

Perfilometría 3D por triangulación láser

Andrés Troiano

7 de mayo de 2021

Departamento de Física
FCEyN, UBA

Lugar de trabajo: CINI, Tenaris Siderca
Director: Martín Argañaraz
Codirector: Nicolás Bonadeo

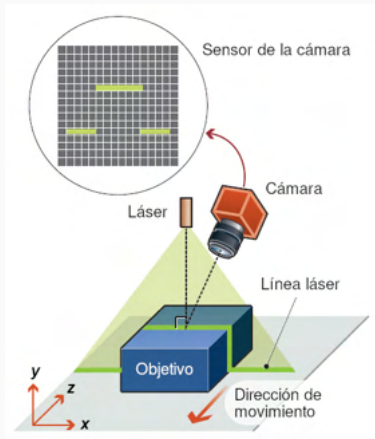
- Pasantía en Tenaris Siderca
- Equipo óptico de ensayos no destructivos
- Mide defectos en la superficie del tubo
- Se desea que además pueda medir el diámetro
- Problemas en el pegado de las distintas cámaras
- Antecedentes de mapeo punto a punto

Introducción

- Control de procesos
- Ingeniería inversa
- Ingeniería civil
- Salud
- Arqueología
- Estudios forenses

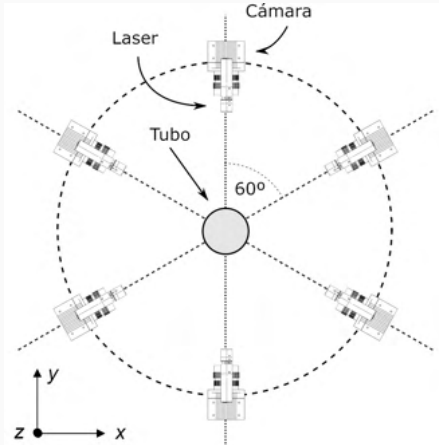
Visión general de distintas técnicas

- Triangulación
- Tiempo de vuelo (TOF)
- Franjas

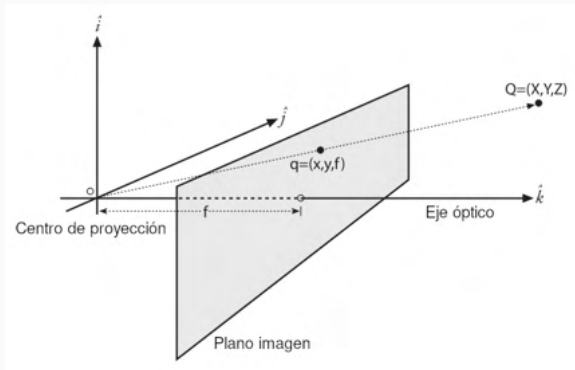


Control de calidad en productos tubulares

- Diámetros entre 140 mm y 244 mm
- Defectos entre 300 μm y 600 μm



Métodos de calibración - Modelo de la cámara



$$x_{pantalla} = f_x \left(\frac{X}{Z} + c_x \right) \quad (1)$$

$$y_{pantalla} = f_y \left(\frac{Y}{Z} + c_y \right) \quad (2)$$

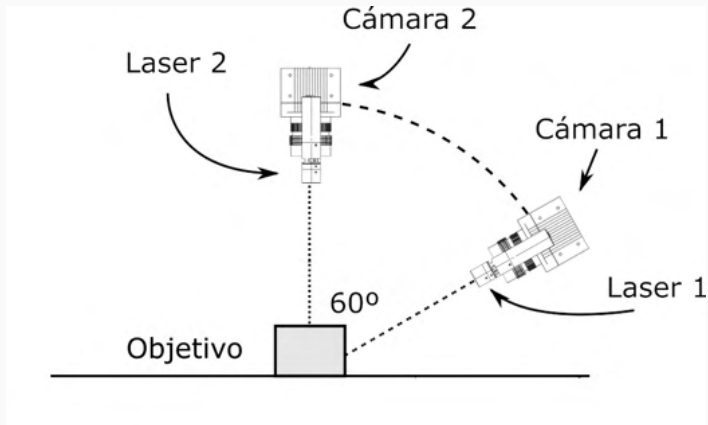
Determinación de los parámetros

- 4 parámetros de la cámara
- 5 parámetros de distorsión
- Estructura con puntos identificables: tablero de ajedrez
- Cada vista proporciona 8 ecuaciones al costo de 6 incógnitas
- En la práctica, al menos 10 vistas de un tablero de 7×8
- Implementado en librerías como OpenCV

- En Tenaris se utilizó este método
- Fue exitoso para medir defectos
- Falló para medir diámetros
- Hay antecedentes de mapeo punto a punto
- Precisión requerida: 100 μm

Montaje experimental

Montaje experimental

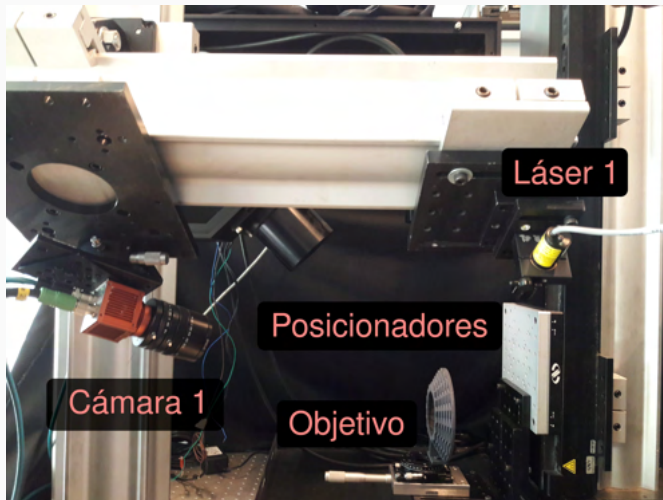


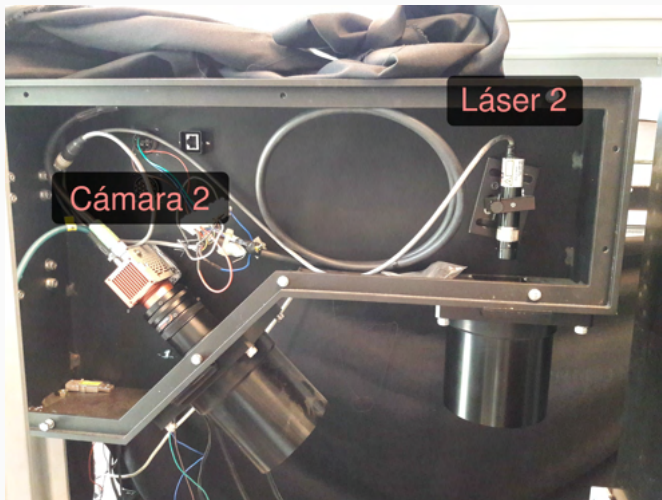
- 2 láseres, 660 nm, 20° de apertura, 390 mm distancia focal (Osela Streamline, Coherent Stingray)
- Cámaras Automation Technology C2-2040, 2048 × 1088
- Lentes Spacecom Pyxis 12
- Filtros pasabanda Midopt BP660 (640-680 nm)

Posicionadores lineales

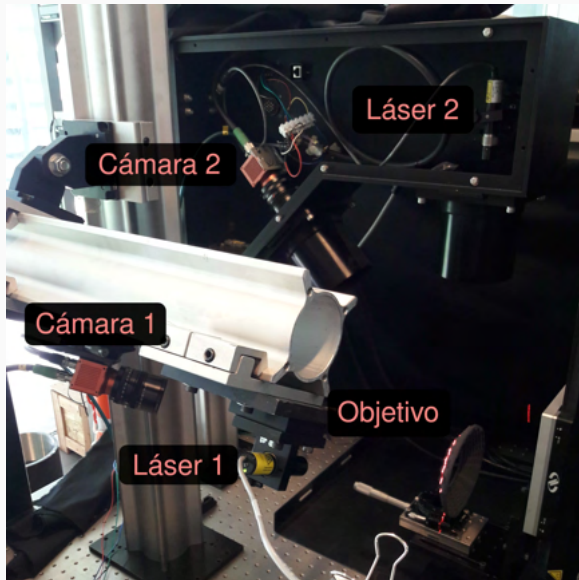
- Posicionadores lineales Newport
- 600 mm de rango
- Precisión de $1.25\ \mu\text{m}$



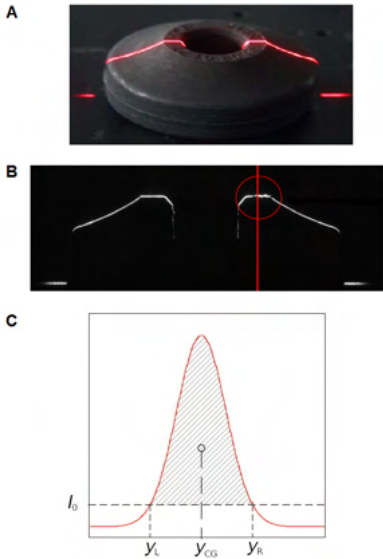




Vista completa

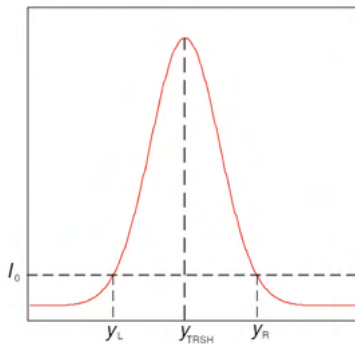
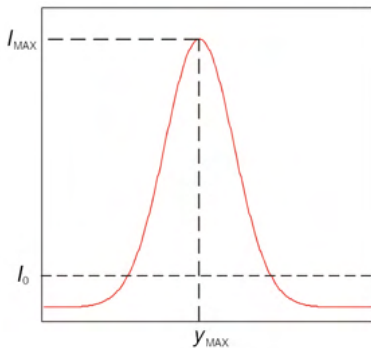


Modo “centro de gravedad” (CoG)



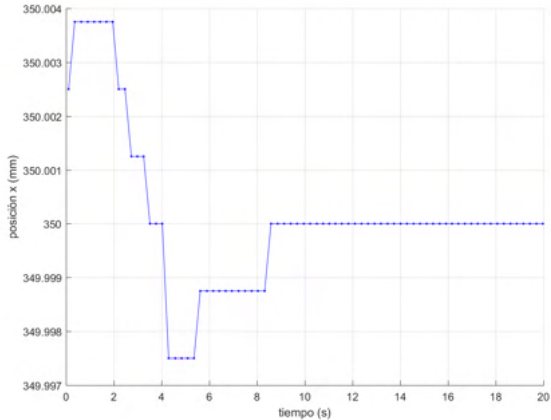
$$y_{CG} = y_L + \frac{\sum_{y=y_L}^{y_R} y(l_y - l_0)}{\sum_{y=y_L}^{y_R} (l_y - l_0)} \quad (3)$$

Modos MAX y TRSH

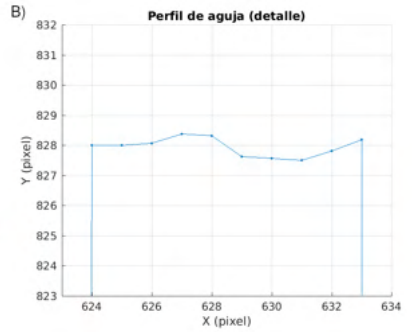
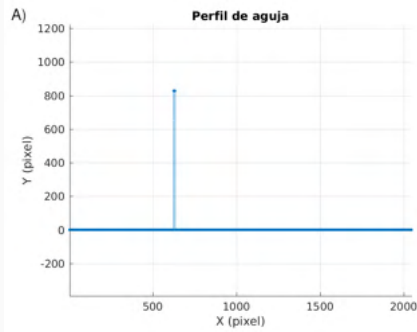


Pruebas preliminares

Caracterización del error de los posicionadores



Calibración con aguja

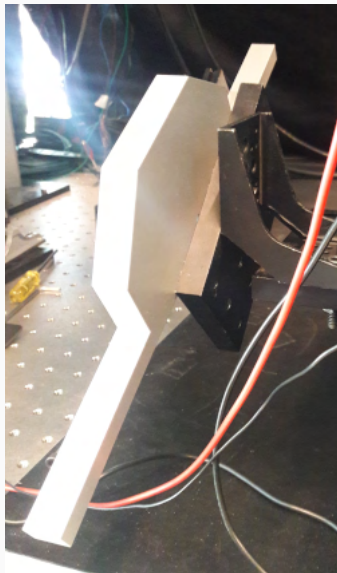


1 pixel $\approx 250 \mu\text{m}$

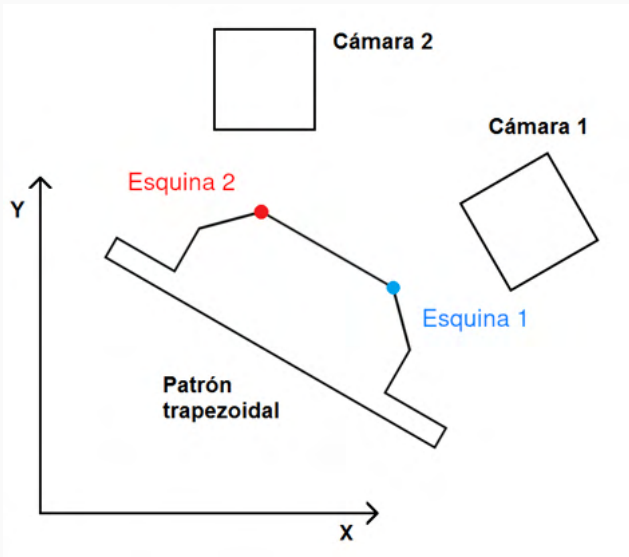
\Rightarrow incerteza $\approx 1 \text{ mm}$

Patrón trapezoidal

Calibración con patrón trapezoidal

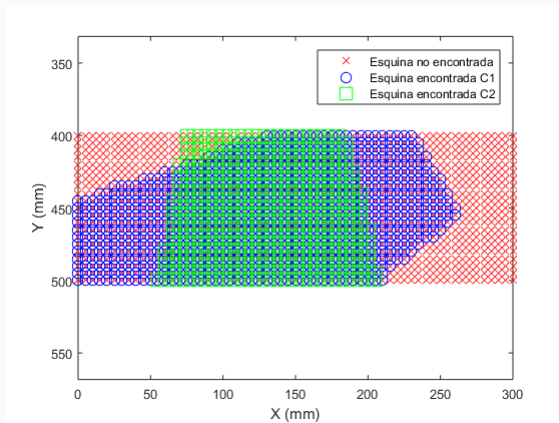


Montaje del trapecio



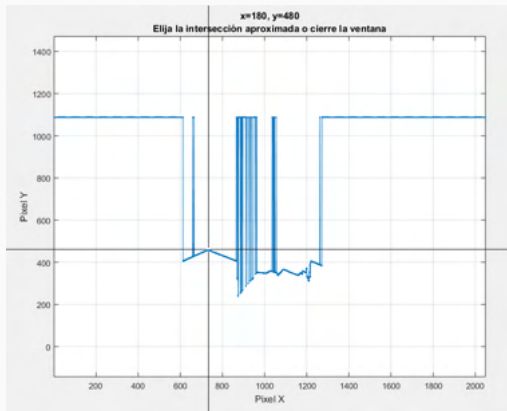
Algoritmo para encontrar esquinas

1. Tomar el perfil que está en el centro del barrido
2. Ordenamiento por cercanía



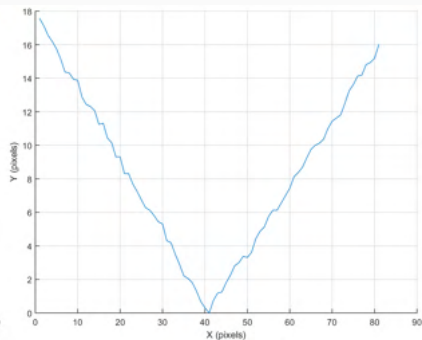
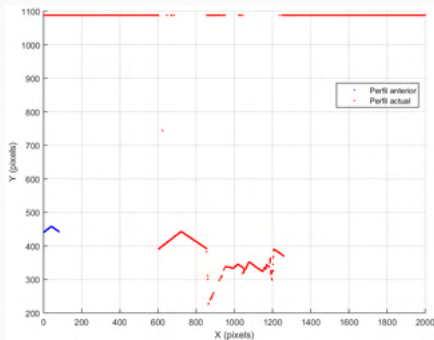
Algoritmo para encontrar esquinas

3. El usuario señala una esquina
4. El algoritmo encuentra la esquina

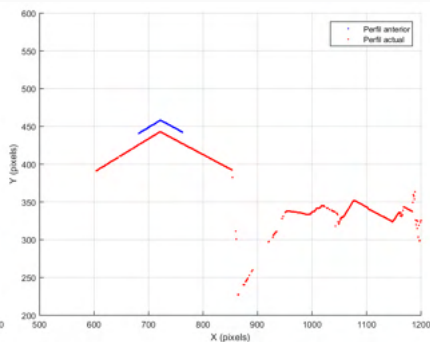
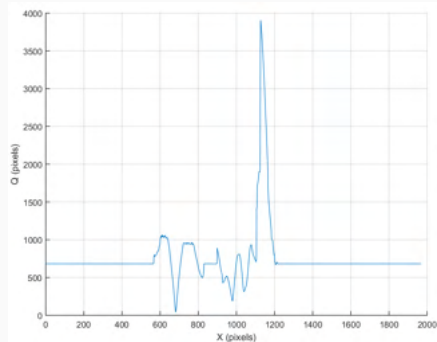


Algoritmo para encontrar esquinas - cont.

5. Comparación con la esquina ya encontrada

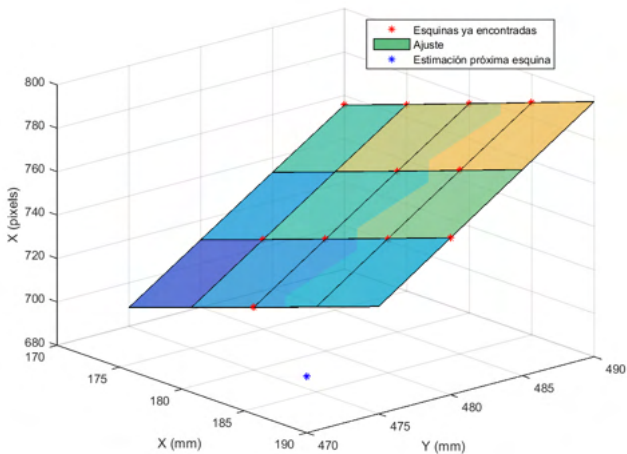


Algoritmo para encontrar esquinas - cont.

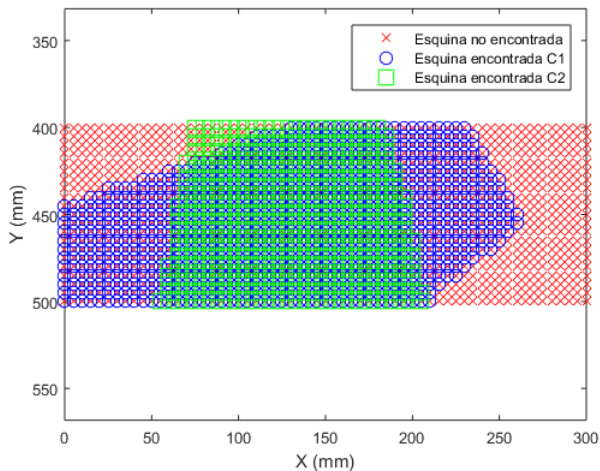


Algoritmo para encontrar esquinas - cont.

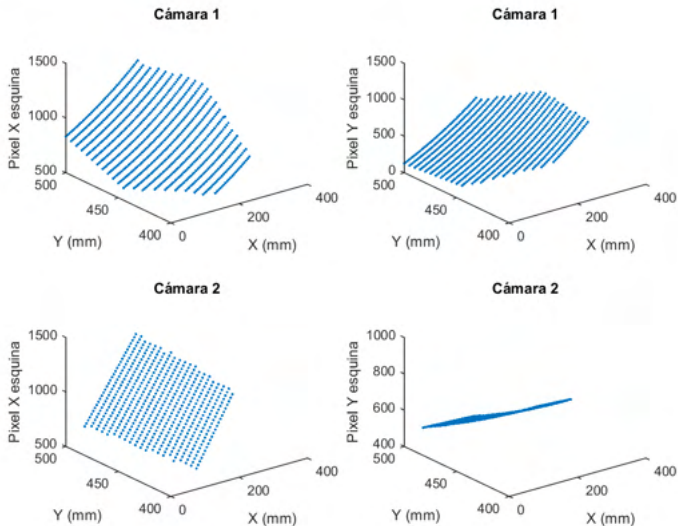
6. A partir de 10 esquinas, estimación mediante polinomio hasta terminar



Procesamiento completo



Visualización del mapa



Ajuste del mapa por polinomios de grado 4 (de milímetros a pixels):

$$x_{px} = p_4(x_{mm}, y_{mm}) \quad (4)$$

$$y_{px} = q_4(x_{mm}, y_{mm}) \quad (5)$$

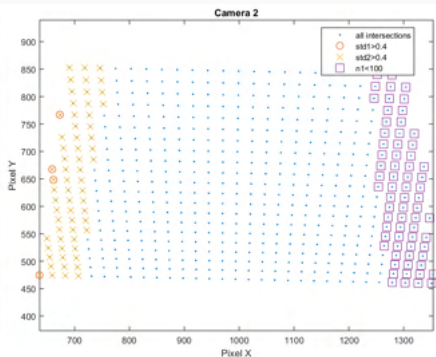
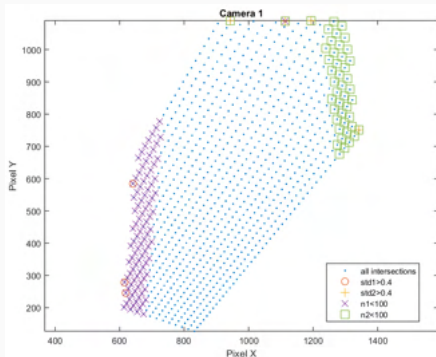
Inversión de los polinomios para ir de pixels a milímetros:

$$x_{mm} = p_4^{-1}(x_{px}, y_{px}) \quad (6)$$

$$y_{mm} = q_4^{-1}(x_{px}, y_{px}) \quad (7)$$

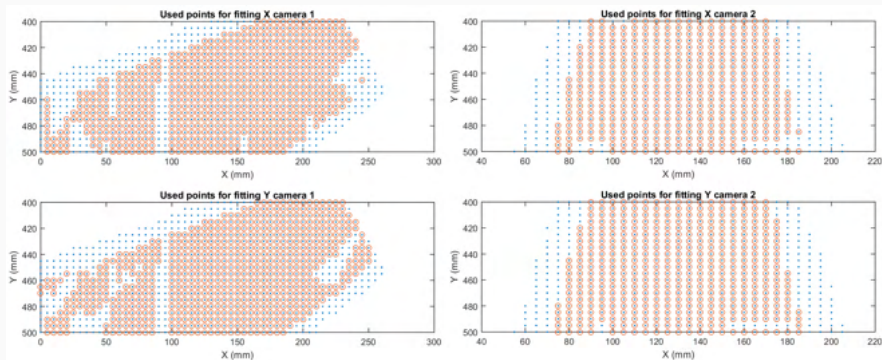
Ajuste por polinomios - Descarte de puntos

- Desviación estándar mayor a 0.4 en los ajustes de las rectas
- Rectas de menos de 100 puntos

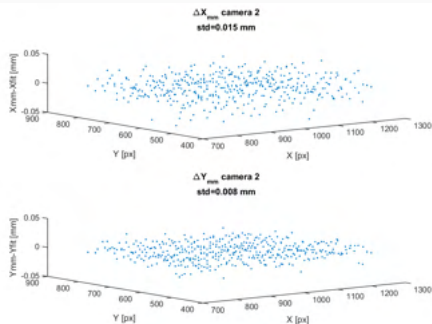
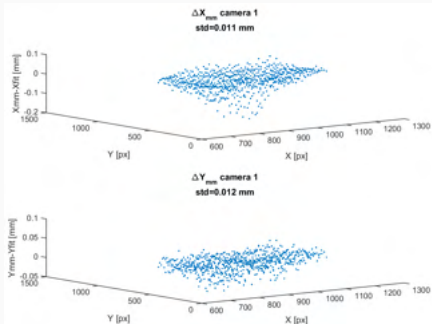


Ajuste de los mapas por polinomios

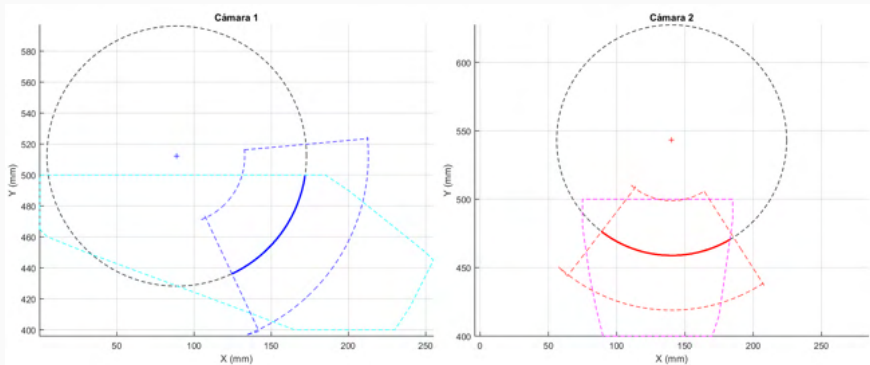
Descarte de puntos alejados a más de 3 desviaciones estándar



Residuos del ajuste de los mapas

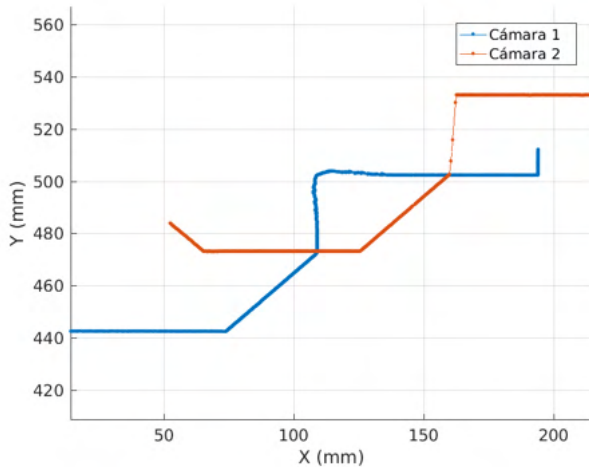


Determinación de las zonas de validez

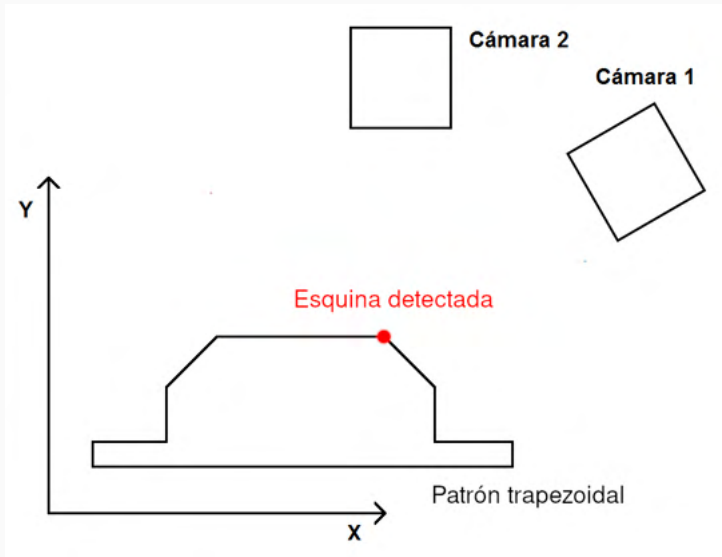


- Únicamente la región calibrada
- 70° centrales
- ± 40 mm respecto de la distancia de trabajo

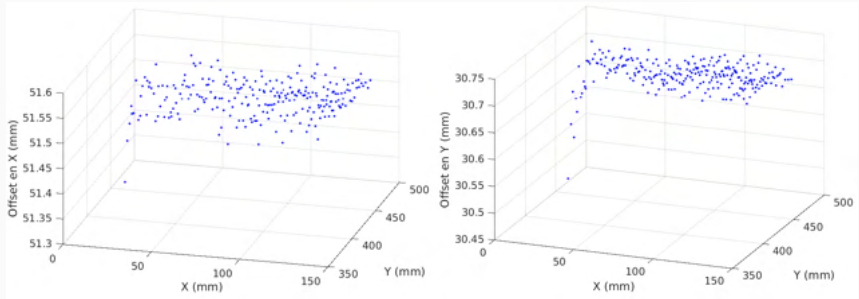
Referencia mutua de las cámaras



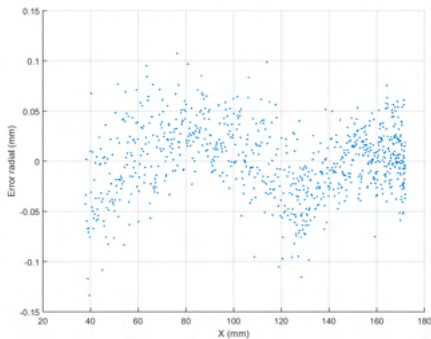
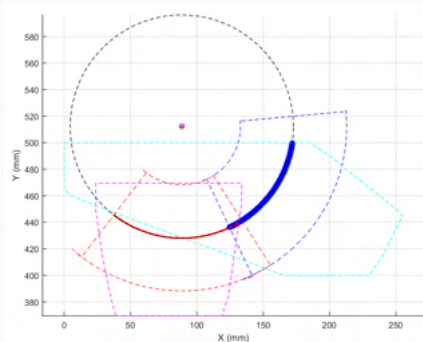
Detección de la misma esquina



Medición del offset en cada punto



Medición de diámetros

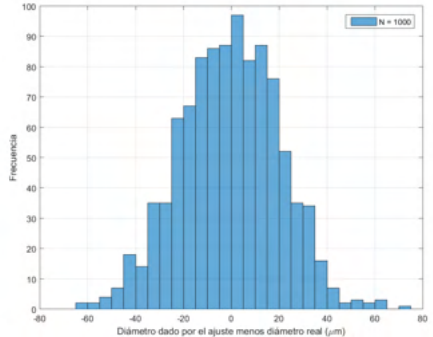
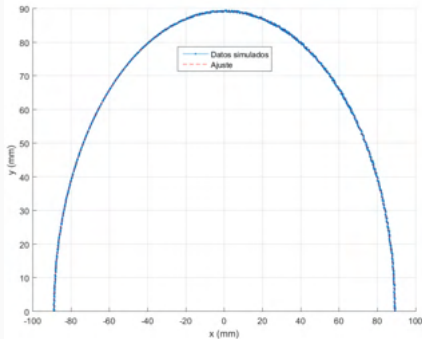


Error de medición - Trapecio

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-245	-5	-147
168.310	-172	186	-168
177.805	-166	204	-157

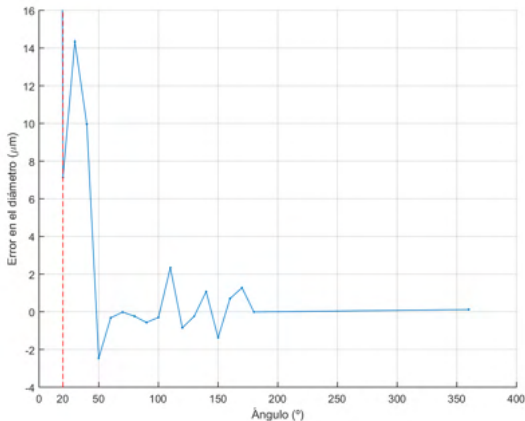
Error de Taubin

- Círculo matemático de 178 mm de diámetro
- Error normal de $100\text{ }\mu\text{m}$ de ancho en x e y
- Se midió el diámetro
- Se repitió 1000 veces
- Se promedió el error



Error de Taubin - resultados

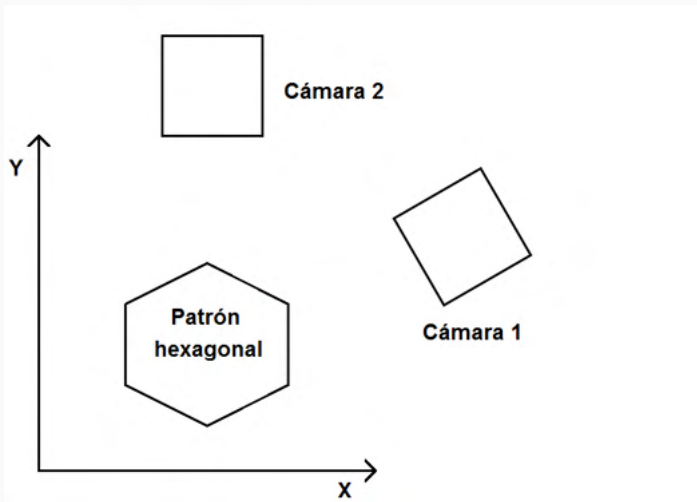
Se repitió para distintos ángulos de apertura, entre 20° y 360°



Para aperturas como las utilizadas en este trabajo, el error introducido por Taubin es inferior a los $2\ \mu\text{m}$

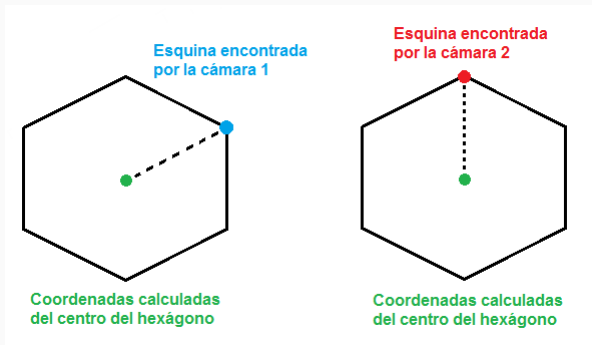
Patrón hexagonal

Calibración con patrón hexagonal

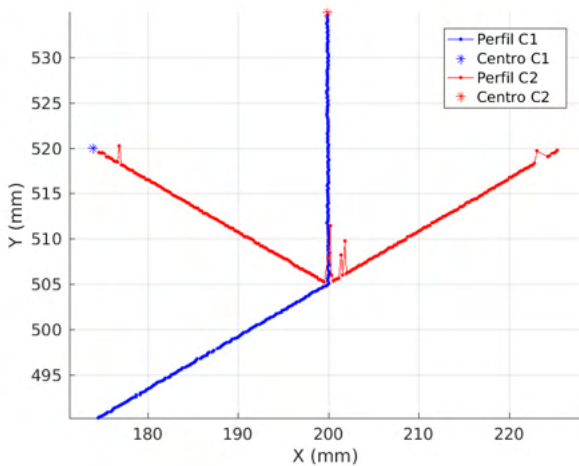


Calibración con patrón hexagonal - cont.

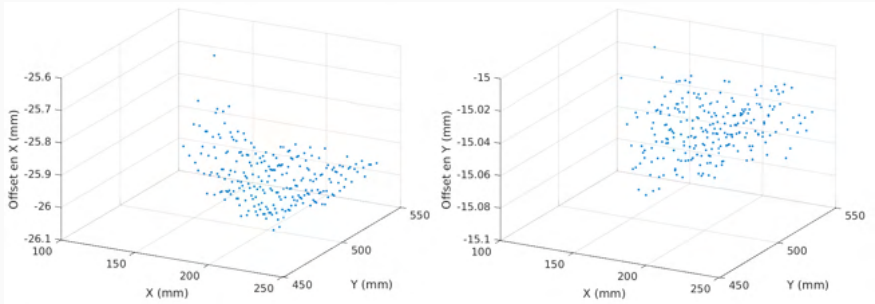
A partir de la esquina se encuentran las coordenadas del centro.



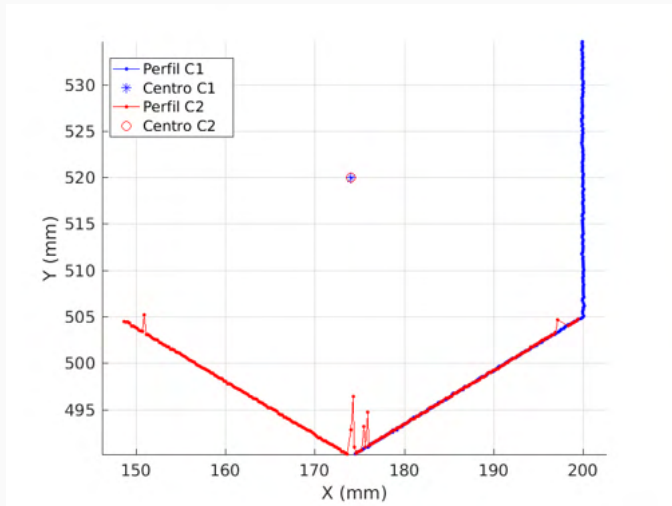
Referencia mutua de las cámaras



Determinación del desplazamiento entre cámaras



Desplazamiento de una de las cámaras



Error de medición - Hexágono

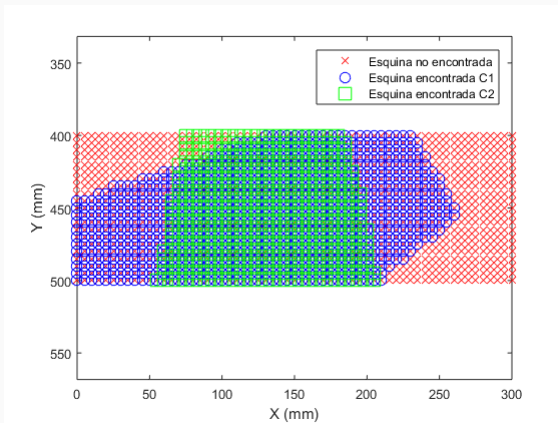
Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-1	-36	-85
168.310	-166	89	-122
177.805	142	49	-82

Patrón “corona”

Calibración con patrón “corona”

- Problema: montar este sistema en planta es muy difícil
- Situación ideal: tener un patrón con suficientes esquinas para poder calibrar con una sola imagen

Cuántas esquinas hacen falta?



Calibración con patrón “corona”

Paso (mm)	Cant. de puntos C1	Cant. de puntos C2	Error en x C1 (μm)	Error en y C1 (μm)	Error en x C2 (μm)	Error en y C2 (μm)
5	395	417	9	11	16	7
10	100	104	10	11	17	8
15	47	50	11	12	20	10
20	28	27	12	13	40	13
25	26	17	ND	ND	ND	ND

Hacen falta al menos 27 puntos.

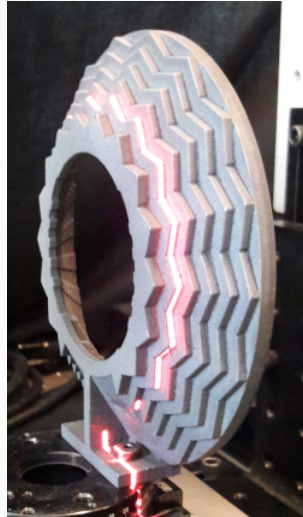
Dos caminos posibles:

1. Diseñar un patrón con 26 esquinas, lo suficientemente grandes, y que no se hagan sombra
2. Reducir la cantidad de parámetros del modelo

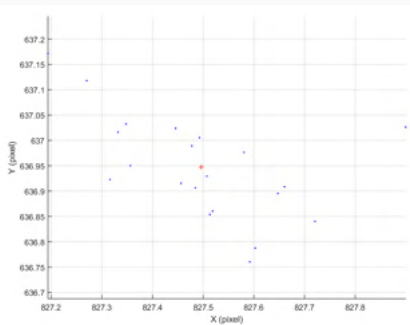
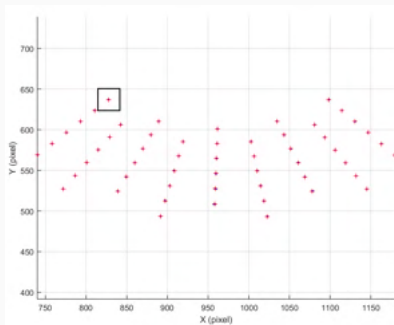
Mientras se avanzaba en el primer camino, se estudió el patrón “corona”:

Patrón “corona”

- 6 radios
- 15 esquinas c/u (90 en total)
- Superficie rugosa \Rightarrow barrido en z



Determinación de las esquinas



Error de medición - Corona

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-306	94	-71
168.310	ND	ND	ND
177.805	ND	ND	ND

El radio del patrón no fue lo suficientemente grande.

Discusión

Repaso de los resultados

Error de medición - Trapecio

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-245	-5	-147
168.310	-172	186	-168
177.805	-166	204	-157

Error de medición - Hexágono

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-1	-36	-85
168.310	-166	89	-122
177.805	142	49	-82

Error de medición - Corona

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-306	94	-71

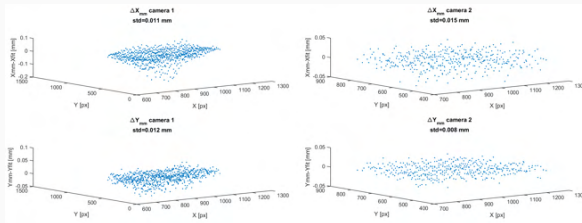
- Ventajas del hexágono/corona
- Componente de error sistemático
- Ventajas del trapecio
- Falta cuantificar la incerteza
- El error observado no se justifica con las fuentes conocidas

- Error en la determinación de la esquina (no se lo puede aislar)
- Error al usar la calibración ($\approx 15 \mu\text{m}$)
- Error en la determinación del *offset* entre cámaras ($\approx 30 \mu\text{m}$)
- Error introducido por Taubin ($\approx 2 \mu\text{m}$)

No alcanzan a justificar los $\approx 150 \mu\text{m}$ de error observado

Error al usar la calibración

Diferencia entre el polinomio que mejor ajusta el mapeo, y los datos (desviación estándar)

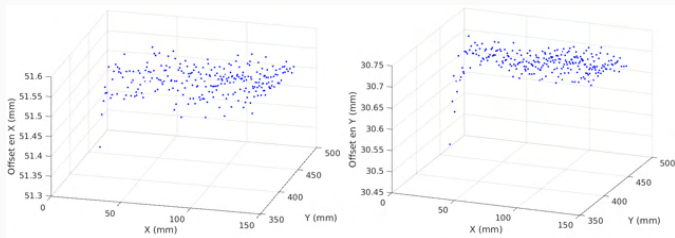


Error de calibración

Calibración	C1 x (μm)	C1 y (μm)	C2 x (μm)	C2 y (μm)
Trapecio	11	12	15	8
Hexágono	8	10	11	6
Corona	11	16	22	9

Aporta $\approx 15 \mu\text{m}$

Error en la determinación del *offset*



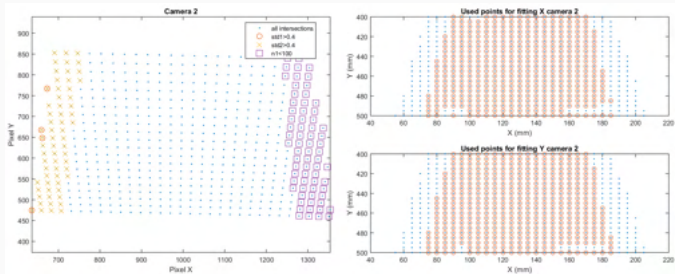
Error de *offset*

Calibración	x (μm)	y (μm)
Trapezio	33	27
Hexágono	24	13
Corona	33	27

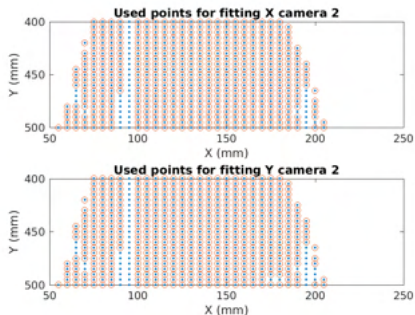
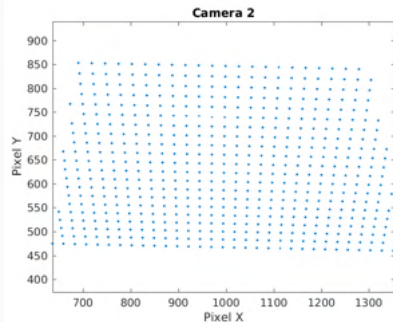
Aporta $\approx 30 \mu\text{m}$

Posibles causas de error sistemático

1. Haber descartado puntos en los bordes del barrido
2. Haber ajustado las caras de la esquina por rectas en el espacio de pixels



Sin descartar puntos



Sin descartar puntos - resultados

Error de medición - Trapecio (sin descartar puntos)

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-191	96	-108
168.310	-146	239	-135
177.805	-152	234	-129

Error de medición - Hexágono (sin descartar puntos)

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	23	11	-77
168.310	-152	-86	-125
177.805	149	25	-88

Error de medición - Corona (sin descartar puntos)

Diámetro (mm)	Error C1 (μm)	Error C2 (μm)	Error ambas (μm)
139.707	-327	216	-23

Ajustando la esquina por curvas

- Ajustar las caras de la esquina por curvas en lugar de rectas
- No produjo una diferencia significativa
- Un paso más: combinar las dos propuestas anteriores. Tampoco produjo diferencias significativas
- El error se redujo a $135\ \mu\text{m}$
- Es necesario medir el error sistemático (excede los plazos de este trabajo)

Trabajo futuro

- Determinar la incerteza de medición
- Fabricar un patrón corona de mayor tamaño
- Encontrar un modelo con menos coeficientes. Candidato: SVD
- Utilizar coordenadas polares

Término	Coef. pol. x C1	Coef. pol. y C1	Coef. pol. x C2	Coef. pol. y C2
1	192.2	506.3	192.4	389.2
x	59	103.2	111.3	-3.5
x ²	1.2	1.1	1.6	-0.9
y	108.5	-73.7	-11.2	-91.9
y ²	-21.8	14.9	2.6	15.9

Conclusiones

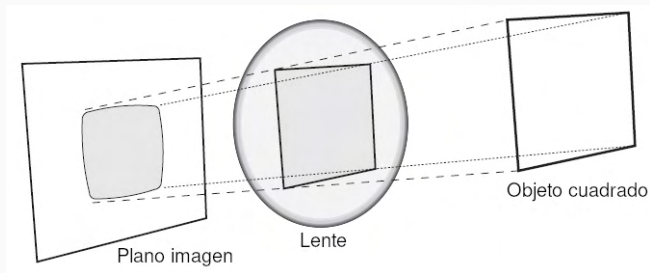
- Se calibró el sistema
- Se exploraron distintas variantes
- El error observado fue cercano al buscado
- Queda pendiente la determinación de la incerteza

Muchas gracias

Apéndice

- Se calibró un sistema de perfilometría 3D por triangulación láser
- Mapeo punto a punto del campo visible mediante un objeto de referencia
- 3 objetos de referencia diferentes
- Error de $135\ \mu\text{m}$

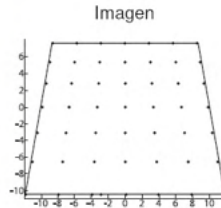
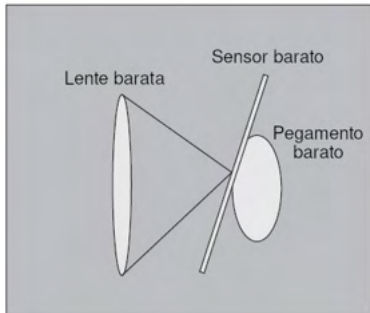
Modelos de distorsión de la lente - Radial



$$x_{\text{corregido}} = x (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (8)$$

$$y_{\text{corregido}} = y (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (9)$$

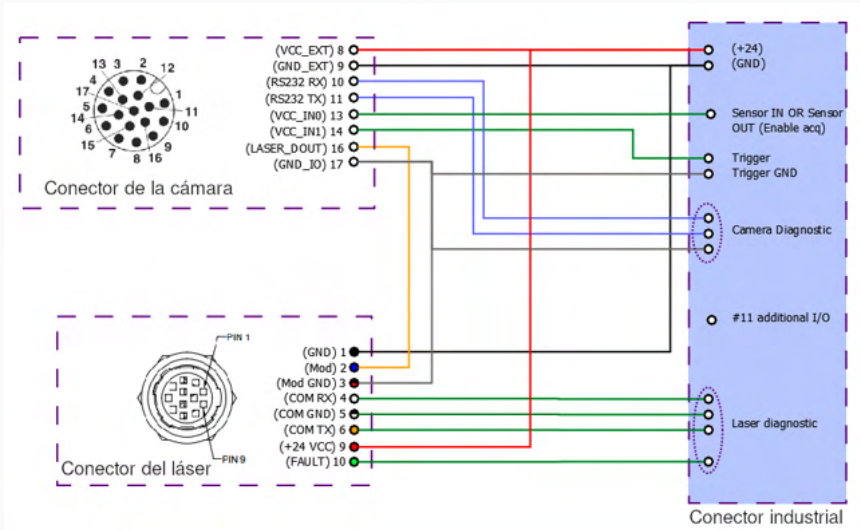
Modelos de distorsión de la lente - Tangencial



$$x_{\text{corregido}} = x + 2p_1y + p_2 (r^2 + 2x^2) \quad (10)$$

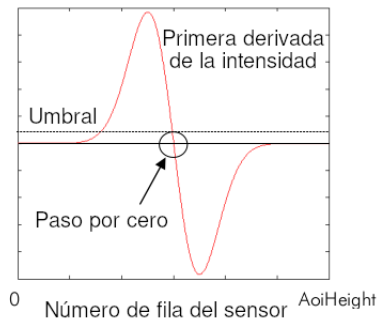
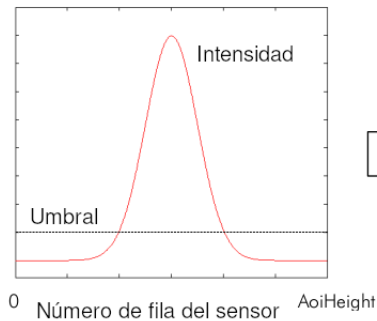
$$y_{\text{corregido}} = y + p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2x \quad (11)$$

Esquema de conexiones del brazo



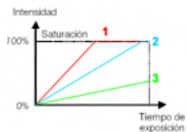
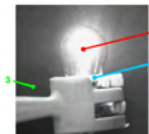
Modo "FIR Peak"

1023

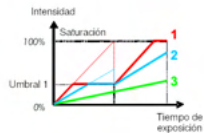
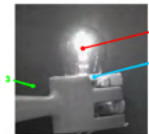


Modo multi-pendiente

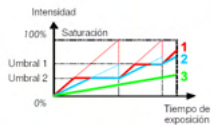
A) Pendiente simple



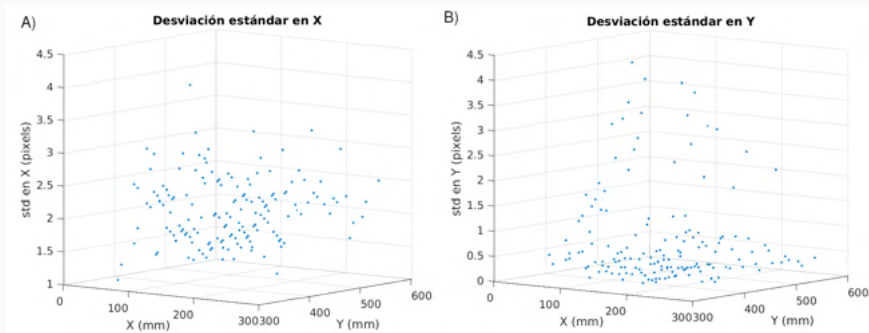
B) Pendiente doble



C) Pendiente triple (modo utilizado)



Aguja - Dispersión en cada coordenada



- Métodos geométricos: más precisos, pero iterativos y lentos.
- Métodos algebraicos: simples, confiables, rápidos. Estimación inicial de los métodos iterativos. Pueden ser muy precisos.

Descripción algebraica del círculo:

$$A(x^2 + y^2) + Bx + Cy + D = 0 \quad (12)$$

Algoritmo de Taubin - cont.

- (x_i, y_i) : i-ésimo punto observacional
- Definimos $z_i = x_i^2 + y_i^2$
- Definimos:

$$A_0 = \frac{2\sqrt{\bar{z}}}{A}$$

Con \bar{z} valor medio de los z_i

- Definimos el vector de parámetros V :

$$V = \begin{pmatrix} A_0 \\ B \\ C \end{pmatrix}$$

- Definimos la matriz X_0 :

$$X_0 = \begin{pmatrix} \frac{z_1 - \bar{z}}{2\sqrt{z}} & x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{z_n - \bar{z}}{2\sqrt{z}} & x_n & y_n \end{pmatrix}$$

- El algoritmo de Taubin calcula el V óptimo minimizando:

$$\mathcal{F} = A_0^T (X_0^T X_0) A_0 \quad (13)$$

- El mínimo de \mathcal{F} es el autovalor más pequeño de $X_0^T X_0$
- El autovalor se calcula como la raíz η del polinomio característico:

$$P(\eta) = c_3 \eta^3 + c_2 \eta^2 + c_1 \eta + c_0 \quad (14)$$

Cuyos coeficientes se definen:

$$c_3 = 4\bar{z},$$

$$c_2 = -\bar{z}\bar{z} - 3\bar{z}^2$$

$$c_1 = \bar{z}(\bar{z}\bar{z} - \bar{z}^2) + 4\bar{z}(\overline{xy}y - \overline{xy}^2) + \overline{xz}^2 - \overline{yz}^2$$

$$c_0 = \overline{xz}^2 \overline{yy} + \overline{yz}^2 \overline{xx} + 2\overline{xzyzxy} - (\overline{xy}y - \overline{xy}^2)(\bar{z}\bar{z} - \bar{z}^2)$$

Fuentes de error - sin descartar puntos

Error de calibración - sin descartar puntos

Calibración	C1 x (μm)	C1 y (μm)	C2 x (μm)	C2 y (μm)
Trapezio	12	13	16	9
Hexágono	11	13	12	7
Corona	11	16	22	9

Error de *offset* - sin descartar puntos

Calibración	x (μm)	y (μm)
Trapezio	27	19
Hexágono	21	13
Corona	27	19