectan al error de Abbe de 1º y 2º orden.

Error de Abbe de 1º orden: Abbe 'offset' (A) no nulo

- direcciones de prueba y medida paralelas pero no coincidentes



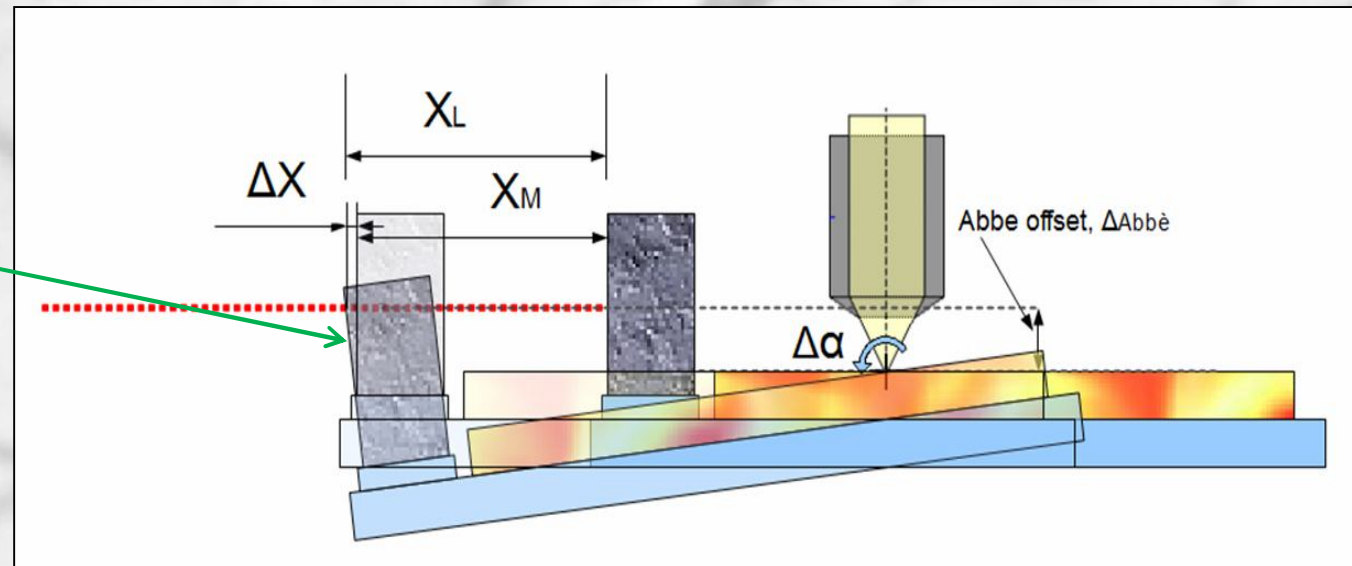
$$\Delta X = A \cdot \tan(\Delta\alpha)$$



¡Es independiente del desplazamiento X!

Puede ser la contribución más importante a la incertidumbre.

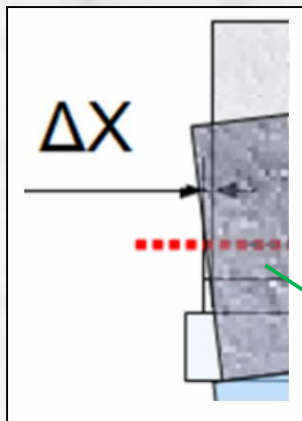
Ejemplo: $A = 0,5 \text{ mm}$, $\Delta\alpha = 5'' \rightarrow \Delta X = 10 \text{ nm}$



Error de Abbe de 2º orden: Abbe 'offset' (A) nulo:

- direcciones de prueba y medida paralelas y coincidentes,
- punto de prueba y medida no coincidentes

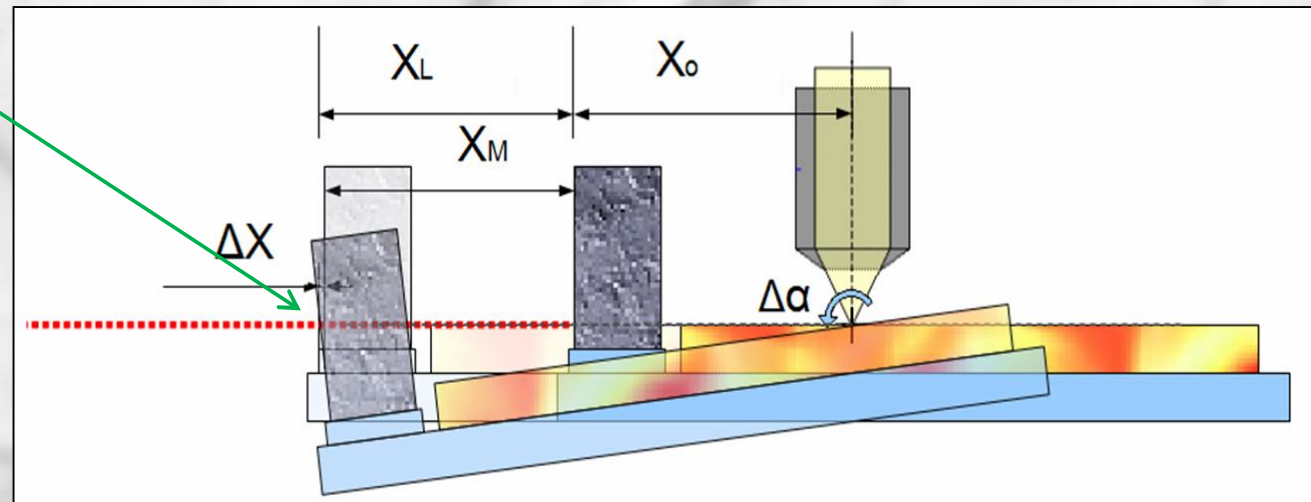
$$\Delta X = (X + X_o) \cdot (1 - \text{Cos}(\Delta\alpha) / \text{Cos}(\Delta\alpha))$$



Depende de la distancia.

Es de menor entidad para pequeños valores de $\Delta\alpha$.

Ejemplo: $X = 100 \text{ mm}$, $\Delta\alpha = 5'' \rightarrow \Delta X = 0,03 \text{ nm}$

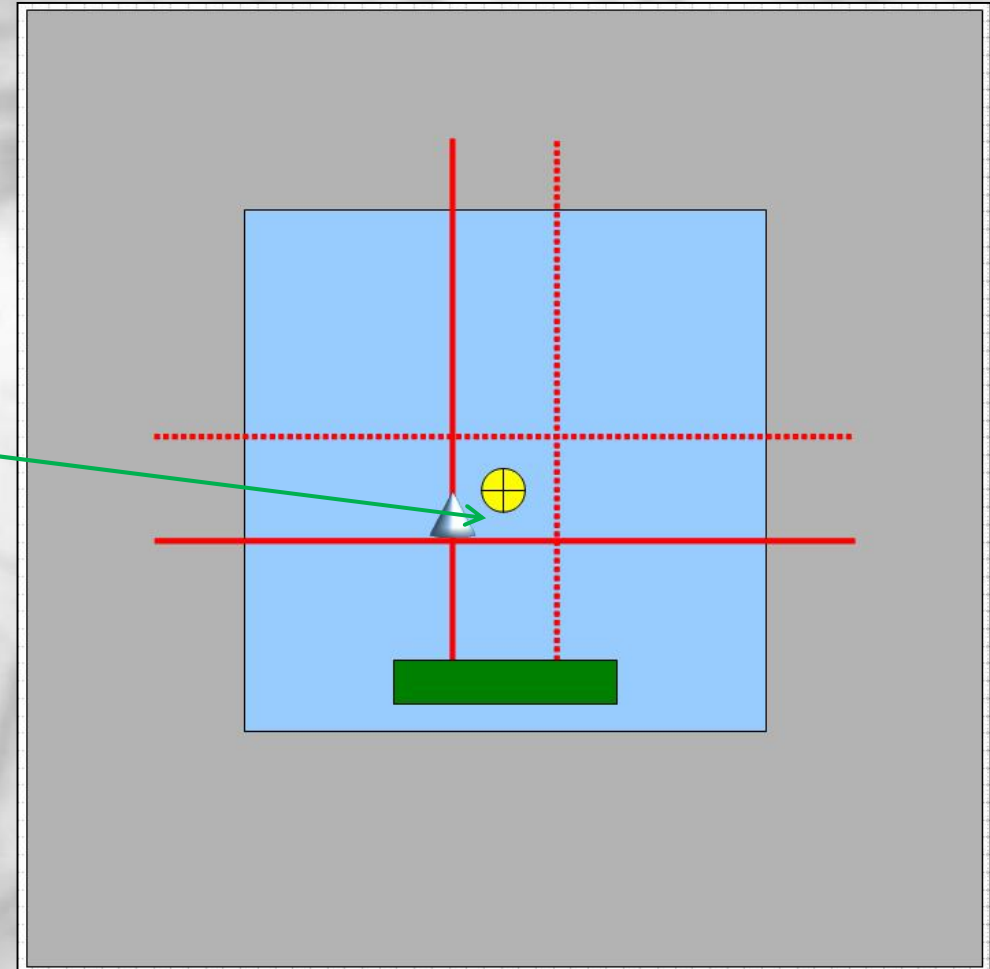
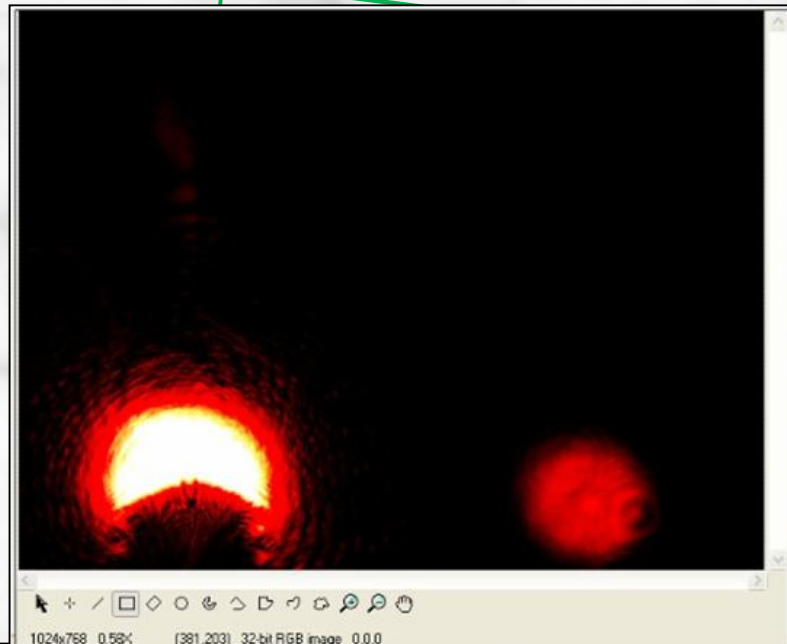


Minimizando los errores de Abbe

Para minimizar el errores de Abbe:

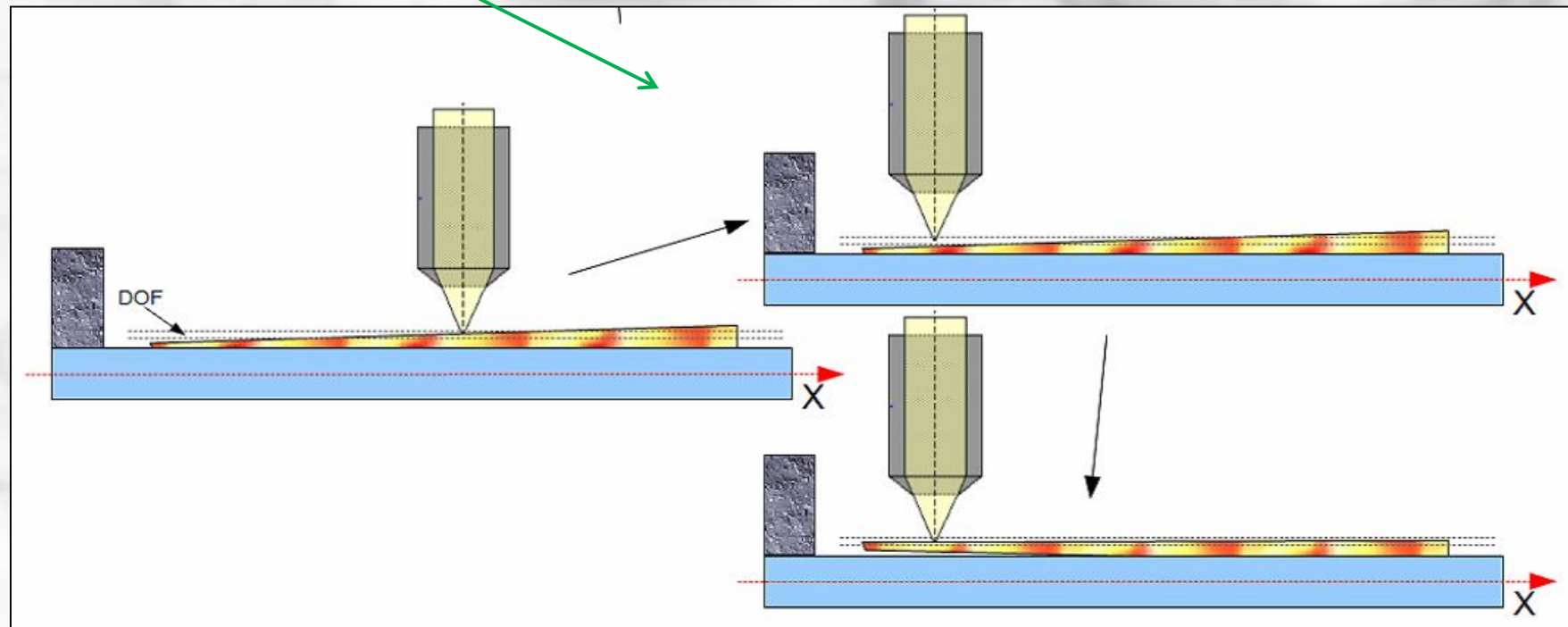
- medir variaciones angulares durante el desplazamiento ($< 5''$)
- minimizar el Abbe 'offset'
- corregir por sw

→ Para minimizar el Abbe 'offset' usamos una cámara auxiliar enfrentada a los haces láser. Hacemos incidir los haces sobre un objeto puntiagudo

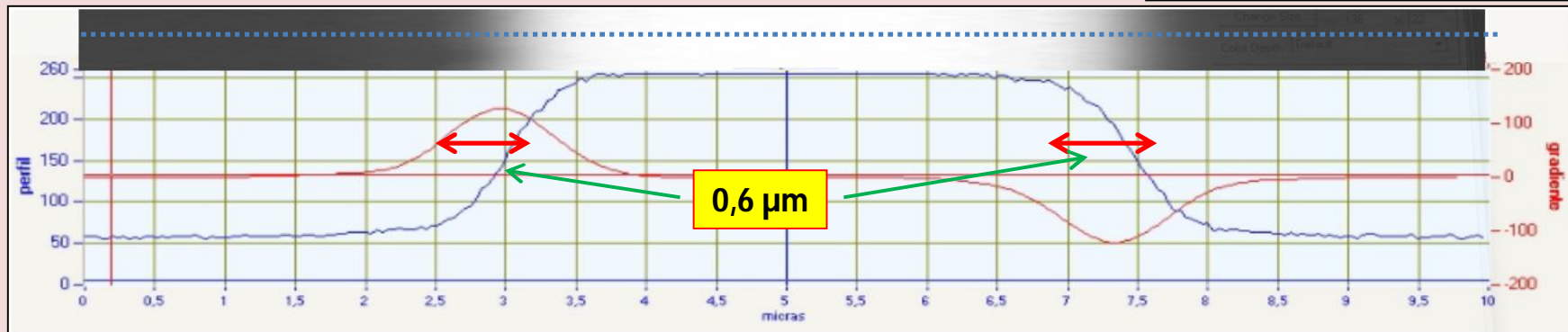
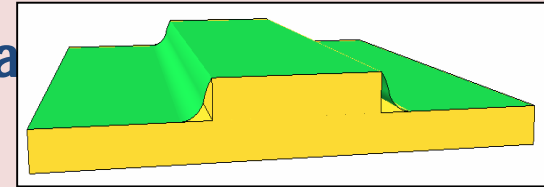


El alineamiento del patrón con el sistema de medida: **usamos mesa auxiliar**

- rotaciones en Z: alineamos con ejes X Y
- rotaciones en X e Y: plano focal coincidente con superficie del patrón



➤ Resolución lateral **absoluta** con microscopía óptica convencional: límite de difracción $\approx 400 \text{ nm}$



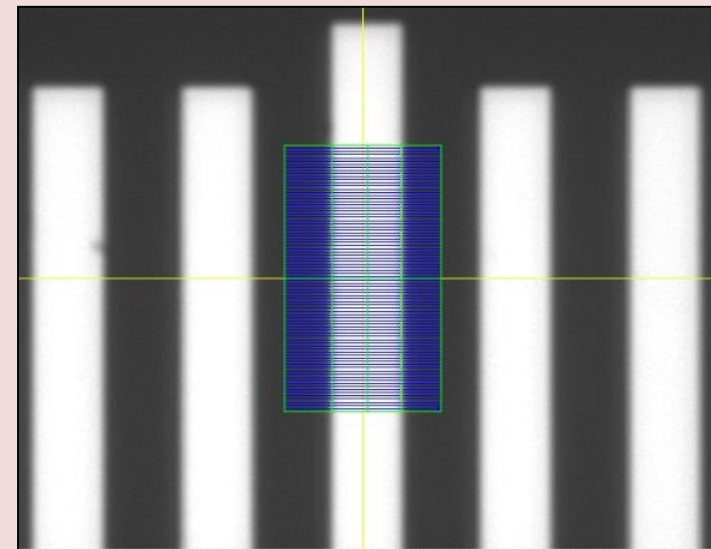
Posición del borde es desconocida con incertidumbre de unos 600 nm

➤ Resolución lateral **relativa: ¡¡mucho mejor!!**

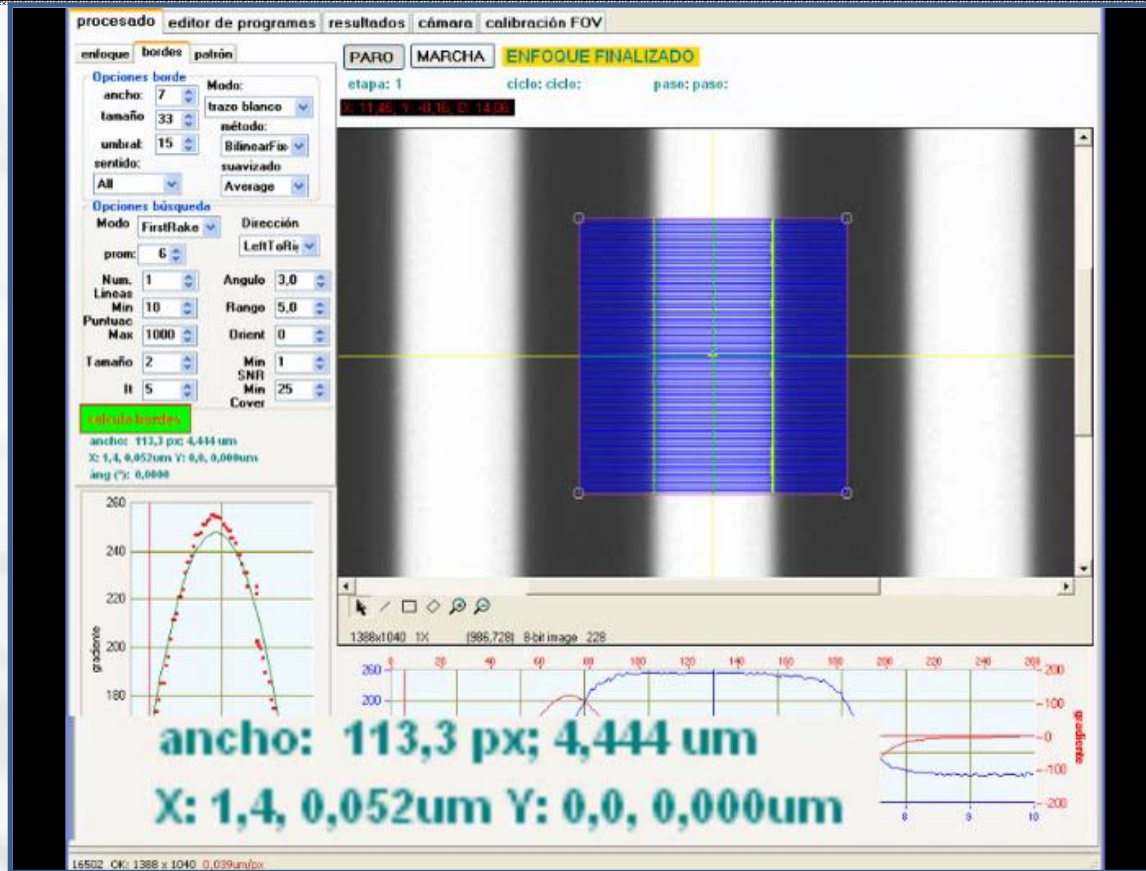
Posición del centro del trazo (punto medio entre dos bordes) se conoce con resolución de 10 nm
→ errores sistemáticos se cancelan

Resolución depende:

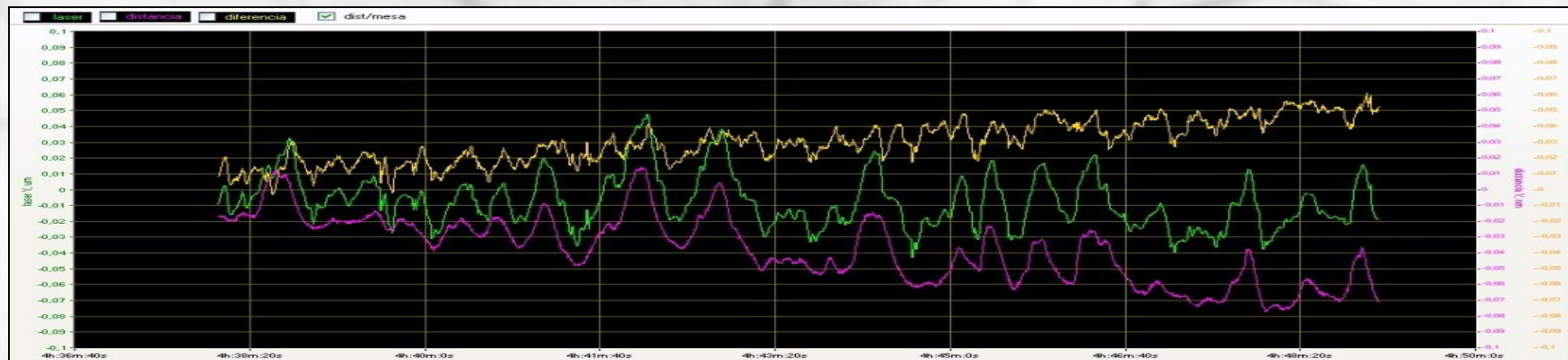
- magnificación de la óptica ($\mu\text{m}/\text{pixel}$)
- estabilidad mecánica
- calidad del sensor óptico (CCD) y objetivo óptico



Resolución y estabilidad del sistema de detección por visión



Resolución del sistema de visión: **mejor de 10 nm**



TRITÓN

CEM CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

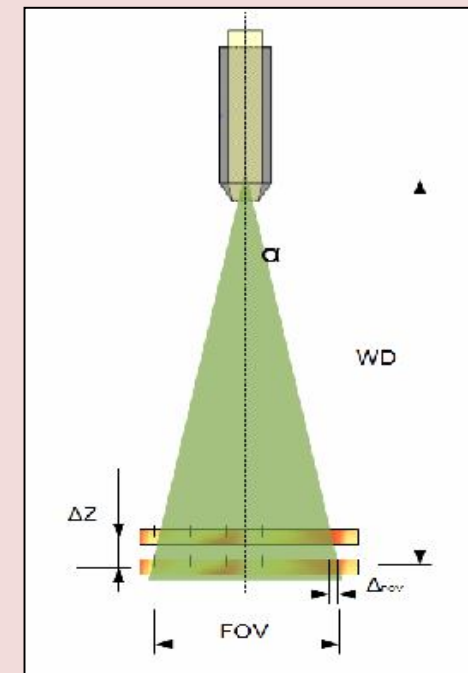
CEM · día Internacional de la Metrología · 2015

Calibración del campo de visión (FOV)

Importante: el sistema interferométrico mide los desplazamientos relativos entre objetos observados en el mismo punto (pixel) del FOV
Si los objetos no caen en el mismo pixel → **calibrar el FOV**

nX	nY	pixelX	pixelY	lasX	lasY	mesaX	mesaY
0	0	0,00	-0,59	0,000009	0,000020	0,000001	0,000000
0	0	477,813	477,511	-0,1995796	-0,2003202	-0,1999445	-0,2000736
1	0	238,908	477,718	-0,1013473	-0,2002099	-0,1000127	-0,2000744
2	0	-0,338	477,802	0,0003769	-0,2000202	-0,0000099	-0,2000727
3	0	-239,903	478,026	0,1004016	-0,1998607	0,0999928	-0,2000739

Planitud y calibración FOV → autoenfoco en rangos grandes de calibración



TRITÓN

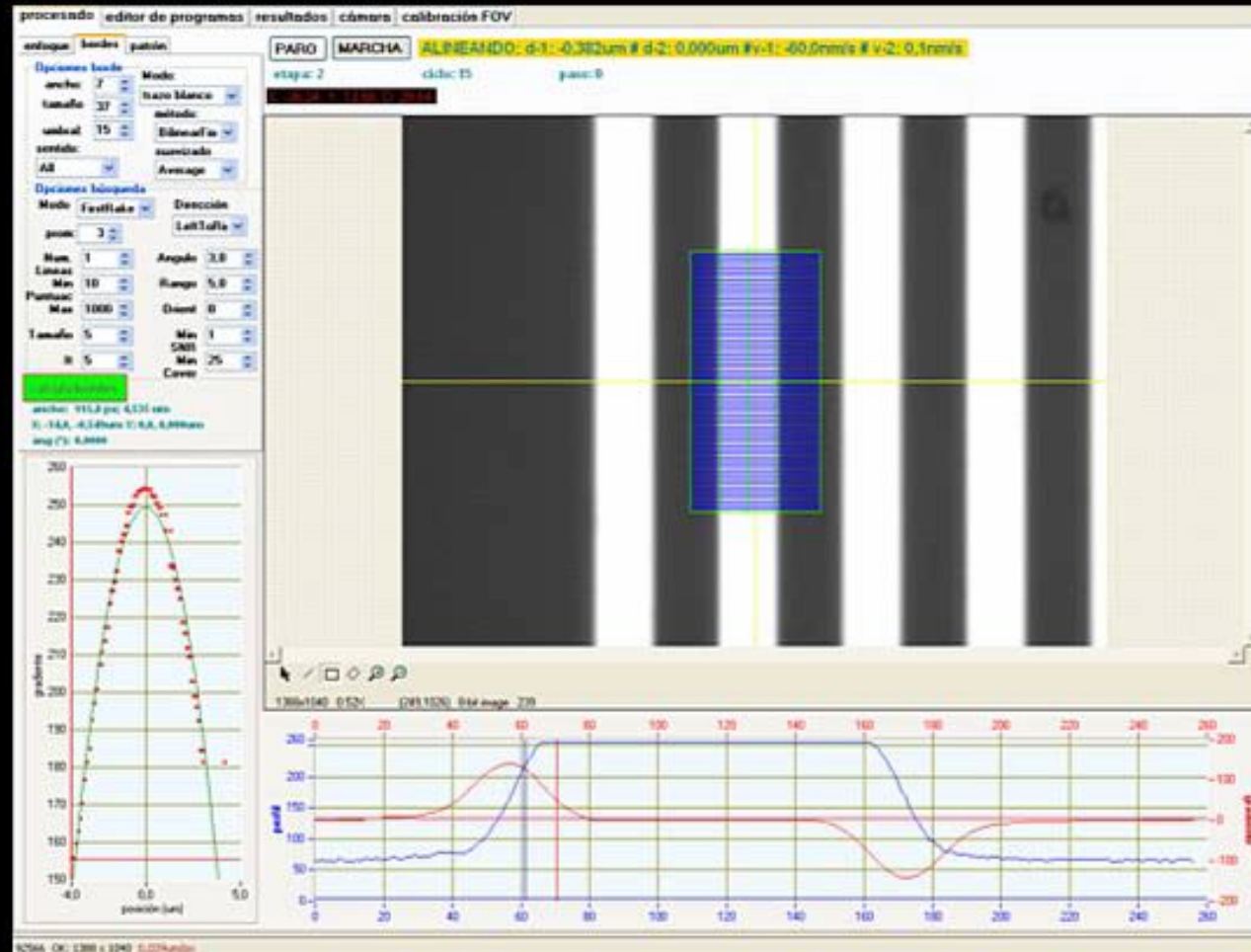


CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

CEM · día Internacional de la Metrología · 2015

Ejemplo de calibración 1D

ALINEANDO: d-1: -0,537um # d-2: 0,000um # v-1: -60,0nm/s # v-2: 0,1nm/s



ancho: 115,9 px; 4,536 um
X: -14,0, -0,382um Y: 0,0, 0,000um



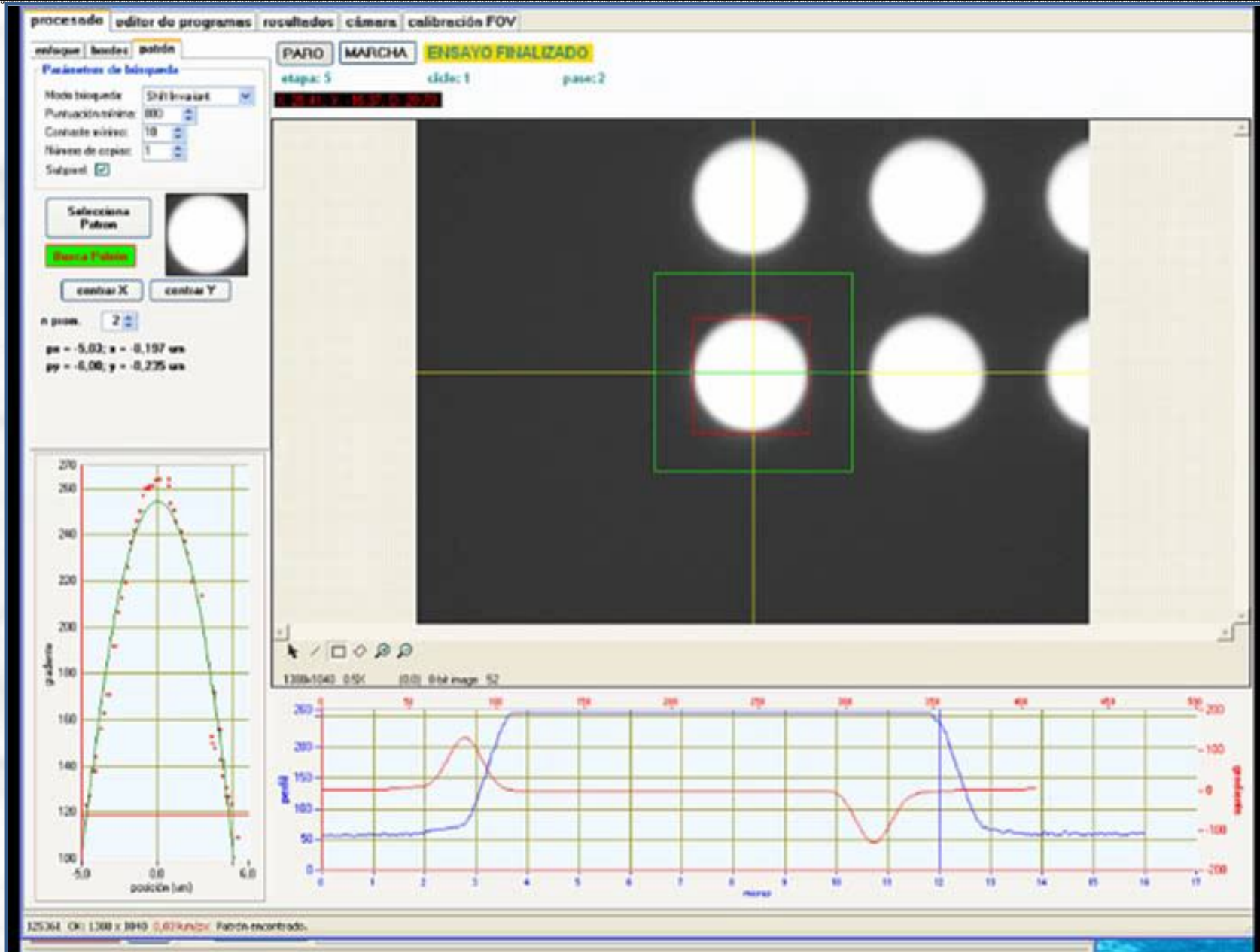
TRITÓN



CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

CEM · día Internacional de la Metrología · 2015

Ejemplo de calibración en 2D y autoenfoco



TRITÓN



CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

CEM · día Internacional de la Metrología · 2015

Muchas gracias por su atención

eloy@tritonsistemas.es
mmperezh@cem.minetur.es

Gracias a todo el Área de Longitud del CEM



TRITÓN

CEM

CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

CEM · día Internacional de la Metrología · 2015