



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE EXPLORACIÓN
TRIDIMENSIONAL DEL PIE HUMANO**

ANDREA FERNANDA MUÑOZ POTOSI

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2009**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE EXPLORACIÓN
TRIDIMENSIONAL DEL PIE HUMANO**

ANDREA FERNANDA MUÑOZ POTOSI

Trabajo de grado elaborado para optar al título de Ingeniera Física

Director

**Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca
Universidad Industrial del Santander**

Co-Director

**Msc. Jaury León Téllez
Universidad del Cauca**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2009**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Msc. Jaury León Téllez
Co- Director del Trabajo de Grado

Ing. Elena Muñoz España
Firma del Jurado

Dra. Claudia Fernanda Villaquirán
Firma del Jurado

Fecha de Sustentación, Popayán, Miércoles 1 de julio de 2009

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A Dios y a María Auxiliadora, por regalarme el don de la vida.
- ❖ A mis padres y a mi hermana, por enseñarme a que después de la tormenta siempre viene la calma, por ser el motor de mi vida, y por apoyarme incondicionalmente. A mi familia en especial a Sandra Milena Hermida Quintero, por el cariño y confianza que me han brindado en todo momento, pero sobre todo, por estar cada uno a su manera, respaldándome para alcanzar mis objetivos.
- ❖ A Luis Gabriel Valdivieso Gonzales, por tu amor, gracias por ser mi soporte en todo momento y por permitir que sigamos construyendo ese sueño que iniciamos. Sin tu apoyo y el de tu familia, este trabajo no podría haberlo concluido.
- ❖ Al Doctor Jaime Enrique Meneses Fonseca director y al Magister Jaury León Téllez codirector de este trabajo mi más sincera gratitud por su confianza, paciencia y disposición en todo momento. Profe Jaime mi mayor agradecimiento por aceptar dirigir este trabajo y enseñarme a disfrutar de él.
- ❖ Al Doctor Arturo Plata, por su amistad, por permitirme darme cuenta de que lo importante es crecer como profesional, pero ante todo como persona. Gracias por su valioso apoyo, comentarios y sugerencias.
- ❖ A todos mis compañeros, amigos y profesores que forman parte del Grupo de Óptica y Láser de la Universidad del Cauca, y al Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales de la Universidad Industrial de Santander por su apoyo, por enseñarme a crecer en la academia, pero sobre todo a crecer como ser humano.
- ❖ A Carlos Chacón, Daniel Gómez, Elver Rodríguez, Sasha Plata, Cesar Célis, Nelson Sosa, Paula Ardila, Vladimir Jerez, Carlos Osorio, Juan José Barrios, Carlos Ricardo Contreras por tantos momentos de reflexión y apoyo para ayudarme a encontrar la razón por la que se alcanzó este objetivo.

Como alguien escribió algún día “Tal como ocurre en otras ciudades del mundo, incluso las del país natal, una persona al visitar un lugar siempre se lleva consigo algo de ese sitio; como un acto majestuoso de comunión(común-unión), donde se deja un poco de lo que se tiene y se toma algo para sustituirlo. La magia estaba hecha. El contacto se había establecido. Nadie era ya el mismo. El encantamiento había surtido efecto”. Gracias a todos por permitirme disfrutar de esta magia.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL	11
<hr/> <hr/>	
CAPITULO 1. TÉCNICA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR TRIANGULACIÓN LÁSER	
<hr/> <hr/>	
1.1. Introducción	17
1.2. Geometría de la triangulación láser	18
1.3. Curvas de calibración experimental	21
1.4. Reconstrucción parcial de un objeto	24
CAPITULO 2. CALIBRACIÓN DE CÁMARAS	
<hr/> <hr/>	
2.1. Introducción	26
2.2. Calibración de cámaras	27
2.2.1. Modelos de cámara con distorsiones geométricas	30
2.2.1.1. Distorsión radial	30
2.2.1.2. Distorsión descentral	31
2.2.2. Notación matricial	32
2.2.2.1. Transformación Lineal Directa (DLT)	34
2.2.2.2. Calculo de parámetros intrínsecos y extrínsecos	36
2.3. Calibración de las cámaras utilizadas	38
2.4. Análisis de error en el cálculo de los parámetros de calibración	44
2.4.1. Distancia entre VR y VE y estimación de error para la cámara 1	49
2.4.2. Distancia entre VR y VE y estimación de error para la cámara 2	50
2.4.3. Distancia entre VR y VE y estimación de error para la cámara 3	51
2.4.4. Distancia entre VR y VE y estimación de error para la cámara 4	52
2.5. Reconstrucción tridimensional completa	53

CAPITULO 3. SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL IMPLEMENTADO

3.1 Introducción	56
3.2 Sistema óptico de triangulación láser implementado	57
3.3. Proceso de reconstrucción tridimensional	59
3.3.1. Captura de las imágenes	59
3.3.2. Procesamiento de imágenes	62
3.3.3. Procesamiento de datos	65
3.4. Unificación experimental de sistemas coordenados	69
3.5. Análisis de error en el cálculo de coordenadas tridimensionales (X,Y,Z) sobre el sistema unificado	73
3.5.1. Precisión	73

CAPITULO 4. SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN 3D: APLICACIÓN A LA MEDIDA DE PARÁMETROS PODOMÉTRICOS DEL PIE

4.1. Introducción	78
4.2 . Condiciones de medición	78
4.3. Reconstrucción 3D del pie	79
4.3.1. Imágenes adquiridas	79
4.3.2. Procesamiento de imágenes	82
4.3.3. Representación 3D	84
4.4. Medida de parámetros del pie	87
4.4.1. Parámetros podométricos básicos	87
4.4.2. Resultados de la medida de parámetros podométrico	88

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFIA

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1. Técnica de triangulación láser	14
Figura. 2. Esquema del montaje	15
Figura. 3. Montaje óptico de triangulación láser	18
Figura. 4. Principio de codificación de la altura	19
Figura. 5. Geometría de triangulación láser	20
Figura. 6. Sistema de coordenadas involucradas	22
Figura. 7. Línea láser sobre la superficie del objeto a diferentes posiciones de Z para la cámara 1	22
Figura. 8. Eliminación de speckle para diferentes posiciones de Z para la cámara 1	23
Figura. 9. Curva de calibración para la cámara 1	23
Figura. 10. Imagen de la curva de calibración interpolada para la cámara 1	24
Figura. 11. Reconstrucción parcial utilizando la cámara 1	25
Figura. 12. Cuadrícula utilizada como patrón de calibración	27
Figura. 13. Sistemas coordenados utilizados para calibrar las cámaras	28
Figura. 14. Componentes de la distorsión geométrica	31
Figura. 15. Imágenes para la calibración de la cámara 1	39
Figura. 16. Sistema coordenado de la cámara	40
Figura. 17. Extracción de puntos de control de la imagen (a) Puntos de control para la imagen libre de distorsiones (b) Puntos Retroproyectados (c) Error en píxeles en la retroproyección para la cámara 1	41
Figura. 18. Transformación geométrica que relaciona píxeles distorsionados a no distorsionados	44
Figura. 19. Relación de píxeles distorsionados a no distorsionados	45
Figura. 20. Geometría para determinar las coordenadas de un punto en el espacio objeto	46
Figura. 21. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la cámara 1	47
Figura. 22. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la cámara 2	48

Figura. 23. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la cámara 3	48
Figura. 24. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la cámara 4	49
Figura. 25. Distribución de distancia entre los VR y VE de la cámara CCD 1	50
Figura. 26. Distribución de distancia entre los VR y VE de la cámara CCD 2	51
Figura. 27. Distribución de distancia entre los VR y VE de la cámara CCD 3	52
Figura. 28. Distribución de distancia entre los VR y VE de la cámara CCD 4	53
Figura. 29. Reconstrucción tridimensional utilizando una cámara	54
Figura. 30. Ubicación de un punto	55
Figura. 31. Reconstrucción tridimensional completa	55
Figura. 32. Montaje experimental	58
Figura. 33. Imagen capturada por la cámara CCD 1	60
Figura. 34. Imagen capturada por la cámara CCD 2	61
Figura. 35. Imagen capturada por la cámara CCD 3	61
Figura. 36. Imagen capturada por la cámara CCD 4	62
Figura. 37. Corte transversal de la línea láser	63
Figura. 38. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la cámara 1	64
Figura. 39. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la cámara 2	64
Figura. 40. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la cámara 3	65
Figura. 41. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la cámara 4	65
Figura. 42. (a) Sistema coordinado de las cámaras 1 y 4	66
Figura. 42. (b) Sistema coordinado de las cámaras 2 y 3	66
Figura. 43. Curvas de calibración de las cámaras CCD 1(a) 2(b) 3(c) 4(d), para $\Delta Z=5\text{mm}$ desde -8cm hasta 8cm	67
Figura. 44. Reconstrucción tridimensional del triángulo de prueba según la cámara 1	68
Figura. 45. Reconstrucción tridimensional del triángulo de prueba según la cámara 2	68

Figura. 46. Reconstrucción tridimensional del triángulo de prueba según la cámara 3	69
Figura. 47. Reconstrucción tridimensional del triángulo de prueba según la cámara 4	69
Figura. 48. Unificación de los sistemas coordenados para las cámaras 1 y 4	71
Figura. 49. Unificación de los sistemas coordenados para las cámaras 2 y 3	71
Figura. 50. Unificación de los cuatro sistemas coordenados	72
Figura. 51. (a) Reconstrucción 3D del objeto, vista frontal	72
Figura. 51. (b) Reconstrucción 3D del objeto	73
Figura. 52. Reconstrucción tridimensional de un bloque de metal	74
Figura. 53. Reconstrucción tridimensional de un círculo de madera	75
Figura. 54. Reconstrucción tridimensional de un tubo de PVC	76
Figura. 55. Condiciones de medición	78
Figura. 56. Pie sintético	79
Figura. 57. Imágenes adquiridas con la cámara CCD 1	80
Figura. 58. Imágenes adquiridas con la cámara CCD 2	80
Figura. 59. Imágenes adquiridas con la cámara CCD 3	81
Figura. 60. Imágenes adquiridas con la cámara CCD 4	81
Figura. 61. Puntos representativos de la imagen 5 (cámara 1)	82
Figura. 62. Puntos representativos de la imagen 5 (cámara 2)	83
Figura. 63. Puntos representativos de la imagen 5 (cámara 3)	83
Figura. 64. Puntos representativos de la imagen 5 (cámara 4)	84
Figura. 65. Vista frontal de la imagen 3D digitalizada del pie	85
Figura. 66. Vista trasera de la imagen 3D digitalizada del pie	85
Figura. 67. Vista lateral de la imagen 3D digitalizada del pie	86
Figura. 68. Vista lateral de la imagen 3D digitalizada del pie	86
Figura. 69. Algunas dimensiones básicas del pie	87
Figura. 70. Altura de la garganta, del empeine y del metatarsiano	88
Figura. 71. Largo total del pie y largo del metatarsiano	89
Figura. 72. Ancho del metatarsiano	89
Figura. 73. Ancho del talón	90

LISTA DE TABLAS

Tabla. 1. Parámetros intrínsecos de las cámaras CCD 1, 2, 3 y 4	42
Tabla. 2. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos de la cámara CCD 1	49
Tabla. 3. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos de la cámara CCD 2	50
Tabla. 4. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos de la cámara CCD 3	51
Tabla. 5. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos de la cámara CCD 4	52
Tabla. 6. Resultados de la medida de parámetros sobre el pie digitalizado	90

INTRODUCCIÓN GENERAL

Algunos de los problemas de salud que se presentan en personas adultas y en niños se debe a la deformación de las extremidades inferiores, las cuales constituyen la parte esencial para la posición bípeda, base del servomecanismo anti gravitatorio y pieza fundamental para la marcha. Las extremidades inferiores son cadera, muslo, rodilla, pierna, tobillo, pie y dedos. Comúnmente en los estudios y referencias del pie se incluyen los dedos. El pie está constituido por 26 huesos, 33 músculos y más de 100 ligamentos, y es la única estructura que está directamente en interface con el suelo, bajo fuertes presiones selectivas que debe disipar para conseguir el equilibrio adecuado y conseguir una mayor eficacia para la propulsión. Debido a esto, es importante estudiar las causas de las deformaciones del pie.

Estas deformaciones pueden ser congénitas, por accidentes o por el uso de un calzado inadecuado al tipo de pie. Si se conoce a tiempo la causa de la deformación, se puede tratar de una forma efectiva o preventiva usando un calzado adaptativo al tipo de pie. Para el tratamiento o la prevención de dicha deformación se deben realizar medidas sobre el pie, y el sistema que realice dichas medidas debe ser confiable, rápido y debe almacenar sistemáticamente la información, permitiendo al ortopedista realizar una valoración y un seguimiento detallado de la deformación.

Para el sector industrial la realización de un sistema de medida podométrico que sea rápido y preciso, permitirá la elaboración de una horma personalizada para la construcción de calzado de uso cotidiano, el cual favorecerá el normal desarrollo del pie y será diseñado según las necesidades y costumbres de la región.

Las medidas para establecer el nivel de deformación o el tipo de pie se hacen utilizando cintas métricas ó podómetros, los cuales generalmente tienen una resolución de milímetros; razón por la cual esta técnica no permite medir con exactitud contornos ni protuberancias y tampoco permite el almacenamiento sistemático de las medidas. Por lo anterior, se ve la necesidad de implementar un sistema de medida tridimensional, que permita extraer información morfológica y geométrica del pie. El objetivo del presente

trabajo es el de diseñar y construir un sistema que permita por vía óptica obtener información tridimensional del pie humano.

Teniendo en cuenta la forma externa del pie y a la futura aplicación del dispositivo construido, se consideran las siguientes condiciones para el sistema de medida:

- a) La resolución debe ser cercana a 1 mm para hacerla comparable a la cinta métrica.
- b) El dispositivo presenta un campo de observación de 32cmX12cmX12cm.
- c) El pie debe estar ubicado sobre una plataforma de vidrio, para obtener información a 360° de observación. Esto impone la utilización de varios sistemas de adquisición de imágenes.

La captura de imágenes usando más de un sensor a la vez, ha sido ampliamente usada en áreas como el sensado remoto y las imágenes médicas. Para algunas aplicaciones, estas capturas pueden realizarse usando sensores de diferentes tipos tales como sensores CCD, infrarrojo o ultrasonido. El principal problema de estos sistemas es alinear las imágenes de todos los sensores de la misma escena debido a la posibilidad de encontrar imágenes heterogéneas. Las no homogeneidades, para el caso en que todos los sensores son del tipo CCD, pueden consistir en ángulos de observación con diferencias significativas y condiciones de iluminación diferentes, entre otros.

Dentro del Laboratorio de Óptica y Tratamiento de Señales de la Universidad Industrial de Santander se desarrollaron, en los últimos años, dos trabajos de reconstrucción tridimensional [2] y [4]. En [2] se diseñó un sistema óptico de reconstrucción 3D utilizando el principio de triangulación láser; el sistema es formado por los módulos de: iluminación(plano láser), posicionamiento, captura de imágenes(dos sensores CCD), procesamiento de información y control de los procesos(software de control). La reconstrucción del objeto es coordinada de manera automática por el software de control, el cual enlaza los demás módulos para obtener finalmente la representación tridimensional del pie. En [4] el sistema óptico de reconstrucción tridimensional a referencia global fijo implementado se basa en la triangulación láser y la visión estéreo. El dispositivo se implementó para medir la variación temporal de la superficie externa en

modelos análogos cualitativos de volcanes de lodo, causados por el impulso generado por gases al interior del volcán. En ambos casos, las imágenes son alineadas gracias a una conveniente ubicación de las cámaras y la ayuda de un punto de referencia común a todas las imágenes.

En este trabajo de investigación se utilizaron cuatro cámaras ubicadas alrededor del objeto con el fin de lograr la reconstrucción a 360°. Para unificar las imágenes capturadas con todos los sensores CCD, convenientemente se utilizó un objeto de dimensiones y formas sencillas cuya reconstrucción tridimensional permitió encontrar los parámetros de unificación haciendo innecesario usar un punto de referencia.

Debido a las características no invasivas, facilidad de implementación, amplio rango de campo de observación y resoluciones adecuadas, los sistemas ópticos de reconstrucción tridimensional han adquirido una fuerte importancia en la generación de sistemas de medidas industriales y biomédicos. Dentro del amplio rango de métodos ópticos de reconstrucción tridimensional que clásicamente se utiliza en el diseño de instrumentos de medida tridimensional, está el método de triangulación láser. Este método, ofrece características de gran importancia como lo son la facilidad de implementación y por ende la reconstrucción de objetos complicados.

Principalmente, en la técnica de triangulación láser se proyecta un patrón (punto, línea, cuadrícula, franjas, etc.); en este caso, se utiliza una línea láser. La intersección entre la iluminación proyectada y la superficie del pie a reconstruir, produce una línea única la cual se observa deformada desde un ángulo diferente al ángulo de proyección. La cantidad de deformación dependerá de la forma y dimensiones del pie, permitiendo que la superficie tridimensional del pie sea codificada en una imagen bidimensional, deformada de la línea (Figura 1).

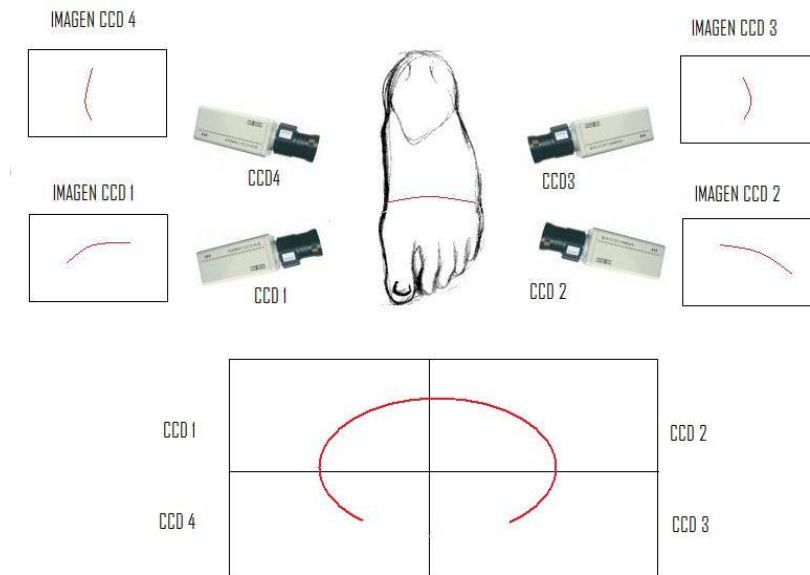


Figura 1. Técnica de Triangulación láser

Una vez finalizado el trabajo de investigación, y con base en las condiciones exigidas al dispositivo, este se construyó con las siguientes características:

- a) Resolución inferior a un milímetro.
- b) Campo de exploración tridimensional de 28 cm X 12 cm X 12 cm (largo, ancho y alto).
- c) Se utilizaron 4 sistemas de adquisición y dos cabezas ópticas que generan dos líneas láser, las cuales se llevan a un mismo plano, formando un plano láser. Los 4 sistemas de adquisición y las dos cabezas ópticas se desplazan simultáneamente paralelo al eje axial del pie, realizando un barrido de la superficie de éste. Se requiere la inmovilidad del pie durante el proceso de adquisición de imágenes.
- d) El sistema obtiene una imagen 3D digitalizada de la superficie del pie (360° de observación). El software de exploración tridimensional final, permite la medida de distancias, que tienen en cuenta la superficie del pie.

El sistema consta principalmente de las siguientes unidades (Figura 2):

- a) **Iluminación y captura:** posee dos cabezas ópticas que aprovechan un haz láser para generar sus respectivos planos de luz. Mediante un soporte los dos planos

láser se llevan a un mismo plano, para ser proyectado sobre la superficie del pie, por medio de un espejo que está ubicado en la plataforma donde se ubica el pie, se puede aprovechar la reflexión del plano láser sobre éste y así reflejar este haz sobre las partes internas y externas del pie. Las imágenes de las curvas de intersección entre el plano láser y la superficie del pie son capturados con cuatro cámaras CCD que garantizan 360° de observación.

- b) **Desplazamiento axial:** permite desplazar el plano láser, junto con las cuatro cámaras CCD paralelo al eje axial del pie, para barrer todo el campo de observación del cuerpo.

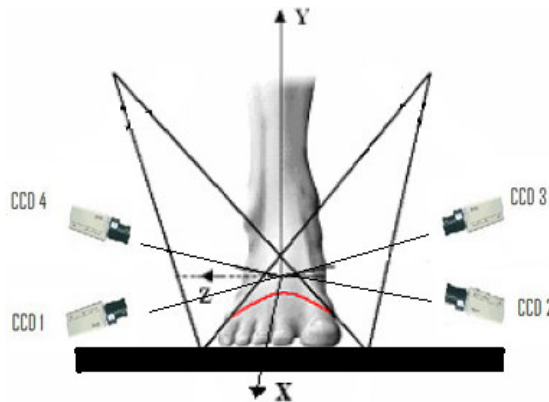


Figura 2. Esquema del montaje

En el procesamiento de las imágenes obtenidas, se distinguen principalmente, las siguientes etapas:

- **Corrección de aberraciones geométricas:** donde se rectifican las imágenes a través de los parámetros de las cámaras, obtenidos previamente mediante un proceso de calibración de cámaras.
- **Tratamiento de imágenes:** permite obtener los puntos representativos de cada línea deformada.
- **Reconstrucción tridimensional:** se realiza la conversión de una imagen bidimensional a una tridimensional, a partir de las curvas de conversión previamente obtenidas para cada cámara. Las vistas laterales tridimensionales del

pie, obtenidas con cada cámara, se unifican para lograr la representación tridimensional final.

- **Medición:** se realizan las medidas de algunos parámetros sobre la imagen tridimensional digital del pie.

En este documento se describe el sistema de reconstrucción tridimensional. En el capítulo 1 se revisan las bases de la reconstrucción tridimensional y la triangulación láser, y la forma como se obtuvieron las curvas experimentales que convierten las coordenadas de la imagen en coordenadas del mundo de los puntos sobre la superficie del pie. En el segundo capítulo, se analiza el proceso de calibración de las cámaras CCD utilizadas y el análisis de error que introduce el cálculo de los parámetros de las cámaras. En el capítulo 3 se analiza el método de reconstrucción tridimensional implementado y el análisis de error en el cálculo de las coordenadas tridimensionales de un punto sobre las superficies del objeto y el proceso de unificación experimental de sistemas coordenados. En el capítulo cuatro se describe, como se utiliza el sistema de reconstrucción para la medida de parámetros sobre la imagen tridimensional del pie. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones y las perspectivas del trabajo realizado.

CAPITULO 1

TÉCNICA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR TRIANGULACIÓN LÁSER

1.1. INTRODUCCIÓN

La imagen de un objeto tridimensional capturada usando una cámara nos proporciona un plano bidimensional en el cual sólo se obtiene información acerca de la intensidad luminosa del objeto en estudio. A partir de ésta, solo se puede recuperar información metrológica en el plano de la imagen y no es posible obtener información topográfica del objeto. Con el fin de extraer información topográfica completa del cuerpo 3D es necesario codificar esta información axial, pedida y justificada por las leyes de la óptica geométrica, en una variable de fácil adquisición y tratamiento. Existen diferentes estrategias de codificación, destacándose los métodos ópticos de reconstrucción tridimensional, donde se usa una variable de naturaleza óptica para codificar la información topográfica. La técnica de triangulación láser es una técnica de reconstrucción tridimensional por vía óptica que codifica información 3D en una imagen 2D de deformación de un patrón láser proyectado sobre la superficie del objeto.

Existen en el mercado diferentes dispositivos que extraen información 3D con resolución que cubre rangos de décimas de micras a milímetros, y campos de observación transversal de décimas de milímetros a metros.

En este capítulo, se realiza un análisis de la geometría de la triangulación usada con el fin de determinar teóricamente las diferentes relaciones entre las coordenadas del mundo real y las coordenadas de la imagen. Conociendo los diferentes parámetros que permiten construir un sistema adaptado a la topografía del pie.

En la sección 1.2, se describe teóricamente la geometría del sistema de triangulación láser usado, que permite obtener las relaciones teóricas entre las coordenadas de la superficie del objeto en el mundo real, a través de las coordenadas de su imagen. En la sección 1.3, se describe el proceso seguido en la obtención experimental de tales relaciones. Y finalmente en la sección 1.4 se realiza la reconstrucción parcial de un objeto.

1.2. GEOMETRÍA DE LA TRIANGULACIÓN LÁSER

Principalmente, la técnica de triangulación láser consiste en proyectar una línea láser sobre la superficie del objeto de estudio y observar la deformación de esa línea por medio de una cámara CCD (Figura 3).

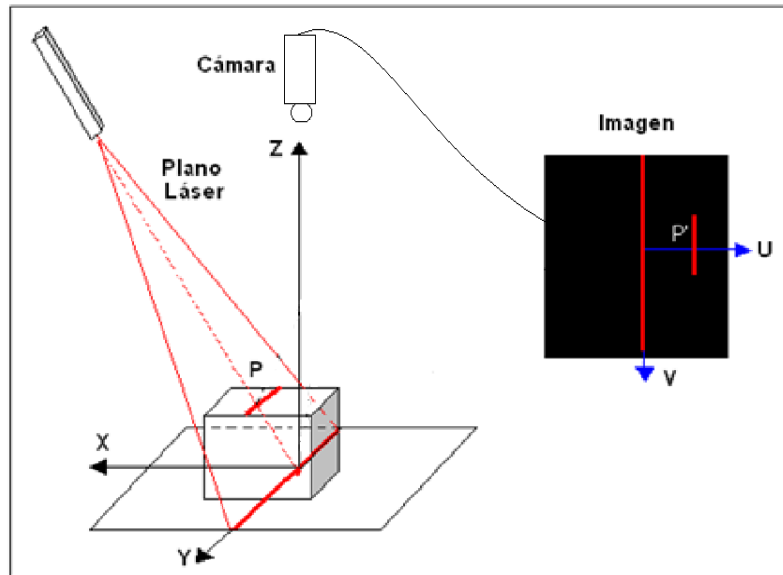


Figura 3. Montaje Óptico de Triangulación láser ^[1].

A partir de esta deformación son detectados los cambios topográficos que se presentan en la superficie del objeto. La línea láser se proyecta sobre el objeto utilizando un modulo de luz estructurada, generalmente formado por una lente cilíndrica y un sistema de filtrado espacial para formar un frente de onda plano. La cámara CCD se ubica perpendicular al plano de referencia, formando un ángulo con el plano de proyección y focalizada frente al plano de referencia. Como se indica en la Figura 4a, al proyectar la línea láser sobre el plano de referencia, la imagen obtenida es una línea recta. Al ubicar el cuerpo sobre el plano de referencia y debido a la topografía de la superficie, la línea se deforma (Figura 4b). Determinando el desplazamiento de cada punto de la línea con respecto a la línea recta obtenida del plano de referencia, es posible calcular la altura de cada punto que pertenece a la línea láser deformada. De esta manera un corrimiento en el plano imagen, codifica la altura medida sobre el eje óptico de la cámara CCD.

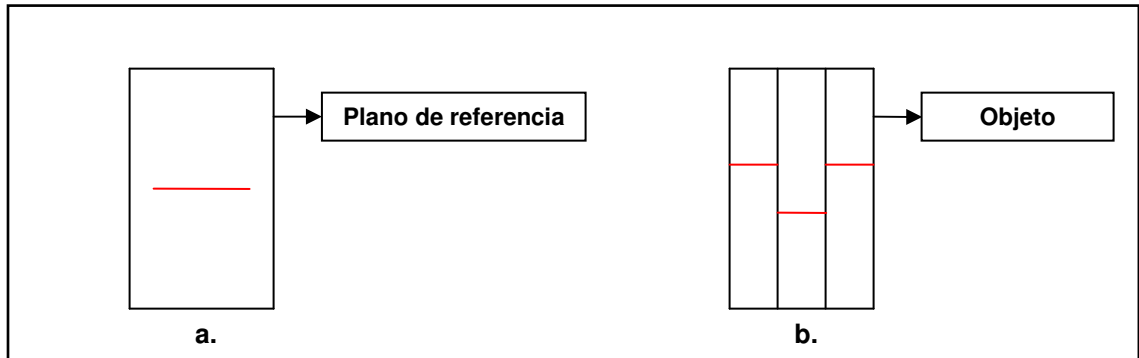


Figura 4. Principio de codificación de la altura.

La Figura 5, muestra un esquema del montaje y los parámetros de la geometría del sistema de triangulación. La línea láser es proyectada formando un plano láser en su propagación a un ángulo β respecto del plano XY (plano de referencia). Un sistema de observación que forma un ángulo θ con la normal del plano de referencia, captura la imagen de la línea. Al ubicar el objeto, el haz es interceptado en P formándose su imagen en P'.

Usando la Ley de Gauss para las lentes delgadas, se puede mostrar que la coordenada Z del punto P en el mundo real está relacionada con la coordenada U de su imagen P' según la expresión:

$$Z(U) = \frac{U \cos \beta}{M \cos(\theta + \beta) \left[\tan(\beta + \theta) + \frac{U}{f} \right]}, \quad (1)$$

donde $M \cong f/d_o$, siendo f la focal efectiva del objetivo de la cámara y d_o la distancia desde O hasta el centro del sistema óptico del objetivo.

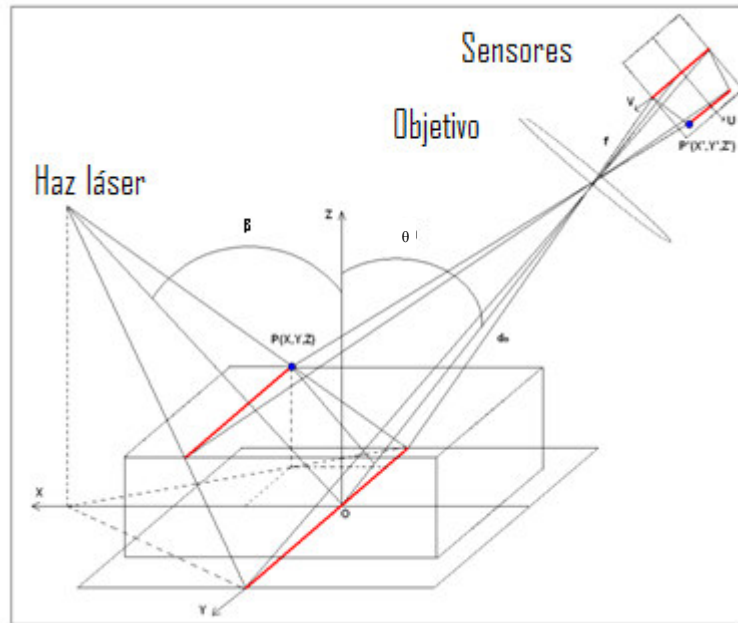


Figura 5. Geometría de la triangulación láser [21]

Para el caso cuando el eje óptico del sistema de observación es perpendicular al plano de referencia ($\theta = 0^\circ$), la expresión (1) queda:

$$Z(U) = \frac{U}{M\left[\tan(\beta) + \frac{U}{f}\right]} \quad (2)$$

Para el mismo caso cuando $\theta = 0^\circ$, se obtiene la expresión que permite encontrar la coordenada Y del mismo punto P en el mundo real:

$$Y = \frac{d_0}{f} V - \frac{\cos(\beta)}{M\left[\tan(\beta) + \frac{U}{f}\right]} UV \quad (3)$$

Utilizando la ecuación 1 se obtiene la altura del cuerpo para los puntos digitalizados de su superficie, realizando un tratamiento digital sobre la imagen para calcular U. El error que se introduce en el cálculo de la altura es determinado principalmente por la precisión al medir los parámetros del sistema: θ , β , f , M . Por lo tanto es necesario buscar otra estrategia para convertir las coordenadas en píxeles de la línea láser a altura en milímetros.

En la sección siguiente se mostrará en detalle el procedimiento de calibración experimental. De igual manera, para obtener la reconstrucción tridimensional completa de la superficie del cuerpo, es necesario realizar un desplazamiento de la línea láser sobre la superficie del objeto de interés en la dirección del eje X, de tal forma que si se realizan n desplazamientos a intervalos ΔX , las respectivas coordenadas X de todos los puntos sobre la n-ésima línea será:

$$X = n\Delta X \quad (4)$$

Una vez calculada la altura para cada punto de la línea láser, se obtiene un corte de la superficie del cuerpo con la altura en milímetros y las coordenadas transversales en píxeles. Un procedimiento de calibración es necesario para convertir las coordenadas sobre el plano de referencia de píxeles a las coordenadas transversales reales de la topografía del cuerpo. Este procedimiento de calibración de coordenadas espaciales se realiza usando las ecuaciones de la óptica geométrica o usando algoritmos tradicionales de calibración de cámaras [1].

1.3. CURVAS DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTALES

El procedimiento mencionado anteriormente se realiza cuando son conocidos los parámetros del montaje experimental. Sí estos no son conocidos ó son difíciles de medir con precisión se efectúa un procedimiento de calibración experimental, el cual consiste en desplazar el plano de referencia paralelo al plano XY en dirección del eje Z.

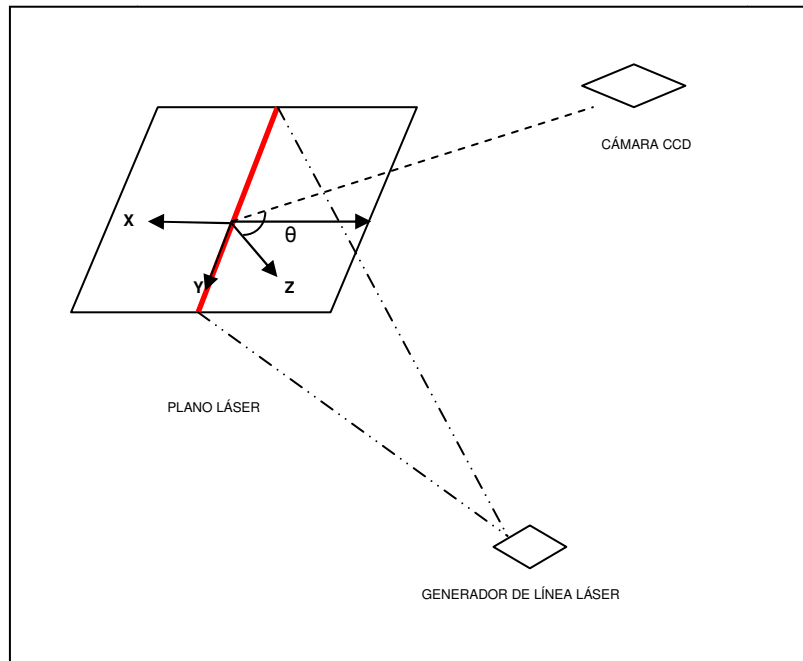


Figura 6. Sistema de coordenadas involucradas

La Figura 6 muestra el sistema coordenado empleado, donde el eje Z es perpendicular al plano de referencia y el eje óptico de la cámara forma un ángulo θ con respecto al eje Z. La Figura 7 muestra varias imágenes adquiridas a diferentes Z. Se observa el desplazamiento de la línea láser en el plano imagen en función de Z. El objetivo de la calibración consiste en encontrar una relación experimental entre la posición de la línea en el plano (en píxeles) en función de la altura del plano de referencia (en mm).

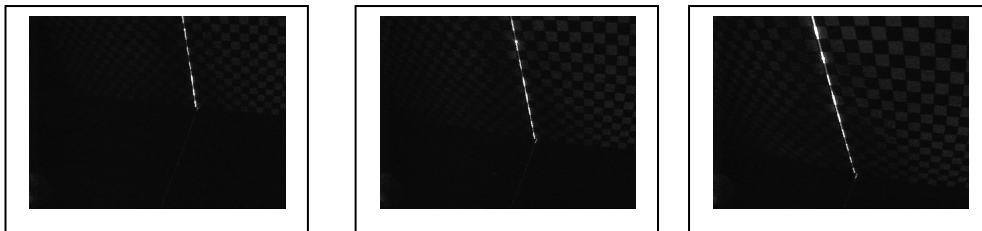


Figura 7. Línea láser sobre la superficie de un objeto plano. Para $Z = -3$ cm, $Z = 0$ cm, $Z = 3$ cm, para la Cámara 1.

A cada línea obtenida para un Z conocido se elimina el ruido presente debido a la coherencia del láser conocido como *speckle* y se extraen las coordenadas en píxeles de la línea central (Figura 8). Debido a la presencia de variaciones locales de la intensidad y a la utilización de una grilla de calibración como objeto, se ajusta la mejor línea recta en términos de mínimos cuadrados a los puntos en píxeles de la línea central para cada Z. La Figura 9 muestra las líneas centrales interpoladas para todos los desplazamientos utilizados, en el rango de -80 a 80 mm con $dz = 5mm$. Al asignarle a cada línea su correspondiente valor en Z se obtiene aproximadamente una curva en el espacio (X, Y, Z), donde X y Y están en píxeles y Z en milímetros. De esta manera interpolando una curva de la forma $ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f$ se obtienen seis coeficientes que calibran el espacio en píxeles, donde a un punto en píxeles (X,Y) le corresponde un valor de Z en milímetros.

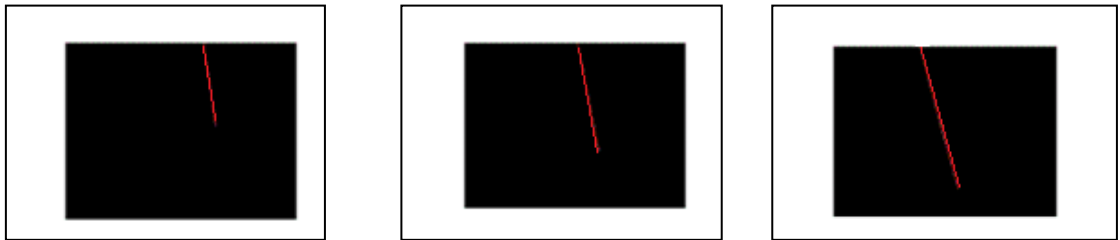


Figura 8. Eliminación de Speckle para Z= -3 cm, Z= 0 cm, Z= 3 cm, para la Cámara 1.

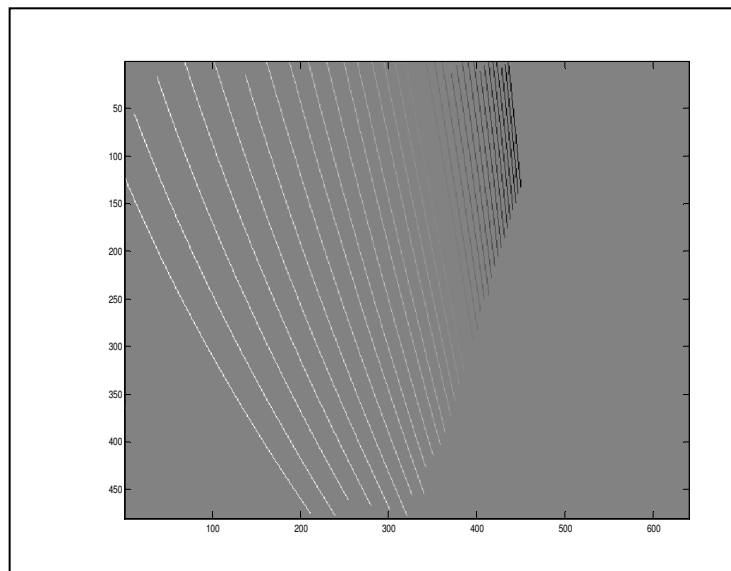


Figura 9. Curva de calibración para la cámara 1

La Figura 10 muestra la curva de calibración interpolada al evaluar el polinomio anterior en el rango de valores (U,V) adquiridos. De esta manera a un punto de la imagen que tiene coordenadas (U,V) en píxeles le corresponde una altura Z en mm. Esta Figura es llamada curva de calibración. El procedimiento de reconstrucción tridimensional consiste en calcular las coordenadas de los puntos centrales de la línea deformada por la topografía del cuerpo y calcular sus correspondientes alturas usando la curva de calibración.

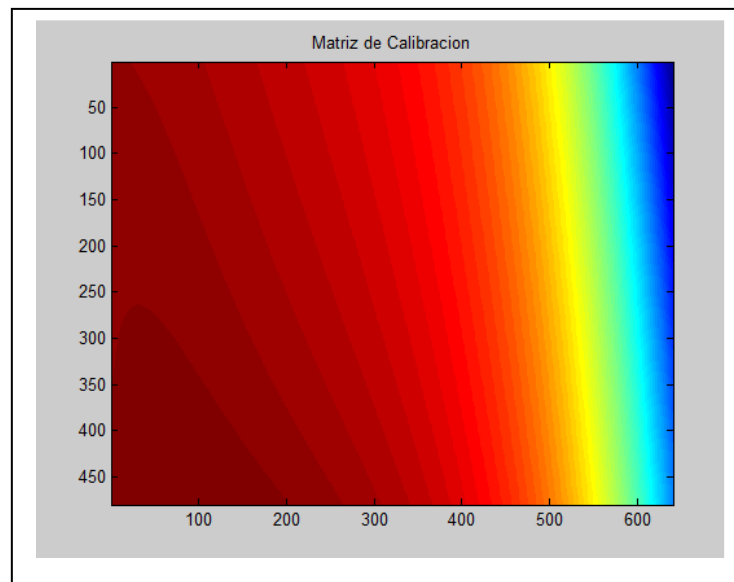


Figura 10. Imagen de la curva de calibración interpolada para la cámara 1

La precisión del procedimiento de reconstrucción la define la aproximación utilizada para ajustar la curva experimental de calibración. Polinomios de orden superior pueden utilizarse si existe la influencia de efectos no lineales en los sistemas de desplazamiento o fuertes aberraciones de los sistemas formadores de imágenes.

1.4 RECONSTRUCCION PARCIAL DE UN OBJETO

Con el fin de mostrar el procedimiento de reconstrucción tridimensional se procedió a reconstruir un objeto mostrado en la Figura 11, en ella se muestra una imagen de la línea

láser deformada y de los puntos centrales después de haber eliminado la influencia del *speckle*. La línea láser se desplazó 170 milímetros con un intervalo $\Delta X=2\text{mm}$, aplicando la curva de calibración de los puntos centrales de todas las líneas obtenidas, se reconstruye parcialmente el objeto.

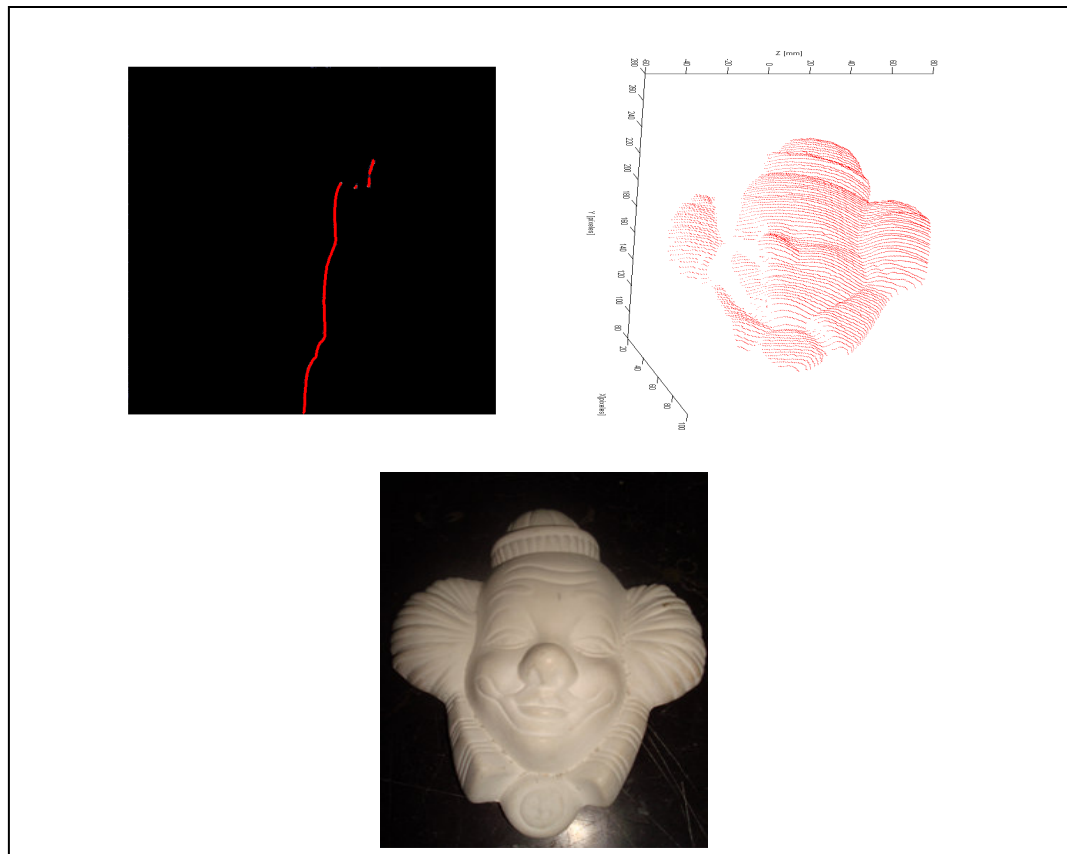


Figura 11. Reconstrucción parcial utilizando la cámara 1

En la Figura 11 se observa que la reconstrucción coincide con la forma del objeto donde la altura está en mm y la posición transversal en píxeles. Para obtener la reconstrucción completa del cuerpo se requiere por lo tanto realizar un proceso de conversión de píxeles en la imagen a milímetros en el espacio del objeto, que tenga en cuenta la perspectiva visual de la cámara y las distorsiones geométricas del sistema formador de imágenes. Este procedimiento se describirá en el capítulo siguiente.

CAPITULO 2 CALIBRACIÓN DE CÁMARAS

2.1. INTRODUCCIÓN

Como se indicó en el capítulo anterior, dada la curva de calibración del dispositivo de reconstrucción láser se obtiene información topográfica del cuerpo. Según la Figura 11, se obtiene información de Z en milímetros mientras que la información en (X,Y) está en píxeles. Para convertir píxeles del plano imagen a milímetros en el plano objeto se suele utilizar el factor de ampliación geométrico del sistema formador de imagen, siempre que el eje óptico sea perpendicular al plano de referencia y el sistema formador de imagen no presente distorsiones geométricas considerables. Si no se cumple ninguna de las anteriores condiciones para el dispositivo implementado, se debe recurrir a estrategias de calibración de cámaras con el fin de convertir píxeles a milímetros sobre el objeto, teniendo en cuenta la posición espacial de la cámara y la influencia de distorsiones geométricas.

Se explica el procedimiento de calibración de cámaras determinando parámetros internos (coordenadas del mundo principal, distancia focal) y externos (matriz de rotación, vector de traslación) de la cámara. Este procedimiento es de gran importancia pues las cámaras comúnmente usadas en visión computacional utilizan lentes para formar el objetivo que poseen imperfecciones y el ensamblaje de las mismas conlleva a desalineamientos de sus componentes. Por ejemplo, el arreglo de sensores de la cámara CCD puede no estar perpendicular al eje óptico del objetivo y la intercepción del eje óptico con el plano imagen puede no coincidir con el centro del arreglo de los sensores. Este proceso abre la posibilidad de realizar aplicaciones, tales como reconocimiento, seguimiento y reconstrucción tridimensional, los cuales se basan en el conocimiento de calibración y posición de la cámara.

En la sección 2.2, se describe el método utilizado para realizar la calibración de una cámara teniendo en cuenta algunos tipos de distorsiones ^[3]. En la sección 2.3, se describe el método usado para la calibración de las cámaras empleadas en el sistema de

reconstrucción, en la sección 2.4, se realiza un análisis de error en el cálculo de los parámetros de calibración de las cámaras y en la sección 2.5, se muestran los resultados obtenidos de la reconstrucción tridimensional completa.

2.2. CALIBRACIÓN DE UNA CÁMARA

Como se mencionó en la sección anterior el proceso de reconstrucción tridimensional completo se basa principalmente en la utilización de los parámetros de calibración de cada cámara. La idea principal de los procesos de calibración de cámaras consiste en obtener los parámetros necesarios para convertir un punto en el espacio objeto al punto correspondiente en el espacio imagen y viceversa a partir del modelo de proyección previamente definido que relaciona los sistemas de coordenadas.

En esencia, el proceso de calibración de cámaras consiste en determinar la geometría y características internas de la cámara: parámetros intrínsecos (coordenadas del punto principal, distancia focal, etc.), y los parámetros extrínsecos (rotación y translación), que representan la localización y orientación de la cámara relativa al sistema de coordenadas del objeto. Estos parámetros normalmente son calculados usando un patrón de calibración (Figura 12) que contiene rasgos fácilmente detectables de manera precisa en la imagen capturada.

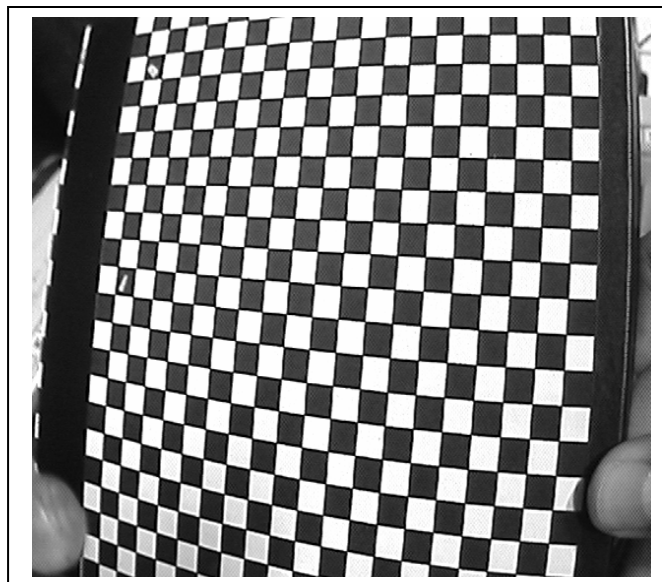


Figura 12. Cuadrícula utilizada como Patrón de Calibración.

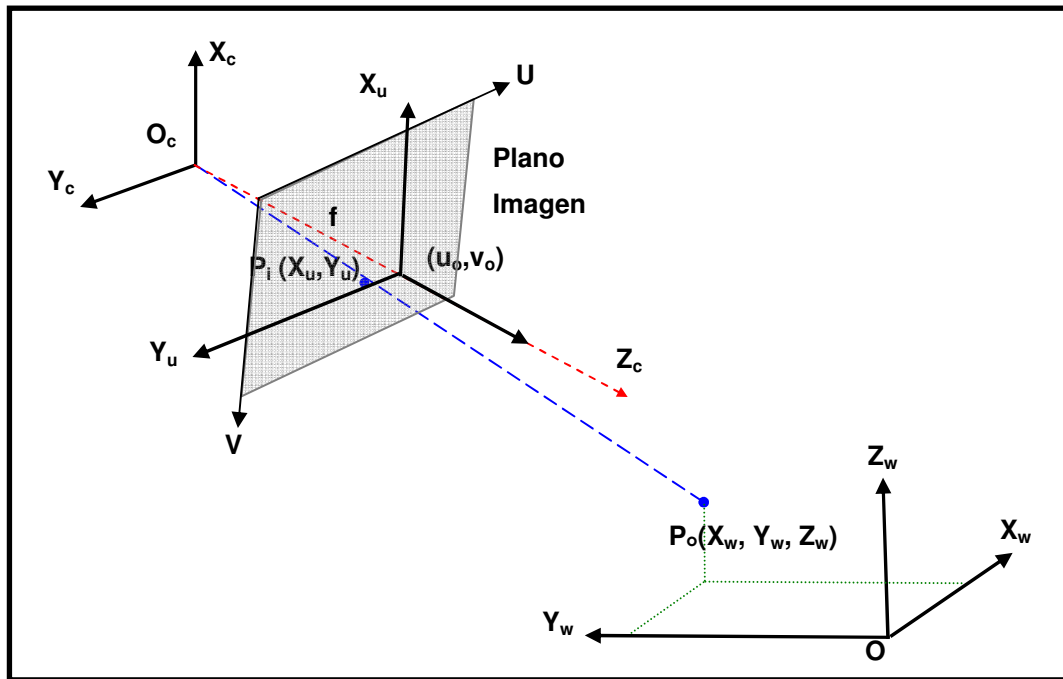


Figura 13. Sistemas coordenados utilizados para calibrar las cámaras.

La Figura 13 muestra el modelo de proyección puntual y los sistemas coordenados utilizados para modelar los sistemas formadores de imágenes. En este modelo la información del objeto se proyecta en el plano imagen por una línea a través de un centro de proyección O_c , denominado centro óptico. El plano imagen se encuentra situado a una distancia llamada Distancia Focal f del centro óptico. El eje óptico es la línea perpendicular al plano imagen y pasa por el centro óptico.

Para ubicar objetos en el mundo real, se define un sistema de referencia fijo, que es llamado sistema de referencia del objeto, (X_w, Y_w, Z_w) . Un objeto en una imagen es medido en términos de coordenadas en píxeles, las cuales están en el sistema de referencia de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) en milímetros, donde el eje Z_c define al eje óptico. Con sólo conocer la distancia en píxeles entre puntos en una imagen, no es posible determinar la distancia correspondiente a los mismos puntos en el mundo real. Por lo tanto, es necesario establecer las ecuaciones que relacionen el sistema de referencia del objeto con el sistema de referencia de la cámara, para establecer la relación entre las

coordenadas de los puntos en el espacio 3D y las coordenadas de los puntos de la imagen 2D. Esta relación, no se puede establecer directamente, haciéndose necesario definir un sistema de referencia intermedio, llamado sistema de referencia de la imagen. El sistema coordenado (U, V) define las filas y columnas en píxeles en el plano imagen y son paralelos a los ejes X_c y Y_c respectivamente. El plano imagen se encuentra a una distancia focal f del origen O_c . Este plano es perpendicular al eje Z_c e intercepta el punto principal de coordenadas (u_o, v_o) en píxeles del plano imagen. El sistema de referencia en milímetros sobre el plano imagen es (X_u, Y_u) paralelos a los ejes X_c, Y_c y centrados en (u_o, v_o) , como se indica en la Figura 13.

Usando la perspectiva puntual, (Modelo Pinhole), un punto $P_o (X_w, Y_w, Z_w)$ en el espacio objeto, es proyectado al punto P_i de coordenadas (X_u, Y_u) . Las coordenadas del punto P_o en el sistema de referencia de la cámara son (X_c, Y_c, Z_c) . A partir de la proyección lineal se tiene:

$$X_u = \frac{f}{Z_c} X_c \quad ; \quad Y_u = \frac{f}{Z_c} Y_c \quad (5)$$

Las coordenadas (U, V) en píxeles se calculan utilizando los factores de conversión K_x y K_y en píxel/mm y las coordenadas del punto principal (U_o, V_o) en píxeles, así:

$$u = K_u X_u + u_o \quad ; \quad v = K_v Y_u + v_o \quad (6)$$

De igual manera, las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) de un punto P_o en la superficie del objeto y con coordenadas $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ en el sistema coordenado de la cámara están relacionados de acuerdo a la ecuación:

$$\vec{P} = R * \vec{P}_o + \vec{T} \quad (7)$$

Donde R es la matriz de Rotación entre sistemas de referencia y T es el vector de Translación.

2.2.1. MODELO DE CÁMARAS CON DISTORSIONES GEOMÉTRICAS ^[4]

Si los componentes ópticos de la cámara fueran perfectos, la transformación entre la imagen bidimensional y el objeto tridimensional en el espacio sería perfectamente lineal y fácil de resolver. Pero las lentes producen distorsiones que no son lineales que afectan la precisión de la transformación. Estas distorsiones se refieren a que la posición del punto en el sensor (que representa un punto del objeto) difiere de la posición ideal que tendría el punto según el Modelo de Proyección Puntual. Como un resultado de algunos tipos de imperfecciones existentes en las lentes, la expresión (6) no permanece constante y debe ser remplazada por expresiones que tomen en cuenta explícitamente los errores en la posición introducida por estos. La cantidad de error δ_i en la posición (X_u, Y_v) a lo largo de cada coordenada usualmente depende de la posición del punto:

$$X_u' = X_u + \delta_x \quad ; \quad Y_v' = Y_v + \delta_y \quad (8)$$

Las coordenadas (X_u', Y_v') son las correspondientes coordenadas con distorsión, que se necesitan corregir para obtener los valores reales del objeto. La Figura 14 muestra la influencia de las distorsiones geométricas. La diferencia de la posición real y la ideal se describe teniendo en cuenta las componentes rectangulares (δ_u, δ_v) , las componentes radiales y tangenciales (δ_r, δ_t) . Las distorsiones más comunes encontradas experimentalmente son la distorsión radial que genera los tradicionales defectos en cojín y barrilete y la distorsión descentral. En la literatura se han propuesto otros tipos de distorsiones [6]. En este trabajo se utilizan las primeras aproximaciones del modelo de la distorsión radial y descentral presentes en el sistema, como se observa en la Figura 14.

2.2.1.1. DISTORSIÓN RADIAL

La distorsión radial causa un desplazamiento hacia adentro o hacia fuera a lo largo del radio. Este tipo de distorsión es causado principalmente por defectos en el radio de curvatura de las lentes. La cantidad de distorsión radial de una lente perfectamente centrada a lo largo de cada coordenada cartesiana de la imagen puede ser representada por:

$$\begin{aligned}\delta_x^r &= k_1 X_u (X_u^2 + Y_v^2) + k_2 X_u (X_u^2 + Y_v^2)^2 + O[(X_u, Y_v)^7] \\ \delta_y^r &= k_1 Y_v (X_u^2 + Y_v^2) + k_2 Y_v (X_u^2 + Y_v^2)^2 + O[(X_u, Y_v)^7]\end{aligned}\quad (9)$$

Donde k_1, k_2 son constantes que determinan la cantidad y dirección de la distorsión.

2.2.1.2. DISTORSIÓN DESCENTRAL

Es provocada por la falta de colinealidad de los centros ópticos y produce desplazamientos radiales y tangenciales. La componente tangencial puede ser modelada por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\delta_x^d &= P_2(3X_u^2 + Y_v^2) + 2P_1X_uY_v + O[(X_u, Y_v)^4] \\ \delta_y^d &= 2P_2X_uY_v + P_1(X_u^2 + 3Y_v^2) + O[(X_u, Y_v)^4]\end{aligned}\quad (10)$$

Donde P_1 y P_2 son constantes que determinan la cantidad y dirección de la distorsión, así como el eje de máxima distorsión tangencial [5].

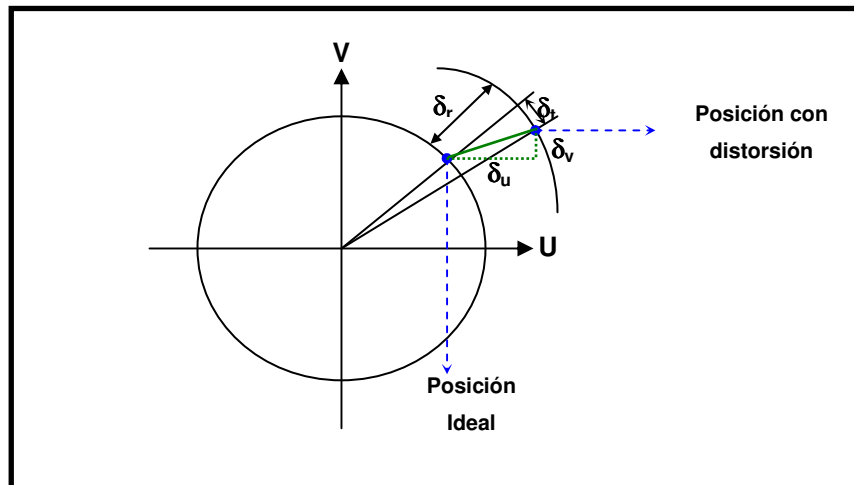


Figura 14. Componentes de la distorsión geométrica

2.2.2. NOTACION MATRICIAL

Según lo anterior, un modelo de cámara más apropiado para aproximar la calibración puede ser derivado combinando el Modelo Pinhole con la modelación de las distorsiones radial y descentral de acuerdo a:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_u (X_u + \delta_x^r + \delta_x^d) \\ K_v (Y_v + \delta_y^r + \delta_y^d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

En este modelo, el conjunto de parámetros intrínsecos es alterado por los coeficientes de distorsión. Según las anteriores ecuaciones cuatro coeficientes son utilizados para calcular los valores de distorsión radial y tangencial.

Desde un punto de vista geométrico, la imagen obtenida con las cámaras es el resultado de una transformación geométrica. Esta transformación permite pasar de una representación tridimensional de la escena a una representación bidimensional de la misma. Para pasar de coordenadas definidas en el sistema coordenado del objeto a coordenadas de la imagen expresadas en píxeles, son necesarios tres pasos:

1. Transformación tridimensional: Los puntos tridimensionales expresados en el sistema coordenado del objeto experimentan un cambio al pasar al sistema coordenado de la cámara. Este cambio de sistema coordenado comprende 9 parámetros: 6 para las rotaciones (r) y 3 para las traslaciones (t). Estos parámetros son la posición y la orientación de la cámara, y son llamados parámetros extrínsecos. La ecuación (7) puede ser escrita de manera matricial como:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2. **Proyección 3D-2D:** Después del cambio de sistema coordenado, los puntos tridimensionales expresados en el sistema coordenado de la cámara son proyectados sobre el plano de la imagen, según la ecuación (5). Esta ecuación puede escribirse matricialmente usando coordenadas homogéneas como:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

3. **Cambio de coordenadas:** Para pasar a coordenadas expresadas en píxeles, las coordenadas se someten a una transformación análoga del plano, definida en la ecuación (6), para un sistema libre de aberraciones o la ecuación (11) para un sistema con aberraciones. Esta transformación está compuesta de 4 parámetros llamados parámetros intrínsecos. La ecuación de conversión (6) puede escribirse usando notación matricial como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u \\ Y_v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Y la ecuación de conversión (11) puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u + \delta_x \\ Y_v + \delta_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Agrupando ecuaciones para el sistema libre de aberraciones, se tiene:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde,

$$M = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

En las ecuaciones anteriores $f_u = f * K_u$ y $f_v = f * K_v$, proporcionan la distancia focal en unidades de píxeles a lo largo de los ejes u y v respectivamente, y (u_0, v_0) es el punto principal de la imagen. La matriz M es conocida como matriz de proyección. Para el caso de aberraciones:

$$M = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 + \delta_u \\ 0 & k_v & v_0 + \delta_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

donde,

$$\delta_u = k_u \delta_x \text{ y } \delta_v = k_v \delta_y$$

2.2.2.1. TRANSFORMACIÓN LINEAL DIRECTA (DLT)

La matriz de proyección M establece la relación matricial entre las coordenadas del objeto, medidas en unidades del sistema métrico y las coordenadas de la cámara, medidas en píxeles. Esta matriz puede escribirse como:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 & m_{14} \\ \bar{m}_2 & m_{24} \\ \bar{m}_3 & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde \bar{m}_j es un vector fila obtenido de las tres primeras columnas. Así, $\bar{m}_j = [m_{j1} \ m_{j2} \ m_{j3}]$ con $j = 1, 2, 3$. Los valores de cada elemento de m_{ij} se pueden obtener de la definición de M. Utilizando la ecuación (16) donde M se ha definido para el sistema libre de aberración, se pueden escribir las coordenadas de la imagen de un punto de la escena de la siguiente forma:

$$u = \frac{m_{11}X_w + m_{12}Y_w + m_{13}Z_w + m_{14}}{m_{31}X_w + m_{32}Y_w + m_{33}Z_w + m_{34}} \quad (20)$$

$$v = \frac{m_{21}X_w + m_{22}Y_w + m_{23}Z_w + m_{24}}{m_{31}X_w + m_{32}Y_w + m_{33}Z_w + m_{34}} \quad (21)$$

Con el fin de calcular los coeficientes de la matriz M, es necesario escribir un sistema de ecuaciones a partir de los puntos del objeto y su proyección en la imagen. Cada punto (X_w, Y_w, Z_w) se proyecta en (U_i, V_i) generándose dos ecuaciones. Estas ecuaciones son lineales con respecto a los coeficientes de la matriz. De esta forma se necesitan al menos 6 puntos para determinar los 12 coeficientes de la matriz M que nos interesa. Es decir, las ecuaciones (20) y (21) pueden ser rescritas como una combinación lineal de los parámetros m_{ij} :

$$X_w m_{11} + Y_w m_{12} + Z_w m_{13} + m_{14} - u_i X_w m_{31} - u_i Y_w m_{32} - u_i Z_w m_{33} = u_i m_{34} \quad (22)$$

$$X_w m_{21} + Y_w m_{22} + Z_w m_{23} + m_{24} - v_i X_w m_{31} - v_i Y_w m_{32} - v_i Z_w m_{33} = v_i m_{34} \quad (23)$$

Al ubicar una cuadrícula en el espacio objeto donde se conocen las coordenadas (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) de varios puntos ($i = 1 \dots n$) y al definir sobre la cuadrícula las coordenadas

en píxeles (U_i, V_i) correspondientes, se obtiene un sistema lineal de ecuaciones de la forma (22) y (23). Si se utilizan N puntos se obtienen 2N ecuaciones. Resolviendo el sistema lineal de ecuaciones se obtienen las componentes m_{ij} de la matriz de proyección para el sistema libre de aberración. Este procedimiento de transformación final es llamado transformación lineal directa (DLT).

2.2.2.2. CALCULO DE PARÁMETROS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

A partir de los 12 elementos calculados de la matriz M se pueden obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos de calibración. La matriz de rotación R se define como:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{r}_1 \\ \vec{r}_2 \\ \vec{r}_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Sabiendo que $\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j^T = \delta_{ij}$ y a partir de la definición de M se obtiene:

- Coordenadas del punto principal:

$$\begin{aligned} u_o &= \bar{m}_1 \cdot \bar{m}_3^T \\ v_o &= \bar{m}_2 \cdot \bar{m}_3^T \end{aligned} \quad (25)$$

- Distancias focales en x , y:

$$\begin{aligned} f_u^2 &= \bar{m}_1 \cdot \bar{m}_1^T - \left[\bar{m}_1 \cdot \bar{m}_3^T \right]^2 \\ f_v^2 &= \bar{m}_2 \cdot \bar{m}_2^T - \left[\bar{m}_2 \cdot \bar{m}_3^T \right]^2 \end{aligned} \quad (26)$$

- Matriz de rotación:

$$\begin{aligned}\bar{r}_1 &= \frac{\bar{m}_1 - u_0 \bar{r}_3}{f_u} \\ \bar{r}_2 &= \frac{\bar{m}_2 - v_0 \bar{r}_3}{f_v} \\ \bar{r}_3 &= \bar{m}_3\end{aligned}\quad (27)$$

- Vector de translación:

$$\begin{aligned}t_x &= \frac{m_{14} - u_0 t_z}{f_u} \\ t_y &= \frac{m_{14} - v_0 t_z}{f_v} \\ t_z &= m_{34}\end{aligned}\quad (28)$$

El anterior procedimiento permite calcular los parámetros de calibración de cada cámara asumiendo que la distorsión es cero. En situaciones experimentales como la mostrada en la Figura 12 el sistema formador de imagen posee aberraciones debido a los términos exponenciales diferentes de 1 en la ecuación (9). El sistema de ecuaciones que relacionan (U'_i, V'_i) y (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) para cada punto no es lineal y el proceso de solución para calcular los valores de m_{ij} se convierte en un proceso de optimización no lineal. La función error utilizada para estimar los parámetros de calibración se define en la ecuación (29), donde N es el número de puntos de observación, (U_i, V_i) son las coordenadas teóricas en píxeles del modelo matemático de proyección con valores de parámetros obtenidos en una etapa intermedia y (U'_i, V'_i) son las coordenadas experimentales obtenidas del tratamiento digital sobre la cuadrícula.

$$F = \sum_{i=1}^N (U'_i - U_i)^2 + (V'_i - V_i)^2 \quad (29)$$

Usando algoritmos de optimización es posible resolver el sistema de ecuaciones no lineales. El método de optimización de Levenberg-Marquardt proporciona una rápida convergencia. Sin embargo, sin unos valores iniciales apropiados de los parámetros, la optimización puede caer en un mínimo local y causar que la calibración falle. Este problema se puede resolver usando como valores iniciales los parámetros obtenidos de la DLT para la optimización.

2.2. CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS UTILIZADAS

En el sistema de reconstrucción, se utilizaron cuatro cámaras convencionales con objetivos de focal 3.6 mm de 640X480 píxeles.

Las cámaras utilizadas presentan una fuerte distorsión como se observa en la Figura 12. Las cuatro cámaras presentan principalmente una fuerte distorsión radial, lo que implicó realizar un proceso de calibración antes de trabajar con las imágenes. Para realizar la calibración de las cámaras y extraer parámetros intrínsecos y extrínsecos, se utilizó el procedimiento descrito anteriormente, propuesto por Janne Heikkila y Olli Silven^[5]. “Camera Calibration Toolbox” es un software de calibración de cámaras digitales desarrollado en MATLAB® y de libre acceso en Internet, que permite calibrar sistemas de adquisición de imágenes. Está basado en el procedimiento anterior y posee una interfaz grafica amigable al usuario que permite secuencialmente obtener los parámetros de calibración.

A continuación se ilustra los pasos importantes desarrollados para ser aplicados a la interfaz y así calcular los parámetros. Como objeto de calibración, se utilizó una cuadrícula blanco y negro, mostrada en la Figura 12, cuyo tamaño de cuadro es de 6 mm.

El proceso de calibración tiene las siguientes etapas:

1. **Adquisición de imágenes:** En esta etapa del proceso, se adquirieron 15 imágenes de la cuadrícula por cada cámara, en diferentes perspectivas de la escena, utilizadas para establecer los puntos de control para la calibración de las cámaras (Figura 15).

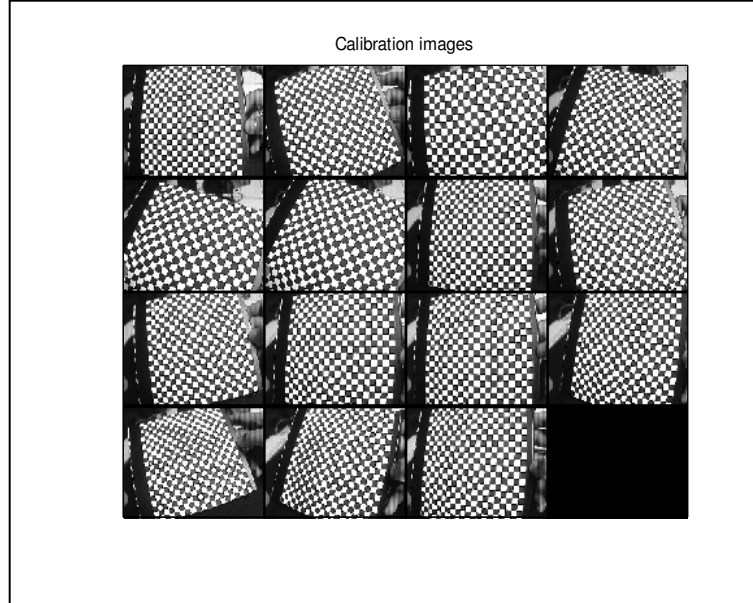


Figura 15. Imágenes para calibración de la Cámara 1

2. Extracción de los puntos de control: Un punto de control corresponde a un vértice de un cuadro negro. Es necesario definir una región rectangular de varios cuadros y el origen del sistema coordenado. El primer punto seleccionado para definir la región de puntos de control es asociado con el punto origen de la imagen de referencia (P_0) de la cuadrícula. Los otros tres puntos de la cuadrícula (P_1, P_2, P_3) pueden seleccionarse aleatoriamente. Una vez realizada esta operación se establece el sistema coordenado que define la dirección de los ejes X, Y y Z como lo muestra la Figura 16. Para extraer los puntos de control se hace necesario conocer la cantidad de cuadros al interior de la región seleccionada tanto en la dirección X como en Y, y conocer el tamaño del cuadro en milímetros. De esta manera se pueden calcular las coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) en mm contando el número de cuadros y asociarlos a los puntos (U_i, V_i) calculados digitalmente. Las coordenadas (U_i, V_i) en pixeles son calculadas realizando un procesamiento digital basado en el gradiente de la imagen.

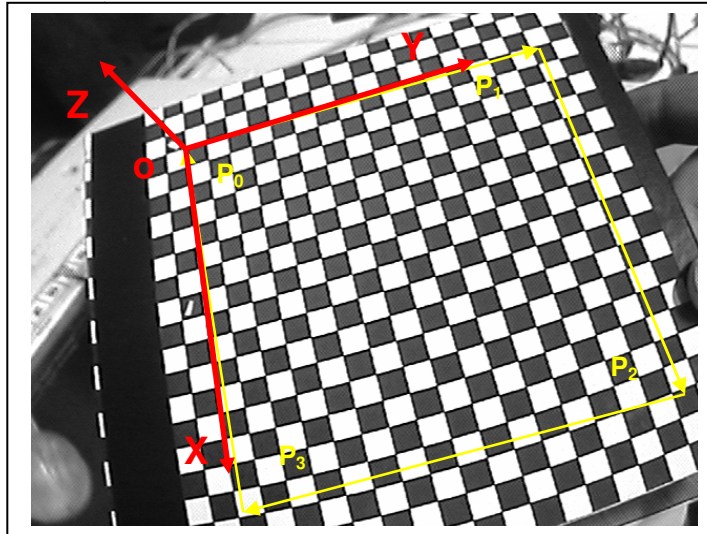


Figura 16. Sistema coordenado de la cámara

3. **Optimización:** Antes de realizar el proceso de optimización no lineal se deben determinar los mejores valores iniciales de los parámetros.

La figura 17 (a) muestra los puntos de control en forma de cruz como deberían verse en una imagen libre de distorsiones. Debido a las distorsiones encontradas en las imágenes adquiridas, las esquinas preestablecidas libres de aberraciones no son cercanas a las esquinas de la imagen real. Esto podría generar inconvenientes en el proceso de optimización al elegir valores iniciales no adecuados de los parámetros. El software permite introducir un valor inicial a la distorsión radial para aproximar de mejor manera los valores iniciales. Una vez extraídas las esquinas de cada una de las imágenes, se obtuvieron los datos para iniciar el proceso de optimización. El algoritmo de optimización usa los valores establecidos por la transformación lineal directa y el valor de coeficiente de distorsión radial que acerca los puntos de control a las esquinas en la imagen real, definido anteriormente. Internamente el procedimiento de optimización utiliza la función de error definida en la ecuación (29) para determinar el valor de los parámetros de calibración que minimiza el error. El algoritmo de optimización converge hasta minimizar el error cuadrático.

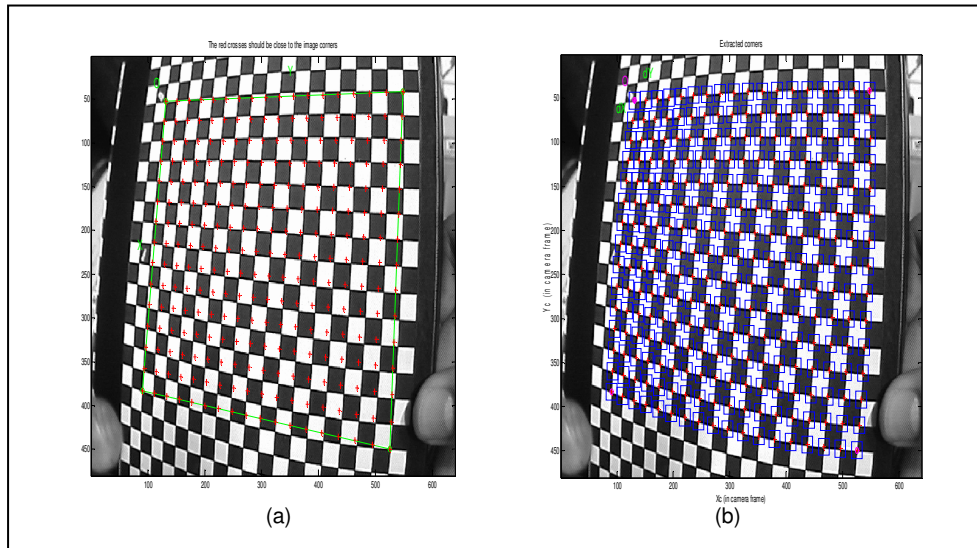


Figura 17. Extracción de puntos de control de la imagen (a) Puntos de Control para imagen libre de distorsiones, (b) Puntos Retroproyectados

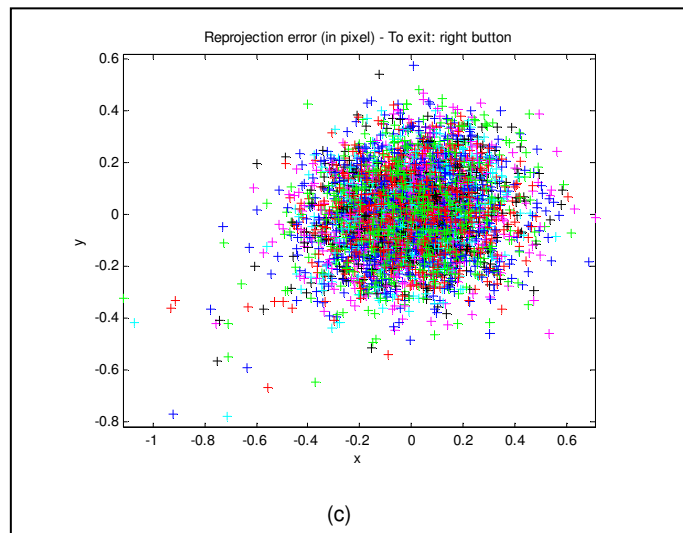


Figura 17 c). Error en píxeles en la retroproyección para la cámara 1

Como resultado de estos procesos se obtuvieron los siguientes parámetros:

- **Parámetros Intrínsecos Cámara CCD 1, 2, 3 y 4**

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos del proceso de calibración para las cámaras utilizadas.

Tabla. 1. Parámetros Intrínsecos cámaras 1, 2, 3 y 4

Parámetro	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4
f_u (píxel)	685.12	682.45	685.49	681.82
f_v (píxel)	683.68	682.15	684.81	680.67
u_o (píxel)	328.80	346.09	378.12	303.24
v_o (píxel)	165.94	181.08	163.08	190.59
k_1 (píxel)	-0.3894	-0.3934	-0.3916	-0.4025
k_2 (píxel)	0.1962	0.1967	0.2041	0.2799
p_1 (píxel)	0.0004	0.0014	-0.0005	-0.0018
p_2 (píxel)	-0.0027	0.0012	0.0005	-0.0006

Donde f_u es la distancia focal del objetivo de cada cámara, (u_o, v_o) son las coordenadas del punto principal de cada cámara, (k_1, k_2) las componentes de la distorsión radial y (p_1, p_2) las componentes de la distorsión tangencial.

- **Parámetros Extrínsecos de las Cámaras CCD 1, 2, 3 y 4**

Los parámetros extrínsecos son calculados con respecto al sistema coordenado O(XYZ) y definidos por:

Cámara CCD 1:

$$R = \begin{bmatrix} 0.180127 & 0.924412 & -0.336179 \\ 0.783570 & 0.071753 & 0.617147 \\ 0.594620 & -0.374585 & -0.711417 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -88.845978 \\ -33.738219 \\ 175.445779 \end{bmatrix}$$

Cámara CCD 2:

$$R = \begin{bmatrix} -0.126847 & 0.810817 & 0.571389 \\ 0.906336 & -0.139334 & 0.398924 \\ 0.403068 & 0.568473 & -0.717199 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -53.011792 \\ -23.940423 \\ 101.291141 \end{bmatrix}$$

Cámara CCD 3:

$$R = \begin{bmatrix} 0.026172 & 0.928971 & -0.369225 \\ 0.999608 & -0.020638 & 0.018928 \\ 0.009964 & -0.369576 & -0.929147 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -93.457726 \\ -22.029004 \\ 169.572131 \end{bmatrix}$$

Cámara CCD 4:

$$R = \begin{bmatrix} 0.017288 & 0.926652 & 0.375523 \\ 0.999610 & -0.024265 & 0.013858 \\ 0.021953 & 0.375137 & -0.926710 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -53.025228 \\ -31.772990 \\ 121.922006 \end{bmatrix}$$

Donde R es la matriz de rotación y T es el vector de translación del sistema coordenado $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$ de cada cámara con respecto al sistema coordenado $O(XYZ)$ del plano de referencia.

Una vez calculados los parámetros intrínsecos y extrínsecos y conociendo las coordenadas (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) se realiza un proceso de retroproyección con el fin de calcular las coordenadas (U_i, V_i) teóricas. Comparando estos valores con los valores experimentales (U_i', V_i') se calcula el error cometido en la aproximación empleada para calcular los parámetros. La Figura 17 (b) muestra la retroproyección de los puntos de control y la figura 17 (c) muestra el error de retroproyección correspondientes a la cámara CCD 1, para todos los puntos de control empleados. Se obtiene un valor medio de 0.185 pixeles en X y 0.185 pixeles en Y.

2.4 ANÁLISIS DE ERROR EN EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Aunque el anterior error verifica la precisión en el cálculo de los parámetros, se desea medir la influencia de esta precisión al medir distancias en milímetros en el espacio objeto, utilizando los puntos de control de la cuadrícula ubicada en $Z=0$.

Es decir, las coordenadas en mm de los puntos de control ubicados en $Z=0$ se conocen teóricamente y se calculan sus correspondientes coordenada en píxeles (U',V') con distorsión. Se pretende hacer el proceso inverso de proyección para obtener las coordenadas en mm a partir de (U',V') usando los parámetros de calibración, la diferencia entre estas coordenadas define el error que se comete al ubicar un punto en el plano a $Z=0$.

El primer paso a seguir para la estimación de las coordenadas (x, y) en milímetros en el espacio objeto para un valor de $Z=0$, usando el patrón de calibración, es obtener sus coordenadas distorsionadas (U',V') .

En el modelo de proyección puntual utilizado, el punto sobre la imagen en píxeles pasa por el centro óptico y llega hasta el punto sobre el objeto. Es decir, la línea recta que une estos puntos se puede calcular siempre que se obtengan las coordenadas en píxeles del punto sin aberraciones. Estas coordenadas corregidas (U,V) se obtienen al restarle a (U',V') las distorsiones geométricas como se muestra en la Figura 18.

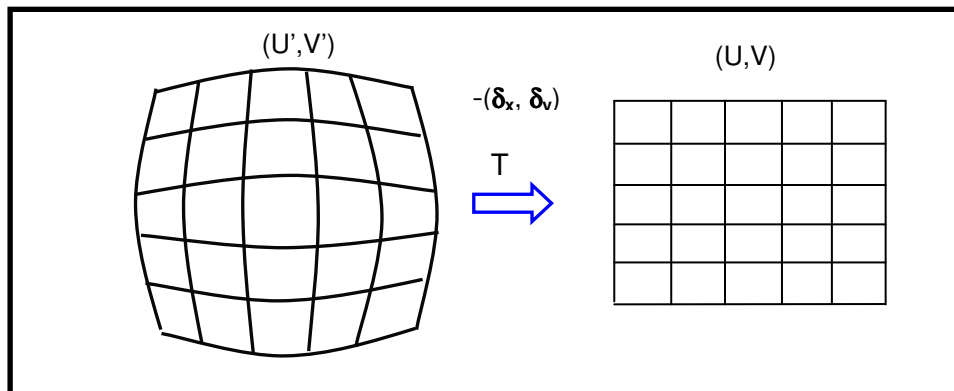


Figura 18. Transformación Geométrica que relaciona píxeles distorsionados a no distorsionados

Las distorsiones geométricas definidas por las ecuaciones (9) y (10) generan un inconveniente al calcular δ_x y δ_y y sus correspondientes coordenadas en píxeles δ_u y δ_v fueron definidos en función de las coordenadas (X_u, Y_v) de los puntos libres de distorsión, pero sobre la imagen se tiene acceso únicamente a la coordenada (U', V') con aberraciones. Por lo tanto no es posible calcular δ_x y δ_y , para esto se necesita relacionar δ_x y δ_y con (X_u', Y_v') a través de cuatro coeficientes k_1', k_2' y P_1', P_2' , de manera similar a como se relaciona en (X_u, Y_v) en las ecuaciones (9) y (10).

$$\begin{aligned}\delta_x^r &= k_1' X_u' (X_u'^2 + Y_v'^2) + k_2' X_u' (X_u'^2 + Y_v'^2)^2 + O[(X_u', Y_v')^7] \\ \delta_y^r &= k_1' Y_v' (X_u'^2 + Y_v'^2) + k_2' Y_v' (X_u'^2 + Y_v'^2)^2 + O[(X_u', Y_v')^7]\end{aligned}\quad (30)$$

$$\begin{aligned}\delta_x^d &= P_2' (3X_u'^2 + Y_v'^2) + 2P_1' X_u' Y_v' + O[(X_u', Y_v')^4] \\ \delta_y^d &= 2P_2' X_u' Y_v' + P_1' (X_u'^2 + 3Y_v'^2) + O[(X_u', Y_v')^4]\end{aligned}\quad (31)$$

El cálculo de estos coeficientes conduce a un sistema lineal de ecuaciones y se ilustra en la Figura 19. Se define una matriz de puntos (X_u, Y_v) teóricos equidistantes a partir de k_1, k_2 y P_1, P_2 y de las ecuaciones (9) y (10) se calculan los (X_u', Y_v') correspondientes. Usando las ecuaciones (30) y (31) se obtiene una relación lineal entre los coeficientes k_1', k_2' y P_1', P_2' puesto que los otros términos se conocen. Al resolver el sistema de ecuaciones se obtienen k_1', k_2' y P_1', P_2' . De esta manera se calcula δ_x y δ_y en función de (X_u', Y_v') .

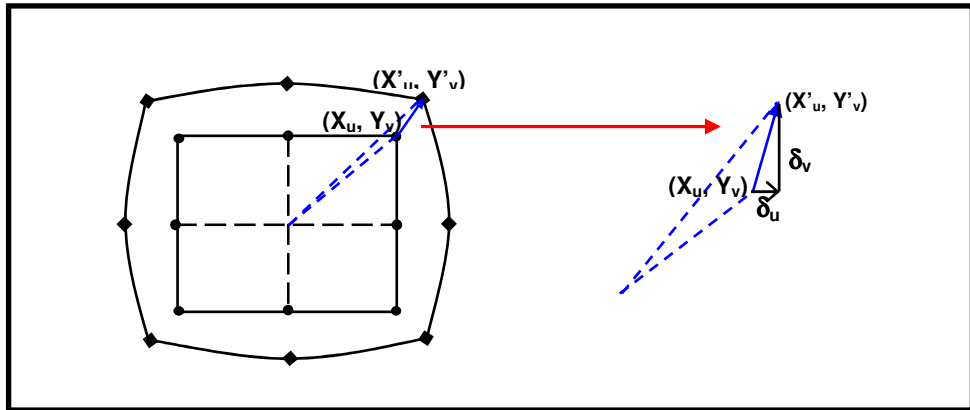


Figura 19. Relación de píxeles distorsionados a no distorsionados

A partir de las coordenadas en píxeles se encuentran sus correspondientes coordenadas en milímetros (X_u, Y_v), usando los parámetros intrínsecos obtenidos. Con estos puntos y con la coordenada $O_c(0,0,0)$ se calcula la ecuación de la recta O_cP en el sistema coordenado de la cámara, Figura 20.

Las coordenadas de P se obtienen de la intersección de la línea $\overline{O_cP}$ con el plano ubicado en $Z_w=0$. La ecuación del plano se calcula con la normal, que es el eje Z_w , y un punto del plano que podría ser el origen O del sistema coordenado del objeto. Esta coordenada debe ser calculada en el sistema coordenado de la cámara para obtener la posición de P en el sistema coordenado (X_c, Y_c, Z_c) . Usando los parámetros extrínsecos, se calculan las coordenadas de $P(X_w, Y_w, Z_w)$ en el sistema coordenado del objeto.

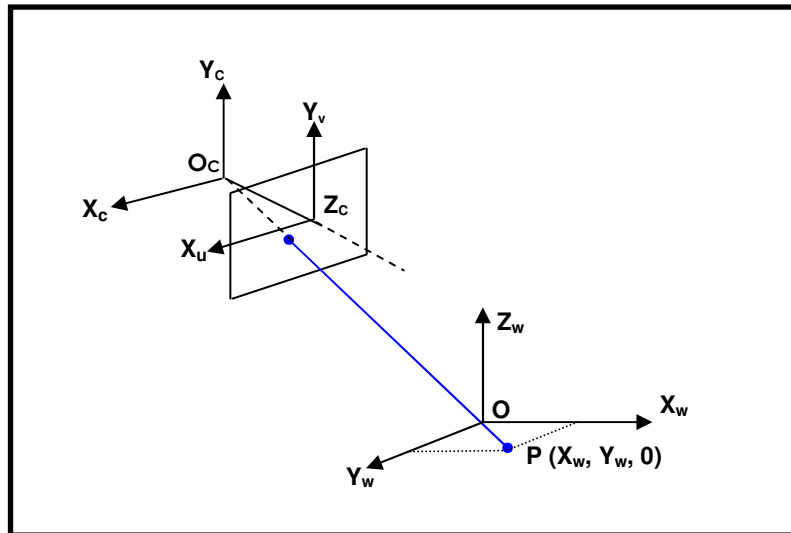


Figura 20. Geometría para determinar las coordenadas de un punto en el espacio objeto

Las figuras 21, 22, 23 y 24 muestran la imagen obtenida por cada cámara, en donde se determinó la posición (X_u, Y_v) de algunos puntos sobre el patrón de calibración para cada cámara individualmente, ubicada a $Z_w=0$.

Las tablas 1, 2, 3 y 4 muestran los valores reales (VR) y los valores estimados (VE) de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos. El error se determina como la distancia entre los puntos reales y los puntos estimados, de la siguiente manera:

$$D = \sqrt{(XT - XE)^2 + (YT - YE)^2} \quad (32)$$

La distancia media se calcula para verificar la influencia de los valores obtenidos en el cálculo de los parámetros del sistema mediante la ecuación (33).

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{n} , \quad (33)$$

donde n es el número de datos.

El error porcentual se calcula de la siguiente manera:

$$\%E = \frac{\bar{D}}{C} * 100 , \quad (34)$$

donde C es el campo de trabajo de la imagen equivalente a 160mm.

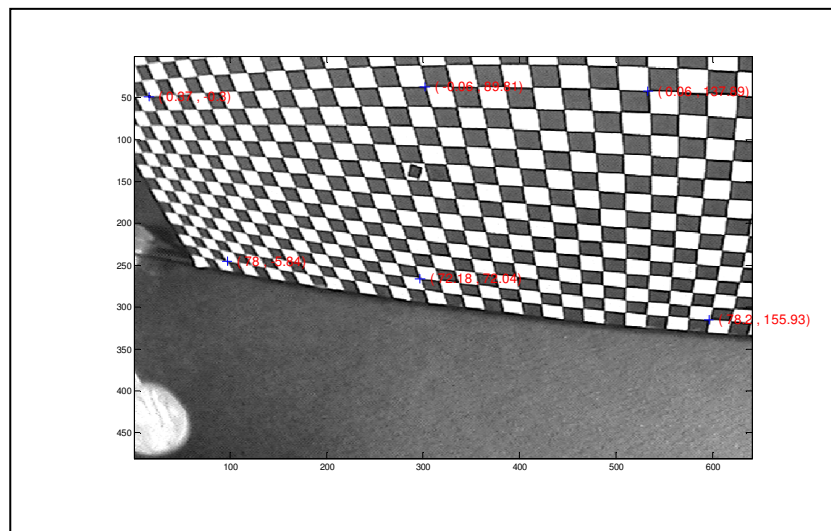


Figura 21. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 1.

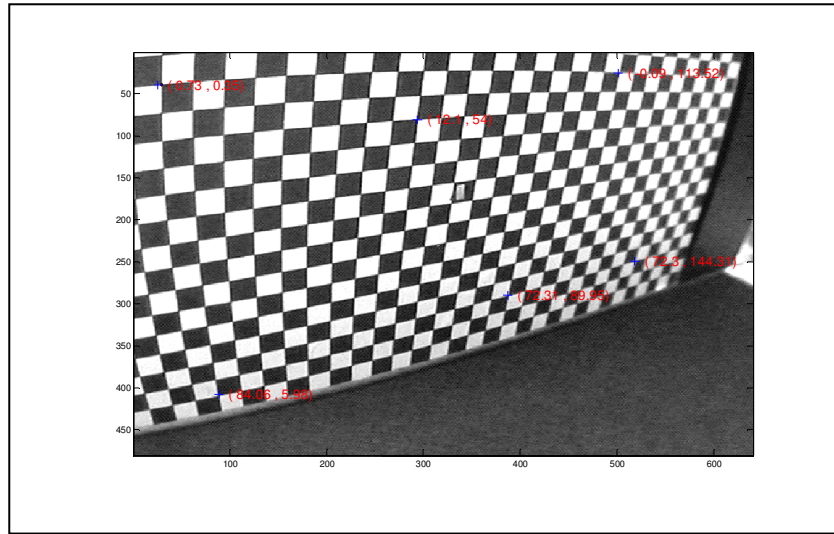


Figura 22. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 2.

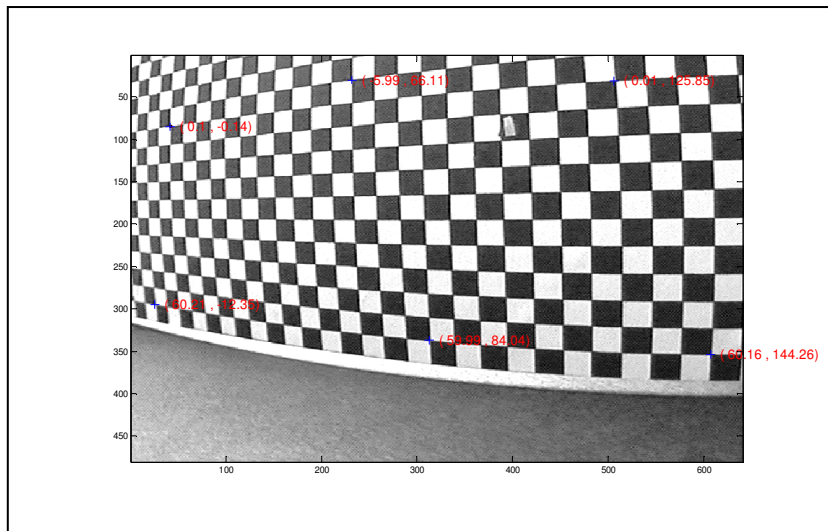


Figura 23. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 3.

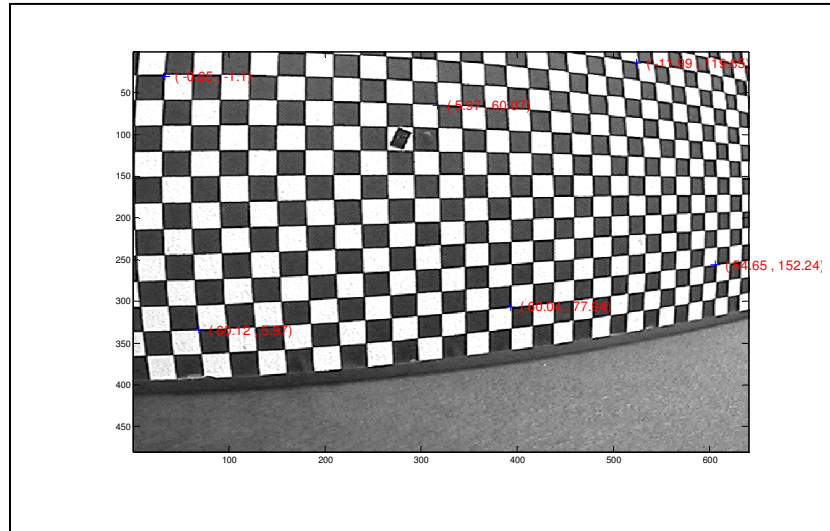


Figura 24. Estimación de las coordenadas (X,Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración para la Cámara 4.

2.4.1. Distancia entre VR y VE, y estimación de error para la Cámara 1

Tabla 2. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la Cámara CCD 1

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	0.37	0	-0.30	0.48
78	78.00	-6	-5.84	0.16
0	-0.06	90	89.81	0.20
72	72.18	72	72.04	0.18
0	0.06	138	137.89	0.13
78	78.20	156	155.93	0.21
\bar{D}				0.23
%E				0.14

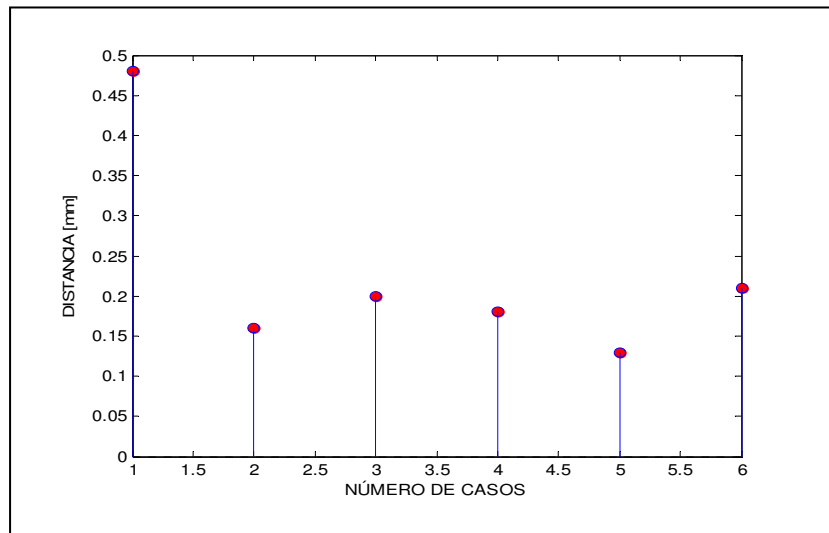


Figura 25. Distribución de distancia entre los VR y VE de la CCD1

2.4.2. Distancia entre VR y VE y estimación de error para la Cámara 2

Tabla 3. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD2

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	0.73	0	0.35	0.81
84	84.06	6	5.98	0.06
12	12.10	54	54.00	0.10
72	72.31	90	89.95	0.31
0	-0.09	114	113.52	0.49
72	72.3	144	144.31	0.43
\bar{D}				0.37
%E				0.23

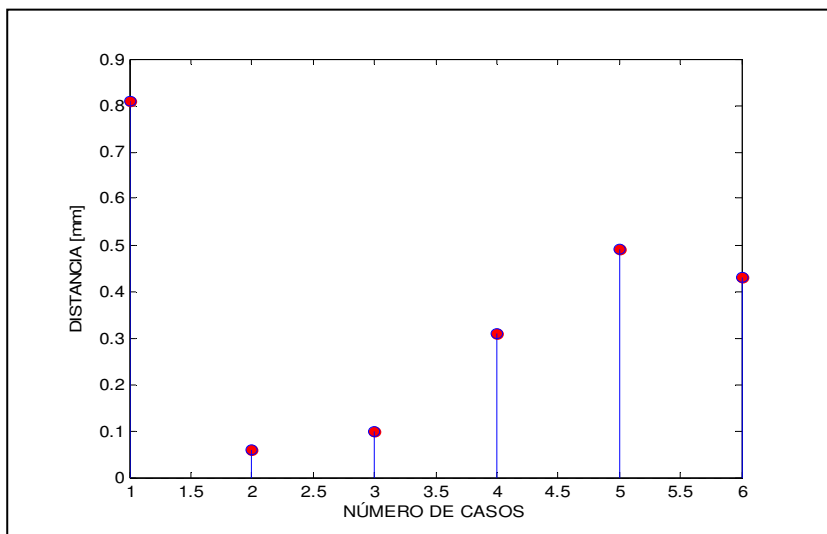


Figura 26. Distribución de distancia entre los VR y VE de la CCD2

2.4.3. Distancia entre VR y VE y estimación de error para la Cámara 3

Tabla 4. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD3

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	0.10	0	-0.14	0.17
60	60.21	-12	-12.35	0.41
-6	-5.99	66	66.11	0.11
60	59.99	84	84.04	0.04
0	0.01	126	125.85	0.15
60	60.16	144	144.26	0.31
\bar{D}				0.20
%E				0.12

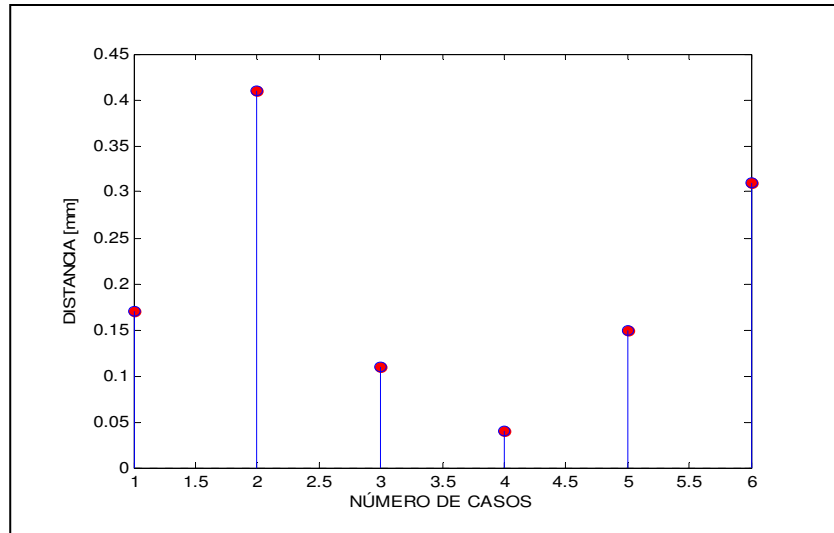


Figura 27. Distribución de distancia entre los VR y VE de la CCD3

2.4.4. Distancia entre VR y VE y estimación de error para la Cámara 4

Tabla 5. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD4

Coordenada X (mm)		Coordenada Y (mm)		Distancia (mm)
VR (mm)	VE (mm)	VR(mm)	VE(mm)	
0	-0.51	0	-1.20	1.30
60	59.79	12	11.98	0.21
6	6.04	54	53.86	0.15
48	47.90	66	66.15	0.18
-12	-11.34	126	125.56	0.79
60	59.74	138	138.10	0.28
\bar{D}				0.49
%E				0.30

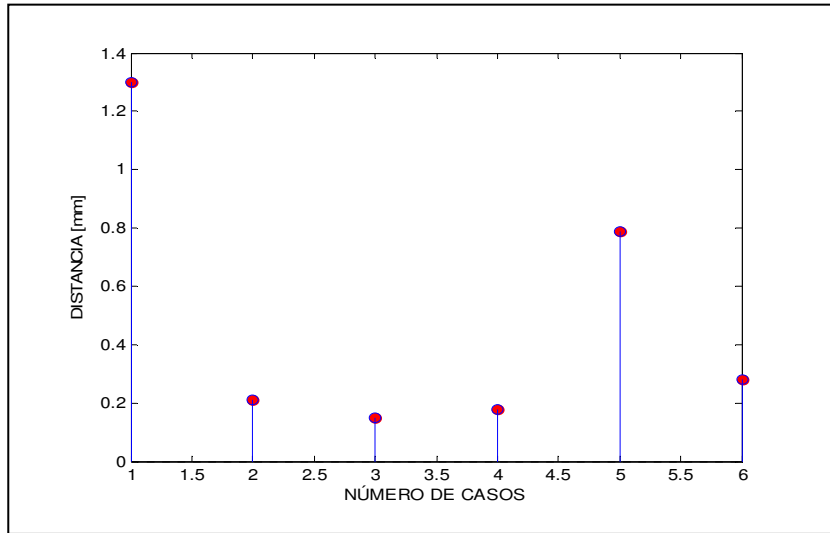


Figura 28. Distribución de distancia entre los VR y VE de la CCD4

Para la cámara 1 el sistema reporta un error de 0.23 mm encontrándose un porcentaje de error de 0.14% al ubicar un punto sobre el plano de referencia en $Z_w=0$ para un campo de observación de 160 mm. Para la cámara 2 el sistema reporta un error de 0.37 mm con un porcentaje de error de 0.23%. Para la cámara 3 el sistema reportan un error de 0.20 mm, con un porcentaje de error de 0.12%. Para la cámara 4 el error del sistema es de 0.49 mm con un porcentaje de error de 0.30%.

Este error se puede reducir usando más coeficientes en la modelización de la distorsión radial y tangencial, principalmente.

2.5 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL COMPLETA

En el capítulo anterior se mostró como se realiza la reconstrucción tridimensional de un objeto, obteniéndose una imagen 3D de la superficie, pero con unidades transversales en píxeles. En esta sección se mostrará cómo se utilizan los parámetros de la cámara para convertir píxeles a milímetros del objeto, teniendo en cuenta las distorsiones geométricas y la perspectiva visual de la cámara.

La Figura 29 muestra una reconstrucción tridimensional del objeto realizado según el procedimiento indicado en el capítulo 1: a cada píxel le corresponde una altura del objeto; el cálculo de las coordenadas (X,Y) se muestra en la Figura 30 y se basa en el procedimiento mostrado en la sección anterior. Al píxel i , sobre el plano imagen se le calculan las coordenadas (X_u, Y_v) eliminando las distorsiones geométricas, a partir de los parámetros intrínsecos. Después se calcula la ecuación de la recta $\overline{O_c P_i}$ en el espacio del sistema coordinado de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) . Esta línea se intercepta con el plano Z_w que tiene un valor de altura dado por la altura que posee el píxel P_i este valor de Z se calcula usando la curva de calibración del sistema de triangulación láser. De la intersección se obtiene (X_i, Y_i) para el píxel P_i . Realizando el anterior procedimiento para todos los puntos trasladados se obtiene una reconstrucción tridimensional completa, como se muestra en la Figura 31.

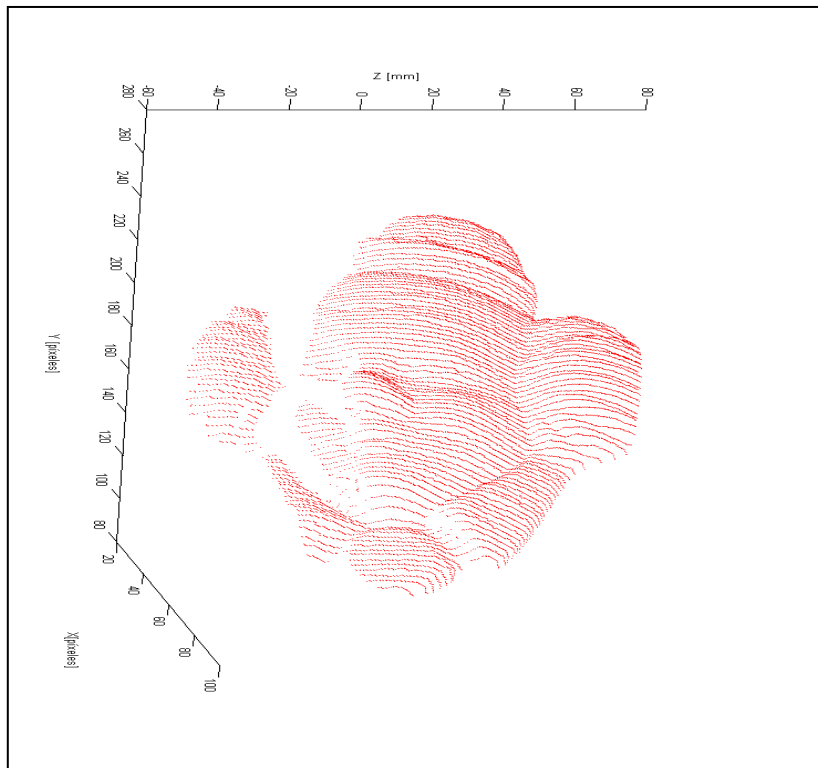


Figura 29. Reconstrucción parcial utilizando una cámara

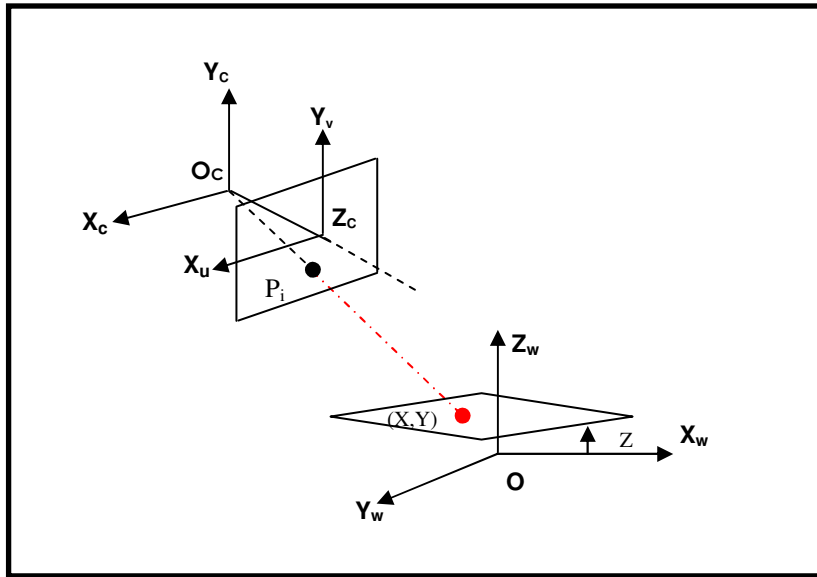


Figura 30. Ubicación de un punto

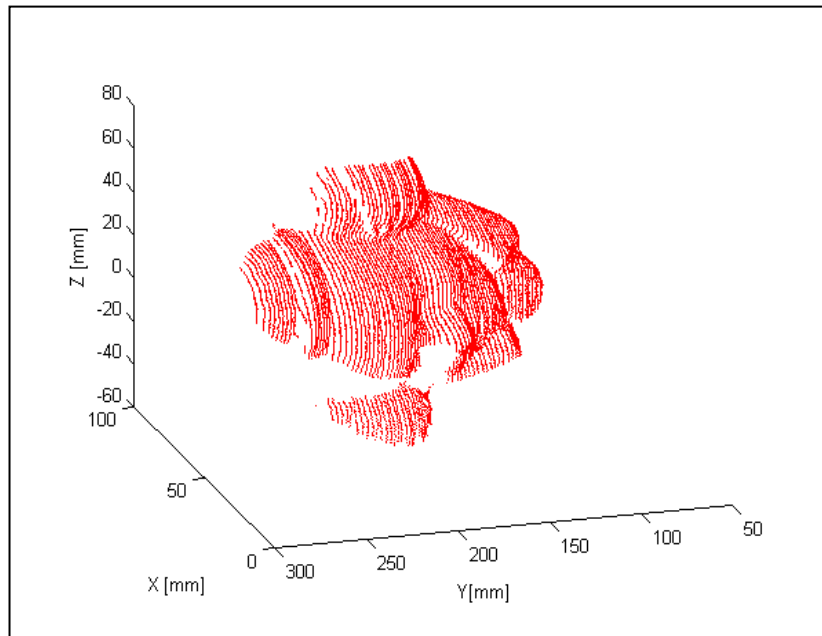


Figura 31. Reconstrucción tridimensional completa.

CAPITULO 3

SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL IMPLEMENTADO

3.1 INTRODUCCIÓN

La técnica de reconstrucción tridimensional por triangulación consiste básicamente de un sistema de iluminación láser, un sistema de observación y un sistema de desplazamiento. En los capítulos anteriores se mostró el procedimiento de reconstrucción tridimensional de un objeto por triangulación láser. En este capítulo se muestra el sistema de reconstrucción tridimensional implementado para obtener información metrológica del pie humano.

Son impuestas las siguientes condiciones sobre el objeto a explorar: 1. La resolución debe ser del orden de un milímetro o inferior. 2. Se debe obtener información a 360° de observación. 3. El objeto se ubica inmóvil sobre una superficie plana. El objeto principal de este trabajo de investigación fue el de validar la técnica de triangulación láser para extraer información tridimensional del pie. En estas condiciones, el sistema implementado corresponde a un modelo preliminar de funcionamiento construido a condiciones de laboratorio. Trabajos posteriores permitirán, con base en los resultados obtenidos en este trabajo, construir un prototipo industrial para usarse en ambientes médicos-podométricos.

En este capítulo se describe detalladamente el sistema implementado para realizar la reconstrucción tridimensional del pie humano. En la sección 3.2, se describe el montaje. En la sección 3.3 se muestra el proceso utilizado en la reconstrucción. En la sección 3.4, se muestra el proceso experimental para llevar el sistema coordinado de cada cámara CCD a un sistema coordinado único y por último en la sección 3.5 se realiza el análisis del error en el cálculo de las coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) , sobre el sistema unificado.

3.2 SISTEMA ÓPTICO DE TRIANGULACIÓN LÁSER IMPLEMENTADO

El sistema construido (Figura 32), consta de los siguientes módulos:

- **MÓDULO DE ILUMINACIÓN**
 1. Láser 1
 2. Sistema óptico (formador del plano láser) 1
 3. Láser 2
 4. Sistema óptico (formador del plano láser) 2
 5. Espejo

- **MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES**
 6. Cámara CCD 1
 7. Cámara CCD 2
 8. Cámara CCD 3
 9. Cámara CCD 4

- **MÓDULO DE DESPLAZAMIENTO**
 10. Sistema de desplazamiento manual

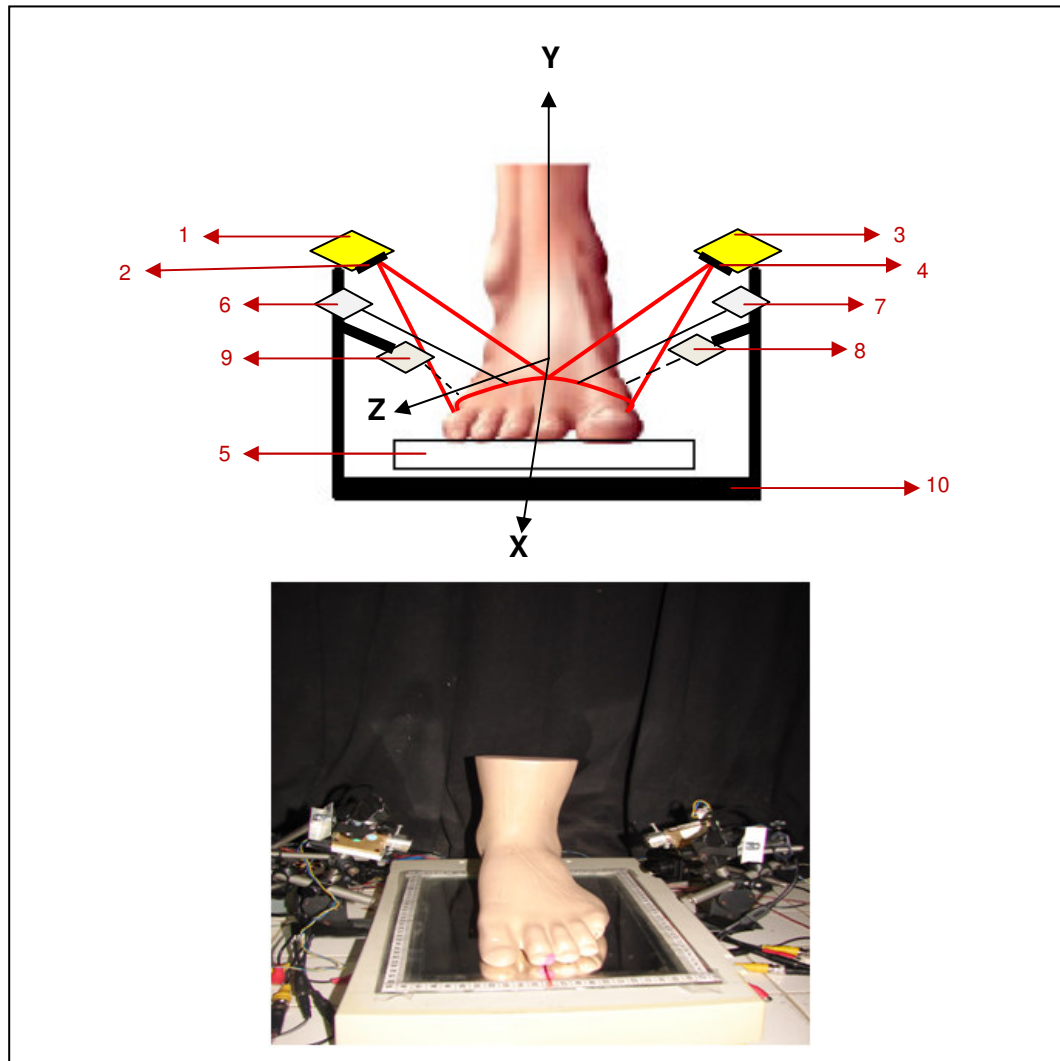


Figura 32. Montaje Experimental

El sistema de iluminación está diseñado de tal forma que el plano láser 1 y el plano láser 2 se llevan a un único plano por medio de un sistema de alineación soportado sobre el sistema de desplazamiento axial. De esta manera se obtiene un único plano láser que se hace incidir perpendicular a la plataforma donde está dispuesto un espejo y sobre la cual va apoyado el objeto; formándose una curva continua cuando intercepta la superficie del objeto a reconstruir (línea continua sobre el pie). Las cámaras CCD 1, 2, 3 y 4, forman un ángulo de inclinación respecto al plano láser y están ubicadas de tal forma que observan tanto las partes internas como las externas de la línea sobre el pie. Tanto los dispositivos generadores de línea láser como las 4 cámaras CCD se desplazan simultáneamente

gracias a un sistema de desplazamiento axial de forma manual. El módulo de desplazamiento axial y el de iluminación están alineados de tal forma que cuando todo el sistema se desplaza, siempre se mantiene continua la curva de intersección entre el plano láser y la superficie del cuerpo. Se utilizó una tarjeta de adquisición Matrox-Meteor II, para digitalizar las imágenes enviadas por cada cámara CCD utilizando un software de adquisición construido en MATLAB®. Las imágenes fueron almacenadas y luego procesadas secuencialmente. Cada imagen digitalizada tenía una resolución de 640X480 píxeles.

3.3 PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

A continuación se describe el proceso de reconstrucción de un objeto en forma de prisma. El proceso está dividido en 3 etapas:

- Captura de las imágenes

- Procesamiento de las imágenes
 - Corrección de distorsión
 - Extracción de las coordenadas (U,V) de los puntos representativos de cada línea

- Procesamiento de datos
 - Obtención de las coordenadas (X,Y,Z) para cada cámara
 - Unificación experimental de sistemas coordenados

3.3.1 CAPTURA DE LAS IMÁGENES

El procedimiento de adquisición de imágenes para la reconstrucción tridimensional se realiza mediante el desplazamiento manual de un soporte que contiene a los sistemas de iluminación y de captura. La línea láser se desplaza axialmente recorriendo el objeto a reconstruir, a intervalos conocidos y constantes.

Cada cámara CCD adquiere una imagen de la perspectiva debida a su ángulo relativo con el plano de referencia y su posición en relación a la línea láser, que se deforma según la superficie del objeto.

A continuación se muestra en las Figuras 33, 34, 35 y 36, una imagen adquirida por las cámaras CCD 1, 2, 3, y 4, en la misma posición de barrido que se realiza con la línea láser sobre un objeto con forma de prisma triangular, respectivamente.



Figura 33. Imagen capturada por la cámara CCD 1



Figura 34. Imagen capturada por la cámara CCD 2

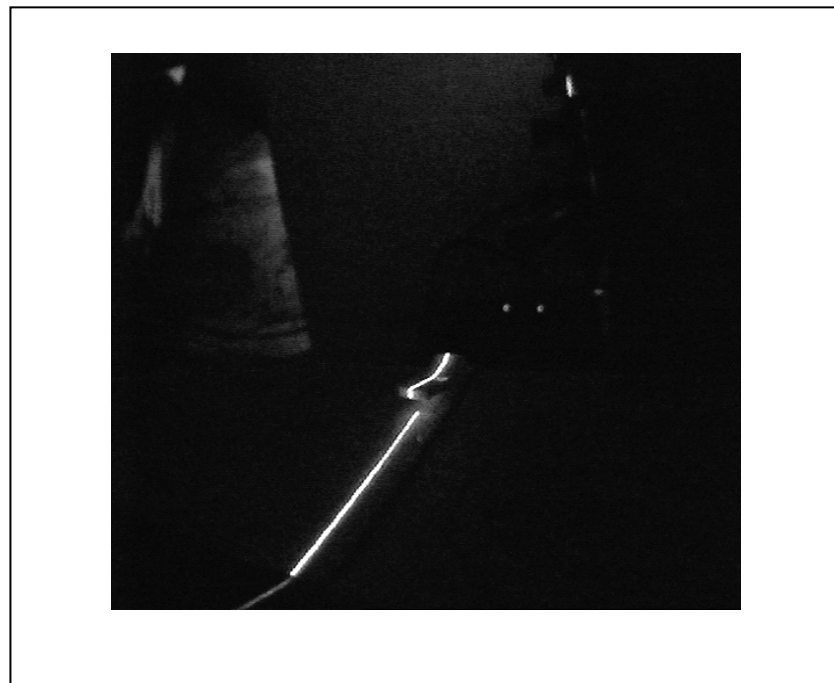


Figura 35. Imagen capturada por la cámara CCD 3



Figura 36. Imagen capturada por la cámara CCD 4

3.3.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

- **CORRECCIÓN DE DISTORSIÓN**

Antes de realizar cualquier medida sobre las imágenes capturadas, cada una es debidamente rectificadas con la ayuda de los parámetros intrínsecos y extrínsecos obtenidos en el proceso de calibración de las cámaras.

- **EXTRACCIÓN DE COORDENADAS (U,V)**

Realizando un corte transversal a la línea láser, su distribución en intensidades es aproximadamente Gaussiana (Figura 37). Se puede asumir que las coordenadas (U, V) de los puntos que representan la intercepción del plano láser con la superficie del cuerpo a reconstruir son en aproximación, las coordenadas (U, V) de la posición central del corte transversal.

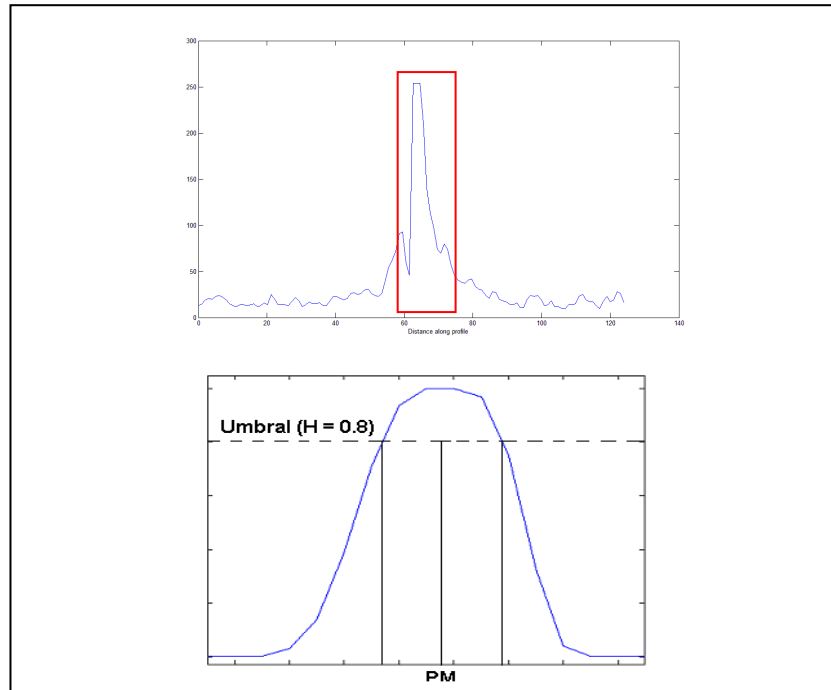


Figura 37. Corte transversal de la línea láser

Para obtener estos puntos primero se realiza un pretratamiento clásico de suavizado para reducir la influencia del speckle y del ruido de fondo debido a la iluminación ambiental. Luego se realiza una binarización, utilizando el rango de valores en niveles de gris de la Distribución Gaussiana de la línea láser. Se definió un umbral de binarización según el siguiente criterio:

$$UMBRAL = I_{min} + H(I_{max} - I_{min}) \quad (35)$$

Donde I_{min} e I_{max} son los valores de las intensidades mínimas y máximas respectivamente de la Distribución Gaussiana y H es un valor comprendido entre 0 y 1 que se ajusta dependiendo del nivel de ruido de toda la imagen. La posición del punto medio (PM) del rango en píxeles con niveles de gris superior al valor del umbral, definen la posición central de la Distribución Gaussiana. Este procedimiento se realiza para cada línea de cada imagen adquirida en el barrido láser. Las Figuras 38, 39, 40 y 41, muestran los puntos representativos de la línea láser capturadas para las cámaras 1, 2, 3, y 4 respectivamente usando un valor de $H = 0.8$.

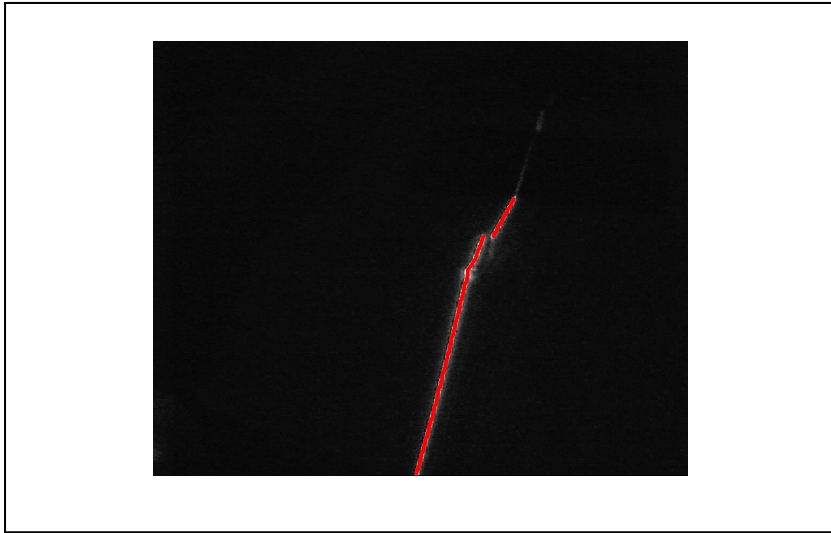


Figura 38. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la Cámara 1

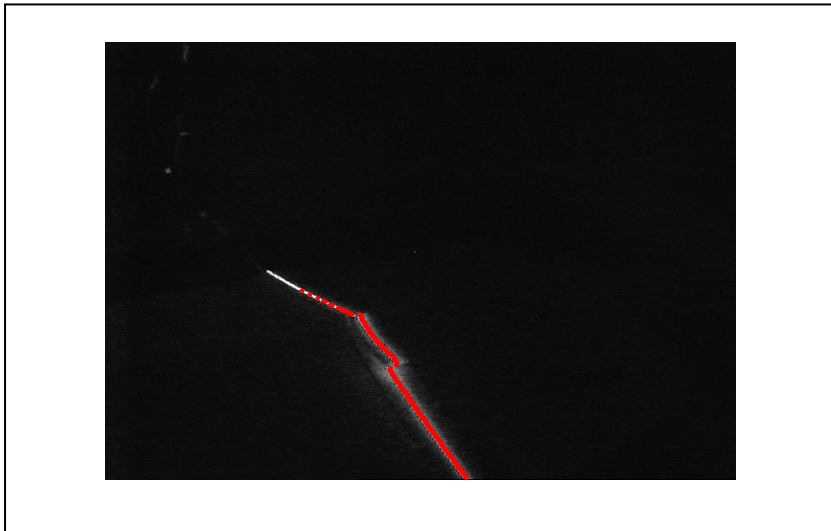


Figura 39. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la Cámara 2



Figura 40. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la Cámara 3

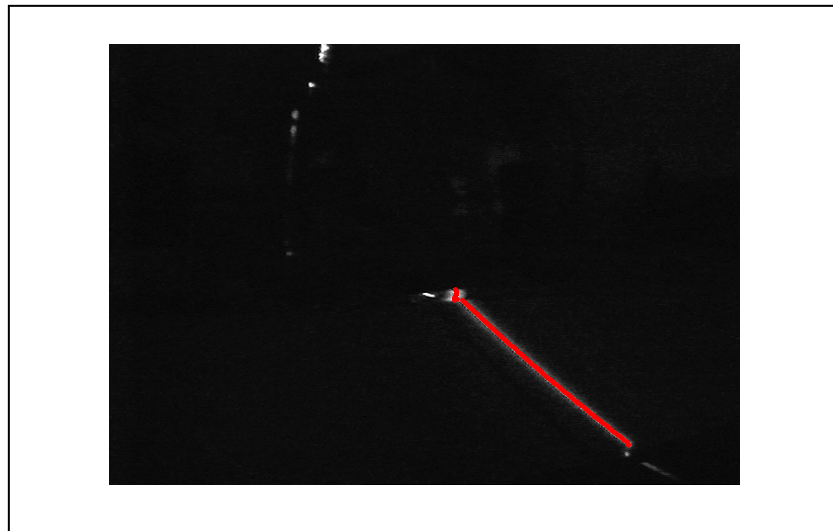


Figura 41. Determinación de los puntos centrales de la línea láser para la Cámara 4

3.3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

Cada cámara adquiere una sección de la línea láser continua sobre el objeto para una posición en dirección axial, al eje X del sistema coordenado unificado. De igual manera

cada cámara define un sistema coordenado del objeto, independiente entre sí. La Figura 42, muestra los sistemas coordenados de cada cámara. Sobre el plano de referencia ubicado perpendicular a la superficie donde se ubica el objeto se ubicarán las cuadrículas, una por cada lado, utilizadas para calcular los parámetros extrínsecos de cada cámara, lo que define el sistema coordenado de cada una. El plano de referencia se desplaza en dirección paralela al eje axial para calcular la curva de calibración de cada sistema de triangulación láser. Las curvas de calibración que se muestran en la Figura 43 corresponden a un $\Delta Z=5\text{mm}$ desde -8 cm hasta 8 cm . Una vez calculados los puntos centrales en cada línea de cada imagen se calcula la coordenada Z usando las curvas de calibración. De igual forma como se indica en la sección 2.3 se realiza la conversión de píxeles a milímetros para las coordenadas (X,Y) .

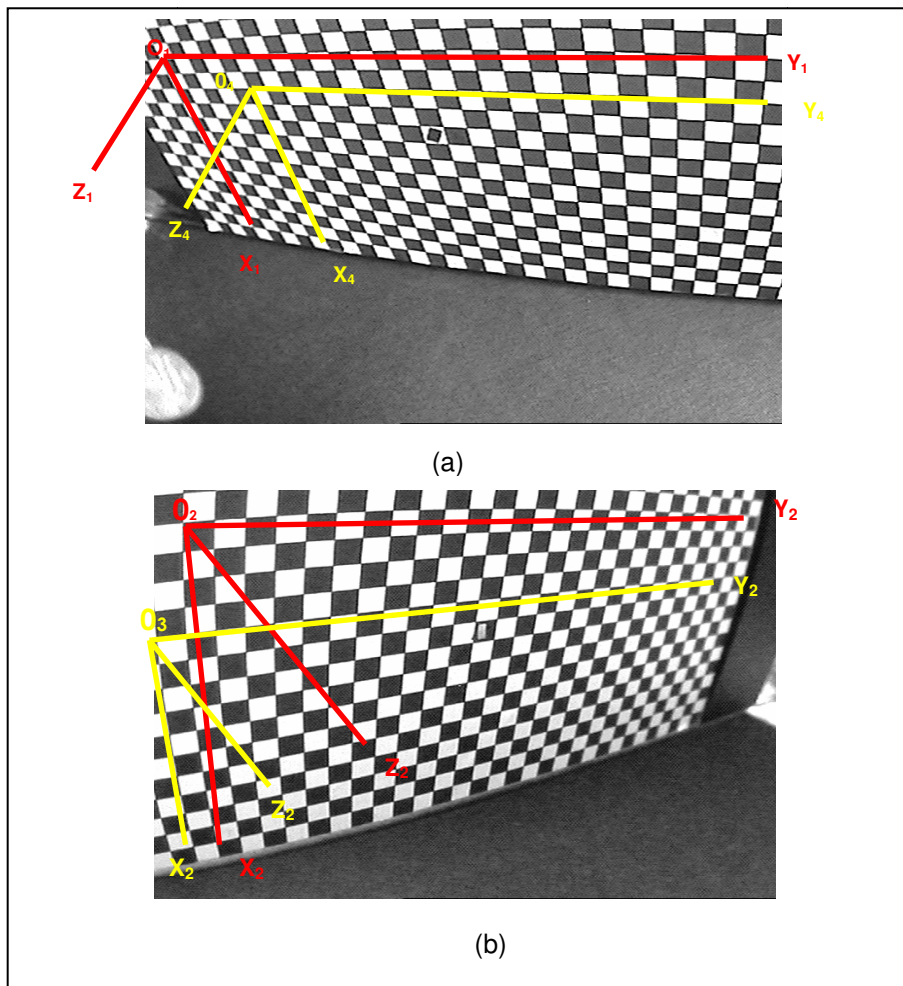


Figura 42. a) Sistema coordenado de las cámaras 1 y 4. b) Sistema coordenado de las cámaras 2 y 3.

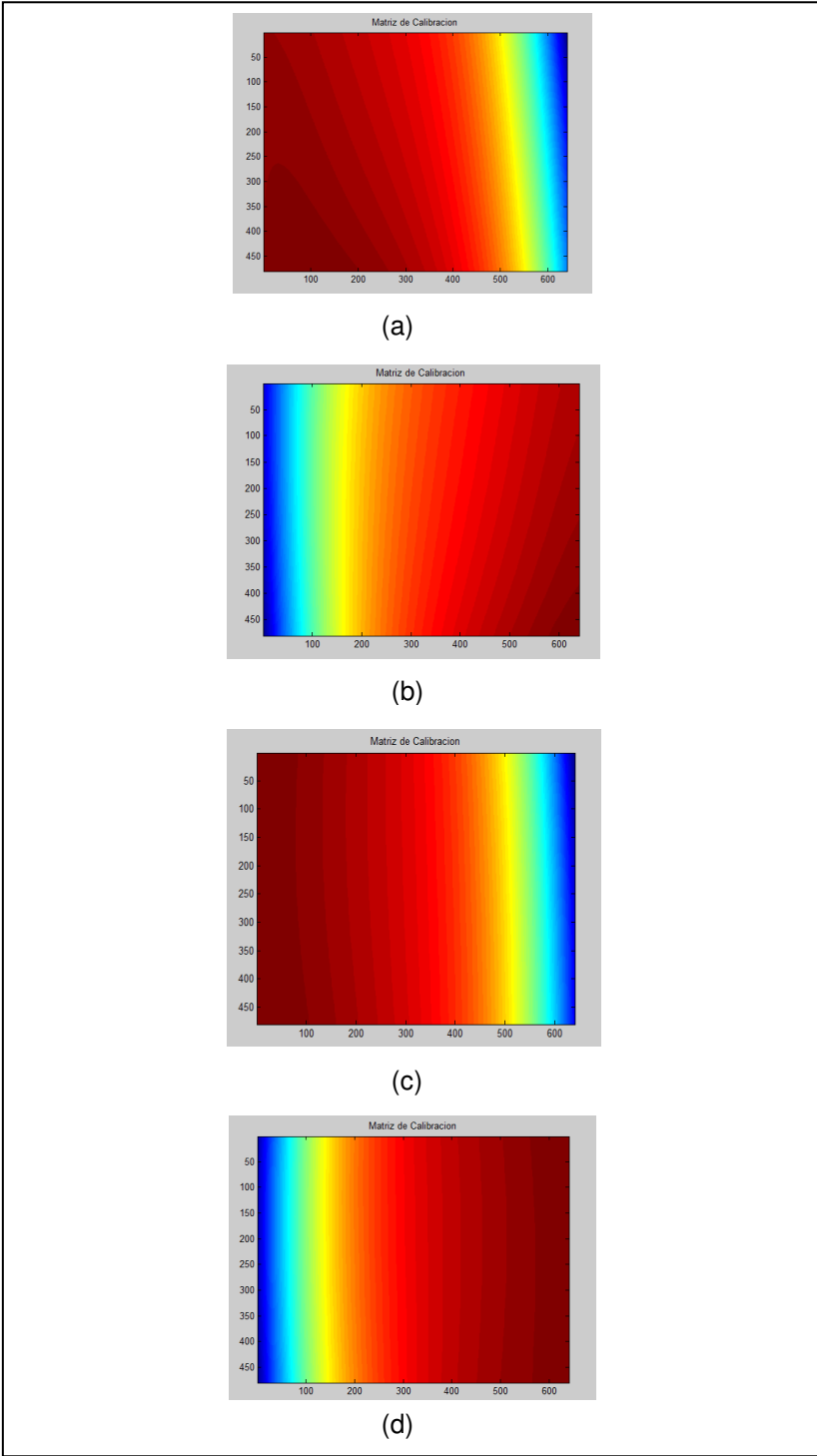


Figura 43. Curvas de calibración de las cámaras CCD 1 (a) CCD 2 (b) CCD 3 (c) CCD 4(d), para $\Delta Z=5\text{mm}$ desde -8 cm hasta 8 cm

Repetiendo el procedimiento anterior para las diferentes posiciones del plano láser sobre la superficie se obtiene la reconstrucción 3D muestreada de la superficie del objeto. Las Figuras 44, 45, 46 y 47 muestran la reconstrucción 3D en cada línea proyectada, para cada cámara.

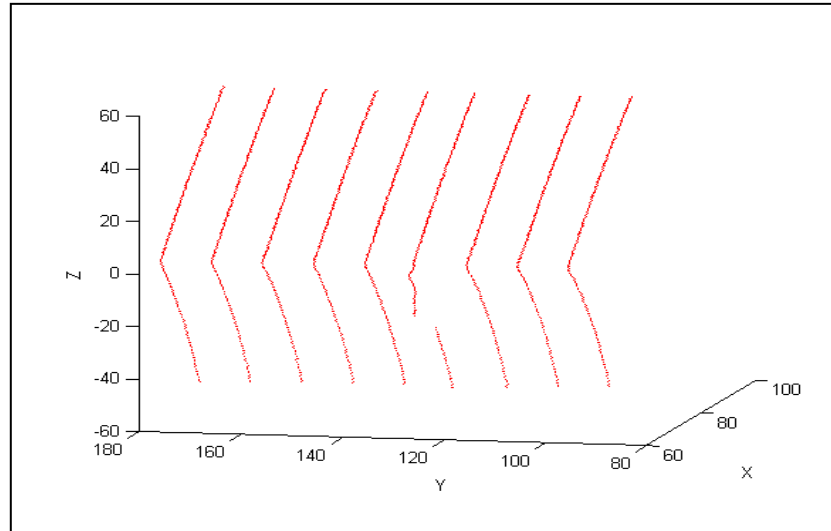


Figura 44. Reconstrucción 3D del triángulo de prueba según la Cámara 1

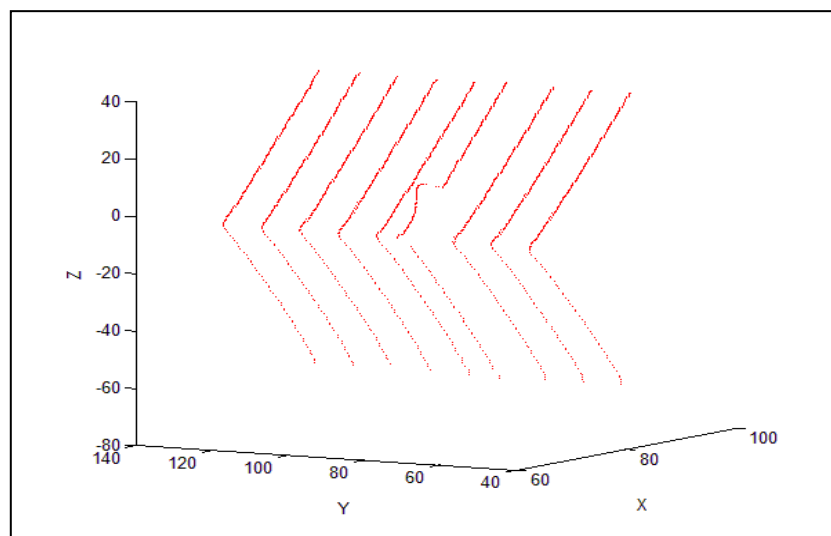


Figura 45. Reconstrucción 3D del triángulo de prueba según la Cámara 2

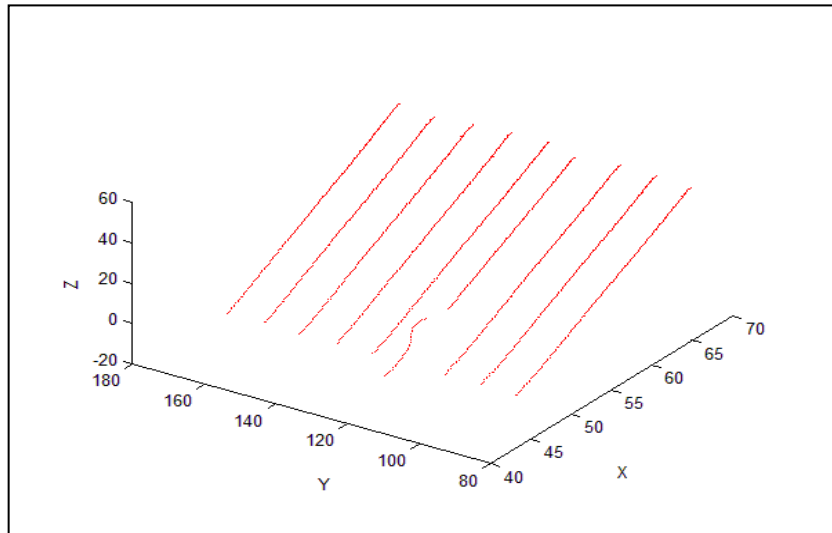


Figura 46. Reconstrucción 3D del triángulo de prueba según la Cámara 3

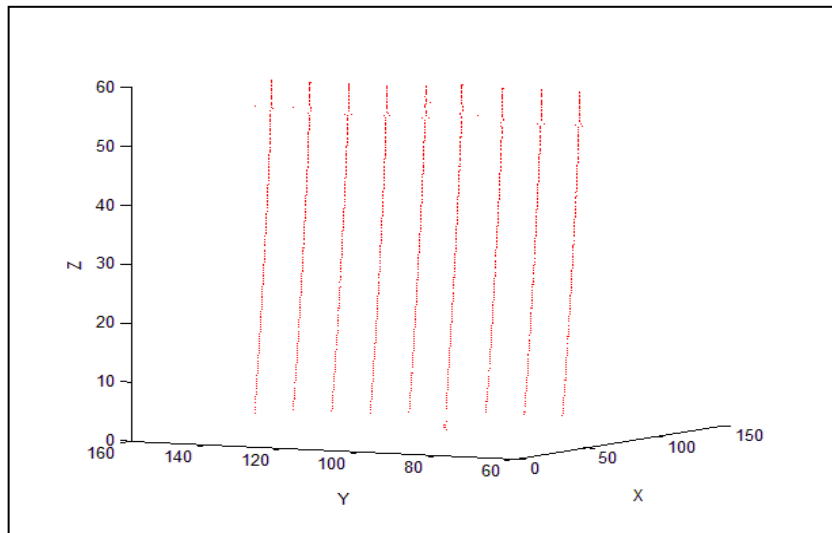


Figura 47. Reconstrucción 3D del triángulo de prueba según la Cámara 4

3.4 UNIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE SISTEMAS COORDENADOS

Puesto que la idea fundamental es aprovechar las perspectivas de cada cámara para reconstruir tridimensionalmente el objeto de interés, se hace necesario unificar la información que proviene de cada una de ellas. Como cada cámara impone un sistema

coordenado independiente, bien definido en la cuadrícula ubicada a cada lado del plano de referencia, es necesario determinar las ecuaciones del plano de formación entre sistemas coordenados para unificar las reconstrucciones tridimensionales independientes, y obtener una única reconstrucción tridimensional.

Como se mencionó anteriormente, los parámetros extrínsecos dan la localización y orientación de cada cámara con respecto al plano de referencia a través de la matriz de rotación y el vector de traslación.

Dos estrategias se utilizan para determinar las ecuaciones de transformación entre sistemas coordenados. En primer lugar, como las dos cámaras ubicadas al mismo lado del plano de referencia usan la misma cuadrícula para calcular los parámetros extrínsecos, sus ejes son paralelos entre sí, lo cual implica que no hay rotación, se requiere calcular el vector de traslación entre orígenes. Este vector se calcula usando las posiciones en la cuadrícula de los orígenes de cada sistema coordenado. Puntos comunes de la cuadrícula a cada cámara con coordenadas espaciales conocidas sirven para optimizar la búsqueda del vector de traslación entre los sistemas coordenados de cada lado. De esta manera las reconstrucciones tridimensionales de las cámaras 1-4 y 2-3, se unifican entre sí, completándose su información. Las Figuras 48 y 49 muestran sus reconstrucciones tridimensionales superpuestas.

Por otra parte, debido al espesor de la lámina de vidrio y a la orientación de cada cuadrícula, fue necesario utilizar un objeto de forma conocida para calcular la transformación de coordenadas entre los sistemas coordenados de las cámaras 1-4 y 2-3. Esto implica que las ecuaciones de transformación óptima entre estos sistemas coordenados debe minimizar la diferencia de las reconstrucciones tridimensionales comunes entre las reconstrucciones de 1-4 y 2-3. Con base en estas zonas comunes se calcularon las transformaciones de los sistemas coordenados para definir un único sistema coordenado unificado mostrado en la Figura 50.

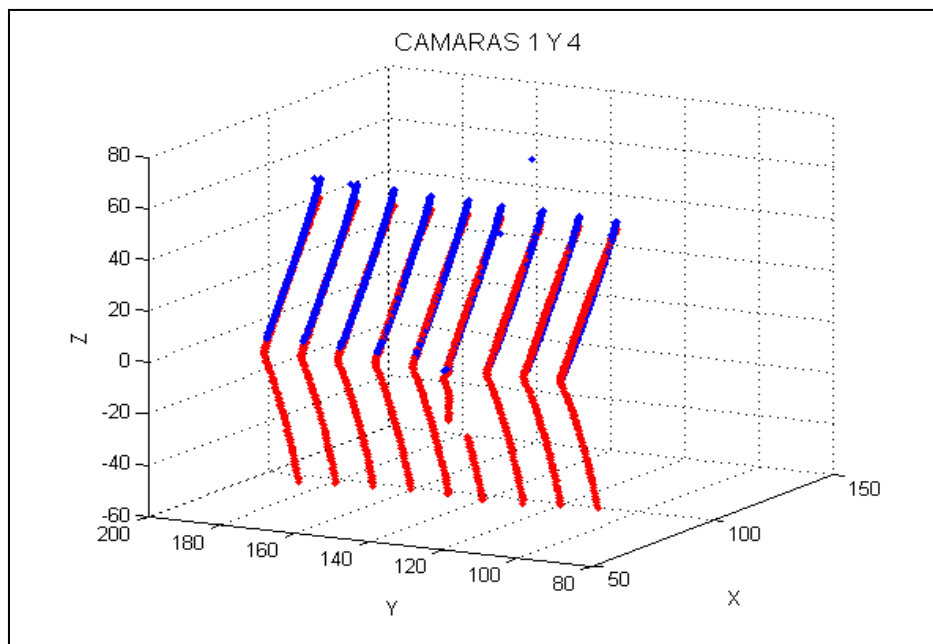


Figura 48. Unificación de los sistemas coordenados para las cámaras 1 y 4

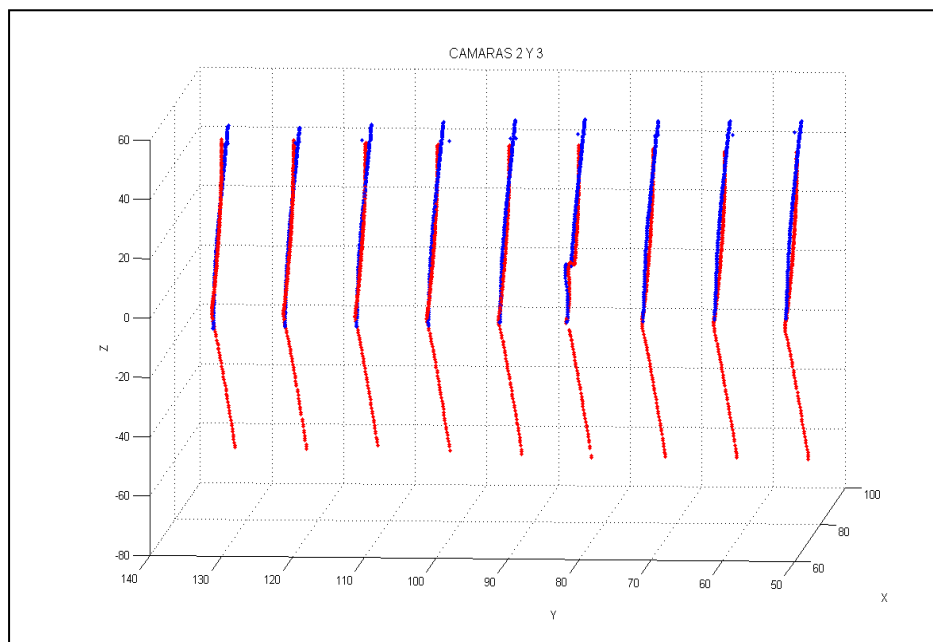


Figura 49. Unificación de los sistemas coordenados para las cámaras 2 y 3

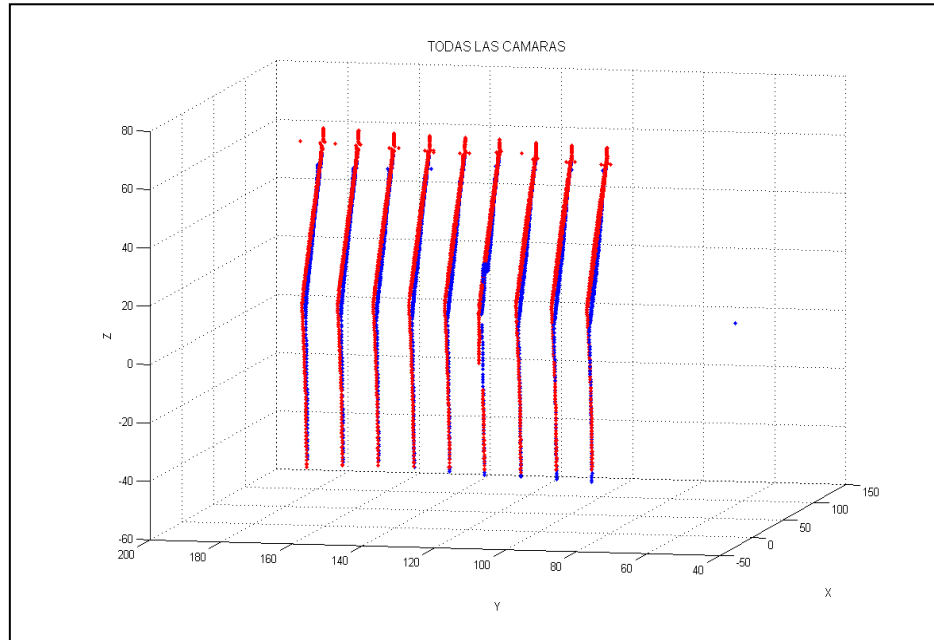


Figura 50. Unificación de los cuatro sistemas coordenados

Siguiendo el procedimiento de reconstrucción, de calibración y de unificación experimental de sistemas coordenados, explicados anteriormente, se reconstruyeron varios objetos. La Figura 51 muestra la reconstrucción tridimensional de un objeto con discontinuidades abruptas.

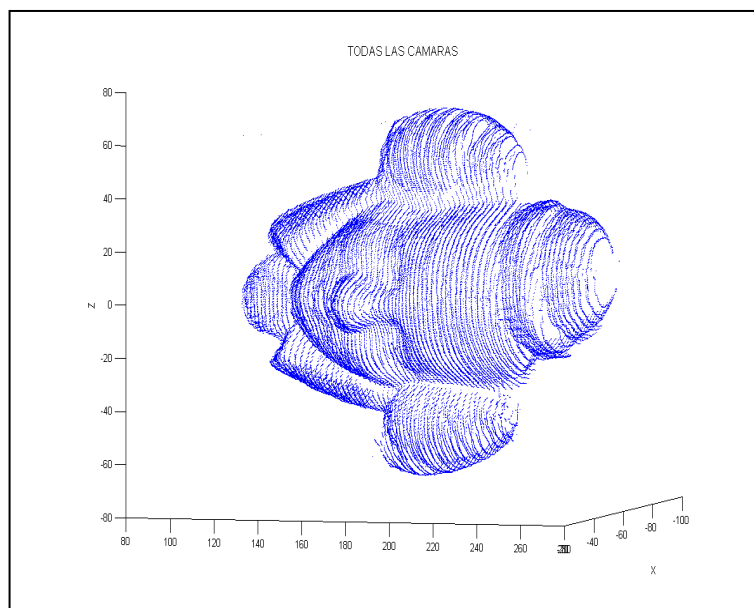


Figura 51. a) Reconstrucción 3D del objeto, vista frontal

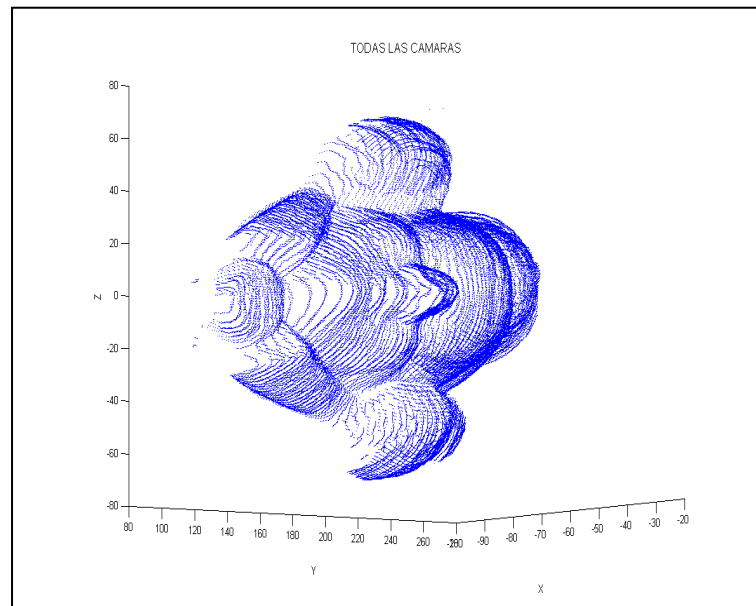


Figura 51. b) Reconstrucción del objeto

3.5 ANÁLISIS DEL ERROR EN EL CÁLCULO DE LAS COORDENADAS TRIDIMENSIONALES (X,Y,Z) SOBRE EL SISTEMA UNIFICADO

En esta sección se calcula la precisión del método, comparando las medidas obtenidas por el método óptico y las obtenidas por el método de contacto. De igual manera se evalúa el sistema de reconstrucción tridimensional. Los objetos utilizados fueron un bloque de metal, un círculo de madera, y un tubo de PVC, de dimensiones conocidas.

3.5.1 PRECISIÓN

Para evaluar la precisión del sistema implementado se reconstruyeron objetos de alturas conocidas, de esta forma se puede comparar la medida reportada por el sistema de reconstrucción y la medida obtenida por un método de contacto de precisión conocida. En el método de contacto se utilizó un calibrador, el cual se ubica en el extremo del objeto y se va desplazando de forma paralela al plano de referencia haciendo contacto

continuamente con la superficie del objeto, con el fin de reportar alturas en diversos puntos del cuerpo.

La precisión de la altura y el ancho de los objetos medidos depende del calibrador, el cual tiene un rango de precisión de ± 0.05 mm. Las Figuras 52, 53, y 54 muestran la reconstrucción 3D de los objetos de prueba usando el sistema óptico implementado.

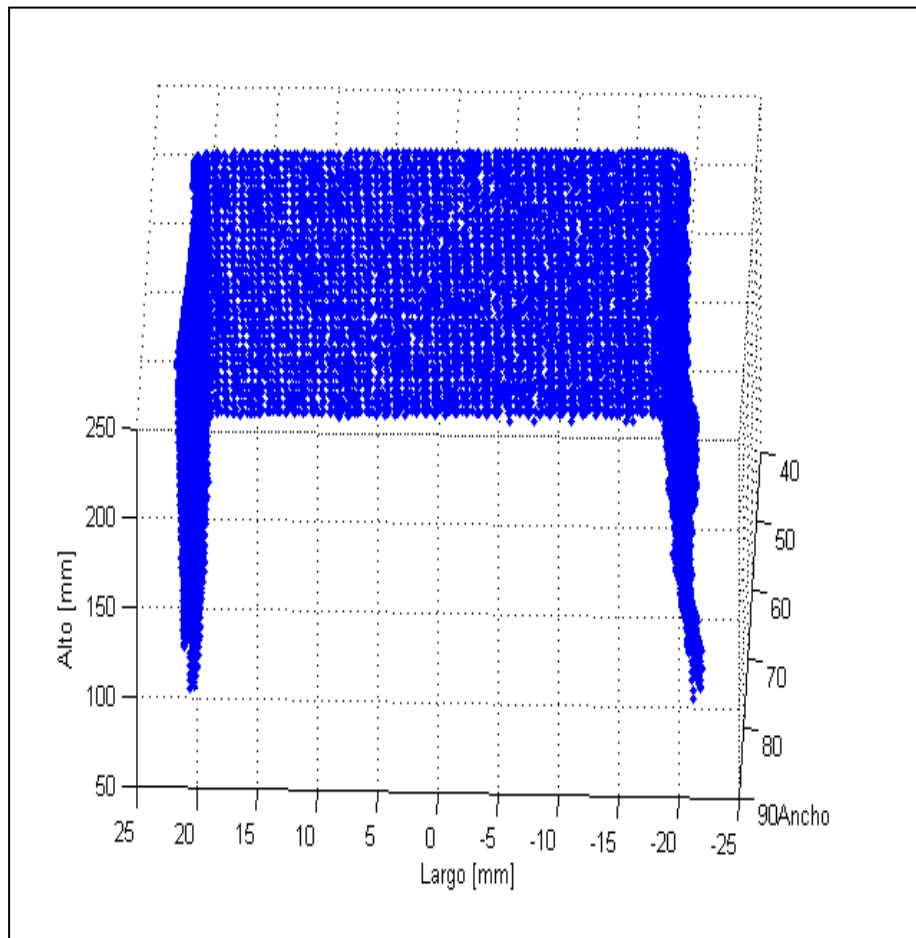


Figura 52. Reconstrucción tridimensional de un bloque de metal

La altura medida con el calibrador a diferentes posiciones sobre el objeto corresponde en promedio a 40.17 ± 0.05 mm; la altura obtenida de la reconstrucción 3D corresponde a 40.10 mm.

Los valores anteriores nos indican que existe una fuerte coincidencia entre los valores indicados por el calibrador y el sistema de reconstrucción tridimensional.

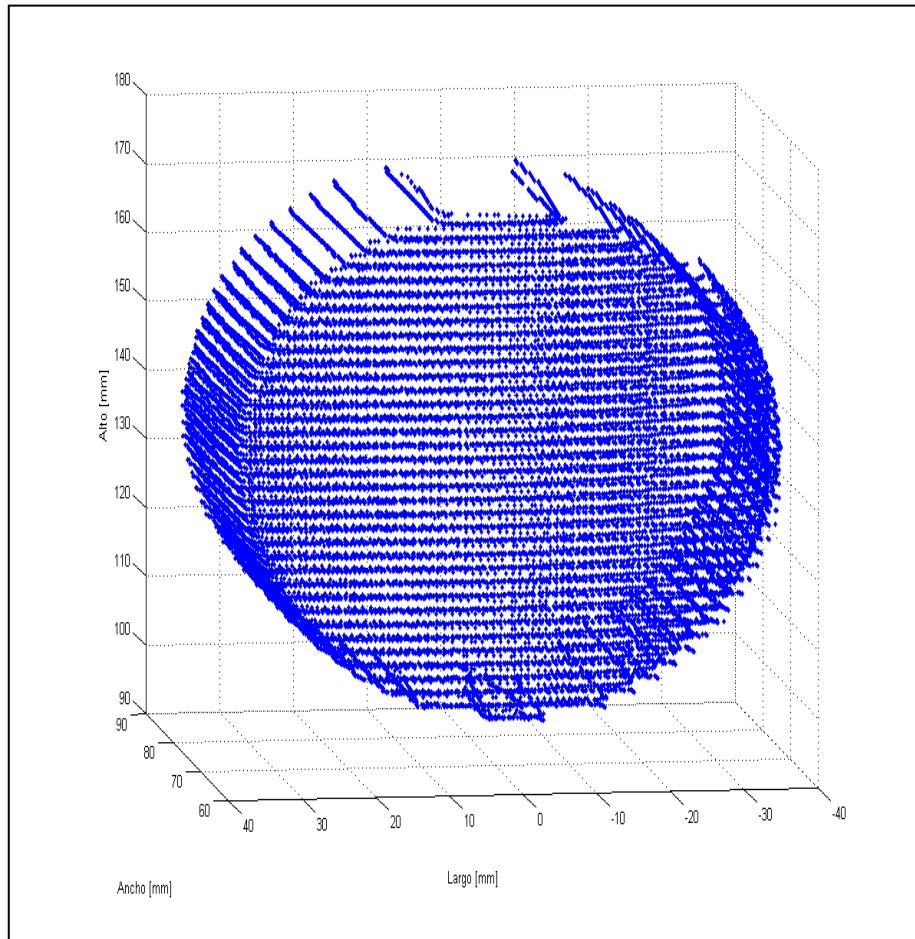


Figura 53. Reconstrucción tridimensional de un círculo de madera

La medida del diámetro del círculo realizada con el calibrador corresponde en promedio a 73.35 ± 0.05 mm, el valor del diámetro del círculo obtenido de la reconstrucción 3D corresponde a 73.50 mm.

La medida del ancho del círculo realizado con el calibrador corresponde en promedio a 20.00 ± 0.05 mm, el valor del diámetro del círculo obtenido de la reconstrucción 3D corresponde a 19.46 mm.

Los valores anteriores nos indican que existe una fuerte concordancia entre los valores indicados por el calibrador y el sistema de reconstrucción tridimensional.

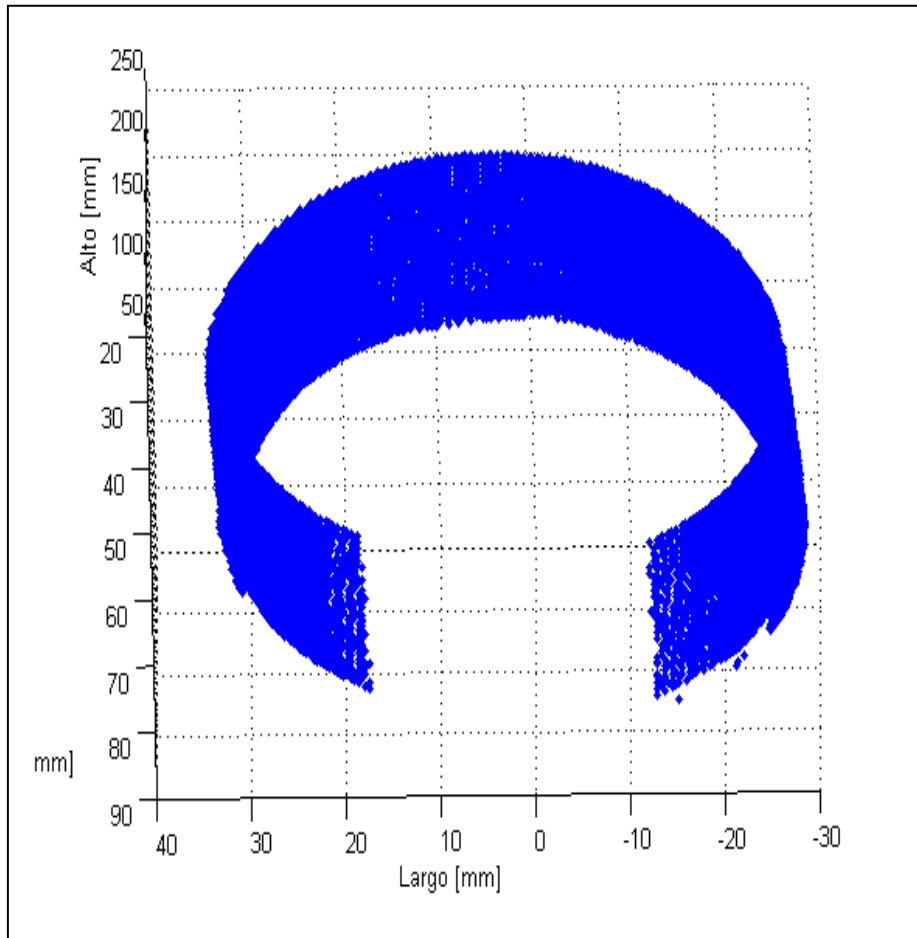


Figura 54. Reconstrucción tridimensional de un tubo de PVC

La medida del diámetro del tubo de PVC es realizada con el calibrador y en promedio corresponde a 60.33 ± 0.05 mm, el valor del diámetro del círculo obtenido de la reconstrucción 3D corresponde a 60.20mm.

Como se ha observado hasta ahora las imágenes capturadas por cada cámara, se someten a una serie de tratamientos digitales con el fin de obtener una reconstrucción precisa del objeto.

Específicamente, cada coordenada en la imagen de cada cámara CCD pasa por una corrección de distorsiones y una curva de calibración con el fin de obtener unas coordenadas en el plano objeto (X,Y,Z) en milímetros.

Las condiciones en las que se construya el sistema, facilitan la reconstrucción. Debido a esto, en el montaje se hizo mucho énfasis en la disposición de las cámaras, y en el alineamiento de los dos planos láser, con el fin de conseguir un único plano láser finalmente, así como también del sistema de posicionamiento.

Cualquier pequeño error, causa un desacoplamiento a la hora de colocar las cuatro imágenes reconstruidas con cada cámara, en un mismo sistema coordenado.

Al realizar la comparación entre los valores en las medidas teóricas obtenidas por medio de un calibrador y los valores de las medidas experimentales entregadas por el software indicando un rango de error menor a 1 mm, que fue uno de los objetivos propuestos en el trabajo de investigación.

CAPITULO 4

SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN 3D: APLICACIÓN A LA MEDIDA DE PARÁMETROS PODOMÉTRICOS DEL PIE

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se describe la implementación del dispositivo de exploración en la reconstrucción del pie con el propósito de medir algunos parámetros podométricos sobre su imagen tridimensional digitalizada. El proceso utilizado en la reconstrucción es el mismo que el descrito en el capítulo 3. En la sección 4.2, se describen las condiciones de ubicación del pie sobre la plataforma del dispositivo, en la sección 4.3, se muestran las imágenes adquiridas y el resultado de la reconstrucción final y en la sección 4.4, algunas medidas sobre la imagen reconstruida.

4.2. CONDICIONES DE MEDICIÓN

La primera condición para que un pie pueda ser reconstruido utilizando el dispositivo de exploración que se construyó es que éste se ubique orientado a lo largo del eje X como se muestra en la Figura 55. Como una condición adicional el pie debe permanecer inmóvil durante el barrido de la línea.

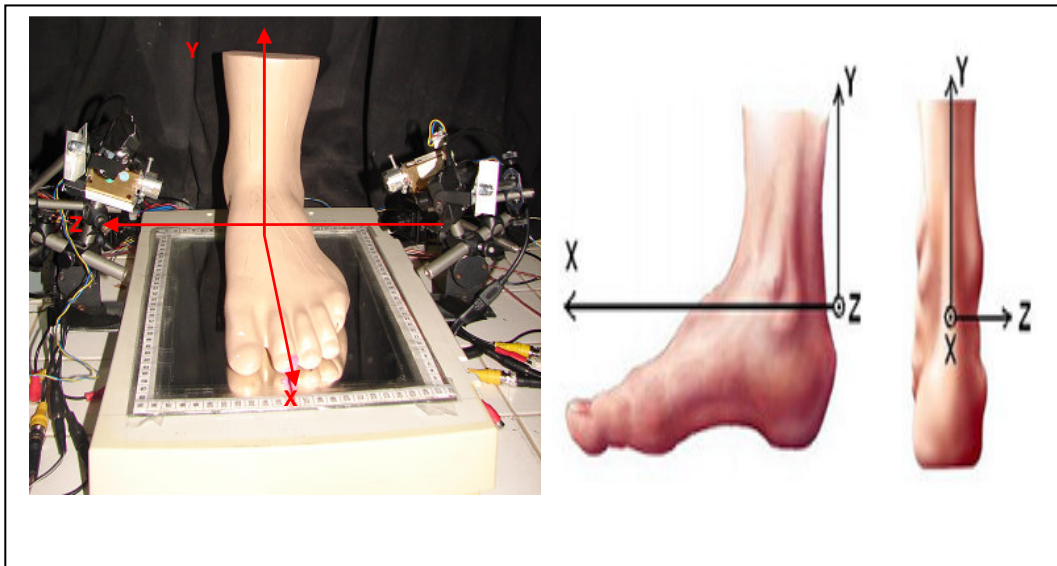


Figura 55. Condiciones de medición

4.3. RECONSTRUCCIÓN 3D DEL PIE

A continuación se muestra, el proceso de reconstrucción de un pie sintético (Figura 56), con el fin de probar el dispositivo de exploración tridimensional diseñado.



Figura 56. Pie sintético

4.3.1. IMÁGENES ADQUIRIDAS

El proceso de adquisición de imágenes para la reconstrucción tridimensional se realiza a partir de un desplazamiento axial de forma manual a intervalos constantes del conjunto del plano láser y las cámaras. Cada cámara adquiere una perspectiva diferente de la línea de intercepción deformada por la superficie del pie. El barrido inicia ubicando el plano láser en un extremo anterior del pie y finaliza en el extremo posterior. A continuación se muestra en la Figuras 57, 58, 59 y 60, las imágenes adquiridas por las cámaras CCD 1, 2, 3 y 4 respectivamente, durante el barrido del plano láser. La secuencia comienza por cada fila.

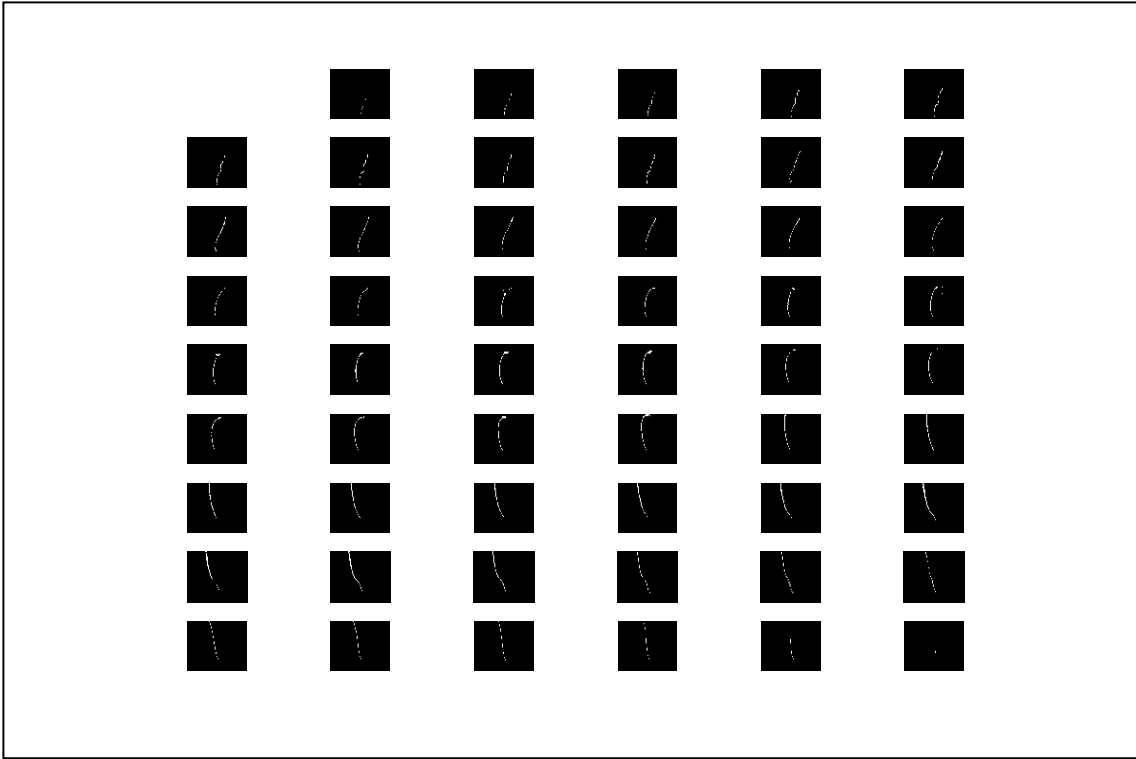


Figura 57. Imágenes adquiridas con la cámara 1.

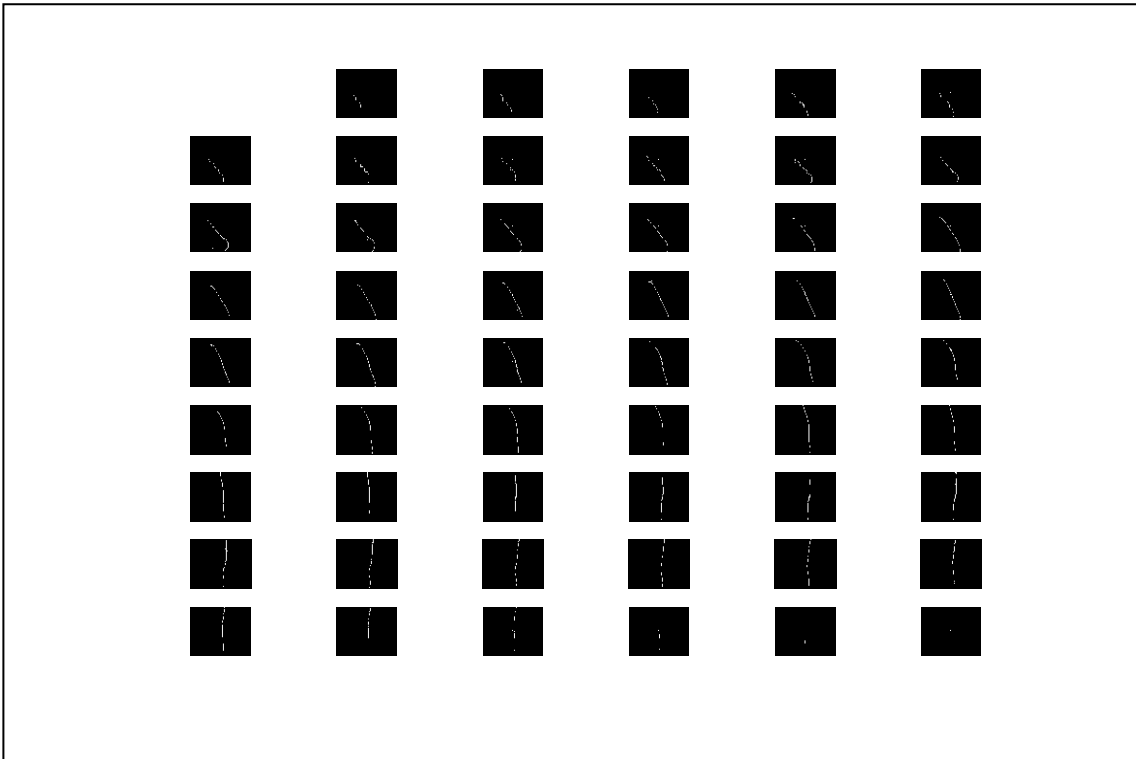


Figura 58. Imágenes adquiridas con la cámara 2.

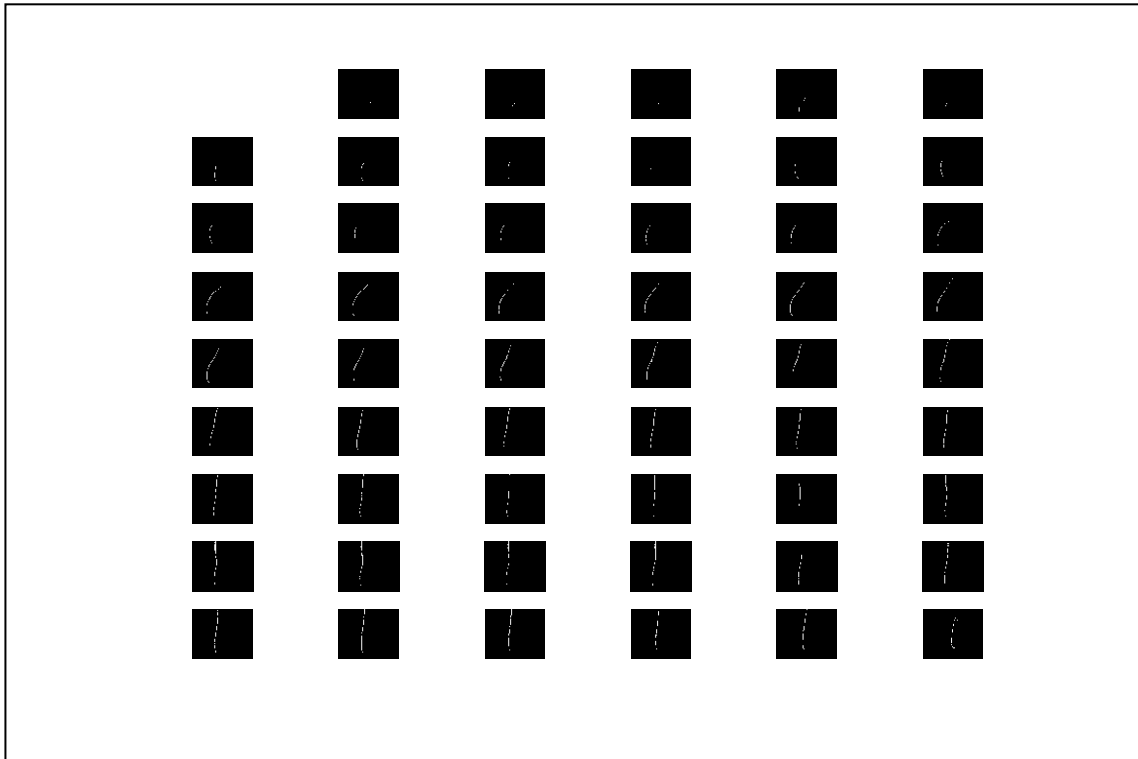


Figura 59. Imágenes adquiridas con la cámara 3.

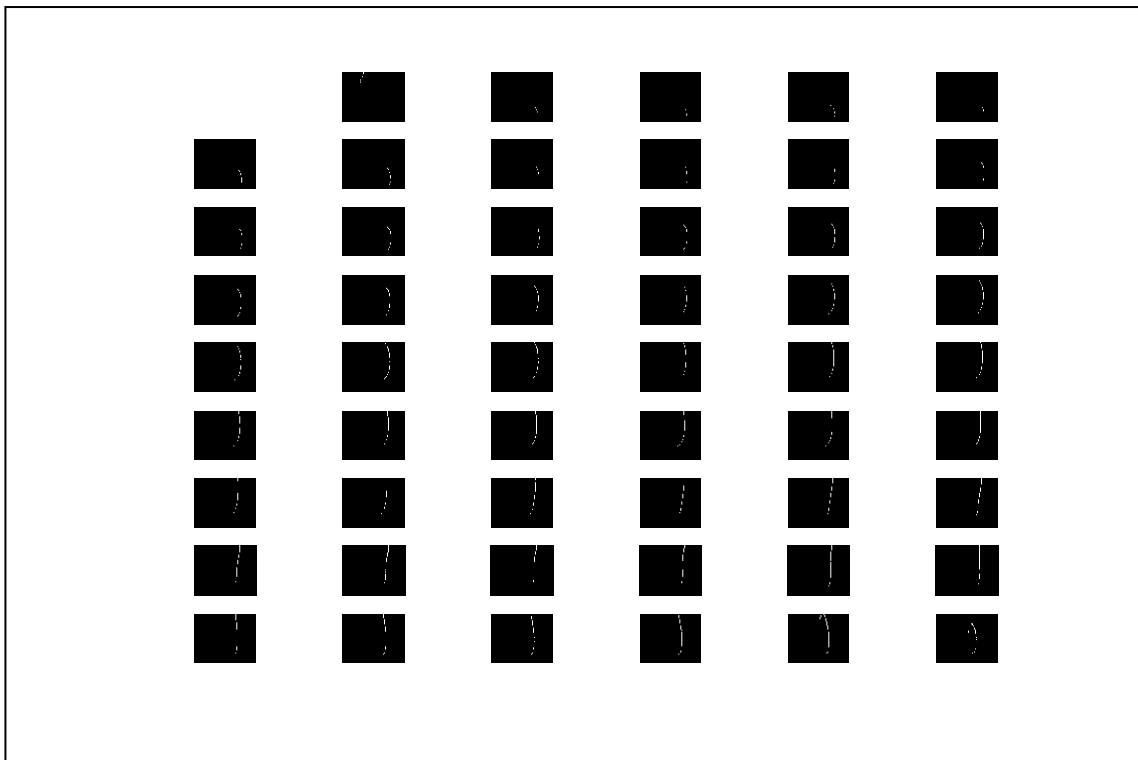


Figura 60. Imágenes adquiridas con la cámara 4.

4.3.2. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Para obtener los puntos representativos de cada línea láser, primero se realiza una binarización de la imagen escogiendo el valor del umbral de intensidad de acuerdo a la expresión (35) descrita en el capítulo anterior. Este proceso permite obtener las coordenadas en píxeles de los puntos representativos de la línea central indicados con una línea roja en las Figuras 61, 62, 63 y 64. Una vez encontrados los puntos representativos de la línea láser, estos se ingresan a la curva de calibración de cada cámara, para realizar la conversión de píxeles a mm. Las Figuras 61, 62, 63 y 64 muestran el resultado obtenido en una posición conocida del plano láser, capturado con cada cámara.

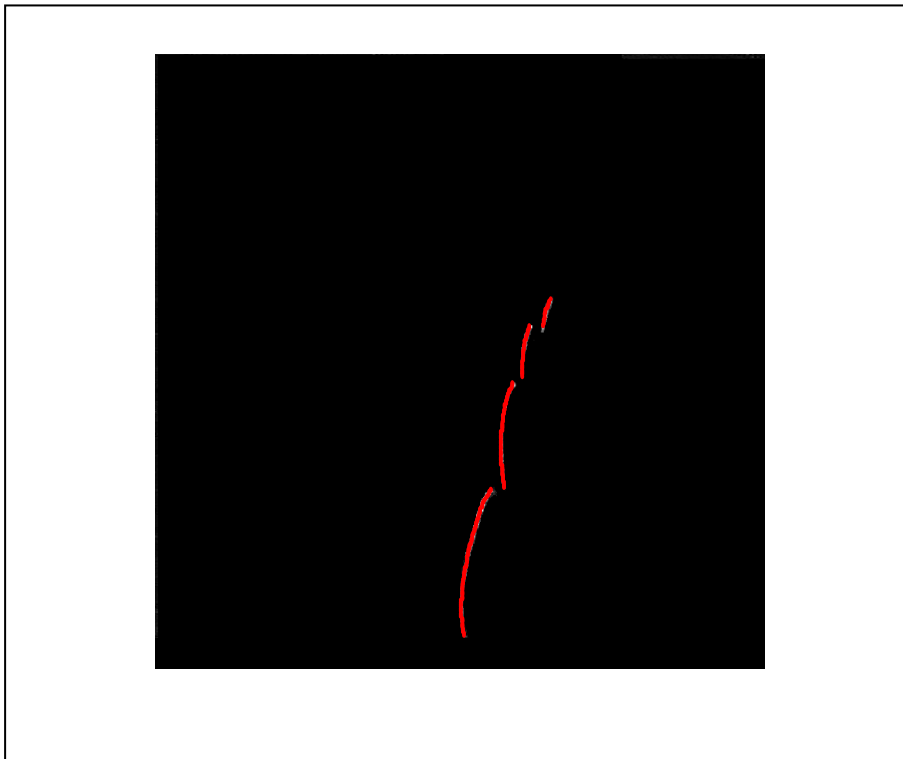


Figura 61. Puntos representativos de imagen 5 (cámara 1)

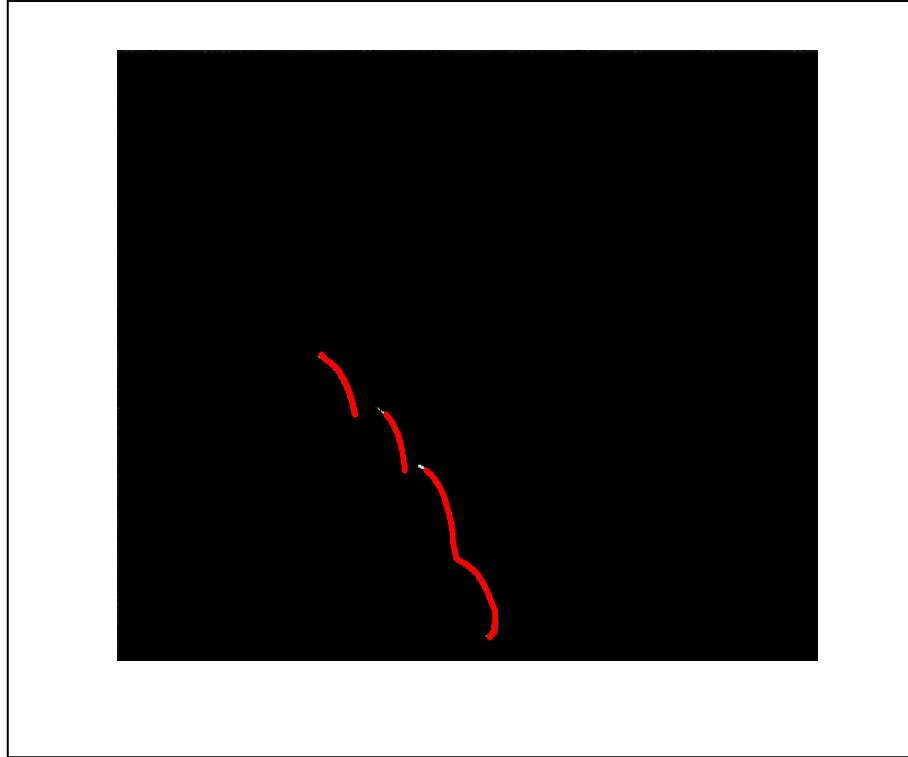


Figura 62. Puntos representativos de imagen 5 (cámara 2)

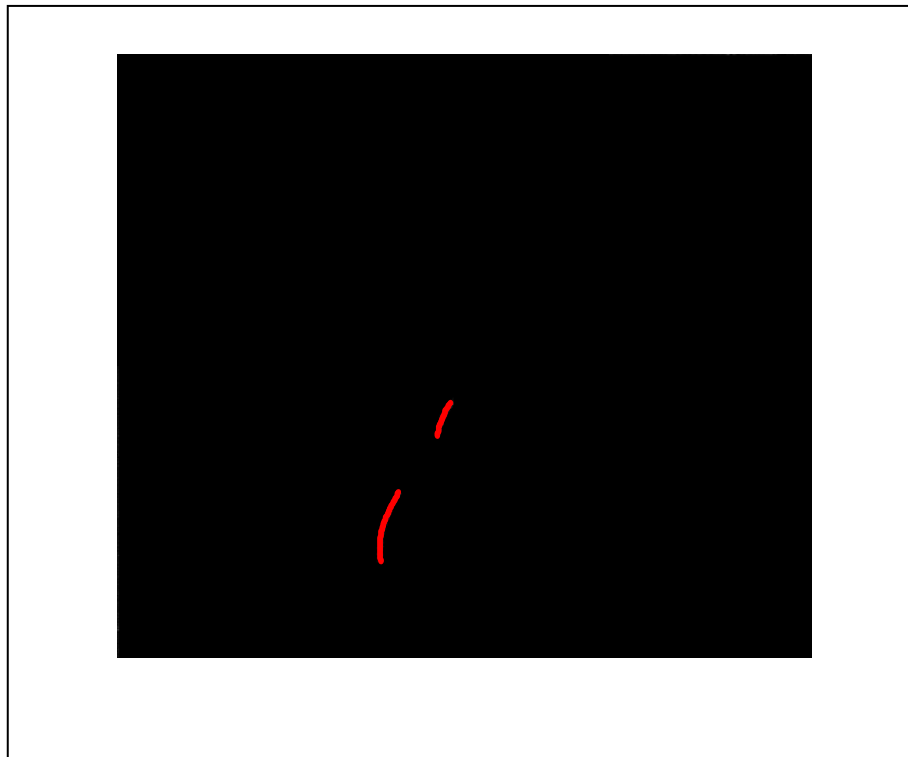


Figura 63. Puntos representativos de imagen 5 (cámara 3)

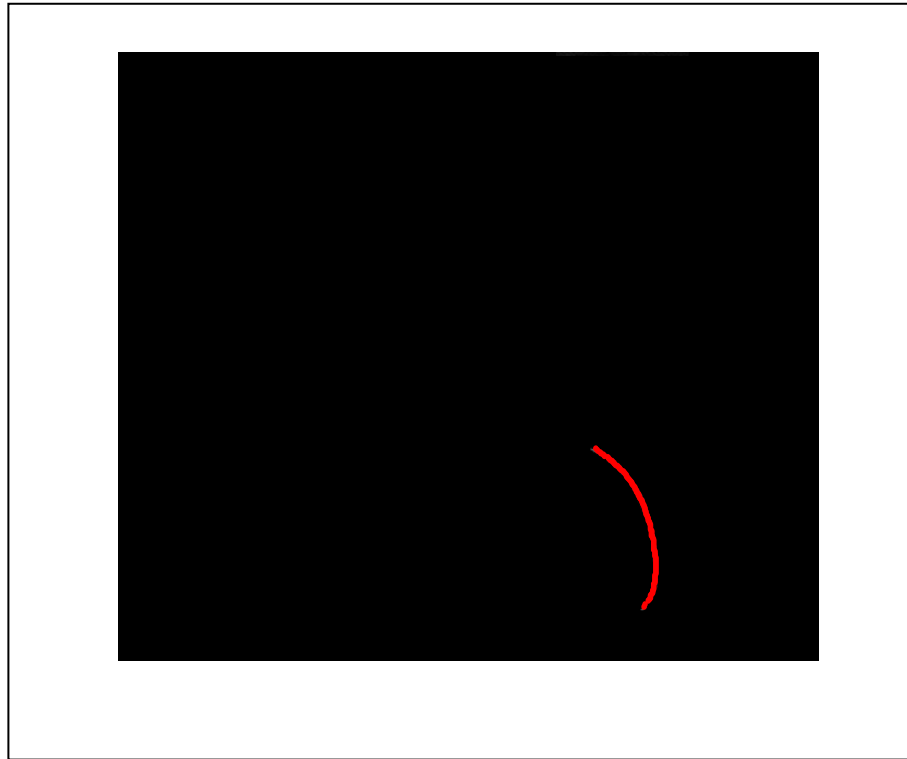


Figura 64. Puntos representativos de imagen 5 (cámara 4)

4.3.3. REPRESENTACIÓN 3D

Utilizando el dispositivo de exploración tridimensional mostrado en la Figura 32, y siguiendo el procedimiento de reconstrucción descrito en el capítulo anterior se calcula la forma 3D del pie.

Es de gran importancia resaltar que como el pie está apoyado en la plataforma reflejante que se encuentra en el dispositivo, la imagen de la planta del pie es un plano.

Los resultados de la reconstrucción tridimensional del pie se muestran en las Figuras 65, 66, 67 y 68.

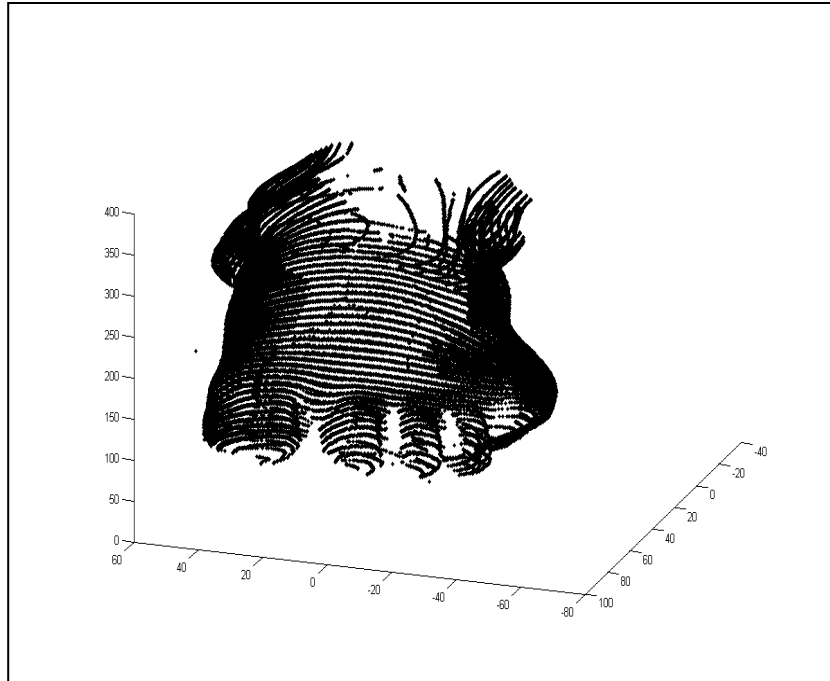


Figura 65. Vista frontal de la imagen 3D digitalizada del pie

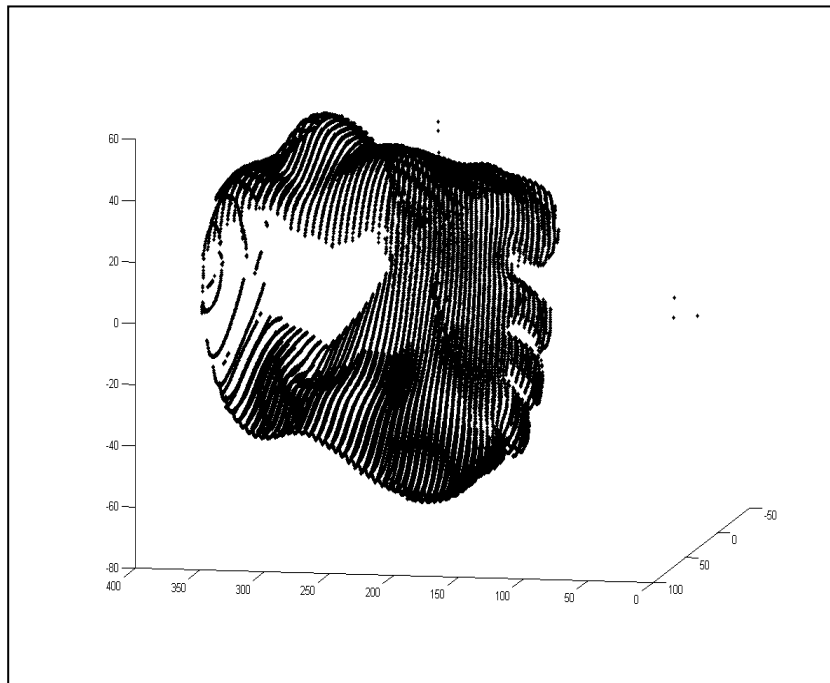


Figura 66. Vista trasera de la imagen 3D digitalizada del pie

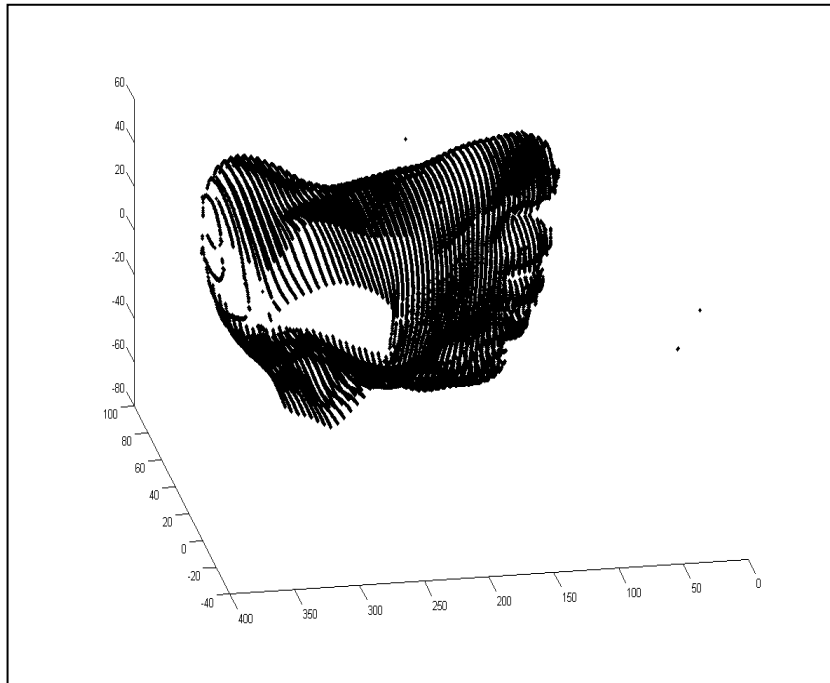


Figura 67. Vista lateral de la imagen 3D digitalizada del pie

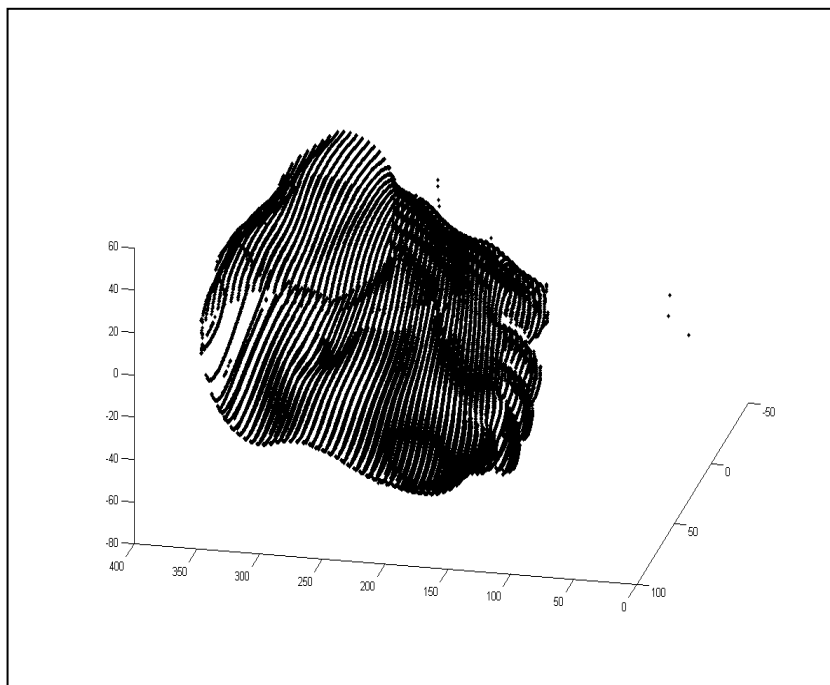


Figura 68. Vista lateral de la imagen 3D digitalizada del pie

4.4 MEDIDA DE PARÁMETROS DEL PIE

4.4.1. PARÁMETROS PODOMÉTRICOS BÁSICOS

Partiendo de la forma exterior y la estructura del pie, así como su posición con respecto a la pierna, incluyendo sus funciones estáticas y dinámicas; se distinguen en el pie un grupo de regiones que permiten obtener medidas que han sido estandarizadas para la fabricación de accesorios ortopédicos, incluyendo su reproducción en forma de horma para el uso industrial^[2,6]. Algunas de estas dimensiones se muestran en la Figura 69.

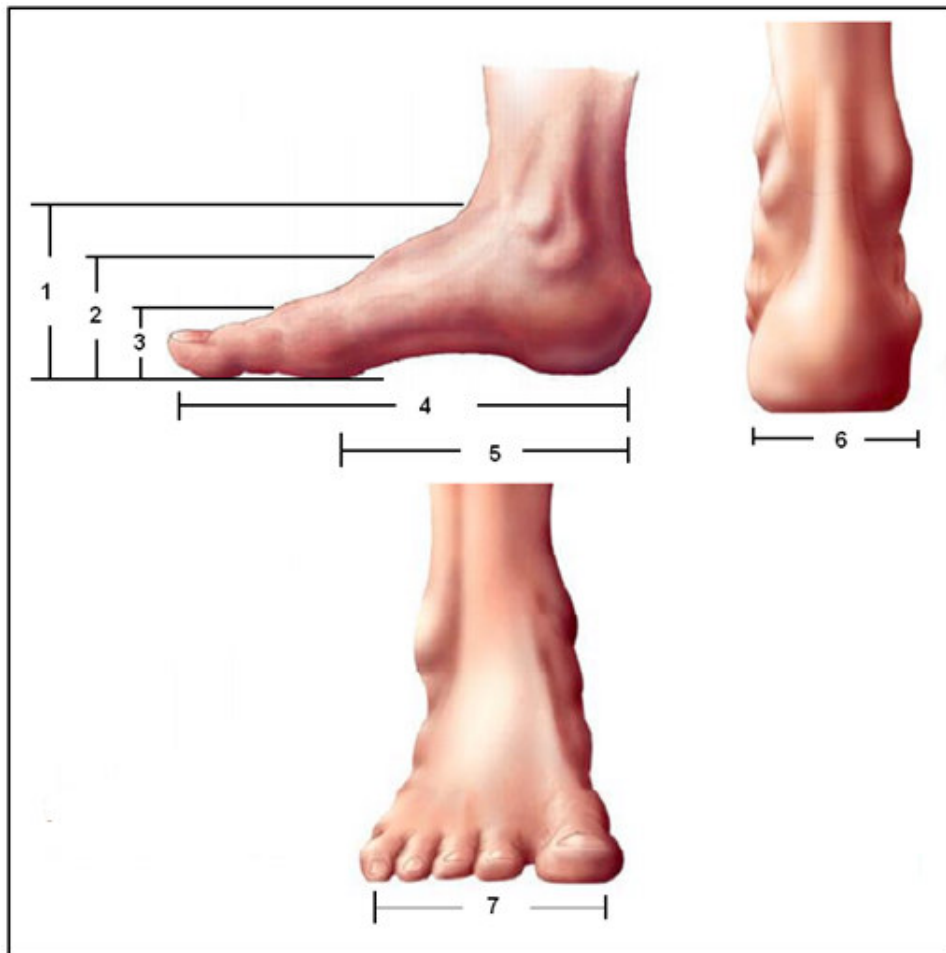


Figura 69. Algunas dimensiones básicas del pie

De acuerdo a la Figura 69, se tiene:

1. Altura de la garganta del pie
2. Altura del empeine
3. Altura del metatarsiano
4. Largo total del pie
5. Largo metatarsiano
6. Ancho del talón
7. Ancho metatarsiano

4.4.2. RESULTADOS DE LA MEDIDA DE PARÁMETROS PODOMÉTRICOS

Sobre la imagen tridimensional digitalizada del pie se midieron algunos parámetros podométricos utilizando herramientas de MATLAB®. Las Figuras de la 70, 71, 72 y 73, muestran las dimensiones que se midieron, y los resultados se registraron en la Tabla 6.

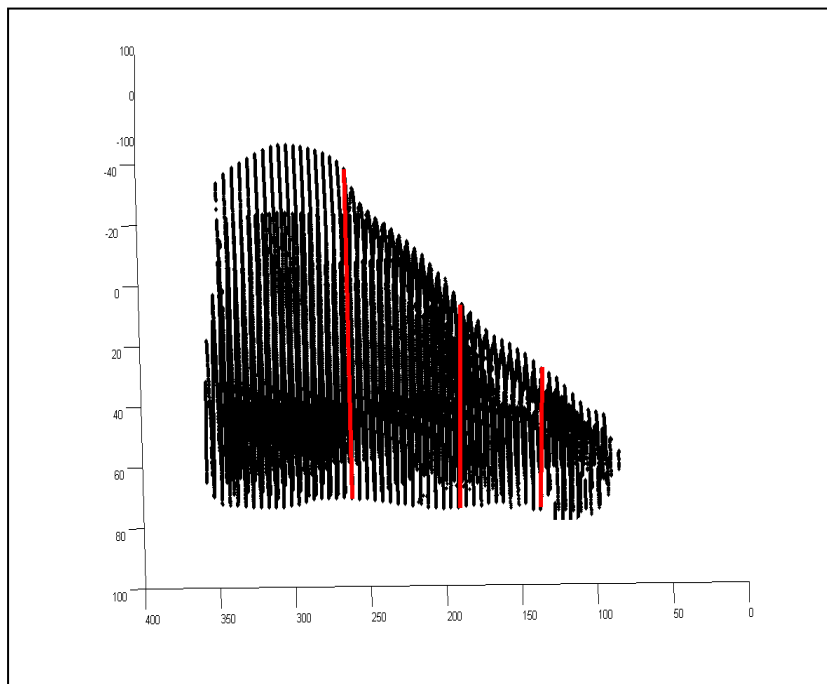


Figura 70. Altura de la garganta, del empeine y del metatarsiano

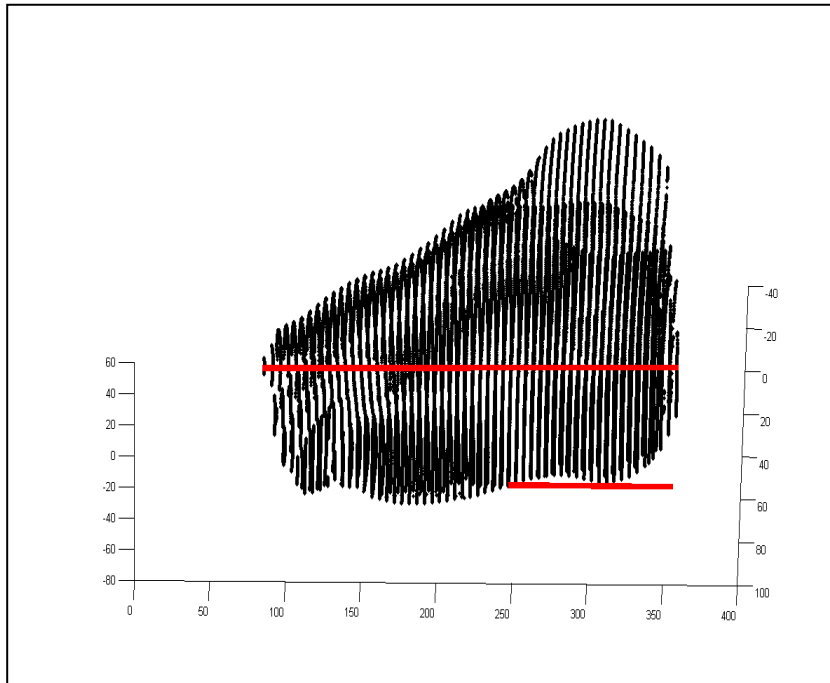


Figura 71. Largo total del pie y largo del metatarsiano

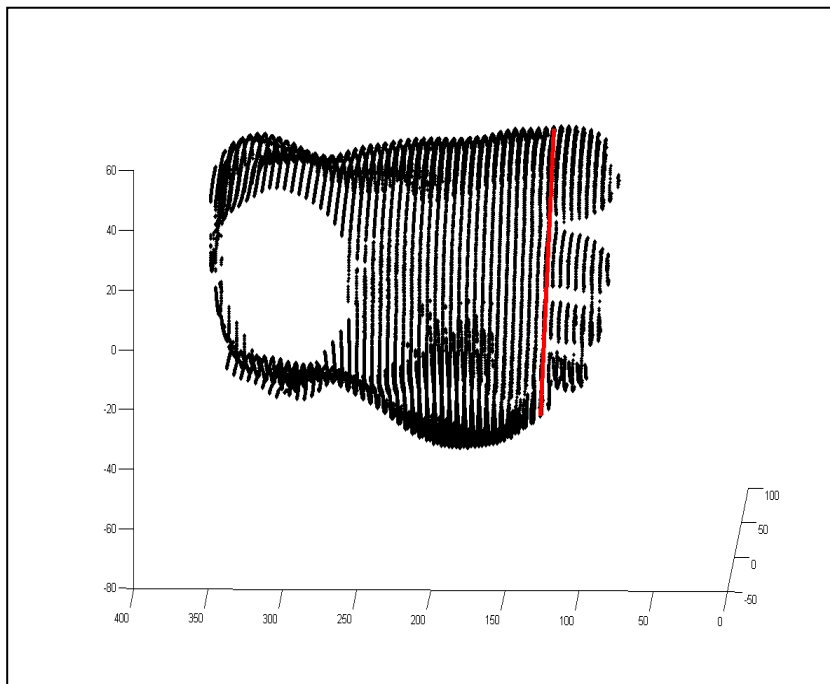


Figura 72. Ancho del metatarsiano

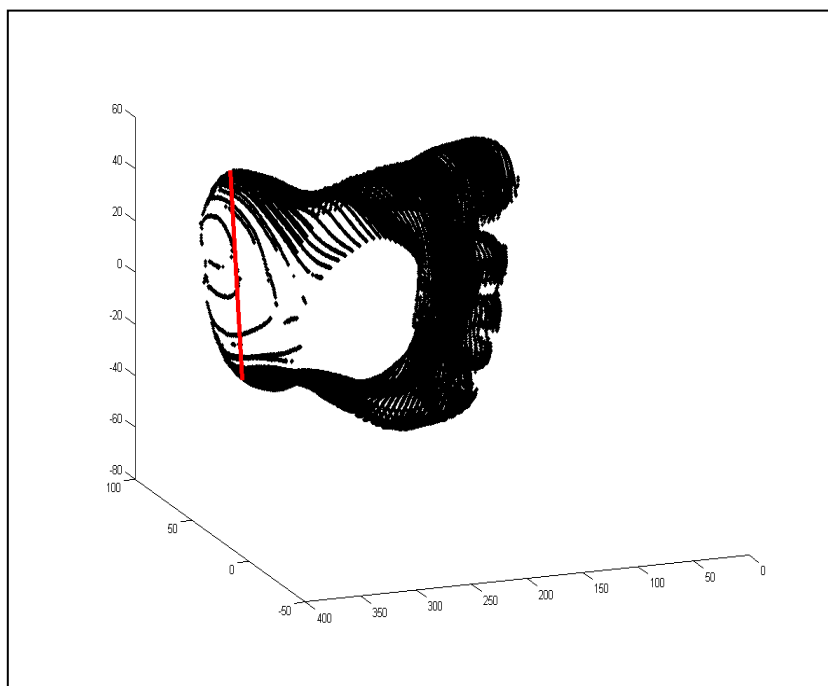


Figura 73. Ancho del talón

Tabla 6: Resultado de la medida de parámetros sobre el pie digitalizado

Parámetro	Valor medido por el sistema (mm)	Valor medido por la cinta métrica (mm)	Porcentaje de error (%)
1	92.58	93.00	0.45
2	59.37	60.00	1.05
3	40.32	40.00	0.80
4	259.34	260.00	0.26
5	159.26	160.00	0.47
6	63.54	64.00	0.72
7	94.90	95.00	0.11

Teniendo en cuenta el valor del porcentaje de error se puede concluir que con el dispositivo de exploración tridimensional construido, se logró obtener una imagen 3D

digitalizada del pie que puede ser vista desde varias direcciones. La caracterización del dispositivo de exploración permite estimar algunos valores de parámetros podométricos sobre su imagen digitalizada, con un intervalo de confianza aceptable.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

En la realización del presente trabajo de investigación se puede concluir lo siguiente:

1. Se diseñó y construyó un dispositivo preliminar de exploración tridimensional del pie por vía óptica. El dispositivo implementado permite obtener una imagen 3D a 360° de observación.
2. Para obtener la reconstrucción del cuerpo se utilizó la técnica de triangulación láser, constituido por 4 cámaras CCD, y dos dispositivos generadores de línea láser los cuales se alinean para formar un único plano láser que se desplaza sobre el objeto a reconstruir por medio de un sistema de desplazamiento axial. Para ello fue necesario recurrir a:
 - ✓ La calibración de cada una de las cámaras debido a la fuerte distorsión geométrica que presentaron sus imágenes. Se calcularon sus parámetros intrínsecos y extrínsecos.
 - ✓ La rectificación de cada una de las imágenes obtenidas en el proceso de barrido del plano láser sobre el objeto a reconstruir, con la ayuda de los parámetros obtenidos en la calibración de las cámaras.
 - ✓ La obtención de forma experimental de la curva de calibración para cada cámara, permitieron encontrar la relación entre las coordenadas de la imagen y las coordenadas del objeto.
 - ✓ La unificación de los 4 sistemas coordenados de las cámaras se llevó a cabo gracias a los parámetros de localización y orientación de un punto del plano de la cámara CCD con respecto al plano de referencia.
3. Gracias a la reconstrucción 3D del pie humano a 360° de observación fue posible extraer parámetros podométricos del pie, como:
 - ❖ Altura de la garganta del pie
 - ❖ Altura del empeine
 - ❖ Altura del metatarsiano
 - ❖ Largo total del pie

- ❖ Largo del metatarsiano
- ❖ Ancho del metatarsiano
- ❖ Ancho del talón

4. El objetivo principal de este trabajo fue el de construir un dispositivo que permitiera extraer información tridimensional del pie humano, para poder realizar una horma digital del pie del usuario y además obtener información a 360° de observación de un pie ubicado en una plataforma, con una resolución cercana o inferior al milímetro. Con el fin de disminuir los errores generados por el desplazamiento manual de los conjuntos iluminación y captura se sugiere automatizar con motores de buena resolución para así mejorar la resolución axial del sistema y posteriormente entregar la horma digital personalizada.
5. Se recomienda el uso de cámaras CCD de mayor resolución con el fin de obtener reconstrucciones más precisas.
6. Se recomienda el uso de este dispositivo en lugares con un ambiente de iluminación controlada, puesto que la superficie reflejante presente en este dispositivo aporta información sobre las partes inferiores del pie que pueden conllevar a un error en la reconstrucción.
7. Mejorando el sistema de iluminación se puede obtener una línea más fina que permitirá realizar barridos a pasos inferiores, realizar una reconstrucción con más detalle sobre la superficie de interés.
8. Habiendo conseguido todos los objetivos propuestos, es importante resaltar que en la técnica de reconstrucción tridimensional implementada el sistema multicaptor se realizó usando 4 sistemas simultáneos de captura de imágenes, técnica que por primera vez en Colombia se implementa obteniendo resultados de alta confiabilidad y precisión tanto a nivel metrológico como industrial. Dichos resultados serán tenidos en cuenta para realizar un dispositivo industrial para usarse en ambientes médicos-podométricos, el cual permitirá la elaboración de una horma estándar permitiendo al ortopedista realizar una valoración y un

seguimiento detallado de la deformación y a la industria la construcción de calzado de uso cotidiano, el cual favorecerá el normal desarrollo del pie y será diseñado según las necesidades y costumbres de la región.

REFERENCIAS

- [1] Contreras P. Carlos R, Dispositivo óptico de medida 3D con simetría cilíndrica: Aplicaciones en balística, Trabajo de grado Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1998.
- [2] Vanegas P. Alberto, Sistema óptico para la extracción de parámetros metrológicos del pie, Trabajo de grado Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.
- [3] Weng, J., Cohen, P. and Herniou, (1992) Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-14(10): 965-980.
- [4] Pérez R. Lenny A, Sistema de reconstrucción tridimensional para el análisis dinámico de un cuerpo: Estudio cuantitativo del vulcanismo de lodo, Trabajo de grado Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.
- [5] Heikkila J. and Silvén O, A Tour- step camera calibration procedure with implicit image correction. Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, FIN -90570 Oulu, Finland, 1997.
- [6] Granados Q. Jacqueline y Luna G. Edgar. Estudio biométrico pediátrico de la población infantil de dos a seis años del área metropolitana de Bucaramanga. Trabajo de grado, Escuela de Diseño Industrial, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1998.

BIBLIOGRAFÍA

1. Viladot A, Lecciones sobre patologías del pie, Barcelona: Litofisian 1979, P: 123-140.
2. Costa Manuel F, Surface inspection by an optical triangulation method, *Optical engineering*, 35(9), September 1996, 2743-2747.
3. Y. Sato and M. Otsuki. Three-dimensional shape reconstruction by active rangefinder. *In IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 142–147, 1993.
4. K. Hattori and Y. Sato. Accurate rangefinder with laser pattern shifting. *Proc. International Conference on Pattern Recognition* 3:849–853, 1996.
5. Marchessoux C, Richard N, Fernandez C, Description of Simple Method in 3D Reconstruction in Medical Imaging, *IEEE Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT.02)*, 2002.
6. Díaz C, Torres A, Ramírez J, García L, Álvarez N, Descripción de un dispositivo destinado al análisis de la marcha en dos dimensiones Cinemed, *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 5 p. 85-92. Junio 2006.
7. Tardón G. Lorenzo J, Métodos robustos de reconstrucción de escenas tridimensionales empleando información binocular, Trabajo de grado Escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicaciones, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid 1999.
8. Guía para el asesoramiento en la elección del calzado para plantillas, Universidad, Instituto de Biomecánica de Valencia, Universidad Politecnica de Valencia.
9. Fabián Delgado, Diseño de un sistema de visión artificial 3D para el control de calidad de piezas industriales mediante la técnica de luz estructurada, Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, 2005.
10. Mario Milver Patiño, Aplicación de la Interferometría holográfica digital en el análisis de la expansión térmica de objetos opacos, Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, 2004.
11. Fabián Mosso y José Luis Gallego, Estudio de deformaciones en superficies sometidas a esfuerzos mecánicos utilizando interferometría Speckle, Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, 2005.

12. Gerardo Idrobo y Carlos Ramírez, Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para la representación tridimensional del rostro humano (TRI_IDENT), Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, 2006.
13. Nácher B., Alemany S., García-Hernandez J., Alcántara E., "3D foot digitizing and its application to footwear fitting" 3D Modeling (Numerisation 3D), Paris, 2004.
14. Taoufik N, three dimensional scanner based on fringe projection, Optical Engineer 34(7), July 1995, 1961-1963