



**Universidad
Zaragoza**

Proyecto Fin de Carrera

Calibración y estudio de capacidad de un sistema de medición
sin contacto de intercambiadores de calor

Autor:

Ignacio Calavia Traín

Director:

Juan José Aguilar Martín

Codirector:

Francisco Javier Brosed Dueso

Febrero 2012



*Departamento de Ingeniería de
Diseño y Fabricación*
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

Calibración y estudio de capacidad de un sistema de medición sin contacto de intercambiadores de calor

Resumen

El objetivo de este proyecto es continuar con el desarrollo de un sistema de medición por visión creado en el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza. Para ello en primer lugar se hace una introducción que permita conocer la evolución de este tipo de sistemas de medición, las diferentes técnicas de medición sin contacto existentes y los campos de aplicación que tienen en la actualidad. También se describen los componentes y el funcionamiento del equipo de visión, para a continuación llevar a cabo diferentes tipos de estudios que permitan tener un conocimiento más profundo del equipo de medición, así como aportar datos, que contribuyan a su mejora. Con ello, se realizan estudios de repetibilidad y sensibilidad. Ambos se llevan a cabo empleando tres modelos diferentes de intercambiadores de calor para la toma de datos.

Se estandariza el procedimiento de calibración y se implementa un segundo método para establecer una comparativa entre ambos. A partir de este segundo procedimiento, también se hace un estudio de sensibilidad modificando la dirección del sistema de visión, con el objeto de tener más datos sobre la influencia de este parámetro en los resultados finales.

Por último se realiza un rediseño de los calibradores empleados en la calibración del equipo, integrando ambos en uno solo, con el fin de hacer más fácil y rápido el procedimiento de calibración.

Tabla de contenidos

1	Introducción.....	1
2	Ensayos a realizar.....	3
2.1	Estudio de repetibilidad.....	3
2.2	Recalibración del equipo.....	7
2.2.1	Estudio de resultados de medición.....	12
2.3	Calibración del equipo por el 2º método y medición de piezas.....	15
2.4	Comparación de métodos de calibración.....	17
2.5	Modificación de las direcciones en el 2º método de calibración.....	18
2.6	Estudio de sensibilidad variando las direcciones.....	21
2.6.1	Variación en el plano XY.....	21
2.6.2	Variación en el plano YZ.....	24
2.7	Diseño de un nuevo calibrador.....	27
3	Conclusiones y trabajo futuro.....	31
	Bibliografía.....	33
	Anexo I.....	37
	Anexo II.....	45
	Anexo III.....	49
	Anexo IV.....	59

Índice de figuras

Figura 2.1.....	3
Figura 2.2.....	3
Figura 2.3.....	3
Figura 2.4.....	3
Figura 2.5.....	4
Figura 2.6.....	4
Figura 2.7.....	4
Figura 2.8.....	4
Figura 2.9.....	8

Figura 2.10.....	12
Figura 2.11.....	12
Figura 2.12.....	13
Figura 2.13.....	13
Figura 2.14.....	13
Figura 2.15.....	13
Figura 2.16.....	14
Figura 2.17.....	14
Figura 2.18.....	14
Figura 2.19.....	14
Figura 2.20.....	15
Figura 2.21.....	28
Figura 2.22.....	28
Figura 2.23.....	28
Figura 2.24.....	28
Figura 2.25.....	29
Figura 2.26.....	29
Figura Anexo II.1.....	45
Figura Anexo II.2.....	47
Figura Anexo II.3.....	48
Figura Anexo II.4.....	48
Figura Anexo II.5.....	48
Figura Anexo II.6.....	48
Figura Anexo III.1.....	49
Figura Anexo III.2.....	50
Figura Anexo III.3.....	50
Figura Anexo III.4.....	50
Figura Anexo III.5.....	52
Figura Anexo III.6.....	53
Figura Anexo III.7.....	54
Figura Anexo III.8.....	54
Figura Anexo III.9.....	56
Figura Anexo III.10.....	56

Índice de tablas

Tabla 2.1.....	4
Tabla 2.2.....	5
Tabla 2.3.....	6
Tabla 2.4.....	9
Tabla 2.5.....	10
Tabla 2.6.....	10
Tabla 2.7.....	16
Tabla 2.8.....	16
Tabla 2.9.....	17
Tabla 2.10.....	19
Tabla 2.11.....	20
Tabla 2.12.....	20
Tabla 2.13.....	22
Tabla 2.14.....	23
Tabla 2.15.....	23
Tabla 2.16.....	25
Tabla 2.17.....	25
Tabla 2.18.....	26
Tabla Anexo I.1.....	38
Tabla Anexo I.2.....	39

Memoria

1 Introducción

En este proyecto se desarrollan varias tareas relacionadas con la medición sin contacto mediante un sistema de visión, apoyándose en otras herramientas de medición, en este caso por contacto, como la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC).

Para conocer este tipo de sistemas de medición debe hacerse un repaso a su evolución a lo largo de la historia, así como una descripción de las diferentes técnicas de imagen tridimensional existentes, analizando las fortalezas y debilidades de cada una, y ver las aplicaciones que tienen actualmente para posteriormente establecer una serie de conclusiones sobre sus ventajas e inconvenientes (ver Anexo 1) [1-12].

El equipo de visión que se emplea fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, en el Área de Ingeniería de los procesos de Fabricación, para la medición de la planitud, el diámetro de los agujeros y la posición 3D de diferentes partes de las piezas, en diferentes modelos.

El proceso de medición se puede dividir en tres etapas: captura de las imágenes, en la que se realiza el barrido de las superficies de interés de la pieza, procesado de la información, en la que se digitalizan las superficies mediante triangulación a partir de la línea de incidencia del láser que aparecen en cada imagen, y obtención de resultados, en la que se determina la planitud, el diámetro y la posición de los agujeros. Para un mejor conocimiento del sistema de medición, ver Anexo 2, en él se define cada una de las partes del equipo y se explica más en profundidad su funcionamiento [13, 26].

En cuanto al procedimiento de calibración y medición, el software empleado para el tratamiento de las imágenes obtenidas y posterior muestra de los resultados ya estaba implementado, por lo que en este proyecto se ha trabajado en estandarizar el primer método de calibración (ver Anexo 3), definiendo con claridad cada uno de los pasos a seguir en el mismo y desarrollar las siguientes tareas, con el fin de mejorar la medición sin contacto mediante este equipo de visión:

- Estudio de repetibilidad con cada uno de los diferentes modelos de intercambiadores de calor de los que se dispone y posterior comparación de los resultados obtenidos con las mediciones hechas de los mismos modelos mediante la MMC.
- Recalibrado del sistema de visión y medición de los diferentes modelos de intercambiadores, empleando diferentes ganancias para hacer un estudio de sensibilidad. También se lleva a cabo un análisis de aquellos resultados que se salen de los valores normales de la medición.
- Calibrado del equipo por un segundo método, medición de un modelo de piezas y comparación de los resultados con el método de calibración anterior.
- Comparación de los dos métodos de calibración.

1 Introducción

- Modificación de las direcciones del sistema de visión en el segundo método de calibración con el objeto de ver su influencia en los resultados de las mediciones y análisis de la tendencia de los mismos.
- Estudio de sensibilidad variando la dirección del sistema de visión en los planos XY e YZ.
- Diseño de un nuevo calibrador que se adecue mejor a las necesidades que se presentan en ambos procedimientos de calibración.

2 Ensayos a realizar

A continuación se exponen los diferentes estudios que se han llevado a cabo con el equipo de medición sin contacto, explicando cada uno de ellos en detalle y sacando conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

2.1 Estudio de repetibilidad

Se basa en la medición de cada uno de los 3 modelos distintos de intercambiadores de calor (Fig. 2.1, 2.2 y 2.3)(del modelo 2 se disponen de dos piezas, por ello se miden ambas teniendo así el modelo 2 y el 2B), con la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) (Fig. 2.4) y mediante un sistema por visión (Fig. 2.5 y 2.6) para posteriormente poder comparar los valores obtenidos por los dos métodos y tener unos valores de corrección, error y recorrido tanto para las coordenadas XY de los agujeros, como para sus diámetros y planitudes de las dos bridas (Fig. 2.7 y 2.8) de cada una de las piezas (Tablas 2.1, 2.2 y 2.3).



Fig. 2.1, 2.2 y 2.3 Modelos 1, 2 y 3 de intercambiadores de calor.



Fig. 2.4 Utillaje requerido para la medición de los modelos de intercambiadores de calor con la MMC.

2 Ensayos a realizar

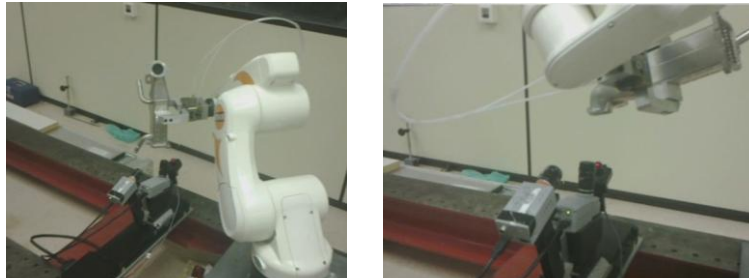


Fig. 2.5 y 2.6 Posicionamiento de las piezas con el robot para la medición de las bridas 1 y 2.



Fig. 2.7 y 2.8 Bridas 1 y 2.

Con la comparación de estas dos formas de medición lo que se hace es determinar la validez del procedimiento de calibración empleado en el sistema de visión, ya que la exactitud en las mediciones hechas con la MMC es muy alta, por lo que son unos valores muy fiables para poder compararlos con los otros [13-19]. Otro factor que podría influir como es la precisión en el posicionamiento de la pieza por parte del robot, tiene una repetibilidad muy buena [2,20-24, 28], lo cual hace que las posibles diferencias que se obtengan entre unos resultados de medición y otros dependerán fundamentalmente de lo buena o no que sea la calibración del equipo de visión.

Las operaciones requeridas para la obtención de los resultados que se exponen en las tablas resumen (Tablas 2.1, 2.2 y 2.3) se detallan con más precisión en el Anexo IV.

BRIDA 1					
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3
Diámetro 1	Recorrido	0.123	1.379	0.492	1.589
	Corrección local	-0.726	-0.617	-0.845	-0.294
	Corrección global	-0.621	-0.621	-0.621	-0.621
	Máximo error global	0.159	0.851	0.588	1.213
Diámetro 2	Recorrido	0.097	0.082	0.102	0.286
	Corrección local	-0.528	-0.828	-0.819	-1.059
	Corrección global	-0.808	-0.808	-0.808	-0.808
	Máximo error global	0.330	0.061	0.058	0.399

Diámetro 3	Recorrido	0.268	0.324	0.043	0.588
	Corrección local	-0.767	-0.947	-0.954	-0.524
	Corrección global	-0.798	-0.798	-0.798	-0.798
	Máximo error global	0.185	0.255	0.182	0.159
BRIDA 2					
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3
Diámetro 1	Recorrido	0.025	0.097	0.036	0.078
	Corrección local	-0.536	-0.499	-0.565	-0.502
	Corrección global	-0.526	-0.526	-0.526	-0.526
	Máximo error global	0.026	0.080	0.056	0.066
Diámetro 2	Recorrido	0.018	0.03	0.016	0.023
	Corrección local	-5.025	-4.973	-4.795	-5.161
	Corrección global	-4.989	-4.989	-4.989	-4.989
	Máximo error global	0.046	0.033	0.202	0.185
Diámetro 3	Recorrido	0.039	0.059	0.030	0.041
	Corrección local	-0.654	-0.642	-0.394	-0.636
	Corrección global	-0.581	-0.581	-0.581	-0.581
	Máximo error global	0.085	0.086	0.201	0.074

Tabla 2.1 Resultados de la medición de los diámetros de los agujeros de las piezas.

Los valores de los recorridos para el diámetro 1 de la brida 1 en los modelos 2 y 3 son demasiado grandes. Si se observan los valores de las 10 medidas tomadas para este agujero, se ve como hay algunas que se salen de los valores normales, por ello el recorrido aumenta. Esto puede deberse a que el agujero que se mide es roscado con lo que la exactitud de la medición disminuye, al ser más fácil que aparezcan reflejos en las imágenes tomadas, que hagan que en su posterior procesamiento para calcular el valor de los diámetros, estos varíen. Esto también provoca que el máximo error global, por lo general, sea mayor en este primer diámetro, ya que es donde la diferencia entre el valor de medición con la MMC y el obtenido con el sistema de visión aplicándole la corrección global es más grande.

BRIDA 1				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3
Recorrido	0.056	0.018	0.072	0.119
Corrección local	-0.149	-0.044	-0.074	-0.17
Corrección global	-0.109	-0.109	-0.109	-0.109
Máximo error global	0.064	0.075	0.065	0.140
BRIDA 2				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3
Recorrido	0.030	0.110	0.020	0.020
Corrección local	-0.075	-0.418	-0.059	-0.082
Corrección global	-0.158	-0.158	-0.158	-0.158
Máximo error global	0.100	0.301	0.109	0.084

Tabla 2.2 Resultados de la medición de las planitudes de las piezas.

En esta segunda tabla cabe destacar los valores de planitud obtenidos para la brida 1 del modelo 3 y el de la brida 2 en el modelo 2. En ambos, las 10 mediciones realizadas eran

2 Ensayos a realizar

grandes comparándolas con las que se tienen para los otros modelos, por ello el valor de corrección local es mayor y con variaciones significativas, lo que hace que el recorrido también sea elevado. Comprobando las dos bridas, se observa que el acabado, que se consiguió después de mecanizarla, es diferente al de los otros modelos y por esto, a la hora de realizar la medición con las cámaras, los valores de planitud obtenidos son diferentes.

A continuación, para poder comparar los valores de X e Y obtenidos por uno y otro método de medición, para la brida 2, se debe hacer un cambio de coordenadas para los datos de X e Y que se consiguen mediante la medición sin contacto (se detalla en el Anexo IV). Para la brida 1 los valores de X e Y que obtenemos por ambos métodos están en el mismo sistema de coordenadas, por lo que no se tiene que hacer nada.

BRIDA 1					
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3
X ₁	Recorrido	0.061	0.599	0.252	0.427
	Corrección local	0.237	0.058	0.071	0.265
	Corrección global	0.158	0.158	0.158	0.158
	Máximo error global	0.104	0.348	0.241	0.294
X ₂	Recorrido	0.100	0.277	0.213	0.272
	Corrección local	0.116	-0.002	-0.017	-0.167
	Corrección global	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018
	Máximo error global	0.185	0.151	0.107	0.323
Y ₁	Recorrido	0.071	0.267	0.101	0.347
	Corrección local	-0.076	-0.125	-0.077	-0.234
	Corrección global	-0.128	-0.128	-0.128	-0.128
	Máximo error global	0.093	0.138	0.108	0.310
Y ₂	Recorrido	0.199	0.459	0.249	0.646
	Corrección local	0.173	-0.155	-0.196	0.078
	Corrección global	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025
	Máximo error global	0.324	0.376	0.268	0.349
BRIDA 2					
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3
X ₁	Recorrido	0.058	0.042	0.044	0.027
	Corrección local	0.207	-0.036	0.073	-0.745
	Corrección global	-0.125	-0.125	-0.125	-0.125
	Máximo error global	0.363	0.110	0.217	0.634
X ₂	Recorrido	0.075	0.060	0.034	0.027
	Corrección local	-0.083	-0.169	-0.093	-0.552
	Corrección global	-0.224	-0.224	-0.224	-0.224
	Máximo error global	0.180	0.098	0.147	0.344
Y ₁	Recorrido	0.020	0.034	0.015	0.015
	Corrección local	0.042	0.020	0.030	-1.020
	Corrección global	-0.232	-0.232	-0.232	-0.232
	Máximo error global	0.283	0.262	0.269	0.795
Y ₂	Recorrido	0	0	0	0
	Corrección local	0	0	0	0
	Corrección global	0	0	0	0
	Máximo error global	0	0	0	0

Tabla 2.3 Resultados de la medición de las coordenadas XY de los agujeros de las piezas.

Se pueden ver en la tablas resumen de resultados cómo los valores de recorrido para los diámetros y coordenadas XY son mayores en la brida 1 que en la 2. Ello es debido, como ya se comentó antes, a que en la brida 1 los agujeros son roscados y en la brida 2 no, por lo que a la hora de tratar las imágenes, para calcular los valores de diámetros y coordenadas, en los roscados se producen reflejos que dificulta el obtener medidas iguales.

Como conclusión de este estudio de repetibilidad y prestando especial atención al parámetro de la planitud, cabe destacar que exceptuando una brida para el modelo 2 y otra para el modelo 3, en los que como ya se comentó los resultados se desviaban de los obtenidos en los otros modelos, la repetibilidad en las medidas es buena. Esto se contrasta haciendo el cálculo de la incertidumbre para los 3 parámetros según la GUM [29] y usando un nivel de confianza del 95% para $k = 2$. Los resultados que se obtienen son para la planitud de 0.05 y en el caso de los diámetros y de su posición de 0.2. Se comprueba que la mayor parte de las mediciones hechas entran dentro de estos valores, sólo quedan excluidas aquellas en las que se ha visto que hay problemas de reflejos o de acabado superficial.

2.2 Recalibración del equipo

El primer método de calibración consiste en relacionar una serie de puntos, cuyas coordenadas 3D en el espacio son perfectamente conocidas, con las coordenadas 2D que se obtienen al capturar imágenes de los mismos [25]. De esta forma se consigue una matriz de perspectiva del modelo cámara, que junto con la imagen del laser incidiendo en el calibrador, nos permite ajustar un mejor plano y con sus coeficientes más los parámetros de la Matriz de Transformación de Perspectiva (MTP), se puede reconstruir los puntos espaciales de la superficie de las piezas a partir de sus imágenes tomadas [27].

El sistema de referencia utilizado es ortogonal y dextrógiro para poder obtener la matriz y los coeficientes del plano y se define a continuación (Fig. 2.9):

- Eje X: su dirección está definida por la intersección del plano que contiene a todos los puntos del calibrador con el plano que contiene a la superficie donde están alojados y su sentido es positivo cuando se avanza hacia la derecha, visto desde la cámara. El origen está en el primer punto del calibrador que aparece a la izquierda de la imagen.
- Eje Y: su dirección es la de desplazamiento del carro de la posicionadora y su sentido coincide con el movimiento positivo que tiene la posicionadora definido por defecto. El origen estaría situado en la posición "cero" o "home" de la posicionadora.
- Eje Z: su dirección es la normal al plano medio entre las dos almenas, donde está definido el origen y el sentido es positivo hacia arriba.

2 Ensayos a realizar

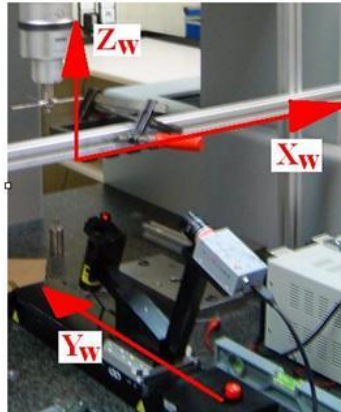


Fig. 2.9 Sistema de referencia en el primer método de calibración.

En la calibración del equipo se modifican dos parámetros de la óptica de las cámaras, enfoque y diafragma, que una vez variados se mantienen fijos para el resto del proceso de calibración y posterior captura de imágenes. Para ajustarlos se emplea una pieza representativa de las que posteriormente se medirán. Una vez realizado el enfoque hay que llegar a un compromiso entre el menor cierre del diafragma que permita mayor profundidad de campo (para tener una imagen nítida y enfocada correctamente alrededor del punto de enfoque) y la mayor iluminación posible de la imagen, para poder emplear tiempos de exposición más cortos (mayor número de captura de imágenes) y ganancias pequeñas (mejor respuesta del sensor ante el ruido). También hay que tener en cuenta que la línea del laser debe estar enfocada a la distancia de trabajo a la pieza (cuando la línea del laser aparece en la parte central de la imagen) y que en el proceso de calibración se captan diversas imágenes del calibrador (desplazándose de un extremo a otro del campo de visión de la cámara) y por lo tanto, la profundidad de campo debe ser suficiente para captar con nitidez los puntos de un extremo y otro. Para lograr este compromiso se ajusta el diafragma para la pieza y posteriormente se comprueba que la profundidad de campo impuesta es suficiente para el calibrador. A la vez que se hace esto, es importante ajustar el valor de la ganancia, de forma que la línea del laser destaque sobre el fondo sin que comience a saturar la imagen ni a aparecer un ruido excesivo. Es recomendable dejar un margen entre el mayor valor de ganancia de la cámara y el valor impuesto por si hubiese alguna pieza cuya superficie fuese más especular, lo que implicaría una menor iluminación en niveles de gris de la línea laser, y se necesitase aumentar este valor [13, 14].

Existen otros parámetros ajustables, que pueden ser modificados sin recalibrar el equipo, como son el tiempo de exposición (tiempo que permanece expuesto el sensor y durante el que capta fotones) y la ganancia (que aumenta el nivel de gris de los píxeles de la imagen para llevarlos a niveles en los que sea posible su correcto análisis), ambos asociados a la operación de la cámara y variables desde software. El primero de ellos no se modifica, dejando su valor en 5 ms y el segundo se varía para hacer un estudio de sensibilidad y ver cómo afectaba a las distintas mediciones. Se empleó una ganancia de 4.6, pero con este valor no se podía efectuar la medición del modelo 2, por lo que para él se tuvo que aumentar hasta 11.6. Para los otros modelos se buscó una ganancia máxima para la cual se pudiesen medir y con ella se hizo la

medición del modelo 1. A continuación se muestran los resultados de las distintas mediciones (Tablas 2.4, 2.5 y 2.6).

BRIDA 1								
		Ganancia	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3	Media	Tendencia
Diámetro 1	Recorrido	16.9	0.123	1.379	0.492	1.589	0.896	0.551
		4.6	0.139		0.066	0.828	0.344	0.000
		11.6		1.495			1.495	1.151
		Max. 9.8	0.183				0.183	-0.161
	Corrección local	16.9	-0.726	-0.617	-0.845	-0.294	-0.621	-0.199
		4.6	-0.773		-0.787	-0.898	-0.819	0.000
		11.6		-0.630			-0.630	-0.190
		Max. 9.8	-0.583				-0.583	-0.237
Diámetro 2	Recorrido	16.9	0.097	0.082	0.102	0.286	0.142	0.047
		4.6	0.09		0.057	0.137	0.095	0.000
		11.6		2.331			2.331	2.236
		Max. 9.8	0.118				0.118	0.023
	Corrección local	16.9	-0.528	-0.828	-0.819	-1.059	-0.809	-0.071
		4.6	-0.668		-0.902	-1.067	-0.879	0.000
		11.6		-0.298			-0.298	-0.581
		Max. 9.8	-0.446				-0.446	-0.433
Diámetro 3	Recorrido	16.9	0.268	0.324	0.043	0.588	0.306	0.054
		4.6	0.306		0.04	0.41	0.52	0.000
		11.6		0.249			0.249	-0.003
		Max. 9.8	1.092				1.092	0.840
	Corrección local	16.9	-0.767	-0.947	-0.954	-0.524	-0.798	-0.118
		4.6	-0.907		-1.002	-0.840	-0.916	0.000
		11.6		-0.867			-0.867	-0.049
		Max. 9.8	-0.435				-0.435	-0.482
BRIDA 2								
		Ganancia	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3	Media	Tendencia
Diámetro 1	Recorrido	16.9	0.025	0.097	0.036	0.078	0.059	0.004
		4.6	0.04		0.083	0.042	0.055	0.000
		11.6		0.063			0.063	0.008
		Max. 9.8	0.021				0.021	-0.034
	Corrección local	16.9	-0.536	-0.499	-0.565	-0.502	-0.526	-0.054
		4.6	-0.662		-0.558	-0.519	-0.579	0.000
		11.6		-0.397			-0.397	-0.182
		Max. 9.8	-0.534				-0.534	-0.045
Diámetro 2	Recorrido	16.9	0.018	0.03	0.016	0.023	0.022	0.007
		4.6	0.019		0.013	0.011	0.014	0.000
		11.6		0.016			0.016	0.002
		Max. 9.8	0.01				0.010	-0.004
	Corrección local	16.9	-5.025	-4.973	-4.795	-5.161	-4.989	-0.047
		4.6	-5.052		-4.847	-5.209	-5.036	0.000
		11.6		-4.912			-4.912	-0.124
		Max. 9.8	-4.968				-4.968	-0.068

2 Ensayos a realizar

Diámetro 3	Recorrido	16.9	0.039	0.059	0.03	0.041	0.042	0.008
		4.6	0.018		0.04	0.044	0.034	0.000
		11.6		0.064			0.064	0.030
		Max. 9.8	0.03				0.030	-0.004
	Corrección local	16.9	-0.654	-0.642	-0.394	-0.636	-0.582	-0.050
		4.6	-0.732		-0.461	-0.703	-0.632	0.000
		11.6		-0.517			-0.517	-0.115
		Max. 9.8	-0.616				-0.618	-0.014

Tabla 2.4 Resultados de la medición de los diámetros de los agujeros de las piezas.

BRIDA 1								
	Ganancia	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3	Media	Tendencia	
Recorrido	16.9	0.056	0.018	0.072	0.119	0.066	0.017	
	4.6	0.071		0.021	0.057	0.050	0.000	
	11.6		0.033			0.033	-0.017	
	Max. 9.8	0.042				0.042	-0.008	
Corrección local	16.9	-0.149	-0.044	-0.074	-0.170	-0.109	0.025	
	4.6	-0.109		-0.026	-0.117	-0.084	0.000	
	11.6		-0.078			-0.078	-0.006	
	Max. 9.8	-0.137				-0.137	0.053	
BRIDA 2								
	Ganancia	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3	Media	Tendencia	
Recorrido	16.9	0.03	0.11	0.02	0.02	0.045	0.032	
	4.6	0.01		0.02	0.01	0.013	0.000	
	11.6		0.05			0.050	0.037	
	Max. 9.8	0.05				0.050	0.037	
Corrección local	16.9	-0.075	-0.418	-0.059	-0.082	-0.159	0.127	
	4.6	-0.035		-0.011	-0.05	-0.032	0.000	
	11.6		-0.172			-0.172	0.140	
	Max. 9.8	-0.092				-0.092	0.060	

Tabla 2.5 Resultados de la medición de las planitudes de las piezas.

BRIDA 1									
	Ganancia	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3	Media	Tendencia		
X1	Recorrido	16.9	0.061	0.599	0.252	0.427	0.335	0.186	
		4.6	0.09		0.077	0.278	0.148	0.000	
		11.6		1.929			1.929	1.781	
		Max. 9.8	0.082				0.082	-0.066	
	Corrección local	16.9	0.237	0.058	0.071	0.265	0.158	-0.166	
		4.6	0.372		0.276	0.324	0.324	0.000	
		11.6		0.506			0.506	0.182	
		Max. 9.8	0.315				0.315	-0.009	

X2	Recorrido	16.9	0.1	0.277	0.213	0.272	0.216	0.120
		4.6	0.109		0.077	0.101	0.096	0.000
		11.6		1.068			1.068	0.972
		Max. 9.8	0.166				0.166	0.070
	Corrección local	16.9	0.116	-0.002	-0.017	-0.167	-0.018	-0.044
		4.6	-0.185		0.043	-0.045	0.061	0.000
		11.6		0.219			0.219	0.158
		Max. 9.8	0.086				0.086	0.025
Y1	Recorrido	16.9	0.071	0.267	0.101	0.347	0.197	0.080
		4.6	0.073		0.038	0.239	0.117	0.000
		11.6		0.240			0.240	0.123
		Max. 9.8	0.142				0.142	0.025
	Corrección local	16.9	-0.076	-0.125	-0.077	-0.234	-0.128	0.016
		4.6	-0.074		-0.118	-0.143	-0.112	0.000
		11.6		-0.140			-0.140	0.028
		Max. 9.8	-0.143				-0.143	0.031
Y2	Recorrido	16.9	0.199	0.459	0.249	0.646	0.388	0.215
		4.6	0.188		0.056	0.276	0.173	0.000
		11.6		0.991			0.991	0.818
		Max. 9.8	0.714				0.714	0.541
	Corrección local	16.9	0.173	-0.155	-0.196	0.078	-0.025	0.012
		4.6	0.051		-0.247	0.157	-0.013	0.000
		11.6		-0.164			-0.164	0.151
		Max. 9.8	0.255				0.255	0.242
BRIDA 2								
		Ganancia	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 2B	Modelo 3	Media	Tendencia
X1	Recorrido	16.9	0.058	0.042	0.044	0.027	0.043	0.002
		4.6	0.031		0.065	0.028	0.041	0.000
		11.6		0.047			0.047	0.006
		Max. 9.8	0.025				0.025	-0.016
	Corrección local	16.9	0.207	-0.036	0.073	-0.745	-0.125	0.012
		4.6	0.247		0.110	-0.696	-0.113	0.000
		11.6		-0.016			-0.016	-0.097
		Max. 9.8	0.287				0.287	0.174
X2	Recorrido	16.9	0.075	0.06	0.034	0.027	0.049	0.008
		4.6	0.036		0.054	0.033	0.041	0.000
		11.6		0.074			0.074	0.033
		Max. 9.8	0.046				0.046	0.006
	Corrección local	16.9	-0.083	-0.169	-0.093	-0.552	-0.224	0.037
		4.6	-0.014		-0.053	-0.495	-0.187	0.000
		11.6		-0.130			-0.130	-0.058
		Max. 9.8	0.002				0.002	-0.185
Y1	Recorrido	16.9	0.020	0.034	0.015	0.015	0.021	-0.003
		4.6	0.018		0.023	0.032	0.024	0.000
		11.6		0.030			0.030	0.006
		Max. 9.8	0.012				0.012	-0.012
	Corrección local	16.9	0.042	0.020	0.030	-1.020	-0.232	-0.081
		4.6	0.054		0.036	-1.028	-0.313	0.000
		11.6		0.059			0.059	-0.254
		Max. 9.8	0.043				0.043	-0.270

2 Ensayos a realizar

Y2	Recorrido	16.9	0	0	0	0	0	0	
		4.6	0		0	0	0	0	
		11.6		0				0	0
		Max. 9.8	0					0	0
	Corrección local	16.9	0	0	0	0	0	0	
		4.6	0		0	0	0	0	
		11.6		0				0	0
		Max. 9.8	0					0	0

Tabla 2.6 Resultados de la medición de las coordenadas XY de los agujeros de las piezas.

Se realiza la media de los recorridos y de las correcciones locales para posteriormente, tomando como referencia la medición con ganancia de 4.6, hacer un estudio de la tendencia de los mismos.

Al analizar el recorrido se observa que no se puede sacar una tendencia en ninguno de los parámetros estudiados.

En cuanto a la corrección local, se ve, que en el diámetro de los agujeros, al aumentar la ganancia, la corrección disminuye y en la planitud, cuando aumenta la ganancia, la corrección local también se incrementa. En las coordenadas XY del centro de los agujeros no se puede sacar una tendencia clara de la corrección.

2.2.1 Estudio de resultados de medición

A continuación se hace un estudio en profundidad de aquellos valores que se salen de los resultados normales en la medición de alguno de los parámetros que se consideran.

- Análisis de los valores que difieren de los normales en la medición del diámetro 1 de la brida 1 (Fig. 2.10–2.14).

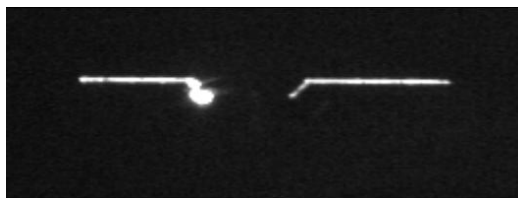


Fig. 2.10 Imagen del diámetro 1 de la brida 1 en el modelo 2.

Se observa en la imagen, que en el modelo 2 con una ganancia de 11.6, aparece un reflejo debido a la presencia de un chaflán, el cual es el causante de que a la hora de medir el diámetro y calcular las coordenadas del agujero, la medición no sea correcta.

Comparando esta imagen con otra tomada del mismo modelo, pero con ganancia 16.9 y donde el error de medición es pequeño, no se aprecia una gran diferencia.

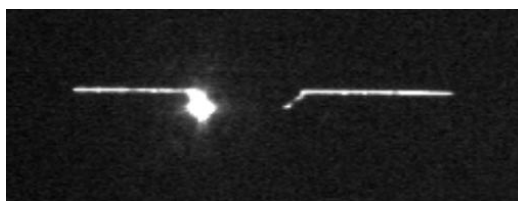


Fig. 2.11 Imagen del diámetro 1 de la brida 1 en el modelo 2, con una ganancia de 16.9.

De igual manera comparando las imágenes anteriores con otras tomadas de diferentes modelos, se observa un problema similar.

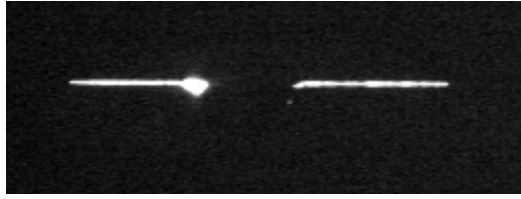


Fig. 2.12 Imagen del diámetro 1 de la brida 1 en el modelo 1.

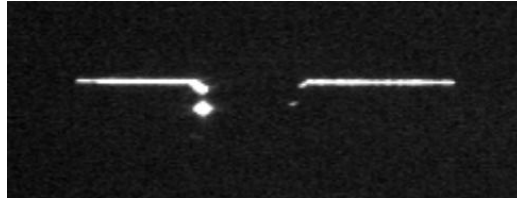


Fig. 2.13 Imagen del diámetro 1 de la brida 1 en el modelo 2B.

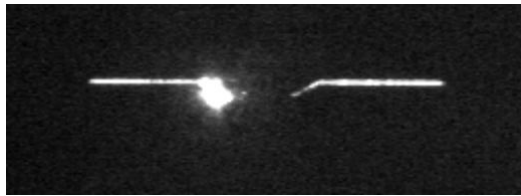


Fig. 2.14 Imagen del diámetro 1 de la brida 1 en el modelo 3.

Por lo tanto se puede concluir que existe un problema con el agujero 1, sobretodo en los modelos 2 y 3, ya que en estos tanto para una ganancia como para otra los valores del recorrido son de los más altos.

Una posible solución sería mejorar el software existente de forma que estos puntos gordos los despreciase. Otra sería posicionar la pieza con el robot de forma que se minimizasen los reflejos.

- Análisis de los valores de recorrido, para el diámetro 2 también de la brida 1 (fig. 2.15-2.17), que difieren de los normales.

Se observa que el mayor valor de recorrido se da en el modelo 2.

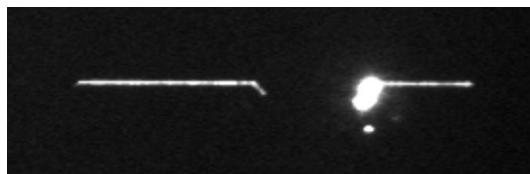


Fig. 2.15 Imagen del diámetro 2 de la brida 1 en el modelo 2.

Si se compara esta imagen con la que se obtiene en la medición de este mismo modelo pero a ganancia 16.9, no se observa gran diferencia.

2 Ensayos a realizar

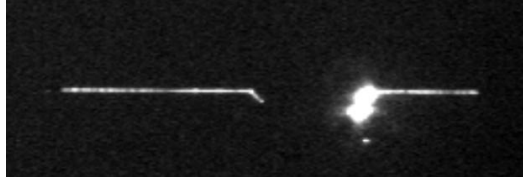


Fig. 2.16 Imagen del diámetro 2 de la brida 1 en el modelo 2, con una ganancia de 16.9.

Viendo la imagen correspondiente al modelo 1, sí que se observa diferencia, ya que sólo hay un único punto gordo, por lo que se puede tomar mejor la medida del diámetro del agujero.

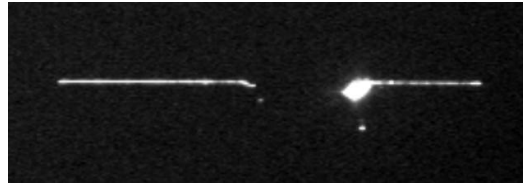


Fig. 2.17 Imagen del diámetro 2 de la brida 1 en el modelo 1.

Por lo que en este segundo caso tenemos un problema que no se generaliza a todos los modelos, sino que sólo se da en uno.

- Estudio del diámetro 3 en el modelo 1 (Fig. 2.18 y 2.19) para una ganancia máxima de 9.8.

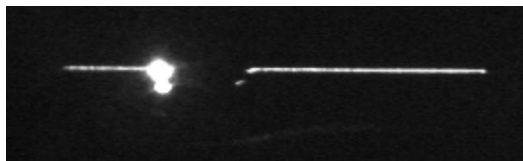


Fig. 2.18 Imagen del diámetro 3 de la brida 1 en el modelo 1, con una ganancia de 9.8.

Para este mismo modelo con una ganancia de 4.6, el punto gordo es de menor tamaño, lo cual permite hacer una medición con un error menor. Por lo que se puede concluir que en este caso para hacer una correcta medición, el valor de la ganancia debería ser lo menor posible.

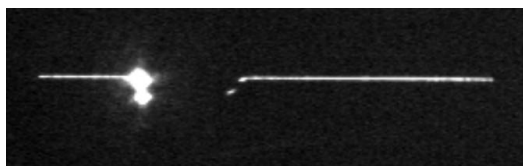


Fig. 2.19 Imagen del diámetro 3 de la brida 1 en el modelo 1, con una ganancia de 4.6.

- Otros valores de recorrido a estudiar son los que corresponden a las coordenadas en X de los agujeros 2 y 3, cuyos diámetros se han analizado antes. Los problemas que se tienen con los reflejos en el chaflán provocan fallos en la determinación de las coordenadas de los centros de los agujeros, por lo que la posible solución sería la misma que para los diámetros, desarrollar un software que no tuviese en cuenta estos puntos gordos o un mejor posicionamiento de la pieza con el robot.

2.3 Calibración del equipo por el 2º Método y medición de piezas

En este método se capta una imagen de puntos y una del laser (para conocer dónde cortan las proyecciones de los puntos y así poder obtener las coordenadas de ese punto de corte), con ellas se construye el sistema de referencia del calibrador en la cámara, que se materializa en el eje reconstruido a partir de los puntos de las aristas, obtenidos de cada imagen tomada mediante el barrido a lo largo de toda la longitud del calibrador (se captan 1300 imágenes, una cada 0.16 mm de avance de la posicionadora). Con este sistema de referencia se construye la MTP, que permite pasar de coordenadas del calibrador a las de la cámara [33].

Para este segundo procedimiento se usa solamente el patrón que se empleaba para calibrar la cámara de avellanados en el primer método (Fig. 2.20).



Fig. 2.20 Montaje para la calibración de las cámaras por el segundo método.

Seguidamente, se explica cómo se hace el sistema de referencia, que al igual que en el primer método de calibración, es ortogonal y dextrógiro. Se definen los tres ejes de coordenadas:

- Eje X: su dirección se construye, igual que en el método anterior, a partir de la intersección del plano que contiene a todos los puntos del calibrador y el plano que contiene a la superficie donde están alojados. Tiene sentido positivo hacia la derecha y el origen está en la esquina superior izquierda del calibrador, según la imagen captada por la cámara.
- Eje Y: su dirección se reconstruye a partir de los puntos de las aristas captados en cada imagen, en el barrido que se hace a lo largo de toda la longitud del calibrador. El sentido es positivo al avanzar por la longitud del calibrador.
- Eje Z: su dirección es la normal a la superficie opuesta al plano que contiene todos los puntos del calibrador, el sentido es positivo hacia arriba y el origen está situado en el plano medio entre las dos almenas.

Para la reconstrucción de la dirección a partir de los puntos de las aristas, en cada barrido del calibrador se van tomando los puntos de las diferentes aristas del mismo, por lo que al final se obtienen varias direcciones, de las cuales se deja la que de un menor error de posición respecto a los agujeros del calibrador, cuya situación está perfectamente determinada mediante la medición con una máquina de medir por coordenadas.

2 Ensayos a realizar

También se determinan las direcciones i, j, k de la posicionadora, para ello se hace un palpado de dos puntos de misma, con lo que se consigue una recta que se proyecta en el plano de la mesa de la MMC y así obtener la dirección [13].

Una vez realizada la calibración nueva se pasan las imágenes, del modelo 1 de intercambiador de calor, captadas con la calibración antigua del aparato y se comparan los resultados obtenidos para el recorrido y la corrección local. Para ello en lugar de emplear los valores absolutos, se utilizan los relativos, que se consiguen dividiendo cada valor de recorrido y corrección por la media de las 10 mediciones hechas para cada parámetro que se mide.

$$\text{Por ejemplo: } \textit{Recorrido relativo} = \frac{\textit{Recorrido}}{\frac{\sum D_i}{10}}$$

A continuación se muestran las tablas comparativas de resultados de medición, según se haya calibrado el equipo de visión por el primer o segundo método, para los diámetros (Tabla 2.7), las planitudes (Tabla 2.8) y las coordenadas XY (Tabla 2.9).

BRIDA 1					
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa
Diámetro 1	Modelo 1 (calibración antigua)	0.139	-0.773	0.018	-0.102
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.142	-0.767	0.019	-0.101
Diámetro 2	Modelo 1 (calibración antigua)	0.090	-0.668	0.012	-0.089
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.108	-0.671	0.014	-0.090
Diámetro 3	Modelo 1 (calibración antigua)	0.306	-0.907	0.040	-0.117
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.310	-0.906	0.040	-0.117
BRIDA 2					
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa
Diámetro 1	Modelo 1 (calibración antigua)	0.040	-0.662	0.004	-0.072
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.039	-0.062	0.004	-0.072
Diámetro 2	Modelo 1 (calibración antigua)	0.019	-5.052	0.0005	-0.136
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.020	-5.053	0.0005	-0.136
Diámetro 3	Modelo 1 (calibración antigua)	0.018	-0.732	0.002	-0.080
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.019	-0.733	0.002	-0.080

Tabla 2.7 Tabla comparativa de diámetros.

BRIDA 1				
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa
Modelo 1 (calibración antigua)	0.071	-0.109	0.433	-0.665
Modelo 1 (calibración nueva)	0.073	-0.114	0.435	-0.679
BRIDA 2				
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa
Modelo 1 (calibración antigua)	0.010	-0.035	0.116	-0.407
Modelo 1 (calibración nueva)	0.010	-0.037	0.114	-0.420

Tabla 2.8 Tabla comparativa de planitudes.

BRIDA 1					
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa
X ₁	Modelo 1 (calibración antigua)	0.090	0.372	0.001	0.004
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.075	0.198	0.001	0.002
X ₂	Modelo 1 (calibración antigua)	0.109	0.185	0.003	0.004
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.111	0.099	0.003	0.002
Y ₁	Modelo 1 (calibración antigua)	0.073	-0.074	0.984	-1
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.074	-0.074	1	-1
Y ₂	Modelo 1 (calibración antigua)	0.188	0.051	0.003	0.001
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.209	0.144	0.003	0.002
BRIDA 2					
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa
X ₁	Modelo 1 (calibración antigua)	0.031	0.247	0.001	0.008
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.031	0.240	0.001	0.008
X ₂	Modelo 1 (calibración antigua)	0.036	-0.014	0.001	-0.0002
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.038	-0.014	0.001	-0.0002
Y ₁	Modelo 1 (calibración antigua)	0.018	0.054	0.198	0.583
	Modelo 1 (calibración nueva)	0.019	0.063	0.231	0.766
Y ₂	Modelo 1 (calibración antigua)	0	0	0	0
	Modelo 1 (calibración nueva)	0	0	0	0

Tabla 2.9 comparativa de coordenadas XY.

El parámetro más determinante en la comparación es el recorrido, ya que al tratarse de la diferencia entre el máximo y mínimo error cometido en las 10 mediciones, para un modelo, es el mejor indicador de lo bien o mal que está hecha la calibración. Sin embargo, la corrección local es un valor que se aplica a cada una de las medidas realizadas, por lo que no nos da una noción del error global de la calibración.

Analizando la comparativa entre los dos métodos de calibración se observa que ni en los diámetros ni en las planitudes hay diferencias significativas. Es en las coordenadas donde se ve la mayor diferencia, en concreto en la Y₁ de la brida 2, tanto el recorrido como la corrección local, ambos relativos, difieren en sus valores, algo que también es normal ya que es aquí, en las coordenadas más grandes, donde se pueden dar las mayores diferencias.

De todas formas la diferencia tampoco es demasiado grande y sólo se da en una coordenada, por lo que este no sería un motivo para decantarnos por uno u otro método de calibración.

2.4 Comparación de los métodos de calibración

No se puede determinar de forma absoluta que un método sea mejor que otro, ya que las ventajas de uno sobre el otro pueden depender de la aplicación que se vaya a hacer o de los medios de los que se dispongan.

Analizándolos más en detalle observamos que en el 1º se hace una mayor aproximación. Ya que la construcción del eje Y se hace con las coordenadas de todos los puntos que se toman en cada una de las imágenes, a partir del movimiento de la posicionadora, y se aproxima al eje Y

de la propia posicionadora. En el 2º método no se realizan aproximaciones para la obtención del sistema de referencia cámara, pero la cantidad de puntos de los que se dispone es pequeña, ya que son sólo los captados en una imagen.

A pesar de estos inconvenientes comentados, se puede asegurar que ambos métodos funcionan muy bien, el primero había sido más empleado y a pesar de las mayores aproximaciones que se hacen, se había comprobado que su repercusión de los resultados finales era mínima. En cuanto al segundo, que había sido menos utilizado, con este estudio comparativo realizado se comprueba que apenas existen diferencias con el primero y que por lo tanto es igual de eficaz.

Como ya se ha dicho la elección de un procedimiento u otro puede depender de determinados aspectos dependientes de la situación en la que se esté. En el caso de no disponer de una MMC, entonces habría que decantarse por el 2º método, en el cual el único elemento externo que se requiere es el calibrador. O en la situación en la que se dispusiese de menor tiempo, uno podría decantarse por el 1º, ya que el barrido del patrón que se hace en el 2º procedimiento, implica que se requiera un mayor tiempo, aunque sin ser excesivo.

2.5 Modificación de las direcciones en el 2º método de calibración

A continuación se realiza un estudio de la influencia de la variación de las direcciones en el segundo método de calibración:

Para la primera calibración de este segundo método se empleo el vector director (I, J, K) siguiente (Dirección 1):

$$I = -0.008418$$

$$J = 0.999965$$

$$K = 0.000092$$

Con el paso de los días se volvieron a hacer dos mediciones de la dirección de la posicionadora (Dirección 2 y Dirección 3), para comprobar si ésta se movía y en caso de hacerlo ver cuál sería su repercusión.

Dirección2:

$$I = -0.008893$$

$$J = 0.9999602$$

$$K = 0.000298$$

Dirección3:

$$I = -0.009472$$

$$J = 0.999955$$

$$K = 0.000361$$

Otro valor de dirección que se tomó fue el (0,1,0), para ver también qué resultados se obtenían. Con todas estas direcciones, para el modelo 1 de intercambiador de calor, se hizo un estudio comparativo viendo si los datos resultantes tomaban algún tipo de tendencia.

Seguidamente se muestran las tablas con los resultados de la medición de los diámetros (Tabla 2.10), las planitudes (Tabla 2.11) y las coordenadas XY (Tabla 2.12), según se modifique el valor de la dirección.

BRIDA 1							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Diámetro 1	Dirección 1	0.142	-0.767	0.019	-0.101	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.143	-0.768	0.019	-0.101	0.001	0.001
	Dirección 2	0.141	-0.767	0.019	-0.101	-0.001	0
	Dirección 3	0.141	-0.766	0.019	-0.101	-0.001	-0.001
Diámetro 2	Dirección 1	0.108	-0.671	0.014	-0.090	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.089	-0.667	0.012	-0.089	-0.019	-0.004
	Dirección 2	0.098	-0.672	0.013	-0.090	-0.010	0.001
	Dirección 3	0.099	-0.671	0.013	-0.090	-0.009	0
Diámetro 3	Dirección 1	0.310	-0.906	0.040	-0.117	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.335	-0.886	0.043	-0.115	0.025	-0.020
	Dirección 2	0.309	-0.905	0.040	-0.117	-0.001	-0.001
	Dirección 3	0.309	-0.904	0.040	-0.117	-0.001	-0.002
BRIDA 2							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Diámetro 1	Dirección 1	0.039	-0.662	0.004	-0.072	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.040	-0.662	0.004	-0.072	0.001	0
	Dirección 2	0.039	-0.662	0.004	-0.072	0	0
	Dirección 3	0.039	-0.662	0.004	-0.072	0	0
Diámetro 2	Dirección 1	0.020	-5.053	0.0005	-0.136	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.020	-5.054	0.0005	-0.136	0	0.002
	Dirección 2	0.020	-5.052	0.0005	-0.136	0	-0.0005
	Dirección 3	0.020	-5.052	0.0005	-0.136	0	-0.0005
Diámetro 3	Dirección 1	0.019	-0.733	0.002	-0.080	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.018	-0.733	0.002	-0.080	-0.001	0.0002
	Dirección 2	0.019	-0.733	0.002	-0.080	0	0.0006
	Dirección 3	0.019	-0.733	0.002	-0.080	0	0.0004

Tabla 2.10 Resultados medición de diámetros.

2 Ensayos a realizar

BRIDA 1							
	Recorrido	Corrección local		Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Dirección 1	0.073	-0.114		0.435	-0.679	0	0
Dirección (0,1,0)	0.067	-0.108		0.414	-0.667	-0.006	-0.006
Dirección 2	0.073	-0.114		0.435	-0.679	0	0
Dirección 3	0.074	-0.114		0.440	-0.679	0.001	0
BRIDA 2							
	Recorrido	Corrección local		Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Dirección 1	0.010	-0.037		0.114	-0.420	0	0
Dirección (0,1,0)	0.010	-0.036		0.115	-0.414	0	-0.001
Dirección 2	0.010	-0.037		0.114	-0.420	0	0
Dirección 3	0.010	-0.036		0.115	-0.414	0	-0.001

Tabla 2.11 Resultados medición de planitudes.

BRIDA 1								
		Recorrido	Corrección local		Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
							Recorrido	Corrección local
X ₁	Dirección 1	0.075	0.198		0.001	0.002	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.096	0.534		0.001	0.006	0.021	0.336
	Dirección 2	0.076	0.179		0.001	0.002	0.001	-0.019
	Dirección 3	0.077	0.156		0.001	0.002	0.002	-0.042
X ₂	Dirección 1	0.111	0.099		0.003	0.002	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.108	0.308		0.003	0.007	-0.003	0.209
	Dirección 2	0.112	0.086		0.003	0.002	0.001	-0.013
	Dirección 3	0.112	0.071		0.003	0.002	0.001	-0.028
Y ₁	Dirección 1	0.074	-0.074		1	-1	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.073	-0.034		2.141	-0.997	-0.001	-0.04
	Dirección 2	0.073	-0.077		0.954	-1.007	-0.001	0.003
	Dirección 3	0.073	-0.080		0.914	-1.001	-0.001	0.006
Y ₂	Dirección 1	0.209	0.144		0.003	0.002	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.178	-0.072		0.003	-0.001	-0.031	-0.072
	Dirección 2	0.208	0.157		0.003	0.003	-0.001	0.013
	Dirección 3	0.208	0.174		0.003	0.003	-0.001	0.030

BRIDA 2							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
X ₁	Dirección 1	0.031	0.240	0.001	0.008	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.031	0.240	0.001	0.008	-0.0001	-0.0002
	Dirección 2	0.031	0.240	0.001	0.008	0	-0.0002
	Dirección 3	0.031	0.240	0.001	0.008	0	-0.0002
X ₂	Dirección 1	0.038	-0.014	0.001	-0.0002	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.036	-0.014	0.001	-0.0002	-0.002	-0.0004
	Dirección 2	0.037	-0.014	0.001	-0.0002	-0.002	-0.0004
	Dirección 3	0.037	-0.014	0.001	-0.0002	-0.002	-0.0004
Y ₁	Dirección 1	0.019	0.063	0.225	0.766	0	0
	Dirección (0,1,0)	0.019	0.063	0.225	0.763	0	-0.0002
	Dirección 2	0.019	0.063	0.231	0.758	0.001	-0.0006
	Dirección 3	0.019	0.063	0.231	0.765	0.001	-0.0001
Y ₂	Dirección 1	0	0	0	0		
	Dirección (0,1,0)	0	0	0	0		
	Dirección 2	0	0	0	0		
	Dirección 3	0	0	0	0		

Tabla 2.12 Resultados medición de coordenadas XY.

Analizando los valores de recorridos y correcciones locales para los diámetros, planitudes y coordenadas XY, se extrae que no se puede sacar ninguna tendencia relacionada con la variación de las direcciones. Lo único a destacar es que para la dirección (0,1,0), tanto para el recorrido como para la corrección local, en la mayoría de los casos y especialmente al hacer la medición de las coordenadas de la brida 1, es donde se producen las mayores variaciones, ya sean positivas o negativas.

2.6 Estudio de sensibilidad variando las direcciones

En este estudio se modifica el vector director de la posicionadora, primero en el plano XY y posteriormente en el YZ. Para ello se realizan los siguientes cálculos.

2.6.1 Variación en el plano XY

Se modifica el vector director únicamente en este plano, por lo que la componente en Z del mismo no se modifica.

Se emplea como valor de partida el vector de la dirección 1:

$$I = -0.008418$$

$$J = 0.999965$$

$$K = 0.000092$$

2 Ensayos a realizar

Con estos datos de I y J se calcula el ángulo de la posicionadora con respecto a la dirección Y en el plano XY.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{-0.008418}{0.999965} = -0.4823^\circ$$

Teniendo este valor de referencia se va incrementando el valor del ángulo y calculando el vector unidad correspondiente hasta conseguir el máximo ángulo posible, para el cual ya no se puede hacer la medición de la pieza.

El valor máximo de α es 2° y para obtener los correspondientes valores de I y J se opera de la siguiente manera.

$$\sin \alpha = \frac{I}{1} \rightarrow I = 1 \cdot \sin \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{J}{1} \rightarrow J = 1 \cdot \cos \alpha$$

Como el valor máximo posible de α es 2° y el que se toma de referencia está próximo a 0.5° , se cogen como valores intermedios 1° y 1.5° , para poder ver si hay alguna tendencia en el recorrido y la corrección local al variar este ángulo.

A continuación se muestra las tablas con los resultados obtenidos en las distintas mediciones de los diámetros (Tabla 2.13), las planitudes (Tabla 2.14) y las coordenadas XY (Tabla 2.15).

BRIDA 1							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Diámetro 1	Dirección 1	0.142	-0.767	0.019	-0.101	0	0
	Dirección 1°	0.131	-0.754	0.017	-0.100	-0.011	-0.013
	Dirección 1.5°	0.131	-0.757	0.017	-0.100	-0.011	-0.010
	Dirección 2°	0.132	-0.754	0.017	-0.100	-0.010	-0.013
Diámetro 2	Dirección 1	0.108	-0.671	0.014	-0.090	0	0
	Dirección 1°	0.121	-0.664	0.016	-0.089	0.013	-0.007
	Dirección 1.5°	0.134	-0.663	0.018	-0.089	0.026	-0.008
	Dirección 2°	0.162	-0.641	0.022	-0.086	0.054	-0.030
Diámetro 3	Dirección 1	0.310	-0.906	0.040	-0.117	0	0
	Dirección 1°	0.303	-0.909	0.039	-0.117	-0.007	0.003
	Dirección 1.5°	0.318	-0.912	0.041	-0.118	0.008	0.006
	Dirección 2°	0.329	-0.908	0.043	-0.117	0.019	0.002
BRIDA 2							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Diámetro 1	Dirección 1	0.039	-0.662	0.004	-0.072	0	0
	Dirección 1°	0.04	-0.662	0.004	-0.072	0.001	-0.0003
	Dirección 1.5°	0.039	-0.661	0.004	-0.072	0	-0.0008
	Dirección 2°	0.04	-0.662	0.004	-0.072	0.001	-0.0002

Diámetro 2	Dirección 1	0.02	-5.053	0.0005	-0.1357	0	0
	Dirección 1°	0.02	-5.051	0.0005	-0.1357	0	-0.001
	Dirección 1.5°	0.02	-5.050	0.0005	-0.1356	0	-0.002
	Dirección 2°	0.048	-5.159	0.0013	-0.1382	0.028	0.107
Diámetro 3	Dirección 1	0.019	-0.733	0.002	-0.080	0	0
	Dirección 1°	0.019	-0.733	0.002	-0.080	0	0.0002
	Dirección 1.5°	0.018	-0.733	0.002	-0.080	-0.001	0.0006
	Dirección 2°	0.018	-0.733	0.002	-0.080	-0.001	0.0004

Tabla 2.13 Resultados medición de diámetros.

BRIDA 1							
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia		
					Recorrido	Corrección local	
Dirección 1	0.073	-0.114	0.435	-0.679	0	0	
Dirección 1°	0.08	-0.118	0.462	-0.682	0.007	0.004	
Dirección 1.5°	0.076	-0.126	0.420	-0.696	0.003	0.012	
Dirección 2°	0.072	-0.157	0.341	-0.744	-0.001	0.043	
BRIDA 2							
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia		
					Recorrido	Corrección local	
Dirección 1	0.01	-0.037	0.114	-0.420	0	0	
Dirección 1°	0.01	-0.036	0.115	-0.414	0	-0.001	
Dirección 1.5°	0.01	-0.036	0.115	-0.414	0	-0.001	
Dirección 2°	0.01	-0.034	0.118	-0.400	0	-0.003	

Tabla 2.14 Resultados medición de planitudes.

BRIDA 1							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
X₁	Dirección 1	0.075	0.198	0.001	0.002	0	0
	Dirección 1°	0.124	-0.158	0.001	-0.002	0.049	-0.040
	Dirección 1.5°	0.160	-0.504	0.002	-0.006	0.085	0.306
	Dirección 2°	0.210	-0.828	0.002	-0.010	0.135	0.630
X₂	Dirección 1	0.111	0.099	0.003	0.002	0	0
	Dirección 1°	0.126	-0.129	0.003	-0.003	0.015	0.030
	Dirección 1.5°	0.113	-0.345	0.003	-0.008	0.002	0.246
	Dirección 2°	0.127	-0.560	0.003	-0.013	0.0016	0.461
Y₁	Dirección 1	0.074	-0.074	1	-1	0	0
	Dirección 1°	0.080	-0.122	0.654	-1	0.006	0.048
	Dirección 1.5°	0.070	-0.164	0.426	-1	-0.004	0.090
	Dirección 2°	0.063	-0.216	0.292	-1	-0.011	0.142
Y₂	Dirección 1	0.209	0.144	0.003	0.002	0	0
	Dirección 1°	0.389	0.389	0.006	0.006	0.180	0.245
	Dirección 1.5°	0.636	0.631	0.010	0.010	0.427	0.487
	Dirección 2°	0.878	0.867	0.014	0.014	0.669	0.723

BRIDA 2							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
X ₁	Dirección 1	0.031	0.240	0.001	0.008	0	0
	Dirección 1°	0.032	0.241	0.001	0.008	0.001	0.001
	Dirección 1.5°	0.033	0.241	0.001	0.008	0.003	0.001
	Dirección 2°	0.034	0.160	0.001	0.005	0.003	-0.080
X ₂	Dirección 1	0.038	-0.014	0.001	0	0	0
	Dirección 1°	0.040	-0.015	0.001	0	0.002	0
	Dirección 1.5°	0.043	-0.015	0.001	0	0.005	0.001
	Dirección 2°	0.049	-0.016	0.001	0	0.012	0.001
Y ₁	Dirección 1	0.019	0.063	0.231	0.765	0	0
	Dirección 1°	0.019	0.063	0.224	0.762	0	0
	Dirección 1.5°	0.018	0.063	0.219	0.752	0	-0.001
	Dirección 2°	0.035	0.015	0.264	0.115	0	-0.048
Y ₂	Dirección 1	0	0	0	0		
	Dirección 1°	0	0	0	0		
	Dirección 1.5°	0	0	0	0		
	Dirección 2°	0	0	0	0		

Tabla 2.15 Resultados de medición de coordenadas XY.

En la comparación de los diámetros y las planitudes no se puede sacar una tendencia clara. Sin embargo, en el caso de las coordenadas, en especial en la brida 1, sí se observa una clara tendencia, al aumentar el recorrido y la corrección global conforme se aumenta el ángulo α . Lo cual es lógico, ya que conforme se incrementa este ángulo la posicionadora cada vez se encuentra en una situación más alejada respecto a las coordenadas de los agujeros.

2.6.2 Variación en el plano YZ

Se opera de la misma forma que antes al variar la dirección en el plano YZ, pero ahora la componente que no se modifica es la X.

Se calcula el ángulo β que forma la posicionadora con la dirección Y, en este caso en el plano YZ.

$$\beta = \tan^{-1} \frac{0.000092}{0.999965} = 5.2714 \cdot 10^{-3} \text{°}$$

Se varía el ángulo β hasta conseguir el mayor valor posible para el que se puede hacer la medición. Y en este caso se observa que no existe un límite, por lo que tomamos un valor mayor de 20° y unos intermedios de 5°, 10° y 15° para poder ver si hay alguna tendencia.

Seguidamente se muestran las tablas con los resultados de las mediciones de los diámetros (Tabla 2.16), las planitudes (Tabla 2.17) y las coordenadas XY (Tabla 2.18).

BRIDA 1							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Diámetro 1	Dirección 1	0.142	-0.767	0.019	-0.101	0	0
	Dirección 5°	0.132	-0.763	0.017	-0.101	-0.010	-0.004
	Dirección 10°	0.131	-0.759	0.017	-0.100	-0.011	-0.008
	Dirección 15°	0.129	-0.757	0.017	-0.100	-0.013	-0.010
	Dirección 20°	0.130	-0.754	0.017	-0.100	-0.012	-0.013
Diámetro 2	Dirección 1	0.108	-0.671	0.014	-0.090	0	0
	Dirección 5°	0.109	-0.652	0.015	-0.087	0.001	-0.019
	Dirección 10°	0.344	-0.675	0.046	-0.090	0.236	0.004
	Dirección 15°	0.119	-0.635	0.016	-0.085	0.011	-0.036
	Dirección 20°	0.104	-0.632	0.014	-0.085	-0.004	-0.039
Diámetro 3	Dirección 1	0.310	-0.906	0.040	-0.117	0	0
	Dirección 5°	0.289	-0.900	0.037	-0.116	-0.021	-0.006
	Dirección 10°	0.300	-0.893	0.039	-0.116	-0.010	-0.013
	Dirección 15°	0.295	-0.896	0.038	-0.116	-0.015	-0.010
	Dirección 20°	0.290	-0.894	0.038	-0.116	-0.020	-0.012
BRIDA 2							
		Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
						Recorrido	Corrección local
Diámetro 1	Dirección 1	0.039	-0.662	0.004	-0.072	0	0
	Dirección 5°	0.041	-0.650	0.004	-0.071	0.002	-0.012
	Dirección 10°	0.041	-0.637	0.004	-0.069	0.002	-0.025
	Dirección 15°	0.042	-0.627	0.004	-0.068	0.003	-0.035
	Dirección 20°	0.042	-0.617	0.004	-0.067	0.003	-0.045
Diámetro 2	Dirección 1	0.02	-5.053	0.0005	-0.136	0	0
	Dirección 5°	0.021	-5.030	0.001	-0.135	0.001	-0.023
	Dirección 10°	0.026	-5.007	0.001	-0.135	0.006	-0.046
	Dirección 15°	0.031	-4.986	0.001	-0.134	0.011	-0.067
	Dirección 20°	0.034	-4.966	0.001	-0.134	0.014	-0.087
Diámetro 3	Dirección 1	0.019	-0.733	0.002	-0.080	0	0
	Dirección 5°	0.036	-0.713	0.004	-0.078	0.017	-0.020
	Dirección 10°	0.037	-0.694	0.004	-0.076	0.018	-0.039
	Dirección 15°	0.033	-0.676	0.004	-0.074	0.014	-0.057
	Dirección 20°	0.034	-0.660	0.004	-0.073	0.015	-0.073

Tabla 2.16 Resultados medición e diámetros.

BRIDA 1						
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
					Recorrido	Corrección local
Dirección 1	0.073	-0.114	0.435	-0.679	0	0
Dirección 5°	0.064	-0.106	0.401	-0.664	-0.009	-0.008
Dirección 10°	0.054	-0.098	0.356	-0.646	-0.019	-0.016
Dirección 15°	0.052	-0.088	0.366	-0.620	-0.021	-0.026
Dirección 20°	0.049	-0.079	0.369	-0.594	-0.024	-0.035

2 Ensayos a realizar

BRIDA 2						
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia	
					Recorrido	Corrección local
Dirección 1	0.010	-0.037	0.114	-0.420	0	0
Dirección 5°	0.010	-0.034	0.118	-0.400	0	-0.003
Dirección 10°	0.010	-0.032	0.120	-0.386	0	-0.005
Dirección 15°	0	-0.029	0	-0.363	-0.01	-0.008
Dirección 20°	0.010	-0.026	0.130	-0.338	0	-0.011

Tabla 2.17 Resultados medición de planitudes.

BRIDA 1							
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia		
					Recorrido	Corrección local	
X ₁	Dirección 1	0.075	0.198	0.001	0.002	0	0
	Dirección 5°	0.097	0.170	0.001	0.002	0.022	-0.028
	Dirección 10°	0.098	0.148	0.001	0.002	0.023	-0.050
	Dirección 15°	0.085	0.123	0.001	0.001	0.010	-0.075
	Dirección 20°	0.093	0.100	0.001	0.001	0.018	-0.098
X ₂	Dirección 1	0.111	0.099	0.003	0.002	0	0
	Dirección 5°	0.088	0.061	0.002	0.001	-0.023	-0.038
	Dirección 10°	0.103	0.031	0.002	0.001	-0.008	-0.068
	Dirección 15°	0.093	0.003	0.002	0	-0.018	-0.096
	Dirección 20°	0.088	-0.024	0.002	-0.001	-0.023	-0.075
Y ₁	Dirección 1	0.074	-0.074	1	-1	0	0
	Dirección 5°	0.057	-0.098	0.585	-1.005	-0.017	0.024
	Dirección 10°	0.058	-0.116	0.501	-1.002	-0.016	0.042
	Dirección 15°	0.067	-0.131	0.513	-1.002	-0.007	0.057
	Dirección 20°	0.071	-0.146	0.487	-1.002	-0.003	0.072
Y ₂	Dirección 1	0.209	0.144	0.003	0.002	0	0
	Dirección 5°	0.192	0.131	0.003	0.002	-0.017	-0.013
	Dirección 10°	0.203	0.113	0.003	0.002	-0.006	-0.031
	Dirección 15°	0.227	0.098	0.004	0.002	0.018	-0.046
	Dirección 20°	0.223	0.083	0.004	0.001	0.014	-0.061
BRIDA 2							
	Recorrido	Corrección local	Recorrido relativo	Corrección local relativa	Tendencia		
					Recorrido	Corrección local	
X ₁	Dirección 1	0.031	0.240	0.001	0.008	0	0
	Dirección 5°	0.759	0.034	0.024	0.001	0.728	-0.207
	Dirección 10°	0.111	0.290	0.003	0.009	0.080	0.050
	Dirección 15°	0.126	0.292	0.004	0.009	0.095	0.052
	Dirección 20°	0.030	0.321	0.001	0.010	-0.002	0.081
X ₂	Dirección 1	0.038	-0.014	0.001	0	0	0
	Dirección 5°	0.024	0.025	0	0	-0.014	0.011
	Dirección 10°	0.461	0.017	0.007	0	0.423	0.003
	Dirección 15°	0.055	0.101	0.001	0	0.017	0.087
	Dirección 20°	0.078	0.137	0.001	0	0.040	0.123

Y ₁	Dirección 1	0.019	0.063	0.231	0.765	0	0
	Dirección 5°	0.356	0.031	3.099	0.270	0.337	-0.032
	Dirección 10°	0.164	0.051	1.734	0.539	0.145	-0.012
	Dirección 15°	0.064	0.070	0.849	0.928	0.045	0.007
	Dirección 20°	0.025	0.067	0.316	0.847	0.006	0.004
Y ₂	Dirección 1	0	0	0	0		
	Dirección 5°	0	0	0	0		
	Dirección 10°	0	0	0	0		
	Dirección 15°	0	0	0	0		
	Dirección 20°	0	0	0	0		

Tabla 2.18 Resultados medición de coordenadas XY.

Por norma general, se puede establecer que conforme aumenta el ángulo β , la corrección local disminuye en todos los parámetros, exceptuando en las coordenadas XY de la brida 2 en la que aumenta. Para el recorrido es difícil encontrar algún tipo de tendencia, ya que para cada parámetro siempre hay alguna medición que la rompe.

2.7 Diseño de un nuevo calibrador

A la hora de realizar la calibración del equipo, se presentan una serie de inconvenientes que provocan el plantearse el diseño de un nuevo calibrador:

- En el primer método se requiere hacer un cambio de patrón cuando se pasa de la calibración de una cámara a otra del equipo. Esto implica la consiguiente pérdida de tiempo por el propio cambio, y por la necesidad de tener que volver a ajustar la altura y orientación del calibrador. En este procedimiento también, cuando se procede a calibrar la cámara de avellanados, se disponen de pocos puntos.
- En el segundo método cuando se capta la imagen de puntos se dispone de muy pocos de ellos, y aunque son suficientes, siempre es mejor contar con una mayor cantidad.
- Problemas en el correcto enfoque de las almenas superiores e inferiores en ambos calibradores.
- Problemas de reflejos a la hora de captar los puntos del calibrador.

A continuación se muestra el calibrador empleado para la cámara de planitud en el primer método de calibración (Fig. 2.21) y el que se usa para la cámara de avellanados en el primer método y para ambas en el segundo (Fig. 2.22).

2 Ensayos a realizar

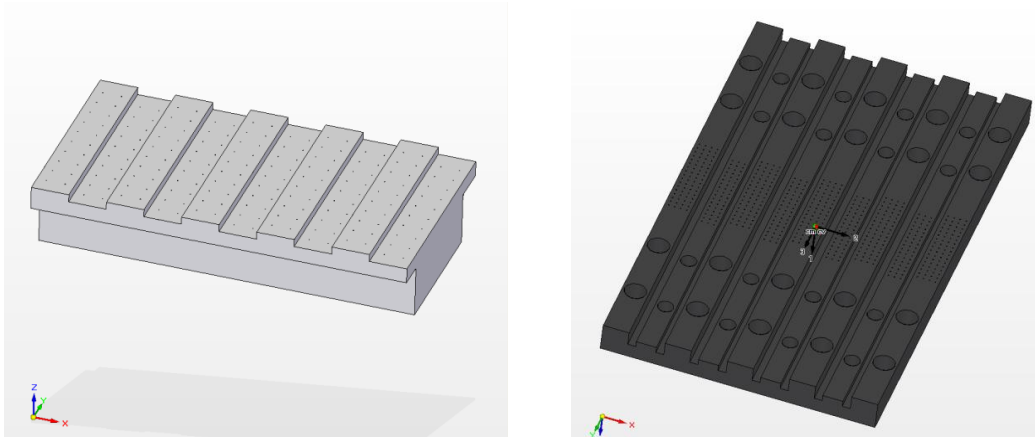


Fig. 2.21 y 2.22 Calibrador cámara de planitud y cámara de avellanados.

Los problemas relacionados con la escasez de puntos en las imágenes captadas por la cámara de avellanados, derivan de que en la amplitud del campo de visión de esta cámara, unos 22 mm, entran pocos puntos según la actual distribución de estos, por ello en el nuevo patrón se plantea el hacer una zona central de almenas de pequeña anchura con un número de puntos similar a los captados por la cámara de planitud en su calibración. En total esta zona tiene 21 mm, las almenas son de 3.5 mm y hay dos escalones que la delimitan de 1.75 mm (Fig. 2.23 y 2.24).

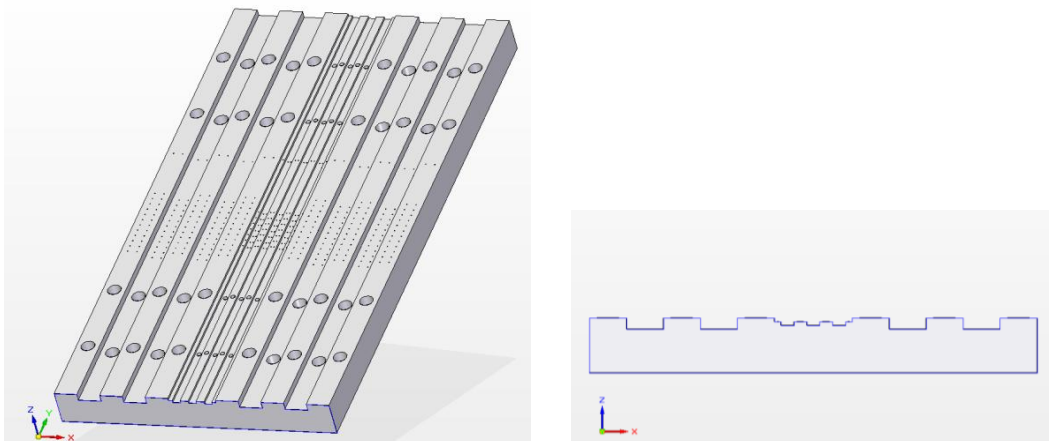


Fig. 2.23 y 2.24 Vista isométrica y frontal del calibrador nuevo.

El equipo siempre se centra en el calibrador según la cámara de avellanados, por ello las almenas de menor anchura están en la zona central. En el caso de la cámara de planitud, existen dos tipos de equipos, unos en los que también se encuentra centrada, y otros en los que está desplazada lateralmente 10 mm. Para no tener problemas a la hora de captar los puntos en ambas situaciones el nuevo patrón dispone de dos zonas laterales de almenas de mayor anchura, que las de la zona central, en las que para la anchura del campo de visión de esta cámara, unos 120 mm, se ha aumentado el número de puntos, reduciendo a la mitad las almenas, de 20 a 10 mm.

En el nuevo diseño del calibrador se tienen 12 filas de puntos en las almenas laterales y 7 filas en las centrales, además de una única fila de puntos, apartada de las anteriores, que se hizo con la idea de ser la imagen de puntos centrada que antes, en el primer método de calibración, se tomaba en la posición 0 de la posicionadora.

Otros de los problemas que se planteaba era la dificultad en el enfoque de las almenas superiores e inferiores en ambas cámaras, pero más acentuado en la de avellanados. Para ello se disminuye la cota de las almenas, pasando de $Z = \pm 2$ en ambos calibradores, a $Z = \pm 1.5$ en las almenas laterales y $Z = \pm 0.5$ en las de la zona central.

Debido a la disminución de la anchura en las almenas se requiere la realización de un estudio sobre la posible ocultación de algunos puntos (Fig. 2.25). De él se concluye que el caso más desfavorable es cuando la cámara de planitud está desplazada 10 mm (Fig. 2.26), ya que en este caso la altura de trabajo debería ser como mínimo de 60.6 mm para que no quedasen ocultos los puntos de esa línea, considerando un radio de 0.2 mm y una distancia de seguridad de 0.3 mm. De todas formas si hubiese ocultamiento tampoco sería demasiado problema, debido a que con la nueva anchura de las almenas ya se tendrían incluso más de los 12 puntos por línea de los que se captaban en el calibrador antiguo.

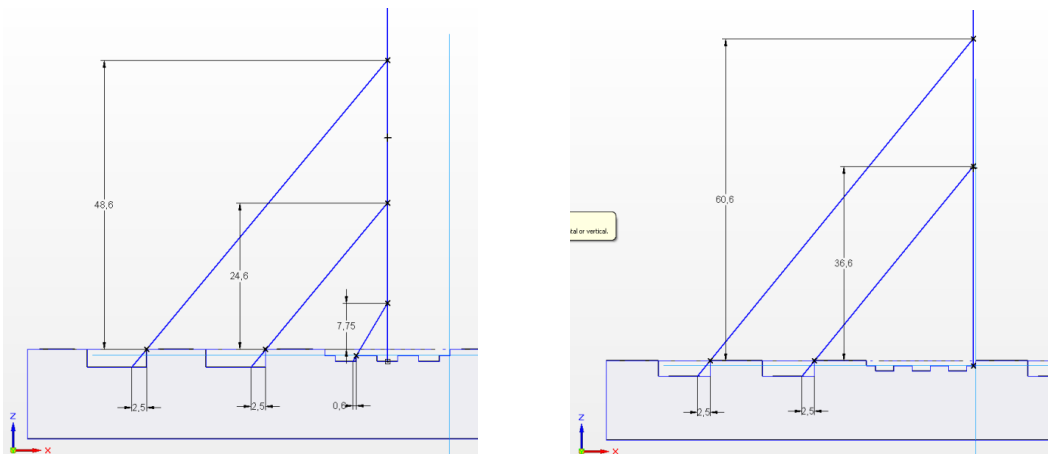


Fig. 2.25 y 2.26 Cámara de planitud centrada en el calibrador y desplazada 10 mm lateralmente.

Otro de los estudios necesarios es la comprobación de que no supone ningún problema la eliminación de las acanaladuras que antes había en el calibrador de la cámara de avellanados y que se empleaban para tener aristas vivas en las almenas de las cotas $Z = +2$ y $Z = -2$. Como con el nuevo diseño se pretende tener el mayor número de puntos dentro de la amplitud de campo de ambas cámaras, el introducir estas acanaladuras hubiese impedido conseguir este objetivo. De esta manera, en el segundo método de calibración, sólo se podrán reconstruir las direcciones en Y, a partir de los puntos de las aristas captados de las cotas $Z = -1.5$ y $Z = -0.5$, en lugar de cómo se hacía antes, a partir de las cotas $Z = +2$ y $Z = -2$. Esto no supondrá un problema ya que en el estudio que se hace sobre el error de posición de las direcciones reconstruidas a partir de los puntos de las aristas captados en $Z = +2$ y $Z = -2$, los errores son similares, pero los recorridos son mayores en las de $Z = +2$, que son las que se eliminan.

2 Ensayos a realizar

3 Conclusiones y trabajo futuro

De todos los ensayos expuestos a lo largo del proyecto se pueden sacar como conclusiones finales que la repetibilidad del equipo es buena, lo cual se contrasta viendo que las mediciones realizadas, exceptuando en las que se dan problemas de reflejos o acabado superficial, entran dentro de la incertidumbre calculada para los parámetros medidos y que es de 0.05 para la planitud y de 0.2 para los diámetros y su posición.

En cuanto a la sensibilidad del sistema de visión frente a la captura de imágenes variando la ganancia empleada, se puede concluir que no existe una tendencia clara en los valores de los recorridos resultantes, a diferencia de la corrección local en la que sí se ven cierta tendencia en los datos que se obtiene de la medida de los diámetros y la planitud. En este análisis también cabe destacar que aquellos resultados de la medición que se salen de lo normal se deben a reflejos que aparecen por la geometría de la pieza y se propone como posible solución una mejora del software o un mejor posicionamiento de la pieza, o como en otros casos el empleo de una ganancia menor.

De la comparación entre los dos métodos de calibración no se puede concluir que un procedimiento sea mejor que otro, ya que atendiendo únicamente a los valores de las mediciones hechas, sólo se observan diferencias apreciables, sin llegar a ser demasiado grandes, en las coordenadas XY. En el resto de los parámetros, sobretodo el de planitud, que es el que más interesa, las diferencias son mínimas. Por lo tanto la elección de un método u otro dependería de otros factores como las herramientas metrológicas que se tienen o del tiempo disponible.

A partir del estudio de sensibilidad hecho modificando el vector director de la posicionadora en los planos XY e YZ, se obtiene que la variación en el primero de los planos provoca un claro aumento del recorrido en los diámetros, ya que la posicionadora se va alejando de las coordenadas de los agujeros. En el caso del plano YZ no se observa ninguna tendencia en los recorridos de los valores resultantes al aumentar el ángulo de variación.

Por último, en lo que se refiere a las conclusiones que se sacan de este proyecto, en el rediseño del calibrador, lo que se persigue es unificar los dos de los que hasta ahora se disponían para cada una de las cámaras, en uno sólo para agilizar el procedimiento de calibración y para una vez vistos los problemas de enfoque y la escasez de puntos que había en la calibración de la cámara de avellanados, poder corregirlos.

En cuanto a la futura línea de trabajo a seguir en el desarrollo de este equipo de visión, se centra sobre todo en estandarizar el procedimiento de calibración con el nuevo calibrador. Además, en la fabricación de los puntos del calibrador se planteó la posibilidad de una vez hecho el punteado con una broca de 0.4 mm, rellenar los agujeros con algún tipo de material que los pueda rellenar y así se eviten problemas, como los que ahora se tenían de la calibración, de aparición de reflejos.

3 Conclusiones y trabajo futuro

Bibliografía

- [1] Sansoni, G.; Trebeschi, M.; Docchio, F. State-of-the-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors* 2009, 9, 568-601.
- [2] Bi, Z.M.; Wang, L. Advances in 3D Data Acquisition and Processing for Industrial Applications. *Robot. Comput. Integrated Manuf.* 2010, 26, 403-413.
- [3] Son, S.; Park, H.; Lee, K.H. Automated Laser Scanning System for Reverse Engineering and Inspection. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2002, 42, 889-897.
- [4] Milroy, M.J.; Weir, D.J.; Bradley, C.; Vickers, G.W. Reverse Engineering Employing a 3D Laser Scanner: A Case Study. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 1996, 12, 111-121.
- [5] Piegler, L.A.; Tiller, W. Parametrization for Surface Fitting in Reverse Engineering. *Comput.-Aided Des.* 2001, 33, 593-603.
- [6] Kim, S.W.; Choi, Y.B.; Oh, J.T. Reverse Engineering: High Speed Digitization of Freeform Surfaces by Phase-Shifting Grating Projection Moire Topography. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 1999, 39, 389-401.
- [7] Dalton, G. Reverse Engineering Using Laser Metrology. *Sensor Rev.* 1998, 18, 92-96.
- [8] Bradley, C.; Vickers, G.W.; Milroy, M. Reverse Engineering of Quadric Surfaces Employing Three-Dimensional Laser Scanning. *J. Eng. Manuf.* 1994, 208, 21-28.
- [9] Piegler, L.; Tiller, W. Parameterization for Surface Fitting in Reverse Engineering. *CAD* 2001, 33, 593-603.
- [10] Chan, V.H.; Samaan, M. Spherical/cylindrical Laser Scanner for Geometric Reverse Engineering. *Proc. SPIE* 2004, 5302, 33-40.
- [11] Onuh, S.; Bennett, N.; Baker, J. Rapid Prototyping: Practical Approach to Enabling Reverse Engineering. *SPIE* 2001, 4566, 145-151.
- [12] Lin, C.; Lay, Y.; Chen, P.; Jain, Y.; Chen, S. The Laser Displacement Measurement with Feedback Control in a Magnetic Levitation and Suspension System. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2000, 190, 25-34.
- [13] Santolaria, J.; Pastor, J.J.; Brosted, F.J.; Aguilar, J.J. A One-Step Intrinsic and Extrinsic Calibration Method for Laser Line Scanner Operation in Coordinate Measuring Machines. *Meas. Sci. Technol.* 2009, 20, doi:10.1088/0957-0233/20/4/045107.
- [14] Santolaria, J.; Guillomía, D.; Cajal, C.; Albajez, J.A.; Aguilar, J.J. Modelling and Calibration Technique of Laser Triangulation Sensors for Integration in Robot Arms and Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. *Sensors* 2009, 9, 7374-7399.
- [15] Che, C.G.; Ni, J. A Ball-Target-Based Extrinsic Calibration Technique for High-Accuracy 3-D Metrology using Off-the-Shelf Laser Stripe Sensors. *Precis. Eng.* 2002, 24, 210-219.

Bibliografía

- [16]Agin, G.J. Calibration and use of a Light Stripe Range Sensor Mounted on the Hand of a Robot. IEEE ICRA 1985, 2, 680-685.
- [17]Theodoracatos, V.E.; Calkins, D.E. A 3-D Vision System Model for Automatic Object Surface Sensing. Int. J. Comput. Vis. 1993, 11, 75-99.
- [18]Xie, Z.; Zhang, C.; Zhang, Q.; Zhang, G. Modeling and Verification of a Five-Axis Laser Scanning System. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2005, 26, 391-398.
- [19]Xie, Z.; Zhang, C.; Zhang, Q. A Simplified Method for the Extrinsic Calibration of Structured-Light Sensors using a Single-Ball Target. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2004, 44, 1197-1203.
- [20]Kjellander, J.A.P.; Rahayem, M. Planar Segmentation of Data from a Laser Profile Scanner Mounted on an Industrial Robot. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2009, 45, 181-190.
- [21]Larsson, S.; Kjellander, J.A.P. Path Planning for Laser Scanning with an Industrial Robot. Robot. Auton. Systems 2008, 56, 615-624.
- [22]Larsson, S.; Kjellander, J.A.P. Motion Control and Data Capturing for Laser Scanning with an Industrial Robot. Robot. Auton. Systems 2006, 54, 453-460.
- [23]Li, J.; Zhu, J.; Guo, Y.; Lin, X.; Duan, K.; Wang, Y.; Tang, Q. Calibration of a Portable Laser 3-D Scanner used by a Robot and its use in Measurement. Opt. Eng. 2008, 47, 017202-1-7.
- [24]Li, J.; Guo, Y.; Zhu, J.; Lin, X.; Xin, Y.; Duan, K.; Tang, Q. Large Depth-of-View Portable Three-Dimensional Laser Scanner and its Segmental Calibration for Robot Vision. Opt. Laser. Eng. 2007, 45, 1077-1087.
- [25]Hartley, R.; Zisserman, A. Multiple View Geometry in Computer Vision; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2000.
- [26]Santolaria, J.; Aguilar, J.J.; Brau, A.; Brosted, F.J. Performance Evaluation of Probing Systems in Data Capture for Kinematic Parameter Identification and Verification of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. In Proceedings of XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology; 6-11 September 2009, Lisbon, Portugal, 2009; pp. 1846-1851.
- [27]Abdel-Aziz, Y.I.; Karara, H.M. Direct Linear Transformation into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry. In Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry; Falls Church, Virginia, VA, USA, 1971; pp. 1-18.
- [28]UNE-EN. ISO 9283:2003 Robots Manipuladores Industriales. Criterios De Análisis De Prestaciones y Métodos De Ensayos Relacionados. AENOR: Madrid, Spain, 2003.
- [29]BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organisation for Standardisation: Geneva, Switzerland, 2008.

Anexos

Anexo I. Introducción a los sistemas de medición sin contacto

Evolución de los sistemas de medición tridimensional

En los últimos años la demanda de sensores ópticos tridimensionales ha tenido un crecimiento incesante, permitiendo el desarrollo de instrumentos comercialmente disponibles en la actualidad. Durante la década de 1970 y 1980 su desarrollo estuvo principalmente circunscrito a los laboratorios de investigación y tenía por objeto el diseño de nuevas técnicas de explotación en la utilización de los rayos de luz (tanto coherentes como incoherentes) en lugar de las sondas por contacto, en vista de la gran cantidad de aplicaciones potenciales para la industria de fabricación mecánica, como el control de calidad y la medición. Se propusieron nuevos principios de medición y se desarrollaron y caracterizaron prototipos para probar sus prestaciones.

En paralelo, se ha estado realizando un esfuerzo considerable encaminado a la miniaturización e integración de fuentes de luz ópticas, detectores y componentes, en el equipamiento electrónico y en la estructura mecánica de los sensores. En la última década, la disponibilidad de técnicas y componentes ha provisto a la producción de un amplio espectro de dispositivos comercialmente disponibles, con resolución de medida desde unos pocos nanómetros a fracciones del metro, y rangos desde micrómetros a unos pocos kilómetros. Más recientemente, la tendencia ha estado dirigida a la producción de dispositivos de coste decreciente con una creciente robustez y portabilidad.

Los problemas de la manipulación, edición y almacenaje de los datos medidos, fueron abordados a nivel de software mediante el desarrollo de un conjunto de potentes programas que importan y manipulan los ficheros de datos, dándoles salida en formatos estandarizados y ampliamente difundidos, tales como los formatos DXF e IGS para aplicaciones CAD, el formato STL para máquinas de prototipado rápido y el VRML para visualización.

Como resultado, el interés en el uso de sensores de imagen 3D ha aumentado. En la industria mecánica y de fabricación, el control de calidad de las superficies es a menudo llevado a cabo sin contacto, en base a técnicas ópticas. Las sondas ópticas y sondas por contacto, son utilizadas a menudo en combinación, debido a que constituyen puntos críticos tanto la precisión de las medidas, como la eficiencia en el proceso. Esto último es tan significativo, que una de las exigencias de partida típica en el diseño de Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC), es que se permita tanto el montaje de sensores ópticos de medición 3D, como los sensores de contacto.

Adicionalmente, los sensores de imagen 3D son de interés en combinación con sensores de visión de dos dimensiones (2D), especialmente en aplicaciones con robots, para chequeo y eliminación de colisiones, y para solucionar ciertos problemas de ensamblado. Como resultado, aquellas compañías que tradicionalmente se habían centrado en el desarrollo de sistemas de visión 2D, están ahora ampliando su abanico de producto mediante la introducción de sensores 3D.

Descripción de las técnicas de medición sin contacto

Los sensores de imagen tridimensional operan generalmente mediante la proyección (de forma activa) o adquisición (en la forma pasiva) de energía electromagnética sobre o desde un objeto (respectivamente) y mediante la captura de la energía transmitida o reflejada. El ejemplo más importante de palpado por transmisión es la tomografía industrial computerizada (CT), la cual usa rayos-X de alta energía y mide la radiación transmitida a través del objeto.

Los sensores de reflexión para la adquisición de superficies pueden ser subdivididos en sensores ópticos o no-ópticos. Los sensores no ópticos incluyen sensores acústicos (ultrasónicos, sísmicos), electromagnéticos (infrarrojos, ultravioletas, radar de micro-ondas, etc) y otros. Estas técnicas miden normalmente distancias al objeto, mediante la medición del tiempo requerido para que un pulso (de energía sónica o de microonda) rebote y vuelva desde un objeto al sensor.

En los sensores ópticos de reflexión, la luz transporta la información correspondiente a la medida. Hay una notable variedad de técnicas ópticas 3D y su clasificación no es única. En la Tabla Anexo I.1 se muestran las más utilizadas.

	Triangulación	Tiempo de retardo (<i>time delay</i>)	Imágenes Monoculares	Pasivo	Activo	Directo	Indirecto
Trianguladores Láser	X				X	X	
Luz estructurada	X				X	X	
Estéreo Visión	X			X		X	
Fotogrametría	X			X		X	
Tiempo de vuelo		X			X	X	
Interferometría		X			X	X	
Contornos por franjas de Moiré			X		X		X

Tabla Anexo I.1 Clasificación de técnicas de imagen tridimensional.

Las técnicas 3D están basadas en triangulación óptica, en el tiempo de retardo (*time delay*), y en el uso de imágenes monoculares. Pueden ser clasificadas en métodos activos o pasivos. En los métodos pasivos, son utilizadas la reflectividad del objeto y la propia iluminación de la escena para obtener la información de la forma, por lo que no es necesario un dispositivo

activo. En la forma activa, son utilizadas fuentes de luz apropiadas, como un vector interno de información. También es posible hacer una distinción entre mediciones directas e indirectas. De las técnicas directas resultan un rango de datos, por ejemplo, un conjunto de distancias entre una superficie desconocida y el rango del sensor. Las medidas indirectas son inferidas a partir de imágenes monoculares y a partir del conocimiento previo de las propiedades del objeto.

Fortalezas y debilidades de las técnicas de medición sin contacto

Las principales características de las técnicas ópticas más frecuentes se resumen en la Tabla Anexo I.2.

Tecnología	Fortalezas	Debilidades
Trianguladores laser	<p>Relativa Simplicidad.</p> <p>Prestaciones generalmente independientes de la luz ambiente.</p> <p>Alta tasa de adquisición de datos.</p>	<p>Restricciones de seguridad asociadas con el uso de la fuente láser.</p> <p>Volumen de medida y rango limitado.</p> <p>Perdida de datos debidos a ocultaciones.</p>
Luz estructurada	<p>Alta tasa de adquisición de datos.</p> <p>Volumen de medida intermedio.</p> <p>Prestaciones generalmente dependientes de la luz ambiente.</p>	<p>Restricciones de seguridad, si hay láser.</p> <p>Complejidad computacional media.</p> <p>Perdida de datos correspondientes a ocultaciones y sombras.</p> <p>Coste.</p>
Estéreo visión	<p>Sencillo y barato.</p> <p>Alta precisión en objetivos o targets bien definidos.</p>	<p>Requerimientos de computación.</p> <p>Poca densidad de datos.</p> <p>Limitado a escenas bien definidas.</p> <p>Baja tasa de adquisición de datos.</p>
Fotogrametría	<p>Sencillo y barato.</p> <p>Alta precisión en objetivos o targets bien definidos.</p>	<p>Requerimientos de computación.</p> <p>Poca densidad de datos.</p> <p>Limitado a escenas bien definidas.</p> <p>Baja tasa de adquisición de datos.</p>

Tiempo de vuelo	Medio-largo rango de medida. Buena tasa en adquirir datos. Prestaciones generalmente independientes de la luz ambiente.	Costoso. La precisión es inferior a la triangulación en rangos cercanos.
Interferometría	Precisión submicrométrica en micro-rangos.	Medición limitada a superficies casi-planas. Coste. Aplicación limitada en entorno industrial.
Contornos por franjas de Moiré	Sencillo y de bajo coste. Rangos cortos.	Limitado a la medición de superficies suaves.

Tabla Anexo I.2 Fortalezas y debilidades de las principales técnicas de imagen tridimensional.

Los comentarios de la tabla son de carácter general, por lo que pueden existir excepciones en diseños específicos. Las fortalezas y debilidades dependen en gran medida de la aplicación. Las técnicas de medición sin contacto tienen una cualidad común de importante consideración, son idóneas en aquellas aplicaciones de medición de objetos frágiles o deformables, o en entornos hostiles en líneas de fabricación (suciedad, etc.). El tiempo de adquisición es otro aspecto importante, especialmente cuando el coste global de todo el proceso de medida aconseja una reducción de tiempo del operador, incluso a expensas de una posible disminución en la calidad de los datos obtenidos. Por otro lado, en los sistemas de visión activos que usan rayo láser para iluminar al objeto, se han de tener en cuenta inexcusablemente consideraciones de seguridad, así como los posibles efectos de interacción con la superficie.

La rápida evolución de las CPUs y de las memorias, ha permitido en los últimos años dotar de prestaciones que eran, de lejos, imposibles de alcanzar antes (en paralelo con una disminución en su coste). Por estas razones, las técnicas que requieren de una fuerte exigencia de computación (por ejemplo, la visión estero pasiva) son ahora más factibles y eficientes.

La selección de qué tipo de sensor debe ser utilizado para resolver un determinado problema de medición, es una tarea relativamente compleja en la que se debe considerar, el tiempo de medición, el presupuesto disponible y la calidad esperada en la medición. Además, los sensores de imagen 3D son susceptibles a la posible pérdida de datos o a la adquisición de datos de mala calidad. Las razones están relacionadas con la geometría óptica del sistema, con el tipo de dispositivo óptico de adquisición y/o proyector, con la técnica empleada y con las características de los objetos a medir. Las prestaciones del sensor pueden depender de las dimensiones, forma, textura y acabado superficial, temperatura y accesibilidad al objeto. Factores relevantes que influyen la elección son también la robustez, la portabilidad, la adaptabilidad del sensor al problema, la facilidad en la manipulación de los datos y la simplicidad en el uso del sensor.

Aplicaciones de las técnicas de medición sin contacto

Un amplio abanico de operaciones es posible hoy en día gracias a la disponibilidad de los sensores desarrollados, de los prototipos de laboratorio y de los apropiados entornos de software, para la obtención de medidas.

Aplicaciones industriales

Los típicos problemas de medición en el campo industrial están relacionados con el control de superficies mecanizadas, para la medición cuantitativa de su rugosidad, ondulación y forma, con la medición dimensional y el control de calidad de productos y con la ingeniería inversa de formas complejas.

Control de calidad de superficies

Las técnicas y sensores en microperfilometría son los más adecuados para llevar a cabo los procesos de medición en el campo del control de superficies. En estas aplicaciones, el objetivo consiste en obtener la representación cuantitativa 3D de las superficies en intervalos de medida que van desde unos pocos micrómetros hasta decenas de milímetros, con resoluciones que van desde unas pocas decenas de nanómetros hasta las decenas de micrómetros. Una aplicación típica es la medición de rugosidad y ondulación (medición de la topología 3D) de superficies mecanizadas, en los que se emplean interferómetros y sensores por triangulación.

Medición dimensional y control de calidad

La medición dimensional de superficies complejas es un campo de aplicación realmente amplio, dado que abarca la adquisición tridimensional de formas en un intervalo que va de las decenas de milímetros hasta los pocos metros y con resoluciones de medida que van desde cien micrómetros hasta unos pocos centímetros. La elección del sensor depende de la forma y dimensión del objeto, de las condiciones del entorno donde se vaya a realizar la medición, del tiempo disponible para efectuarla y, por supuesto, de los requisitos de medición.

Ingeniería Inversa de superficies con forma libre

La ingeniería inversa es el proceso de creación de un conjunto de especificaciones y planos a partir de la inspección de un objeto directamente. El modelo geométrico se obtiene a partir de los datos capturados por un sensor. En el caso de objetos con geometría regular, es habitual generarlos analíticamente. Para superficies de forma libre que no presentan propiedades geométricas regulares, es necesario realizar su medición y crear un modelo 3D para la representación de sus características.

La actual tecnología industrial para la medición precisa de objetos 3D, utiliza el escaneo por contacto mediante la utilización de sondas sobre Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs). Esta técnica es precisa y ampliamente utilizada para la creación de un modelo de la superficie. Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, la primera desventaja de

esta estrategia es el tiempo empleado. Por otro lado, el uso de sensores ópticos 3D permite recoger una gran cantidad de datos dimensionales en un razonable corto espacio de tiempo. Como contraprestación, las características metrológicas de los sensores sin contacto son normalmente más bajas que las que proporciona la MMC. Por consiguiente, es conveniente la utilización combinada de sondas mecánicas y ópticas como estrategia para obtener una alta calidad en la descripción del CAD en un tiempo significativamente inferior.

Conservación del patrimonio cultural

En los últimos años el uso de sensores de imagen 3D para la adquisición sin contacto de elementos del patrimonio cultural, ha ganado una atención creciente por parte de museos y para los especialistas en arqueología. Un cierto número de investigadores han trabajado en el modelado de estatuas de especial interés, en la documentación 3D y virtualización de lugares arqueológicos, en la clasificación automatizada de piezas y en aplicaciones de visualización. La cadena de medición y elaboración es aún un proceso de ingeniería inversa, similar al expuesto en la industria. Incluso los objetivos son los mismos, adquisición, modelizado y visualización son necesarios en el ámbito cultural, con el fin de controlar los hallazgos arqueológicos. Adicionalmente, la disponibilidad de modelos 3D abre la posibilidad de la reproducción virtual, para propósitos didácticos y de divulgación. Copias físicas de los originales son realizadas usando técnicas de prototipado rápido.

Medicina

Ciertos sensores ópticos tridimensionales han sido diseñados específicamente para la digitalización de cuerpos humanos (parcial o completamente) y están siendo cada vez más extendidos. Proporcionan datos de relativa alta resolución de las superficies para construir modelos digitales precisos del cuerpo. Los datos tridimensionales son utilizados en el diseño de prótesis, en cirugía, cirugía plástica, en ortopedia, ortodoncia protésica y en dermatología. Una interesante actividad de investigación se centra en la construcción de modelos digitales dinámicos 3D para el estudio de la postura y de la marcha, y para aplicaciones de cirugía a tiempo real. El uso de estos sensores ha sido propuesto en medicina, incluso en combinación con datos radiológicos, para la documentación completa de heridas.

Otro ámbito de actividad está relacionado con el análisis de tejidos blandos y huesos. En este ámbito se estudia la viabilidad de la utilización de sensores de imágenes 3D a fin de evaluar un método único, preciso y fiable en la investigación, proporcionando información precisa sobre el origen de las lesiones. De esta forma, el modelo 3D obtenido y almacenado en una base de datos, constituye una información cuantificable y objetiva, que puede ser consultada y compartida para su posterior análisis por diferentes personas. Para ello, la selección del sensor debe ser adecuado a la aplicación, en términos de calidad de las medidas y en la velocidad de adquisición de los datos.

Conclusiones

La presentación de los sistemas de adquisición 3D mencionados, ofrece ciertas conclusiones. La primera concierne al coste del equipo: la mayoría de los equipos disponibles son relativamente caros, y esto representa un obstáculo para una más amplia distribución de los sistemas de medición óptica 3D, tanto en la industria como en el resto de ámbitos. Sin embargo, se observa una tendencia hacia la disminución en los costes, principalmente debido al incremento del número de fabricantes de equipos y componentes para integradores, y de ahí la creciente competencia y la rápida evolución en la tecnología que integran estos sistemas, que ofrece componentes electrónicos y ópticos a cada vez más bajo coste.

La segunda conclusión hace referencia al hecho de que, para la mayoría de las aplicaciones de relevancia en industria, el uso de la adquisición 3D no es una tarea trivial. Los sistemas son aún bastante complejos en su uso y es necesario personal con adiestramiento y cierta experiencia para manejarlos. En este punto, de nuevo, existe una tendencia progresiva hacia una simplificación y automatización en los equipos y sistemas de adquisición (especialmente en el ámbito de la industria y paulatinamente en otros ámbitos), para conseguir que el uso sea asequible para los operarios.

Una tercera conclusión, la cual es crucial desde el punto de vista metrológico, es la necesidad de normas que garanticen la trazabilidad de las mediciones 3D a partir de estándares reconocidos y extensamente difundidos. Dado que la adquisición 3D es relativamente nueva, estas normas sí que están desarrolladas pero todavía no están instauradas a nivel industrial.

Por último también se debe comentar que, en algunos casos de complejidad metrológica, los sistemas ópticos 3D no representan la solución al problema cuando son usados exclusivamente, el uso simultáneo de sistemas de contacto y sin contacto puede ser necesario para dar una completa solución metrológica. Sin embargo, es patente que las aplicaciones de adquisición 3D se están incrementando notablemente, constituyendo esta tecnología en la actualidad una parte fundamental en automoción, robótica, prototipado rápido y modelado 3D.

Anexo II. Estudio en detalle del equipo de medición sin contacto

Descripción del sistema de visión

El equipo de medición se muestra en la Fig. Anexo II.1 y consta de dos cámaras CCD (a) con su óptica (b), filtro (c) y el sistema de iluminación láser (d), como la mayoría de los sistemas de visión por triangulación láser. Además incluye una estación lineal de traslación (ELT) de alta precisión (e) y su control (f). Sobre el carro de la ELT están montados los componentes en el soporte (g).

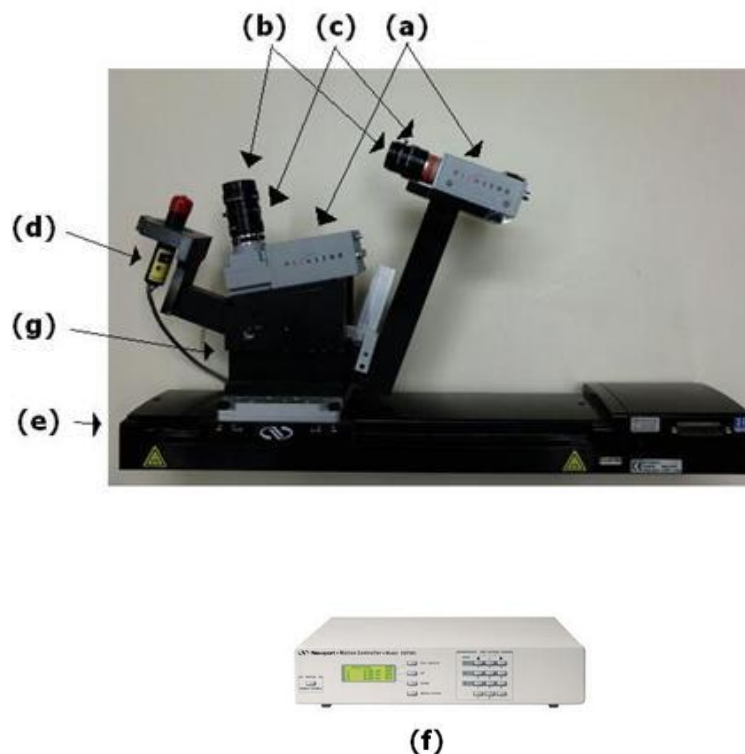


Fig. Anexo II.1 Componentes del sistema de visión.

Se dispone de dos modelos de cámaras cuya única diferencia es la disposición de la lente. En una el objetivo está colocado de manera horizontal al cuerpo de la cámara y en el otro está a 90° , en cuanto al resto de características, son similares para ambos.

Tienen una resolución de 1280×1024 píxeles, que determina la cantidad de puntos a obtener de cada imagen y el tamaño de píxel es de $6.7 \mu\text{m}$. Esos 1280 puntos se reparten por los 130 mm que tiene el CMx. Este factor es función de la lente y de su distancia de trabajo. La resolución a lo largo del eje X es de 0.1 mm/píxel .

Anexo II

Las características espectrales del sensor de la cámara se escogieron para obtener un buen contraste entre la línea láser de las imágenes y el fondo. La ganancia y el tiempo de exposición de la cámara se controlan tanto manual como desde software.

La cámara escogida permite seleccionar la región de la imagen que interesa capturar (ROI), disminuyendo considerablemente la cantidad de información a transmitir y analizar. En función del tamaño de esta región y del tiempo de exposición, la velocidad de captura llega a los 106 fps.

La ROI seleccionada es de 1280 x 96 px, lo que permite capturar a una velocidad de 106 fps con un tiempo de exposición de 5 ms. La transmisión de los datos así tomados necesita aproximadamente 13 Mb/s, siendo el ancho de banda de 400 Mb/s, correspondiente al protocolo empleado para su conexión.

No es necesaria ninguna tarjeta específica de captura (utiliza una tarjeta FireWire convencional de bajo coste).

El láser incorporado es de clase II ($>1\text{mW}$), la línea proyectada tiene un perfil no Gaussiano para que la línea brille de manera uniforme a lo largo de toda la superficie, evitando la formación de picos de intensidad o zonas de superficie oscuras que no se podrían digitalizar. La óptica utilizada para generar el plano abre 60° , con lo que, a la distancia de trabajo del láser, éste coge todo el campo de medida.

El filtro interferencial centrado a la longitud de onda del láser permite reducir o eliminar las fuentes de luz no deseadas del entorno. La colocación del filtro entre la cámara y la lente junto con las características espectrales del sensor CCD seleccionado consiguen un buen contraste entre los píxeles de la línea láser y los del fondo.

Se escogió una óptica de alta resolución para ser utilizada con un CCD de 1280x1024 píxeles, de modo que pueda resolver la anchura de la línea incidente, del orden de 0.1 mm. Es manual sin zoom, ya que la distancia entre la superficie del intercambiador y la cámara es prácticamente constante.

Se buscó el compromiso entre una óptica de distancia focal grande (en este caso, 12 mm) para evitar la distorsión de la imagen y una óptica con un ángulo de apertura que permita captar todo el campo de trabajo.

Estos dos aspectos son fundamentales para reducir la distorsión de la imagen manteniendo una distancia de trabajo pequeña.

La ELT cuenta con una precisión de localización de $5\ \mu\text{m}$ y con una resolución de $0.5\ \mu\text{m}$, Estas propiedades son fundamentales para el sistema, ya que el cálculo de la coordenada Y_w de los puntos reconstruidos se basa en la lectura que toma el programa procedente del control y de su sincronía con la imagen capturada. Si el sistema de posicionado no es repetible, el sistema de medición tampoco lo será. La repetibilidad unidireccional del sistema es de $1,5\ \mu\text{m}$.

La velocidad de la ELT se configura a 20 mm/s para recorrer los 250 mm de carrera que tiene. Al sobredimensionar el recorrido nos aseguramos que hay espacio suficiente antes y después del intercambiador para acelerar y decelerar.

Los errores debidos a la carga sobre el carro y a su excentricidad no son significativos y no afectan a la precisión del sistema.

Los componentes del sistema de visión se unen al carro mediante un soporte, el cual se diseñó para registrar la posición de cada uno de los componentes. Para ello en cada pieza se practicaron ranuras y cajeras que fijan las posiciones relativas, mientras que la unión entre las piezas se realiza con tornillos. El caso del láser es una excepción, ya que está sujeto con una brida.

El material utilizado para el soporte es aluminio y se pinta de negro para evitar la posible aparición de reflejos.

Funcionamiento del sistema

En la primera etapa, el carro desplaza el sistema de visión, que barre la superficie a medir, capturando las imágenes de la incidencia del láser sobre la pieza (Fig. Anexo II.2).

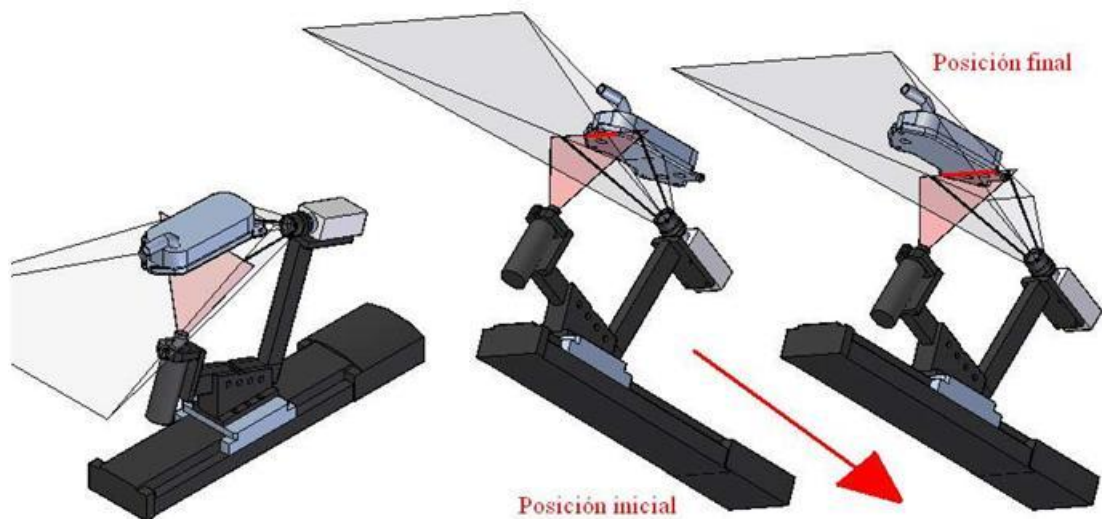


Fig. Anexo II.2. Barrido de la superficie de la pieza con el sistema de medición.

La densidad de puntos a obtener en la digitalización depende del tamaño del CCD de la cámara, de su velocidad de captura y de la velocidad de desplazamiento de la E.L.T.

En la segunda etapa, de cada imagen capturada se obtiene un punto digitalizado por cada columna con uno o varios píxeles blancos. Ese punto, una vez reconstruido, forma parte de la nube de puntos resultante de la digitalización de la superficie. Cuanto mayor sea el número de píxeles del CCD de la cámara más puntos de la superficie tendrá la nube (siempre que el campo de medida en X esté bien ajustado).

En la tercera etapa, una vez reconstruida la nube de puntos, se opera con ella hasta poder compararla con una plantilla (Fig. Anexo II.3 y Anexo II.4) de cara a diferenciar los puntos que no pertenecen a la superficie sujeta a control. Todo ello codificado en las mismas según un código de niveles de gris.

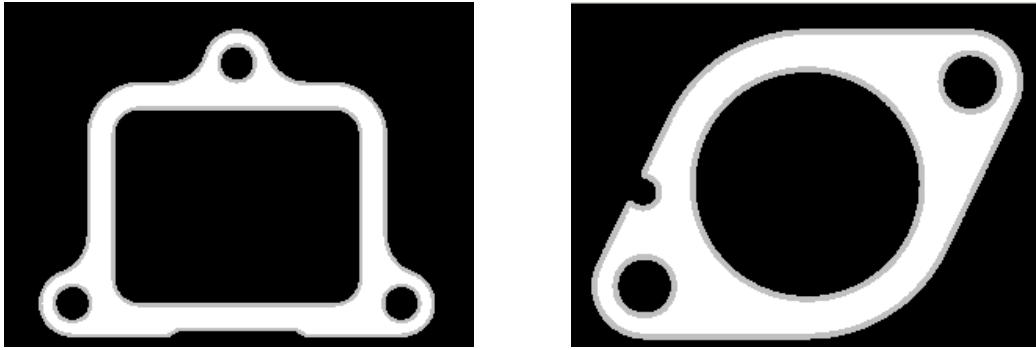


Fig. Anexo II.3 y Anexo II.4. Plantillas para filtrar los puntos de la superficie.

Para finalizar la tercera etapa y obtener los resultados de la medición, se opera con las coordenadas de los puntos que quedan dentro de las zonas de las plantillas conociendo así si cumplen o no las restricciones impuestas en cada zona, además de analizar las regiones, marcadas también en la plantilla, con el fin de detectar posibles defectos superficiales.

De las zonas que se quieren analizar su posición, se obtendrán unas matrices de localización de los elementos a referenciar, con las cuales se calculará la posición de dichos elementos respecto a un sistema de referencia.

Para la obtención de estos resultados, se emplean los siguientes métodos de cálculo: las circunferencias de los agujeros se obtienen por Mínimos Cuadrados a partir de los puntos reconstruidos de su contorno, la planitud de la superficie se estudia calculando el plano, por Mínimos Cuadrados, que mejor ajusta los puntos seleccionados con la plantilla.

El programa muestra los resultados de planitud gráficamente (Fig. Anexo II.5 y Anexo II.6), mediante una escala de colores que indica, para cada zona, los puntos que se salen de la tolerancia y numéricamente, en las casillas inferiores se muestran los valores máximos.

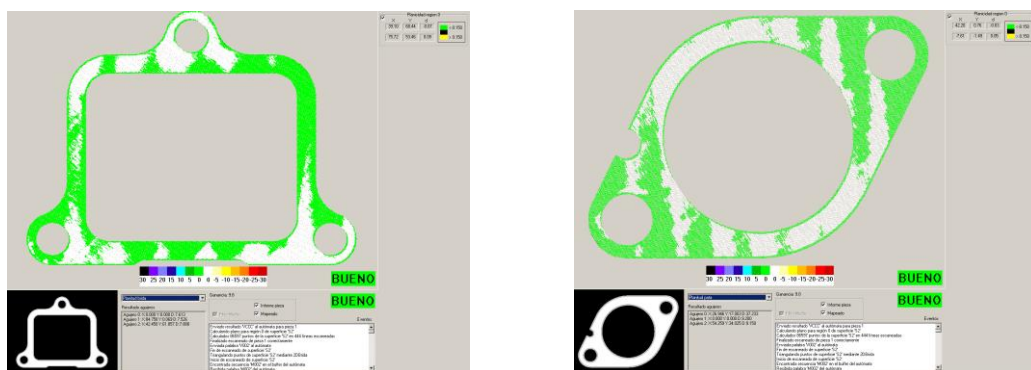


Fig. Anexo II.5 y Anexo II.6 Representación gráfica de los resultados de la medición.

Anexo III. Estandarización del primer método de calibración

Cámara de planitud

Para la calibración de la cámara de planitud se captan unas imágenes, se tratan y se procesan mediante un programa de software.

Captura de imágenes

Pasos a seguir:

1. Posicionar el calibrador en la estructura amarrándolo con el sargento (Fig. Anexo III.1).



Fig. Anexo III.1 Montaje requerido para la calibración de la cámara de planitud.

2. Encender el laser (5 ó 6 V).

IMPORTANTE: cuando no se emplee, por seguridad, la clavija del laser permanecerá desconectada.

3. Centrar el laser en la imagen (para ello es necesario subir o bajar un poco el patrón) (Fig. Anexo III.2).

- Abrir el programa de captura de imágenes (PixeLINK Capture OEM) y en la pestaña Basic Controls:
 - Seleccionar el código de la cámara, en este caso la de planitud, que estamos empleando.
 - PLAY (para ver con la cámara)

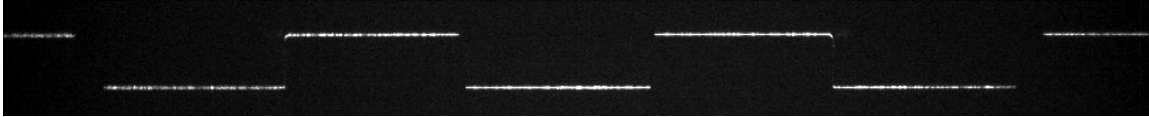


Fig. Anexo III.2 Imagen del laser centrado.

4. Apagar el laser.
5. Alineamiento del calibrador y la posicionadora:
 - Encender MMC y el programa Metrolog XG.
 - Seleccionar un palpador (cualquiera).
 - Hacer un sistema de coordenadas palpando un punto del patrón. Para ello en Metrolog XG: ALINEAMIENTO --> UN PUNTO --> palpar un punto en la cara superior del patrón --> pulsar OK.
 - Palpar un punto en las 4 esquinas del patrón y ver que la diferencia entre ellos en el eje Z es inferior a 1 décima de milímetro. En caso de que no se cumpla ir ajustando la altura del patrón manualmente hasta conseguirlo.
6. Encender la posicionadora y abrir su programa de control (ESP-Util):
 - GPIB --> Open Port --> Reset
 - HOME --> start (Home switch and index)
 - JOG --> Mode Indexed --> 1 mm (X index distance)
 - POSITION (aparece un indicador digital que nos dice la posición en la que está la posicionadora)

En JOG pulsando en los cursores +X y -X desplazamos la posicionadora hacia un lado u otro.
7. Encender el foco (colocarlo encima de la cámara de avellanados) y conectar la clavija del laser.
8. Centrar bien la posicionadora para la correcta captura de los puntos (Fig. Anexo III.3 y Fig. Anexo III.4) y ajustar en el PixelLINK el valor de la ganancia si fuese necesario.
 - Posicionadora en 0:

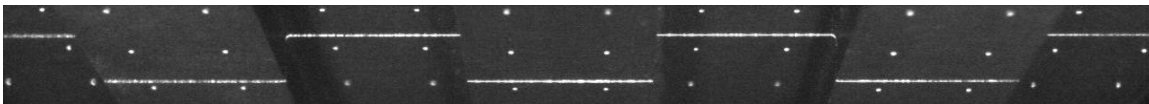


Fig. Anexo III.3 Imagen de la posicionadora centrada en 0.

- Posicionadora en +17:



Fig. Anexo III.4 Imagen de la posicionadora centrada en +17.

9. Apagar el laser.
10. Llevar la posicionadora a la posición +18 y luego a la +17 (nos pasamos para ir luego en el mismo sentido y evitar el posible juego).
11. Seleccionar en PixelINK la pestaña Image Capture.
12. Desplazar la posicionadora a la posición que interesa, dar nombre a la imagen, guardar y capturar imagen (botón Capture).

REPETIR PARA CADA POSICIÓN

A continuación se indican las posiciones en las que hay que capturar las imágenes y la forma de numerarlas:

- Posición = 17 --> Imagen 00
- Posición = 15 --> Imagen 01
- Posición = 13 --> Imagen 02
- Posición = 11 --> Imagen 03
- Posición = 9 --> Imagen 04
- Posición = 7 --> Imagen 05
- Posición = 5 --> Imagen 06
- Posición = 4 --> Imagen 07
- Posición = 3 --> Imagen 08
- Posición = 2 --> Imagen 09
- Posición = 1 --> Imagen 10
- Posición = 0 --> Imagen 11
- Posición = 0 --> Imagen 11+laser (encendemos el laser)

IMPORTANTE: AUMENTAR LA GANANCIA PARA LA CAPTURA DEL LASER SI FUESE NECESARIO

- Posición = 0 --> Imagen laser (apagamos el foco)
- Posición = -1 --> Imagen 12 (apagamos el laser, encendemos el foco y volvemos a tomar las imágenes como al principio)
- Posición = -2 --> Imagen 13
- Posición = -3 --> Imagen 14
- Posición = -4 --> Imagen 15
- Posición = -5 --> Imagen 16
- Posición = -7 --> Imagen 17
- Posición = -9 --> Imagen 18
- Posición = -11 --> Imagen 19

Posición =-13 --> Imagen 20

Posición =-15 --> Imagen 21

Posición =-17 --> Imagen 22

Tratamiento de imágenes

13. Empleando el PAINT dar la vuelta a las imágenes (IMAGE --> FLIP/ROTATE --> FLIP VERTICAL --> OK). La imagen 11+laser NO se necesita.
14. En la imagen central (Imagen 11) tapar con negro, con el PAINT, aquellos agujeros que no se necesitan (Fig. Anexo III.5).

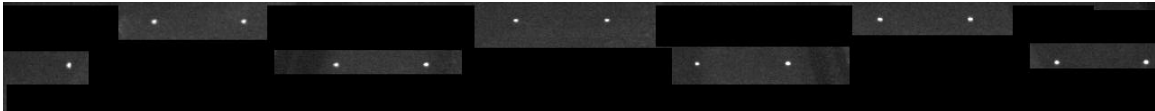


Fig. Anexo III.5 Imagen de los agujeros a dejar en la imagen central tomada.

Procesamiento de imágenes

15. Meter las imágenes tratadas en la carpeta test (en C:\), junto con el fichero .txt PuntosDavid
16. Abrir el programa MICROSOFT VISUAL C++ 6.0
17. Abrir con él el fichero escribe.dsw
18. Comprobar en el fichero que el código de la cámara activado es el adecuado. Para ello buscar mediante CONTROL F la palabra SENSOR, ver en qué línea de código están los números de las cámaras (ir dando ENTER), comprobar que está activado el correcto (coincide con el código de cámara que aparece en el programa PixeLINK Capture OEM) y que los demás están comentados.
19. Seleccionar en PROJECT --> SETTING --> opción DEBUG.
20. Pulsar F5
21. En la pantalla que aparece darle a CALCULAR --> DIBUJAR --> RETROCEDER --> DIBUJAR, así sucesivamente hasta que vuelve a aparecer la primera imagen, entonces hacer DIBUJAR --> AVANZAR --> DIBUJAR, repetir hasta que de nuevo aparezca la primera imagen.

IMPORTANTE: aquellos puntos que al AVANZAR O RETROCEDER aparecen fuera de los círculos, porque el programa no los calcula bien, pinchar sobre ellos con el botón derecho del ratón (aparece una cruz azul) para eliminarlos. Así evitamos que luego salgan puntos que se desvían de los normales en el resultado de la calibración.
22. Dar a CALCULA MTP XYZ.
23. Guardar el Excel generado (lo normal es que los valores de U estén entre (-1.5,+1.5) y los de V entre (-0.5,+0.5)).

24. Pulsar en LASER --> DIBUJAR (lo normal es que en el plano del laser generado di_max y di_min sean menores de 0.5).
25. Hacer un pantallazo y guardar la imagen generada.
26. Pulsar CALIBRADO.BIN (se genera el fichero de calibración en la carpeta Calibrado_binario (en C:\)).
27. Renombrar el fichero de calibración: calibrado1 NOMBRE DEL EQUIPO.bin

Cámara de avellanados

Para la calibración de la cámara de avellanados se captan unas imágenes, se tratan y se procesan mediante un programa de software.

Captura de imágenes

Pasos a seguir:

1. Posicionar el calibrador en la estructura amarrándolo con el sargento (ahora empleamos un calibrador diferente al de la cámara de planitud).
2. Encender el laser (5 ó 6 V).

IMPORTANTE: cuando no se emplee, por seguridad, la clavija del laser permanecerá desconectada.

3. Centrar el laser en la imagen (para ello es necesario subir o bajar un poco el patrón) (Fig. Anexo III.6).
 - Abrir el programa de captura de imágenes (PixeLINK Capture OEM) y en la pestaña Basic Controls:
 - Seleccionar el código de la cámara, en este caso la de planitud, que estamos empleando.
 - PLAY (para ver con la cámara)

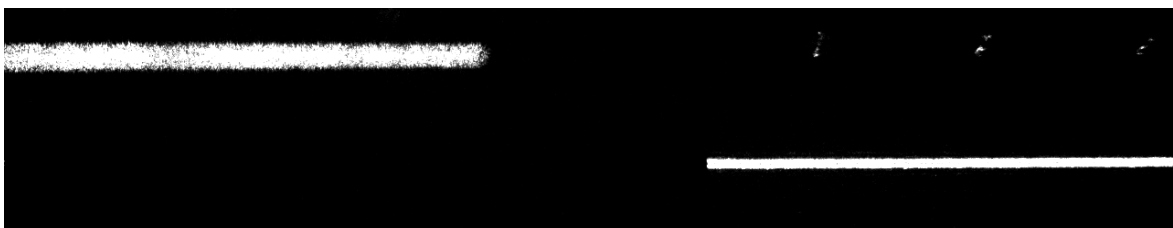


Fig. Anexo III.6 Imagen del laser centrado.

4. Apagar el laser.
5. Alineamiento del calibrador y la posicionadora:
 - Encender MMC y el programa Metrolog XG.
 - Seleccionar un palpador (cualquiera).

Anexo III

- Hacer un sistema de coordenadas palpando un punto del patrón. Para ello en Metrolog XG: ALINEAMIENTO --> UN PUNTO --> palpar un punto en la cara superior del patrón --> pulsar OK.
 - Palpar un punto en las 4 esquinas del patrón y ver que la diferencia entre ellos en el eje Z es inferior a 1 décima de milímetro. En caso de que no se cumpla ir ajustando la altura del patrón manualmente hasta conseguirlo.
6. Encender la posicionadora y abrir su programa de control (ESP-Util):
- GPIB --> Open Port --> Reset
 - HOME --> start (Home switch and index)
 - JOG --> Mode Indexed --> 0.25 mm (X index distance)
 - POSITION (aparece un indicador digital que nos dice la posición en la que está la posicionadora)

En JOG pulsando en los cursores +X y -X desplazamos la posicionadora hacia un lado u otro.

7. Encender los 2 focos (colocarlos a ambos lados de la cámara de avellanados y orientarlos para ver los puntos del calibrador lo mejor posible) y conectar la clavija del laser.
8. Centrar bien la posicionadora para la correcta captura de los puntos (Fig. Anexo III.7 y Fig. Anexo III.8) y ajustar en el PixelINK el valor de la ganancia si fuese necesario.
- Posicionadora en 0:

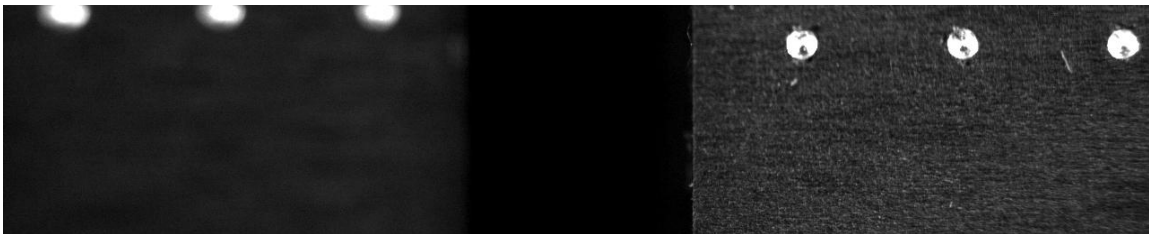


Fig. Anexo III.7. Imagen de la posicionadora centrada en 0.

- Posicionadora en -4:

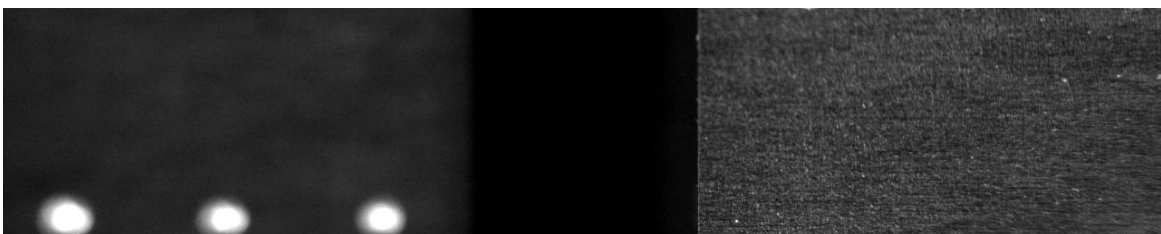


Fig. Anexo III.8. Imagen de la posicionadora centrada en -4.

9. Apagar el laser.
10. Llevar la posicionadora a la posición -4.25 y luego a la -4 (nos pasamos para ir luego en el mismo sentido y evitar el posible juego)
11. Seleccionar en PixelINK la pestaña Image Capture.

12. Desplazar la posicionadora a la posición que interesa, dar nombre a la imagen, guardar y capturar imagen (botón Capture).

REPETIR PARA CADA POSICIÓN

A continuación se indican las posiciones en las que hay que capturar las imágenes y la forma de numerarlas:

Posición = -4 --> Imagen 00

Posición = -3.75 --> Imagen 01

Posición = -3.5 --> Imagen 02

Posición = -3.25 --> Imagen 03

Posición = -3 --> Imagen 04

Posición = -2.75 --> Imagen 05

Posición = -2.5 --> Imagen 06

Posición = -2.25 --> Imagen 07

Posición = -2 --> Imagen 08

Posición = -1.75 --> Imagen 09

Posición = -1.5 --> Imagen 10

Posición = -1.25 --> Imagen 11

Posición = -1 --> Imagen 12

Posición = -0.75 --> Imagen 13

Posición = -0.5 --> Imagen 14

Posición = -0.25 --> Imagen 15

Posición = 0 --> Imagen 16

Posición = 0 --> Imagen laser (encender laser y apagar focos)

IMPORTANTE: AUMENTAR LA GANANCIA PARA LA CAPTURA DEL LASER SI FUESE NECESARIO

Posición = 0.25 --> Imagen 17 (apagar el laser y encender los focos)

Tratamiento de imágenes

13. Empleando el PAINT dar la vuelta a las imágenes (IMAGE --> FLIP/ROTATE --> FLIP VERTICAL --> OK).
14. Tapar con negro aquellos agujeros que estén en los límites de la imagen y que no se vean completos (para evitar posteriores errores en el cálculo de los centros de los círculos por parte del programa) (Fig. Anexo III.9 y Fig. Anexo III.10).

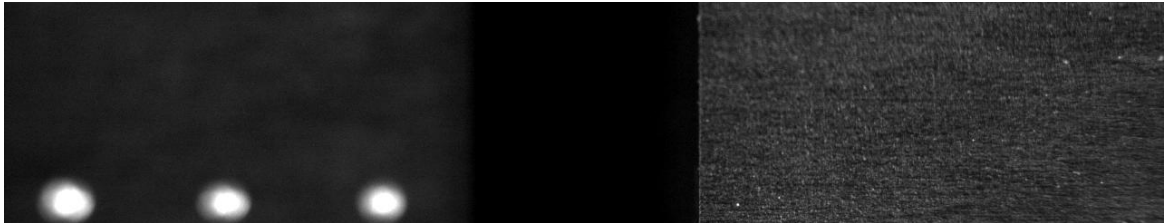


Fig. Anexo III.9 Imagen de puntos antes de ser tratada.

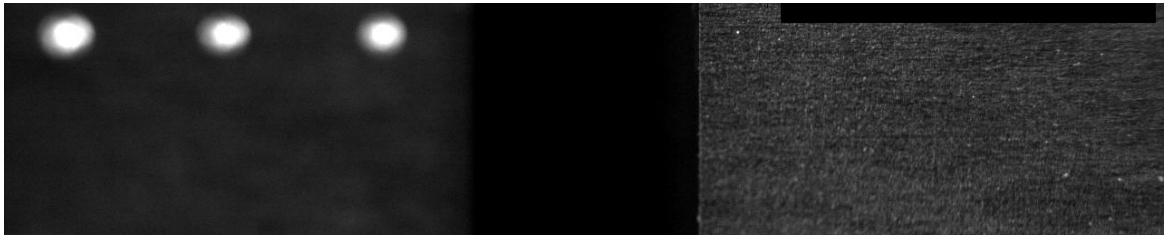


Fig. Anexo III.10 Imagen de puntos después de ser tratada.

Procesamiento de imágenes

15. Meter las imágenes tratadas en la carpeta test (en C:\), junto con el fichero .txt PuntosDavid (diferente fichero para la cámara de avellanados que para la de planitud)
 16. Abrir el programa MICROSOFT VISUAL C++ 6.0
 17. Abrir con él el fichero escribe.dsw
 18. Comprobar en el fichero que el código de la cámara activado es el adecuado. Para ello buscar mediante CONTROL F la palabra SENSOR, ver en qué línea de código están los números de las cámaras (ir dando ENTER), comprobar que está activado el correcto (coincide con el código de cámara que aparece en el programa PixeLINK Capture OEM) y que los demás están comentados.
 19. Seleccionar en PROJECT --> SETTING --> opción DEBUG.
 20. Pulsar F5
 21. En la pantalla que aparece darle a CALCULAR --> DIBUJAR --> RETROCEDER --> DIBUJAR, así sucesivamente hasta que vuelve a aparecer la primera imagen, entonces hacer DIBUJAR --> AVANZAR --> DIBUJAR, repetir hasta que de nuevo aparezca la primera imagen.
- IMPORTANTE: aquellos puntos que al AVANZAR O RETROCEDER aparecen fuera de los círculos, porque el programa no los calcula bien, pinchar sobre ellos con el botón derecho del ratón (aparece una cruz azul) para eliminarlos. Así evitamos que luego salgan puntos que se desvían de los normales en el resultado de la calibración.
22. Dar a CALCULA MTP XYZ.
 23. Guardar el Excel generado (lo normal es que los valores de U estén entre (-1.5,+1.5) y los de V entre (-0.5,+0.5)).

24. Pulsar en LASER --> DIBUJAR (lo normal es que en el plano del laser generado di_{max} y di_{min} sean menores de 0.5).
25. Hacer un pantallazo y guardar la imagen generada.
26. Pulsar CALIBRADO.BIN (se genera el fichero de calibración en la carpeta Calibrado_binario (en C:\)).
27. Renombrar el fichero de calibración: calibrado2 NOMBRE DEL EQUIPO.bin

Anexo IV. Cálculos requeridos para los distintos análisis

Cálculos matemáticos

Para el cálculo de planitud:

$$Planitud = d_{max} - d_{min}$$

Tenemos 10 mediciones (X_i) para cada pieza realizadas con el robot, con ellas sacamos un valor medio para los diámetros (\bar{X}), la posición de cada uno de ellos y la planitud.

Con la medida obtenida en la MMC (X_{MMC}) podemos sacar un valor de corrección para cada dato:

$$C_i = X_{MMC} - \bar{X}$$

Con las correcciones de cada uno de los modelos sacamos un valor de corrección global:

$$C_{global} = \sum \frac{C_i}{n^\circ \text{ de modelos}}$$

Se corrige cada medición tomada:

$$X_{i \text{ corregido}} = X_i + C_i$$

Con ello se calcula el error como el valor medido con la MMC menos cada una de las medidas corregidas:

$$\varepsilon_i = X_{MMC} - X_{i \text{ corregido}}$$

El recorrido es el máximo valor de los errores menos el mínimo:

$$Recorrido = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$$

El cálculo de los errores y del recorrido se hace tanto con la corrección para cada modelo, como con la corrección global para los tres modelos de piezas:

$$X_{i \text{ corregido global}} = X_i + C_{global}$$

$$\varepsilon_{i \text{ global}} = X_{MMC} - X_{i \text{ corregido global}}$$

$$Recorrido \text{ global} = \varepsilon_{max \text{ global}} - \varepsilon_{min \text{ global}}$$

$$Recorrido = Recorrido \text{ global}$$

Cambio de coordenadas

En la MMC para construir el eje X se toman los centros de los agujeros 0 y 2, por ello para calcular α se toma la distancia entre estos dos puntos.

$$\tan \alpha = \frac{Y_2}{X_2}$$

Anexo IV

Los valores Y_2 y X_2 los obtenemos de la medición, por lo que de esta ecuación podemos sacar el valor de α .

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{Y_2}{X_2}$$

Con este valor de α se puede sacar el valor de X_2 corregido.

$$\sin \alpha = \frac{Y_2}{X_2 \text{ corregido}}$$

$$X_2 \text{ corregido} = \frac{Y_2}{\sin \alpha}$$

El valor de Y_2 siempre será 0.

Para el cálculo de las coordenadas X_1 e Y_1 corregidas se hacen las siguientes operaciones.

$$\tan \alpha = \frac{Y_{aux}}{X_1}$$

$$Y_{aux} = X_1 \cdot \tan \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{Y_{aux}}{X_1 \text{ corregido}}$$

$$X_1 \text{ corregido} = \frac{Y_{aux}}{\sin \alpha}$$

$$Y_{aux 2} = Y_1 - Y_{aux}$$

$$\cos \alpha = \frac{Y_1 \text{ corregido}}{Y_{aux 2}}$$

$$Y_1 \text{ corregido} = Y_{aux 2} \cdot \cos \alpha$$

