



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO VALLE DE CHALCO



MÉTODO DE CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA DE PROYECTORES DIGITALES APLICADO A LA RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL BASADO EN PROYECCIÓN DE PATRONES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN COMPUTACIÓN

P R E S E N T A

DANIEL DASAED PADILLA ROBLEDO

ASESOR:

DR. EN C. C. WILLIAM DE LA CRUZ DE LOS SANTOS

Revisor: DR. EN C. MANUEL ÁVILA AOKI

Revisora: DRA. EN C. C. MARÍA DE LOURDES LÓPEZ GARCÍA



VALLE DE CHALCO SOLIDARIDAD, MÉXICO

AGOSTO 2017.



Valle de Chalco, Méx. 13 de julio de 2017

VOTO APROBATORIO DE ASESOR

M. EN P. J. JUAN CARLOS HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
DEL CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE CHALCO

PRESENTE.

Por este conducto, comunico a usted que el trabajo de Tesis titulado:

Método de calibración radiométrica de proyectores digitales aplicado a la reconstrucción tridimensional basado en proyección de patrones

Llevado a cabo por Daniel Dasaed Padilla Robledo con número de cuenta 1226749 de la licenciatura en **Ingeniería en Computación** Registrado con fecha 18 de noviembre de 2016 y con número de registro ICO/18.11.16/455 ha concluido, por lo que **con fundamento en el artículo 93 del reglamento de Evaluación Profesional** *Que en letra dice "En el momento en que el asesor y el pasante consideren que el trabajo escrito está concluido, éste lo informará por escrito a la subdirección y solicitará la revisión del mismo por los profesores nombrados para tal efecto"*.

Solicito la revisión del mismo por los profesores nombrados para tal efecto.

Sin más por el momento quedo de usted.

ATENTAMENTE


Dr. William de la Cruz de los Santos
wdelacruz@uaemex.mx





OFICIO: FT5

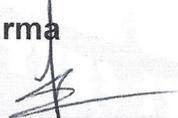
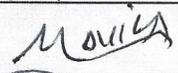
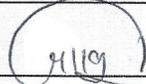
Valle de Chalco, Méx. 28 de agosto de 2017

M. EN P. J. JUAN CARLOS HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
DEL CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE CHALCO

PRESENTE.

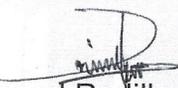
Por este conducto, comunico a usted que el trabajo de Tesis con el título:

Método de calibración radiométrica de proyectores digitales aplicado a la reconstrucción tridimensional basado en proyección de patrones
Llevado a cabo por Daniel Dasaed Padilla Robledo con número de cuenta 1226749 de la licenciatura en **Ingeniería en Computación** registrado el 18 de noviembre de 2016 con Número de Registro ICO/18-11-16/455 ha concluido y estamos de acuerdo para la impresión definitiva de Tesis

	Nombre	Firma
Asesor	Dr William de la Cruz de los Santos	
Revisor	Dr Manuel Ávila Aoki	
Revisora	Dra María de Lourdes López García	

Sin más por el momento quedo de usted.

ATENTAMENTE


Daniel Dasaed Padilla Robledo

Nombre del pasante



CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

El que suscribe **Daniel Dasaed Padilla Robledo** Autor(es) del trabajo escrito de evaluación profesional en la opción de **Tesis** con el título **Método de calibración radiométrica de proyectores digitales aplicado a la reconstrucción tridimensional basado en proyección de patrones**, por medio de la presente con fundamento en lo dispuesto en los artículos 5, 18, 24, 25, 27, 30, 32 y 148 de la Ley Federal de Derechos de Autor, así como los artículos 35 y 36 fracción II de la Ley de la Universidad Autónoma del Estado de México; manifiesto mi autoría y originalidad de la obra mencionada que se presentó en el **Centro Universitario UAEM Valle de Chalco** para ser evaluada con el fin de obtener el Título Profesional de **Ingeniero en Computación**.

Así mismo expreso mi conformidad de ceder los derechos de reproducción, difusión y circulación de esta obra, en forma **NO EXCLUSIVA**, a la Universidad Autónoma del Estado de México; se podrá realizar a nivel nacional e internacional, de manera parcial o total a través de cualquier medio de información que sea susceptible para ello, en una o varias ocasiones, así como en cualquier soporte documental, todo ello siempre y cuando sus fines sean académicos, humanísticos, tecnológicos, históricos, artísticos, sociales, científicos u otra manifestación de la cultura.

Entendiendo que dicha cesión no genera obligación alguna para la Universidad Autónoma del Estado de México y que podrá o no ejercer los derechos cedidos.

Por lo que el autor da su consentimiento para la publicación de su trabajo escrito de evaluación profesional.

Se firma la presente en la ciudad de Valle de Chalco Solidaridad, a los 28 días del mes de agosto de 2017.



Daniel Dasaed Padilla Robledo

Dedicatoria

Este trabajo de tesis esta dedicado a mi mamá, por todo el apoyo brindado cada día durante el transcurso de mi carrera, por animarme cuando parecía que ya no podia más, por permanecer a mi lado cuando todo se tornaba difícil, por esas noches que se desvelo conmigo esperando a que terminara mis tareas, por preocuparse por mi salud y mi bienestar, por brindarme lo que necesitaba para lograr mis objetivos y en especial por mantener siempre su promesa de nunca dejar de hacerme reír. Por eso y muchas cosas más, este trabajo está dedicado a ti. Nunca lograré pagarte todo lo que has echo por mi, pero hare lo posible, porque te lo mereces, porque te quiero, por ser mi mamá y por ser la persona que nunca me dejo solo.

A mi hermano, que desde que cumplí doce años me ha mantenido. Se lo difícil que debió haber sido, pero supiste sacarme adelante, junto a mi mamá y aquí esta el resultado de tanto esfuerzo de su parte. Nunca voy a poder pagarte todo lo que has echo por mi, he incluso en ocasiones un gracias no es suficiente, pero si sirve de algo siempre estaré para ti cuando mas lo necesites y para lo que sea, como tu siempre lo has estado para mi. Eres el mejor hermano que pude haber tenido y por la ayuda que siempre me brindaste, este trabajo también esta dedicado a ti.

Por ultimo, quiero dedicar este trabajo a mi papá, que aunque ya no este entre nosotros, es la razón para seguir adelante, fue y sera siempre quien me da las fuerzas para lograr lo que me propongo. Este trabajo representa lo que siempre quiso y esperaba de mi desde que empecé a ir a la escuela, aun recuerdo sus platicas que de cierta forma fueron de gran ayuda para culminar este trabajo. De

nuevo un gracias se queda corto para todo lo que él ha echo por mi, aun sin su presencia, pero al menos se que en esta ocación no lo he defraudado y me gusta pensar que está orgulloso de mi. Es por eso, que dedico enteramente este trabajo a mi persona favorita, mi papá.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma del Estado de México por brindarme las instalaciones necesarias para el desarrollo de este trabajo. A la beca otorgada en el proyecto con clave UAEM-CA-237, ya que fue de mucha ayuda en la realización del mismo, así como en la culminación de este trabajo de tesis. A mi asesor, el Dr. William Cruz-Santos, por los conocimientos brindados a lo largo de este año que permitieron mejorar mis habilidades, así como aprender nuevas cosas y mostrarme lo interesante que puede ser la reconstrucción tridimensional, por la confianza y el apoyo que siempre recibí de su parte, que fueron parte fundamental en el desarrollo de este trabajo y por lo cual fue un gusto trabajar con él. Agradecer también a la Dra. María de Lourdes López García por el apoyo, la ayuda y la asesoría brindada en la realización de una parte de este trabajo de tesis, que permitieron la culminación del mismo y que de igual forma ayudara a mejorar mis habilidades, así como adquirir nuevos conocimientos. Por ultimo agradezco a mis amigos, empezando por Diego y Alonso, por la amistad brindada y por el apoyo que me dieron durante la carrera y en el desarrollo de este trabajo. A Minerva, que siempre estuvo apoyándome y animándome cuando estaba muy presionado, hizo que dejara de pensar tanto y darme un respiro, algo que resulta importante y de mucha ayuda. A Ricardo, en especial, mi mejor amigo que de igual forma fue un gran apoyo y de quien he aprendido muchas cosas, hizo que siempre confiara en mi, a superarme y mejorar en muchos sentidos, además de que siempre estuvo presente para despejarme y relajar un poco las cosas. Y los que faltan Daniel, Luis y Carlos, igual agradezco su amistad y el apoyo que recibí de su parte en al-

gún momento, siempre me hicieron pensar en grande, no ser conformista y buscar más, algo que siempre tengo en mente.

Resumen

Los sistemas de visión computacional basados en técnicas de luz estructurada consisten comúnmente de una cámara y un proyector digital. Una de las técnicas más usadas es la proyección digital de patrones sinusoidales con corrimiento de fase para el análisis de perfiles de objetos. Debido a que los proyectores comerciales son fabricados para realzar efectos visuales; éstos distorsionan los patrones proyectados, por lo que no existe una correspondencia entre las intensidades proyectadas y las capturadas por la cámara. Al proceso de eliminar esta distorsión que introducen los proyectores digitales se le llama *calibración radiométrica*. En el presente trabajo de tesis se analizan los métodos de calibración radiométrica más usados y se propone un nuevo método basado en interpolación polinomial. Para validar la propuesta se diseñó una herramienta de software para la proyección y captura de patrones sinusoidales, así como para el análisis de la respuesta del proyector. Experimentos realizados muestran que el nuevo método de calibración radiométrica elimina sustancialmente la distorsión introducida por el proyector.

Índice general

Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificación del estudio	3
1.4. Metodología	5
1.5. Delimitación de la investigación	5
1.6. Organización de la tesis	6
2. Marco teórico y estado del arte	7
2.1. Generación de patrones de interferencia	7
2.2. Algoritmo de detección de fase	8
2.3. Desarrollo de la fase	10
2.3.1. Algoritmo de desarrollo de fase guiado por calidad . .	11
2.4. Calibración radiométrica	12
2.5. Estado del arte	14
3. Algoritmo de calibración radiométrica	19
3.1. Algoritmo de calibración radiométrica basado en interpolación poli- nomial	19

ÍNDICE GENERAL

3.2. Influencia de la distorsión γ en la información de fase	23
4. Software de aplicación	25
4.1. Análisis de requerimientos	25
4.2. Diseño	27
4.2.1. Casos de uso	28
4.2.2. Diagrama de clases y de interacción	40
4.2.3. Diagramas de actividades	40
5. Experimentos y resultados	51
5.1. Experimentación	51
5.2. Reconstrucción 3D	61
5.2.1. Calibración geométrica	62
5.2.2. Modelo de perspectiva de la cámara	63
5.2.3. Adquisición de imagen digital	65
5.2.4. Parámetros de cámara	66
5.2.5. Modelo de cámara	68
5.2.6. Calibración del sistema cámara-proyector	70
5.3. Recuperación de la información 3D	71
6. Conclusiones y trabajo futuro	76
A. Apéndices y anexos	78
A.1. Algoritmo de detección de fase basado en mínimos cuadrados	78
A.2. Código Mathematica para la solución de la fase	80
Referencias	83

Índice de figuras

2.1. De izquierda a derecha, patrones de interferencia para los corrimiento $\delta_1 = -2\pi/3$, $\delta_2 = 0$, y $\delta_3 = 2\pi/3$	8
2.2. Ejemplo de curvas para diferentes valores de γ	13
2.3. Respuesta de proyector.	14
3.1. Ejemplo de curva de respuesta del proyector. Se muestra el ajuste polinomial de la curva de respuesta y su polinomio inverso. También se muestra la curva de respuesta ideal como referencia.	21
3.2. (izquierda) Patrones sinusoidales en una dimensión descritos en las ecuaciones (2.2) a (2.4) y (derecha) patrones sinusoidales ideales modificados por la respuesta del proyector.	22
3.3. (izquierda) Patrones sinusoidales inversos en una dimensión y (derecha) superposición de los patrones ideales con los patrones proyectados invertidos (líneas punteadas).	22
3.4. De izquierda a derecha: se muestran el error o diferencia absoluta entre los patrones ideales y los patrones inversos proyectados para $\delta_1 = 2\pi/3$, $\delta_2 = 0$ y $\delta_3 = -2\pi/3$, respectivamente.	23
3.5. Se muestra la fase envuelta $\phi(x, y)$ para los patrones ideales, modificados e inversos.	24
3.6. (izquierda) Superposición de la fase desenvuelta ideal y la fase desenvuelta inversa proyectada, (derecha) diferencia absoluta entre las fases de la izquierda.	24

ÍNDICE DE FIGURAS

3.7. (Patrones sinusoidales con corrección radiométrica con 3 corrimientos de tamaño 640×480 pixeles, $a = 30$, $b = (240 - 30)/2$ y $p = 42$ pixeles de ancho.	24
4.1. Diagrama de bloques del sistema propuesto de calibración	26
4.2. Diagrama de bloques del modulo de calibración radiométrica	27
4.3. Diagrama general de casos de uso del software propuesto.	29
4.4. Diagrama de clases de la aplicación.	40
4.5. Diagrama de interacción que describe la comunicación que existe en la preparación del escenario.	41
4.6. Diagrama de interacción que describe la comunicación que existe en la proyección y captura de imágenes.	42
4.7. Diagrama de interacción que describe la comunicación que existe en la calibración.	43
4.8. Diagrama de actividades para la selección de imágenes.	44
4.9. Diagrama de actividades para la ubicación de la imágenes capturadas.	45
4.10. Diagrama de actividades para la selección de la cantidad de imágenes a proyectar.	46
4.11. Diagrama de actividades para obtener el tiempo de proyección y captura.	47
4.12. Diagrama de actividades para el proceso de proyección.	48
4.13. Diagrama de actividades para la cancelación del proceso de captura.	49
4.14. Diagrama de actividades para el proceso de calibración radiométrica.	50
5.1. Estructura de la interfaz del sistema propuesto.	52
5.2. Interfaz principal del sistema propuesto.	53
5.3. Sistema de rectificación conformado por una cámara, un proyector y una computadora.	53
5.4. Interfaz principal habilitada.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

5.5. Ventana para escoger la carpeta que contiene las imágenes a proyectar.	55
5.6. Despliegue de imágenes encontradas en forma de lista.	55
5.7. Selección de la ubicación de imágenes capturadas.	56
5.8. Ventana para indicar la ubicación de las imágenes capturadas.	56
5.9. Selección de la cantidad de imágenes a proyectar.	57
5.10. Selección de todas las imágenes para proyectarse.	58
5.11. Sistemas proyectando imágenes en escala de grises.	59
5.12. Selección del directorio de imágenes capturadas.	59
5.13. Tabla con resultados y gráfica de la misma.	60
5.14. Resultado del rango dinámico.	60
5.15. Sistema proyectando patrones de franjas.	61
5.16. Elementos de un dispositivo de imagen	63
5.17. Elementos de un lente delgado	64
5.18. Modelo de perspectiva de la cámara	64
5.19. Componentes del sistema de adquisición de imágenes digitales	65
5.20. Relación entre el marco de referencia de la cámara y el mundo real	67
5.21. Ejemplo de capturas del patrón de calibración: las imágenes en el primer renglón pertenecen a la cámara y las del segundo renglón son generadas desde el punto de vista del proyector.	70
5.22. Error de reproyección de las esquinas detectadas en las 15 posiciones del patrón de calibración para la cámara (izquierda) y proyector (derecha), respectivamente.	71
5.23. Objeto de prueba con franjas proyectadas.	72
5.24. Visualización de la fase envuelta $\phi(x, y)$ (arriba), la información de modulación $\gamma(x, y)$ (centro) y el promedio de las imágenes $I'(x, y)$ (abajo). Las matrices $\phi(x, y)$, $\gamma(x, y)$ y $I'(x, y)$ fueron normalizadas al intervalo $[0, 1]$ y escaladas a escala de grises para poder visualizarlas.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

5.25. Mapa de fase desenvuelto usando el algoritmo de desenvolvimiento de fase guiado por calidad.	74
5.26. Reconstrucción 3D por proyección digital de patrones usando rectificación radiométrica.	74
5.27. Reconstrucción 3D por proyección digital de patrones sin usar rectificación radiométrica.	75

Capítulo 1

Introducción

Existen varios métodos para la reconstrucción tridimensional de objetos físicos como los de luz estructurada, métodos radiométricos, sistemas laser y Proyección Digital de Patrones (PDP), entre otros Bell y cols. (2016) B. Li y cols. (2015). En particular, el método PDP consiste de un sistema integrado por un proyector digital y una cámara. En este tipo de métodos se proyectan patrones de franjas sobre un objeto y se capturan los mismos usando la cámara digital. Posteriormente, se resuelve y se analizan las deformaciones de los patrones sinusoidales para determinar su forma y medidas.

1.1. Planteamiento del problema

Una de las problemáticas del método PDP es que debido a que los proyectores se fabrican para realzar los efectos visuales en la proyección, las intensidades que se capturan con la cámara no coinciden con las intensidades proyectadas, lo cual introduce errores cuando se lleva a cabo el análisis del perfil de los objetos. Provocando así, que la información tridimensional pierda precisión. A este efecto se le llama relación no lineal de la cámara con el proyector, por lo que, es necesario realizar una *calibración radiométrica*. Para tal motivo, se puede llevar a cabo la implementación de un método que realice dicha calibración. Estos métodos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

se dividen en dos tipos: activos y pasivos, lo cual hace formularnos la siguiente pregunta: ¿Que tipo de método debe ser implementado?. Una descripción más detallada de los tipos de métodos antes mencionados se encuentra en el capítulo 2 del presente trabajo de tesis.

La calibración radiométrica del proyector consiste en corregir las intensidades que se proyectan en relación con las que se capturan, es decir, las intensidades proyectadas deben coincidir con las intensidades capturadas. De esta forma, se mejora sustancialmente la reconstrucción tridimensional de los objetos usando el método PDP.

1.2. Objetivos

Objetivo General: desarrollar un nuevo método de calibración radiométrica para mejorar la reconstrucción tridimensional usando los métodos PDP.

Objetivos específicos:

1. Analizar los algoritmos de rectificación radiométrica existentes en el estado del arte.
2. Desarrollar un nuevo método de calibración radiométrica basado en interpolación polinomial.
3. Realizar el diseño y la implementación del sistema de calibración radiométrica.
4. Hacer pruebas del sistema desarrollado.

1.3. Justificación del estudio

El método PDP requiere generar patrones de franjas, los cuales presentan un corrimiento de fase. Esta característica representa un desplazamiento de las franjas hacia la derecha a partir del origen de la imagen. Las imágenes de patrones de franjas se generan en una computadora empleando un algoritmo, donde se especifica la amplitud y el ancho de la franja, así como el corrimiento. Cabe mencionar que, en el sistema, estos patrones de franjas representan una señal sinusoidal, a diferencia de otros sistemas que hacen uso de señales binarias.

Cuando los patrones de franjas son generados, estos pueden proyectarse sobre un objeto usando un proyector digital. Posteriormente, se capturan las imágenes del objeto con los patrones de franjas, con lo cual se puede calcular la información de fase. La fase contiene la información relevante de las propiedades físicas del objeto. El cálculo de la información de fase se abordará con más detalle en el marco teórico.

Los proyectores digitales son fabricados de tal forma que mejoran los efectos visuales, provocando que las intensidades no sean lineales, es decir, se modifican los niveles de grises al ser proyectados. Entonces, al capturar los patrones de franjas, lo ideal es que las intensidades de las imágenes capturadas coincidan con las intensidades proyectadas. La no linealidad entre el proyector y la cámara introduce errores a la información de fase, por lo que la precisión de la reconstrucción tridimensional se reduce. Es por eso, la importancia de llevarse a cabo un proceso de calibración radiométrica precisa, para corregir la no linealidad entre la cámara y el proyector.

Por otro lado, la automatización a través de una aplicación de software hace del proceso de calibración radiométrica más eficiente al reducir el tiempo de ejecución del método PDP. Esta aplicación debe ser capaz de realizar las tareas principales para la calibración como es la configuración y ejecución del método PDP, y del método de calibración radiométrica del proyector, así como de visualizar los

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

resultados.

Los elementos que conforman un sistema de calibración radiométrica son una cámara CCD (Charge-Coupled Device), un proyector digital y un equipo de computo. Estos son los recursos con los que se cuentan para realizar el diseño e implementación de un sistema de calibración radiométrica y de esa forma llevar a cabo el desarrollo de un nuevo método para tal motivo. En cuanto al área de trabajo, se hace uso de un ambiente controlado donde no debe haber luz o en dado caso la menor posible. Por lo tanto, se puede decir que el proyecto es factible, ya que los dispositivos antes mencionados son de fácil acceso, aunque el costo de los mismos pueden llegar a ser altos. En cuanto al ambiente, este puede adaptarse para que sea un cuarto lo más oscuro posible, pudiendo trabajar casi en cualquier lugar y por lo tanto hacer pruebas sin que se presente algún problema que afecte las mismas. Así mismo, este proyecto es viable ya que al contar con los elementos antes mencionados se puede llegar a la conclusión de los objetivos. Por otro lado se cuenta con los conocimientos necesarios para el desarrollo de algoritmos que permitan llevar a cabo la calibración radiométrica, así como la aplicación de software antes mencionada. Además un estudio previo sobre el proceso de calibración radiométrica e investigaciones de las mismas, brindan las herramientas y conocimientos necesarios para lograr el desarrollo e implementación de un nuevo método de calibración.

Cabe mencionar que el estudio es completamente original, ya que, aunque existen actualmente una gran cantidad de investigaciones referentes a la calibración radioétrica, es un método nuevo el que se propone, que puede llegar a brindar mejores resultados y así poder emplearse en diferentes áreas o bien realizarse un análisis más a fondo, que permita mejorar el mismo. Además su uso puede ser sobre aplicaciones de alta velocidad, lo cual brinda un amplio campo de investigación donde puede ser de gran ayuda un método como el que aquí se propone o bien puede servir de estudio para la realización de nuevos métodos.

En el presente trabajo de tesis se empleara una investigación de tipo experi-

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

mental, debido a que existen variables que deben ser controladas, como por el ejemplo el ambiente en el cual se está trabajando. Estas variables son manipuladas y al emplear el método para la calibración radiométrica, estas pueden producir un efecto determinado que puede ser de ayuda o bien, puede alterar el proceso de calibración y por consiguiente la reconstrucción tridimensional. Esto permite establecer hipótesis que ayuden a la mejora del método de calibración radiométrica.

1.4. Metodología

Para alcanzar los objetivos de esta tesis, se realizará una investigación documental sobre los fundamentos de la calibración radiométrica y los algoritmos más relevantes publicados en el estado del arte.

Para el desarrollo de la herramienta de software de calibración radiométrica se propone utilizar el Proceso Unificado de Desarrollo de Software (PUDS), a través del Lenguaje Unificado de Modelado (UML). Se llevaran a cabo las siguientes actividades:

1. Casos de uso: para identificar la funcionalidad del sistema propuesto.
2. Clases: para la arquitectura correcta del sistema.
3. Interacción: para visualizar la comunicación entre las clases.
4. Actividades: para seguir la ruta correspondiente a cada proceso en el sistema.

1.5. Delimitación de la investigación

En este proyecto se plantea un escenario que consiste de una cámara y un proyector. El sistema propuesto se aplicará únicamente para patrones de interferencia

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

o de franjas, por lo que la calibración radiométrica será útil sólo para escenarios de este tipo.

Existen diferentes sistemas de reconstrucción tridimensional, que incluyen diferentes elementos para su funcionamiento. En la mayoría de ellos, se requiere el uso de varias cámaras y de varios proyectores que faciliten el proceso de recuperación de la información en 3D. Aunque en este trabajo de tesis se usa una cámara y un proyector, el método de calibración propuesto también puede ser usado en sistemas que usan más elementos como cámaras y proyectores. Además, la metodología usada para la implementación de la herramienta de software puede ser de ayuda en el análisis y desarrollo de sistemas.

1.6. Organización de la tesis

En el capítulo 2 se exponen los fundamentos y el estado del arte. En el capítulo 3 se muestra el método de calibración radiométrica propuesto. En el capítulo 4 se muestra el diseño de la herramienta de software para la proyección y captura de patrones sinusoidales; en el capítulo 5 se muestran los experimentos y discusión, y en el capítulo 6 las conclusiones y trabajo futuro.

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

En este capítulo se presentan los conceptos importantes para comprender el método PDP tales como la generación digital de patrones sinusoidales, el cálculo de la información de fase, el procesamiento de la fase o desenvolvimiento, y el planteamiento teórico del problema de rectificación radiométrica Geng (2011) Bell y cols. (2016).

2.1. Generación de patrones de interferencia

Los patrones de interferencia se pueden generar de manera discreta por medio de la siguiente ecuación D. Malacara (2007) Z. Malacara y Servín (2016) :

$$I_k(x, y) = b[1 + \cos(\frac{2\pi}{p}x + \delta_k)] + a \quad (2.1)$$

donde

- b es la amplitud,
- p es el ancho de la franja,
- a es un desplazamiento,
- δ_k es un corrimiento de fase,



Figura 2.1: De izquierda a derecha, patrones de interferencia para los corrimiento $\delta_1 = -2\pi/3$, $\delta_2 = 0$, y $\delta_3 = 2\pi/3$.

- $I_k(x, y)$ es una imagen de 8 bits.

La ecuación (2.1) define un patron de franjas de ancho p y amplitud b . El corrimiento de fase δ_k introduce un desplazamiento de las franjas hacia la derecha a partir del origen en la imagen. El número de patrones k siempre es mayor o igual a 3. Por ejemplo, sea $\delta_k = \frac{2\pi}{3}(k - 2)$ el corrimiento definido para $k = 1, 2, 3$, entonces los patrones de interferencia se expresan como:

$$I_1(x, y) = b[1 + \cos(\frac{2\pi}{p}x - \frac{2\pi}{3})] + a, \quad (2.2)$$

$$I_2(x, y) = b[1 + \cos(\frac{2\pi}{p}x)] + a, \quad (2.3)$$

$$I_3(x, y) = b[1 + \cos(\frac{2\pi}{p}x + \frac{2\pi}{3})] + a. \quad (2.4)$$

La Figura 2.1 muestra los patrones de interferencia para las ecuaciones en (2.2)-(2.4). Note que las franjas están desplazadas con respecto a la anterior inmediata.

2.2. Algoritmo de detección de fase

Para expresar las intensidades que se obtienen a partir de la proyección de los patrones de interferencia sobre un objeto, se hace uso de la ecuación fundamental

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

del corrimiento de fase, expresada de la siguiente forma:

$$I_k(x, y) = I' + I'' \cos(\phi + \delta_k) \quad (2.5)$$

donde

- $I'(x, y)$ es la intensidad promedio,
- $I''(x, y)$ es la modulación,
- $\phi(x, y)$ es la fase por ser determinada.

Para resolver el sistema de ecuaciones definido en (2.5) se necesita establecer el número k de patrones de interferencia, así como sus corrimientos δ_k .

Si consideramos los valores para δ_k usados en la ecuación $\delta_k = \frac{2\pi}{3}(k - 2)$ con $1 \leq k \leq 3$, las intensidades de cada patron de interferencia proyectado sobre el objeto son:

$$I_1(x, y) = I' + I'' \cos\left(\phi - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2.6)$$

$$I_2(x, y) = I' + I'' \cos(\phi), \quad (2.7)$$

$$I_3(x, y) = I' + I'' \cos\left(\phi + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.8)$$

Resolviendo el sistema de 3 ecuaciones dadas en (2.6) a (2.8), para I' , ϕ y $\gamma = I''/I'$ se tiene que:

$$I'(x, y) = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}, \quad (2.9)$$

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{3(I_1 - I_3)^2 + (2I_2 - I_1 - I_3)^2}}{I_1 + I_2 + I_3}, \quad (2.10)$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3} \right]. \quad (2.11)$$

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

La solución del sistema de ecuaciones (2.9)-(2.11) se conoce como el algoritmo de corrimiento de fase de tres pasos. La fase ϕ es denominada mapa de fase envuelta (*wrapped phase map*), que se caracteriza por tener saltos de 2π , debido a que la solución está dada por una arco tangente la cual se define entre el rango de $-\frac{\pi}{2}$ a $\frac{\pi}{2}$. La modulación γ representa la calidad en cada pixel de fase, y se usa comúnmente para segmentar el mapa de fase entre las regiones válidas o inválidas. Finalmente, la ecuación para I' expresa solo un promedio de las intensidades en las imágenes I_1, I_2, I_3 .

Note que el mínimo número de corrimientos es $k = 3$, para poder resolver el sistema de ecuaciones dado en (2.5). Sin embargo, se pueden utilizar más de 3 corrimientos y resolver el sistema de ecuaciones, por medio del método de mínimos cuadrados. Mientras mas patrones se usen, la fase ϕ se puede recuperar con mucha más precisión. Por otro lado, si se usa el mínimo número de patrones ($k = 3$), la fase se ve afectada por diversas fuentes de error. Una de las fuentes de error que afectan a la recuperación de la fase es la respuesta no lineal del proyector. Por lo que es importante llevar a cabo la calibración radiométrica del proyector. Por otro lado, si se usan muchos corrimientos el tiempo de proyección y captura también aumenta. En aplicaciones donde se requiere procesamiento rápido es conveniente usar el mínimo número de patrones.

En el Apéndice se muestra la solución a las ecuaciones (2.9) a (2.11) por medio del método de mínimos cuadrados. También se proporciona la implementación en el paquete de análisis Mathematica del método de mínimos cuadrados.

2.3. Desenvolvimiento de la fase

En el método PDP la fase contiene información física del objeto en cuestión. Se le llama envuelta porque en la ecuación (2.11) se representa como una función arco tangente la cual esta definida en el intervalo $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, con lo cual se presentan discontinuidades módulo 2π . Para eliminar las discontinuidades en el mapa de fase,

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

se aplica un algoritmo de desenvolvimiento de fase (*unwrapped phase algorithm*) y así obtener un mapa de fase continuo Φ .

La siguiente ecuación expresa la relación entre ambas, la fase envuelta y la fase continua

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi \cdot m(x, y) \quad (2.12)$$

donde $m(x, y)$ representa un valor entero conocido como número de campo (*field number*). Por tanto, la operación de desenvolvimiento (*unwrapping operation*) consiste en encontrar el valor de campo correcto para cada medición de la fase.

2.3.1. Algoritmo de desenvolvimiento de fase guiado por calidad

Existen varios algoritmos de desenvolvimiento de fase que se pueden clasificar como: algoritmos espaciales y algoritmos temporales Ghiglia y Pritt (1998). En los primeros se resuelve cada pixel siguiendo una ruta de integración, mientras que los segundos utilizan una secuencia de mapas de fase que varían en el tiempo, que se utilizan para estimar la fase continua. Dentro los algoritmos espaciales se tienen los guiados por calidad Cruz-Santos y cols. (2016). Este tipo de algoritmos reciben un mapa de fase envuelto $\phi(x, y)$ y un mapa de calidad $Q(x, y)$ donde cada valor $Q(i, j)$ indica la calidad del pixel $\phi(i, j)$ en el mapa de fase. La salida o resultado del algoritmo es la fase continua o desenvuelta.

El algoritmo de desenvolvimiento de fase usa una estructura de datos llamada *lista adjunta* donde se insertan los pixeles o valores de fase de manera ordenada de acuerdo a sus valores de calidad. El proceso de desenvolvimiento comienza seleccionando un pixel inicial y posteriormente se insertan sus pixeles vecinos a la lista adjunta. Se saca de la lista adjunta el pixel con calidad mayor y se insertan sus pixeles vecinos. El proceso continua hasta que la lista adjunta este vacía.

A continuación se muestra el algoritmo de desenvolvimiento de fase guiado por calidad:

Algorithm 1 Desenvolvimiento de fase guiado por calidad

```
1: Encontrar el pixel de inicio con el valor de calidad más alto
2: Guardar su valor de fase en el arreglo de soluciones
3: Marcar el pixel como desenvuelto
4: Insertar el pixel en la lista adjunta
5: while (la lista adjunta no este vacía) do
6:     Eliminar de la lista adjunta el pixel con calidad mayor
7:     for (cada pixel vecino) do
8:         if (el pixel no esta desenvuelto) then
9:             Desenvolver el pixel y guardar su valor en el arreglo de soluciones
10:            Insertar el pixel en la lista adjunta
11:            Marcar el pixel como resuelto
```

2.4. Calibración radiométrica

La no-linealidad del proyector con respecto a la cámara se puede modelar de la forma

$$w = u^\gamma \quad (2.13)$$

donde

- $u \in [0, 1]$ denota el valor de pixel de imagen normalizado,
- w es la intensidad de salida actual normalizada,
- γ es una constante particular del proyector.

La Figura 2.2 muestra varios ejemplos del comportamiento del modelo no-lineal del proyector. Para un valor de $\gamma = 1$, las intensidades de entrada y salida del proyector son las mismas. Mientras que para valores $0 \leq \gamma \leq 1$, las intensidades de salida siempre son mayores que las de entrada, y para valores $\gamma > 1$, las intensidades de salida siempre son menores que las de entrada. A las curvas que se muestran en la Figura 2.2 también se les conoce como respuesta γ o respuesta de proyector.

En la mayoría de los proyectores, la respuesta del proyector no siempre sigue un modelo como en la ecuación (2.13). Por ejemplo, la Figura 2.3 muestra una

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

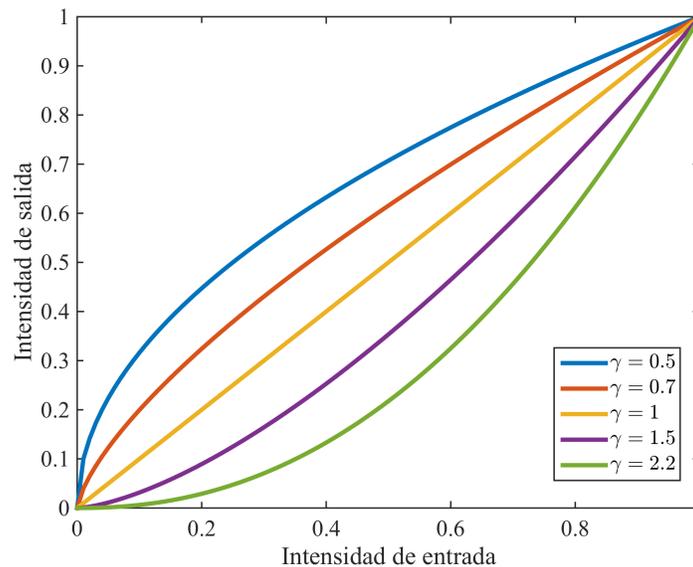


Figura 2.2: Ejemplo de curvas para diferentes valores de γ .

curva de respuesta de proyector usado en este trabajo de tesis. La curva se obtuvo proyectando y capturando las intensidades en escala de grises desde 0 hasta 255 sobre una superficie plana y blanca. Por cada imagen capturada, se seleccionó una ventana de tamaño 7×7 píxeles y se promediaron sus valores. Así, para cada intensidad proyectada (eje horizontal), se muestra el promedio de las intensidades capturadas (eje vertical).

Como puede verse en la Figura 2.3, la respuesta del proyector no siempre se puede modelar usando la ecuación (2.13). En este trabajo de tesis, se modelará la respuesta de proyector por medio de una expresión polinomial dada por

$$I_o = c_0 + c_1 I_i + \dots + c_6 (I_i)^6 + c_7 (I_i)^7 \quad (2.14)$$

donde I_i es la intensidad de entrada, I_o es la intensidad de salida y c_0, c_1, \dots, c_7 son las constantes a ser calibradas. Se escogió un polinomio de grado 7 ya que la mayoría de las curvas de respuesta de proyector se pueden ajustar a este modelo.

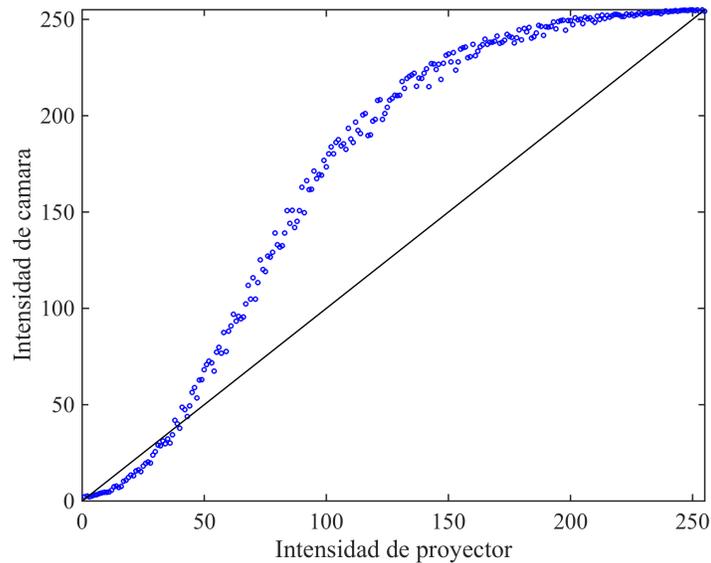


Figura 2.3: Respuesta de proyector.

2.5. Estado del arte

Existen varios métodos de rectificación radiométrica de proyectores que se pueden clasificar en dos grupos S. Zhang (2015) J. Peng y cols. (2016) Z. Li y Li (2011) J. Huang y cols. (2013):

- *Activos*: Realiza la calibración modificando los patrones de franjas antes de que se proyecten sobre el objeto.
- *Pasivos*: Se capturan las imágenes tal como está configurado el proyector y después se corrige el error de fase en las imágenes capturadas.

Para los métodos activos, P. S. Huang y cols. (2003) proponen un método donde se proyectan secuencialmente, imágenes con intensidades uniformes sobre una superficie plana con una reflectividad uniforme. Dichas imágenes son tres, una por cada canal de color rojo, verde y azul (RGB), así de esta forma obtiene una curva de escala de grises por cada uno de los canales. Para obtenerlo, emplea el uso de una cámara CCD, la cual captura las imágenes reflejadas y posteriormente, obtiene y registra el valor promedio en un área de 10×10 píxeles en el centro

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

de la imagen. Por último, cambia la intensidad de la imagen proyectada con los nuevos valores registrados, con lo cual logra realizar la compensación lineal entre las intensidades proyectadas con las capturadas.

De igual forma, X. Zhang y cols. (2012) propone un modelo genérico de franjas distorsionadas, expresado como una serie de Fourier. Así, basándose en ese modelo, un método robusto de calibración gamma es introducido. Posteriormente propone un método de corrección γ para corregir la distorsión de la misma con el valor γ calibrado. Dicho método está basado en el método de cambio de fase multifrecuencia, con lo cual se elimina el efecto de desenfoque. Tiene la ventaja de que es aplicable a todas las franjas sinusoidales, además de un rendimiento más estable para diversos lanzamientos en situaciones de desenfoque. Otra característica es que puede corregir la no linealidad y conserva la misma relación señal-ruido que la franja no corregida. Por último, en los resultados mostrados se puede ver como reduce un 75.5% la desviación estándar del error de fase cuando se aplica su método propuesto.

Por otra parte, en los métodos pasivos es donde se puede ver un mayor estudio, ya que han sido más los métodos propuestos de este tipo que los métodos activos y por lo tanto existe un mayor avance en estos. Uno de ellos es el propuesto por Guo y cols. (2004), donde realizan una corrección γ que se basa en el análisis de funciones de distribución acumulativa (FDA) y el cual permite estimar el valor γ a partir del histograma acumulativo normalizado de las imágenes de franjas. El proceso consiste de tres pasos, el primero evalúa la distribución de fase inicial empleando un algoritmo de corrimiento de fase. El segundo paso es estimar el valor γ de acuerdo con la estadística de intensidad de las imágenes, el cual consiguen al eliminar las uniformidades de brillo de fondo y la modulación de la imágenes de franjas. En el tercer paso se hace uso de la estimación gamma, donde se evalúa la distribución de fase una vez más para mejorar su precisión. Al unir la estimación gamma y la evaluación de la fase, el valor γ real puede ser calculado. De igual forma, la distribución de fase del patron de franja puede resol-

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

verse con mayor precisión. De esta forma el problema de la no linealidad puede ser resuelto.

S. Zhang y Yau (2007) y S. Zhang y Huang (2007) realizaron un algoritmo de compensación que reduce el error de fase. Ellos usan una *tabla de búsqueda* (TB) de error de fase, la cual permite reducir el error de fase en cualquier algoritmo de corrimiento de fase. En este caso, el método empleado para la creación de la TB, usa una tabla de calibración uniforme y una técnica de análisis de imágenes de franjas. Se capturan una serie de imágenes de franjas en una superficie plana y uniforme, se analiza el error de fase de las imágenes capturadas y se almacena en la TB para la compensación de error de fase. La TB que generan es de 256 elementos, la cual es pequeña pero suficiente para obtener buenos resultados al momento de corregir el error de fase. de fase de las imágenes capturadas, calculado a partir de la calibración gamma del proyector.

Liu y cols. (2010), desarrollan un método más preciso para la calibración gamma y dos estrategias para minimizar el efecto gamma en la determinación de la fase. La primera estrategia realiza la corrección gamma, lo que lleva a una mejora de 60 veces en el error de fase. La segunda estrategia, no realiza una corrección gamma, dando como resultado una mejora en el error de fase de 33 veces. Ambos representan una mejora considerable en comparación con los resultados antes mencionados. A diferencia de los métodos anteriores, este método realiza la corrección gamma a partir de una serie de patrones de franjas generados y proyectados sobre una superficie arbitraria, y después se computa la energía existente en los armónicos de orden superior sobre una base pixel por pixel. Por otra parte, cuando no se realiza la calibración gamma, la corrección se puede llevar a cabo al derivar un parámetro gamma, así como un parámetro de fase al procesar los patrones de franjas obtenidos de un escaneado de medición de fase donde la energía de los armónicos de orden superior tiende a cero.

En una investigación llevada a cabo por Hoang y cols. (2010), se muestra un esquema robusto y simple que permite eliminar la no linealidad de las intensida-

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

des producida por el efecto gamma. La particularidad de dicho esquema, es que combina un algoritmo de fase con un método de corrección gamma, con lo cual puede determinar el valor gamma que existe en el sistema al utilizar técnicas de corrimiento de fase de tres pasos. Por último, llevan a cabo un proceso de precodificación gamma al sistema, lo que brinda resultados más precisos, una velocidad más rápida y su implementación en sistemas de proyección de franjas.

Las TB han resultado ser de mucha ayuda en métodos pasivos. Xu y cols. (2011) muestran un método donde se utilizan varias TB's. Estas se calculan al colocar un plano uniforme delante del sistema, alejándolo o acercándolo al mismo y generando para cada posición una TB. Así, encuentran que las TB pueden ser representados como una función polinomial de alto orden para cada plano, a lo cual llaman *ajuste polinomial del intraplano*. Por otra parte, encuentran que el error de fase presenta una misma estructura a diferentes profundidades pero con amplitudes diferentes. Entonces, la amplitud puede representarse como un conjunto de funciones polinomiales en términos de profundidad, a lo cual llaman *acoplamiento del polinomio del interplano*. De igual forma, proponen un método que hace uso de una TB directa para la representación intraplanar y un montaje polinómico de orden inferior para la representación interplanar. Esto lo denominan como TB polinomial (TBP), debido a que todos los elementos de la TB representan una función polinomial en términos de profundidad. Por último, establecen una función matemática de error de fase determinada por la fase envuelta y la profundidad, con lo cual realizan la calibración radiométrica.

Finalmente, J.-Z. Peng y cols. (2014) muestran un método que genera la curva de compensación de la respuesta de intensidad obtenida por parte de la cámara y el proyector. Lo que proponen al usar esta curva de compensación es una función de ranura restringida o de aproximación cubica cónica restringida, con lo cual se puede calcular el valor compensado de entrada en escala de grises y posteriormente se ajusta la curva compensada. Esto proporciona algunas mejoras como son: evitar oscilaciones y sobresaltos durante el proceso de ajuste, eliminar

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

eficazmente el error de fase periódico, corrige todo el rango de respuesta de intensidad no lineal del sistema PDP, los cálculos que se realizan son más precisión y el promedio cuadrático medio (PCM) del error de fase puede reducirse a por lo menos 0.0049 rad.

Capítulo 3

Algoritmo de calibración radiométrica

En este capítulo se muestra el algoritmo o método de calibración radiométrica. El método propuesto cae dentro de los algoritmos activos ya que requieren de menos tiempo de procesamiento y se pueden utilizar en aplicaciones de alta velocidad. La idea principal de la propuesta se basa en realizar un ajuste polinomial a la curva de respuesta del proyector y generar los patrones de franjas sinusoidales inversos de tal forma que al ser proyectados, la distorsión γ se elimina con la respuesta del proyector.

3.1. Algoritmo de calibración radiométrica basado en interpolación polinomial

Los pasos del método de rectificación radiométrica son los siguientes:

1. Obtener la respuesta del proyector proyectando las intensidades en escala de grises desde 0 hasta 255.
2. Realizar un ajuste polinomial a la curva de respuesta del proyector.

CAPÍTULO 3. ALGORITMO DE CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA

3. Calcular el polinomio inverso del paso anterior.
4. Generar los patrones sinusoidales ideales de acuerdo a las ecuaciones (2.2) a (2.4).
5. Aplicar el polinomio inverso del paso 3 a los patrones sinusoidales ideales, y así obtener los patrones inversos.

Usando la respuesta de proyector que se muestra en la Figura 2.3. La Figura 3.1 muestra el ajuste polinomial de la respuesta de proyector de la Figura 2.3. La curva de color rojo en la Figura 3.1 representa un polinomio de grado 7 que pasa por los puntos en la curva de respuesta del proyector (vea la ecuación (2.14)). El ajuste polinomial se obtuvo por medio de la función `polyfit` en MatLab para el intervalo de valores entre 30 y 240. No se utilizaron los valores iniciales ni finales en la curva de respuesta ya que comúnmente la cámara no los puede distinguir. Al intervalo de intensidades que la cámara puede distinguir se le llama *rango dinámico*.

Para calcular el polinomio inverso del ajuste polinomial en el paso 3 del método de calibración radiométrico. Considere la tabla de valores (I_o^k, I_i^k) donde I_o^k es la intensidad de salida y I_i^k es la intensidad de entrada en el ajuste polinomial. Si intercambiamos los renglones por columnas en la tabla como (I_i^k, I_o^k) se puede graficar el polinomio inverso como se muestra en la Figura 3.1. Sin embargo, para cualquier valor $0 \leq x \leq 255$ no necesariamente existe un valor I_i^k igual a x . Se puede obtener un valor muy cercano a x si el número de puntos k en la tabla es lo suficientemente grande, tal que $|\hat{I}_i^k - x|$ sea mínimo para algún \hat{I}_i^k .

La Figura 3.2(izquierda) muestra los patrones sinusoidales en una dimensión descritos en las ecuaciones (2.2) a (2.4) donde $a = 30$, $b = (240 - 30)/2$ y $p = 1024$. Note que el rango dinámico usado en este ejemplo es el intervalo de 30 a 240. Cuando los patrones ideales generados en el paso 4 del método de calibración radiométrica son proyectados, éstos se modifican por la respuesta del proyector. La modificación de las curvas ideales se puede simular evaluando el polinomio cal-

CAPÍTULO 3. ALGORITMO DE CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA

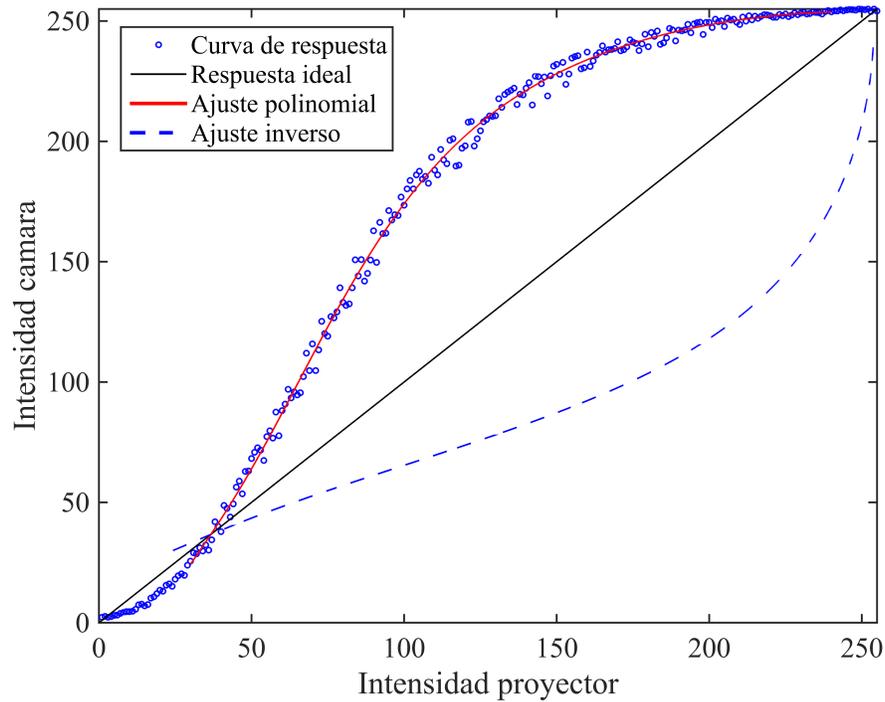


Figura 3.1: Ejemplo de curva de respuesta del proyector. Se muestra el ajuste polinomial de la curva de respuesta y su polinomio inverso. También se muestra la curva de respuesta ideal como referencia.

culado en el paso 2 en cada punto de las curvas. La Figura 3.2(derecha) muestra una simulación de la modificación de los patrones sinusoidales al ser proyectados. Como puede verse las intensidades crecen al ser proyectadas, modificando la forma sinusoidal de los patrones ideales.

Finalmente, para construir los patrones sinusoidales inversos se evalúa el polinomio inverso en cada uno de los valores en los patrones ideales. El número de valores I_i^k usados para aproximar los valores inversos es de $210/0.01=21000$. La Figura 3.3(izquierda) muestra los patrones sinusoidales inversos en una dimensión obtenidos a partir del polinomio inverso. Como puede verse, el rango de valores en las intensidades es menor que en los patrones ideales. Los patrones inversos tienen la propiedad de que al ser proyectados, sus intensidades se corrigen por medio de la respuesta del proyector y volviéndose sinusoidales. Lo anterior se puede demostrar experimentalmente si aplicamos el polinomio ajustado a la

CAPÍTULO 3. ALGORITMO DE CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA

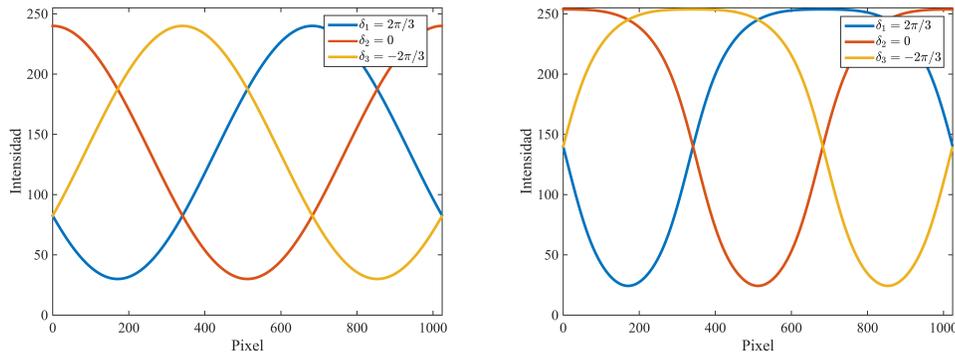


Figura 3.2: (izquierda) Patrones sinusoidales en una dimensión descritos en las ecuaciones (2.2) a (2.4) y (derecha) patrones sinusoidales ideales modificados por la respuesta del proyector.

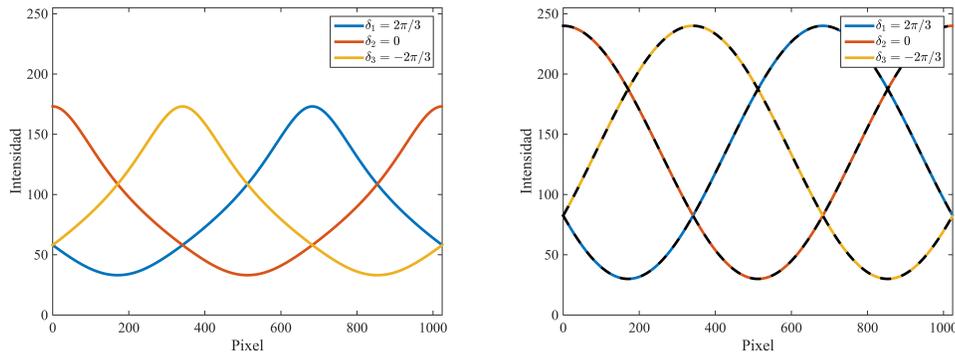


Figura 3.3: (izquierda) Patrones sinusoidales inversos en una dimensión y (derecha) superposición de los patrones ideales con los patrones proyectados invertidos (líneas punteadas).

respuesta del proyector a cada uno de los puntos de los patrones inversos. Como puede verse en la Figura 3.3(derecha) los patrones inversos proyectados se ajustan a los patrones ideales lo que verifica la efectividad del método de calibración radiométrica.

Para visualizar el error entre los patrones ideales y los patrones inversos proyectados, se tomó la diferencia absoluta entre ellos. La Figura 3.4 muestra el error para los patrones de la Figura 3.3(derecha). El valor promedio del error para los corrimientos $\delta_1 = 2\pi/3$, $\delta_2 = 0$ y $\delta_3 = -2\pi/3$ en la Figura 3.4 son 0.0041, 0.0043 y 0.0041 píxeles, respectivamente.

CAPÍTULO 3. ALGORITMO DE CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA

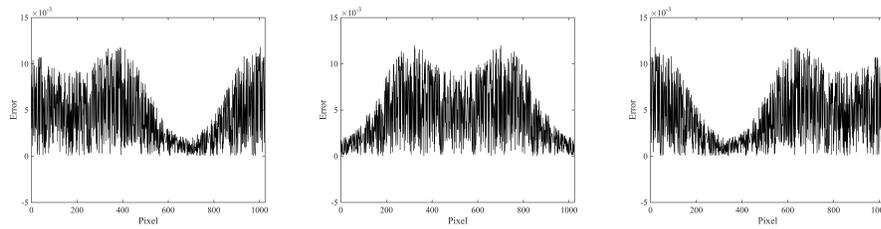


Figura 3.4: De izquierda a derecha: se muestran el error o diferencia absoluta entre los patrones ideales y los patrones inversos proyectados para $\delta_1 = 2\pi/3$, $\delta_2 = 0$ y $\delta_3 = -2\pi/3$, respectivamente.

3.2. Influencia de la distorsión γ en la información de fase

Para visualizar el efecto de la distorsión γ del proyector sobre la información de fase, se calculará la fase $\phi(x, y)$ usando la ecuación (2.11) usando los patrones ideales de la Figura 3.2(izquierda), los patrones modificados por la respuesta del proyector en la Figura 3.2(derecha) y los patrones inversos de la Figura 3.3(izquierda). La Figura 3.5 muestra la fase de estos 3 casos mencionados. Como se puede ver, la respuesta del proyector altera drásticamente la información de fase en los casos de los patrones modificados e inversos. El salto brusco que se observa en la fases se debe a las discontinuidades en el mapa de fase envuelto como se expresó en la ecuación (2.12).

En la Figura 3.6(izquierda) se muestra una comparación entre la fase desenvuelta ideal y la fase desenvuelta inversa proyectada. En este ejemplo se usó el algoritmo de desdoblamiento de fase guiado por calidad. En la Figura 3.6(derecha) se muestra el error o diferencia absoluta entre las fases de la Figura 3.6(izquierda). Se encontró que el valor promedio del error fue de 0.000036 radianes.

Finalmente, en la Figura 3.7 se muestran los patrones sinusoidales inversos bidimensionales con corrección radiométrica que se utilizarán en un sistema PDP.

CAPÍTULO 3. ALGORITMO DE CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA

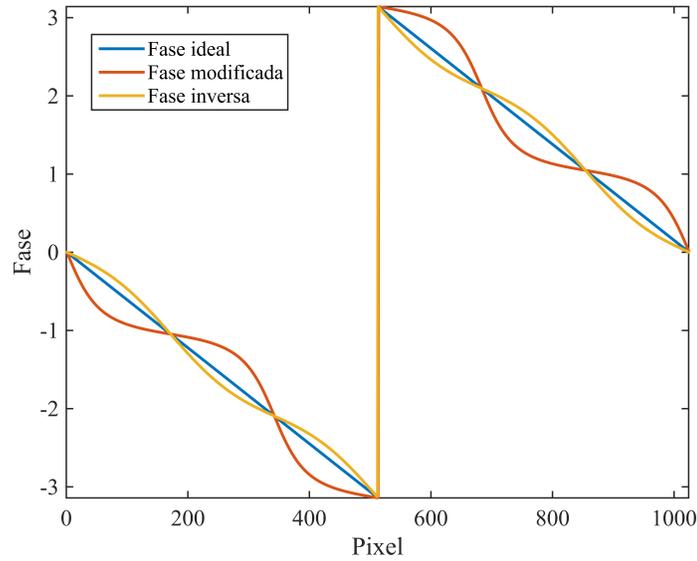


Figura 3.5: Se muestra la fase envuelta $\phi(x, y)$ para los patrones ideales, modificados e inversos.

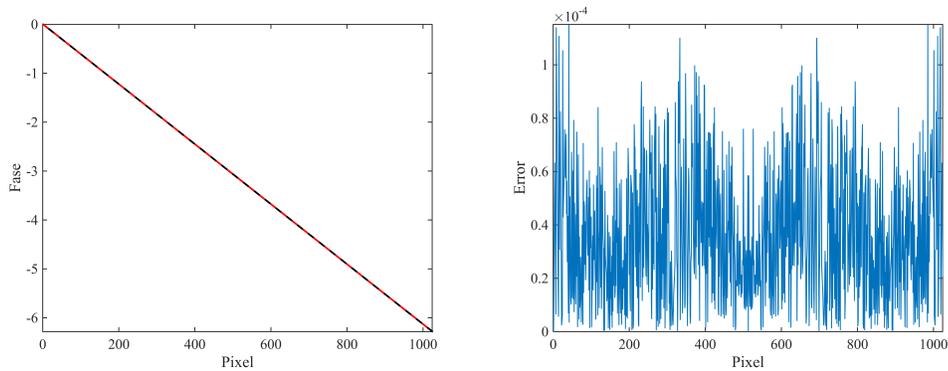


Figura 3.6: (izquierda) Superposición de la fase desenvuelta ideal y la fase desenvuelta inversa proyectada, (derecha) diferencia absoluta entre las fases de la izquierda.

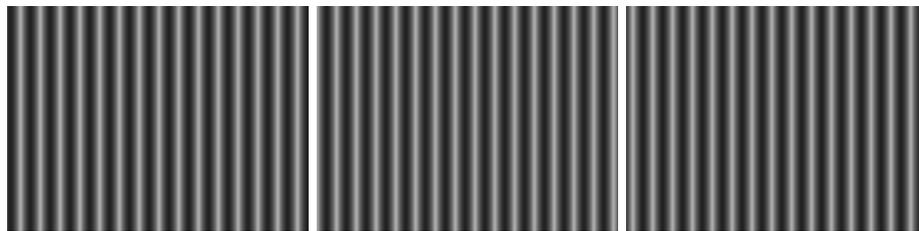


Figura 3.7: (Patrones sinusoidales con corrección radiométrica con 3 corrimientos de tamaño 640×480 píxeles, $a = 30$, $b = (240 - 30)/2$ y $p = 42$ píxeles de ancho.

Capítulo 4

Software de aplicación

En este capítulo se presenta el análisis y diseño del software de aplicación para el proceso de calibración radiométrica. Mediante diagramas UML, se presenta el funcionamiento de la aplicación, especificando diagramas de casos de uso, de clases, interacción y actividades.

4.1. Análisis de requerimientos

La funcionalidad de un sistema de reconstrucción tridimensional se muestra en la Fig. 4.1. Está dividido en dos partes, del lado izquierdo se encuentran los procesos para realizar la calibración radiométrica, del lado derecho se presentan los procesos para la reconstrucción tridimensional. Como puede observarse, la calibración radiométrica es usada por la calibración cámara proyector con el objetivo de realizar una calibración más precisa.

Este trabajo está centrado en el proceso de la calibración radiométrica, por tanto, se trabajó con todos los módulos de la parte izquierda.

Para tener una idea más explícita de lo que significa la calibración radiométrica, es necesario tener una imagen de la problemática. La luz que proyecta el sol sobre los objetos tiene un reflejo que el sistema ocular captura y es así como los ojos captan la forma y el color del objeto. Dado que el ser humano tiene dos ojos,

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

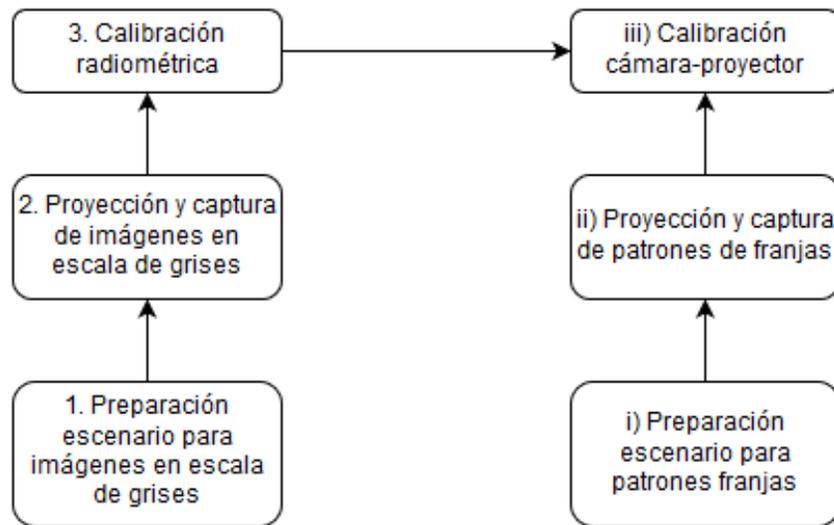


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema propuesto de calibración

el cerebro triangula la información que ambos ojos capturan, para identificar la forma y la posición. Respecto al color, el cerebro procesa la luz, pero no es capaz de distinguir dos colores cuando éstos son muy cercanos o son de luz infrarroja o ultravioleta.

En el ámbito digital, la cámara es un sensor que simula la función del ojo, el proyector emite la luz y la calibración cámara-proyector es utilizada para obtener los parámetros internos y externos de la cámara del escenario donde se encuentra el objeto y con esto, identificar la forma y la distancia del mismo. Ya que la cámara tiene la función de *mirar*, así como los ojos, también tiene limitaciones, es decir, tiene rangos de color que no distingue. Lo que ocasiona pérdida de información que puede derivar a un reconstrucción tridimensional imprecisa.

Para obtener una *mirada* más amplia, la calibración radiométrica es efectuada. En la Fig. 4.2, se muestra el proceo de calibración que consiste en emitir, a través del proyector, una combinación de colores en escala de grises. Por ejemplo, si la profundidad del color es de 8 bits, entonces se tienen 2^8 tipos de grises, en donde 0 es negro y 255 es blanco. La emisión de cada intensidad de gris es capturada por la cámara, lo que resulta en un conjunto de 256 niveles de grises. Con esta información se obtiene la respuesta γ del proyector y se calcula el rango dinámico

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

de las intensidades en nivel de gris que son afectadas, identificadas como a y b , donde a indica el valor inicial y b el valor final del rango. Con esta información se obtienen los patrones de interferencia que serán utilizados para la calibración cámara-proyector.

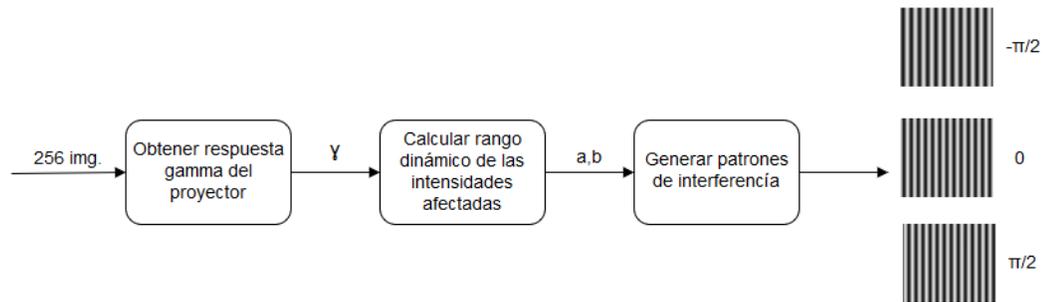


Figura 4.2: Diagrama de bloques del módulo de calibración radiométrica

Una vez obtenidos los patrones de franjas se procede a proyectarlos, empleando los módulos i) y ii). Estos, se proyectan de la misma manera que las imágenes en niveles de gris de los módulos 1 y 2, ya que son imágenes, sin embargo, es importante hacer la separación en el proceso, ya que una proyección es de niveles de gris y la otra es de patrones de interferencia.

4.2. Diseño

En esta sección se muestra el diseño del software propuesto, mediante la realización de diagramas UML. Estos permiten que se tenga un idea más detallada de lo que contendrá el software, así como la funcionalidad del mismo, las arquitectura correcta, las comunicación entre clases y la ruta que se debe seguir en cada proceso. Se emplean diagramas de casos de uso, diagrama de clases, diagramas de interacción y diagramas de actividades para explicar la metodología a utilizar, la cual está centrada en el Proceso Unificado de Desarrollo de Software (PUDS).

4.2.1. Casos de uso

Para explicar los diferentes eventos requeridos en el software, se realizan casos de uso que ayuden a comprender las secuencias de interacciones que existen entre el actor y el sistema. El actor, que a partir de ahora se hará referencia a él como *usuario*, es el que inicia los diferentes eventos del sistema y en este caso solo se hace presente un actor. En la figura 4.3 se muestra el diagrama de caso de uso general para el software de aplicación.

A continuación, se presenta a detalle la descripción de cada uno de los casos de uso que componen el software de aplicación.

NOMBRE: Seleccionar imágenes.

Actor: Usuario.

Descripción: Permite al usuario seleccionar la ubicación de las imágenes que serán proyectadas.

Disparador: Con un solo click sobre el botón de "Load Images".

Precondiciones: Tener iniciada una sesión con la cámara.

Postcondiciones: ninguna.

Flujo normal:

1. El usuario solicita seleccionar las imágenes. (E1)
2. El sistema muestra un cuadro de dialogo para elegir la ubicación de las imágenes.
3. El usuario escoge la ubicación de la imágenes. (S1)
4. El sistema muestra un mensaje indicando que se encontraron todas las imágenes.
5. El sistema lee la ubicación de las imágenes y muestra los nombres y la ubicación de los archivos en forma de lista.
6. Finaliza el caso de uso.

Flujos alternativos:

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

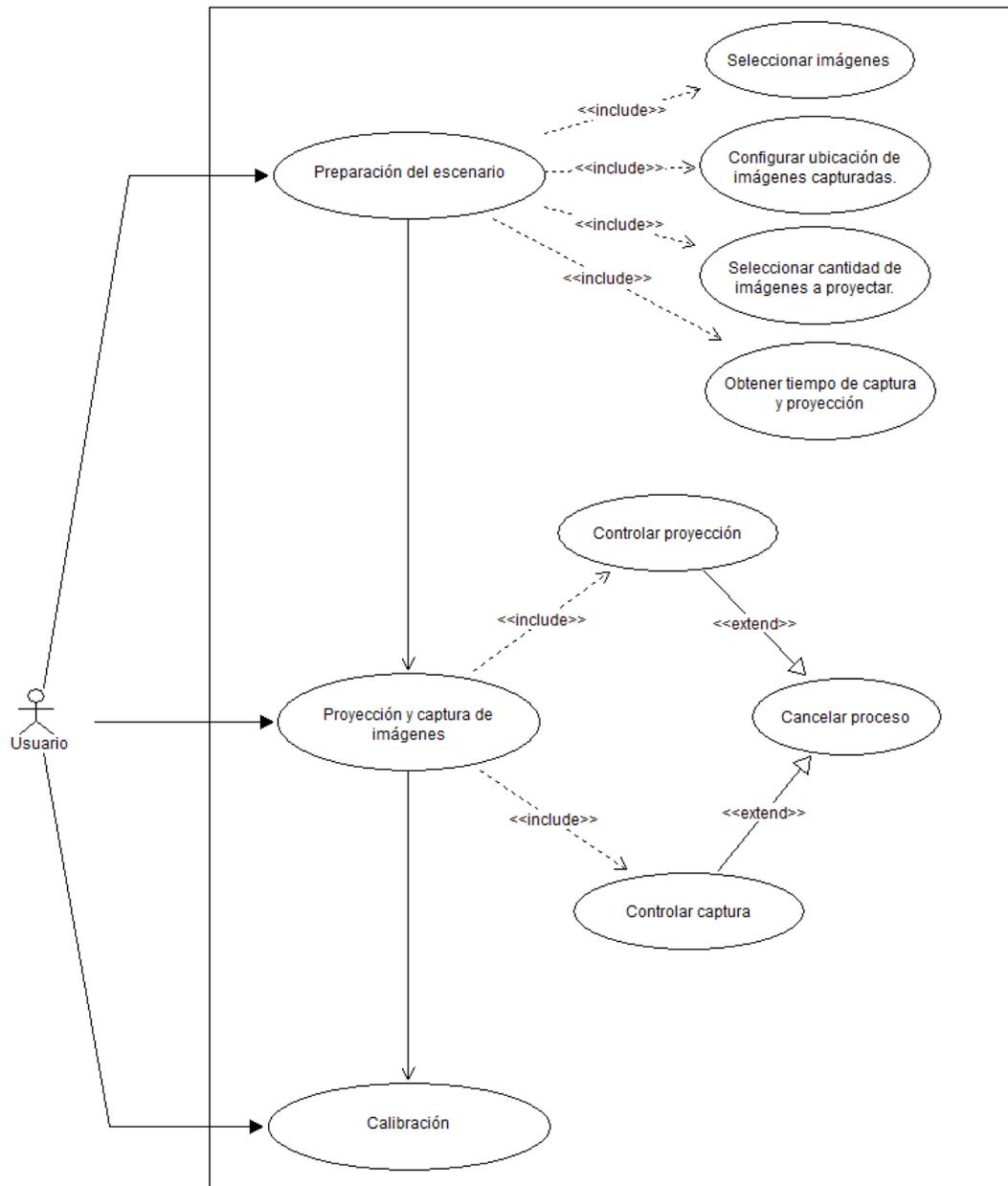


Figura 4.3: Diagrama general de casos de uso del software propuesto.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

S1 El usuario cancela la selección de la ubicación de las imágenes antes del paso 4 del flujo normal.

a) Finaliza el caso de uso.

Excepciones:

E1 Problemas al abrir el cuadro de dialogo.

a) El sistema muestra un mensaje indicando que existe un problema al abrir el cuadro de dialogo.

b) Vuelve al flujo principal, paso 1.

Prioridad: Alta.

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: El usuario debe generar previamente las imágenes a proyectar.

Requerimientos especiales: El software ya identifica correctamente los dispositivos de proyección y cámara.

NOMBRE: Configurar ubicación de imágenes capturadas.

Actor: Usuario.

Descripción: Permite definir la ubicación donde el sistema guardará las imágenes capturadas.

Disparador: Al seleccionar una de las dos opciones ("Camera"ó "Computer"), mediante un radio button.

Precondiciones: Tener iniciada una sesión con la cámara.

Postcondiciones: Indicar un directorio si la opción elegida es "Computer".

Flujo normal:

1. El sistema muestra las opciones para definir la ubicación de las imágenes capturadas.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

2. El usuario elige una opción.

2.1. Si la opción elegida es "Camera", el sistema establece la memoria SD de la cámara como la ubicación donde se guardarán las imágenes.

2.2. Si la opción elegida es "Computer", el sistema establece el directorio especificado como la ubicación donde se guardarán las imágenes.

(S1)

3. Finaliza el caso de uso.

Flujos alternativos:

S1. El sistema muestra un directorio por default en una caja de texto, donde se guardarán las imágenes.

S1.1. El usuario puede especificar un directorio donde guardar las imágenes capturadas al dar click en el botón "Browse".

S1.2. El usuario escoge el directorio donde desea guardar las imágenes capturadas. (S2)

S1.3. El sistema establece el directorio especificado como la ubicación de las imágenes capturadas y se muestra el mismo en la caja de texto.

S1.4. Finaliza el caso de uso.

S2. El usuario puede cancelar la opción de elegir el directorio donde se guardarán las imágenes capturadas.

S2.1. El sistema establece el directorio por default y la ubicación donde se guardarán las imágenes capturadas.

S2.2. Finaliza el caso de uso.

Excepciones:

E1. Escoger una opción sin tener previamente iniciada una sesión con la cámara.

E1.1. El sistema muestra un mensaje que dice "Referencia a objeto no establecida como instancia de un objeto".

E1.2. Vuelve al flujo principal, paso 2.

Prioridad: Alta.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: Ninguna.

NOMBRE: Seleccionar cantidad de imágenes a proyectar.

Actor: Usuario.

Descripción: Permite al usuario seleccionar la cantidad de imágenes a proyectar.

Disparador: Al seleccionar las imágenes de un list box o al dar click en el botón "Select All".

Precondiciones: Tener iniciada una sesión con la cámara.

Postcondiciones: Ninguna.

Flujo normal:

1. El sistema muestra en un list box las imágenes encontradas en la ubicación indicada previamente en el caso de uso "Seleccionar imágenes".
2. El usuario selecciona la o las imágenes que desea proyectar. (S1)
3. El sistema marca los archivos seleccionados con una paloma en el list box.
4. Finaliza caso de uso.

Flujos alternativos:

S1. El usuario puede seleccionar todas las imágenes al dar click sobre el botón "Select All".

S1.1. El sistema marca con una paloma todos los archivos mostrados en el list box.

S1.2. Finaliza el caso de uso.

Excepciones:

E1. No existen archivos para seleccionar en el list box.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

E1.1. El sistema muestra un mensaje indicando que el list box no cuenta con archivos para seleccionar.

E1.2. Vuelve el flujo principal, paso 2.

Prioridad: Alta.

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: Ninguna.

NOMBRE: Obtener tiempo de proyección y captura.

Actor: Usuario.

Descripción: Se obtiene el tiempo definido en la cámara y se establece en la aplicación como el tiempo de proyección y captura.

Disparador: Al dar click en el botón "Take Photo".

Precondiciones: Tener iniciada una sesión con la cámara.

Postcondiciones: Ninguna.

Flujo normal:

1. El usuario solicita iniciar con el proceso de proyección y captura.
2. El sistema obtiene el valor definido en la cámara.
3. El sistema establece el valor obtenido como el tiempo de proyección y captura.
4. Inicia el caso de uso "Controlar proyección".
5. Inicia el caso de uso "Controlar captura".
6. Finaliza el caso de uso.

Flujos alternativos: Ninguno.

Excepciones:

E1. La cámara se desconecta.

E1.1. El sistema indica que la cámara se ha desconectado antes de finalizar el proceso.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

E1.2. Finaliza caso de uso.

Prioridad: Alta.

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: Ninguna.

Requerimientos especiales: Tener definido el tiempo en la cámara.

NOMBRE: Controlar proyección.

Actor: Usuario.

Descripción: Se controla el proceso de proyección de la imágenes seleccionadas previamente en el caso de uso "Seleccionar imágenes".

Disparador: Al dar click sobre el botón "Take Photo".

Precondiciones: Contar con una cantidad de imágenes a proyectar.

Postcondiciones: Ninguna.

Flujo normal:

1. El usuario solicita tomar foto.
2. El sistema inicia la librería GLUT encargada de la proyección.
3. El sistema crea una ventana de nombre "Projection" y con dimensiones definidas a partir del ancho y alto de las imágenes a proyectar.
4. El sistema ejecuta la función que controla el tiempo de proyección de cada imagen.
 - 3.1. El sistema lee la imagen a proyectar y convierte la misma en textura para que puedan ser proyectada.
 - 3.2. El sistema procede a desplegar la imagen mediante el proyector.
 - 3.3. Inicia caso de uso "Controlar captura".
 - 3.4. El sistema espera el tiempo definido para la proyección de la imagen antes de volver a repetir el proceso a partir del punto 3.1 y hasta que se terminen de proyectar todas las imágenes.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

5. El sistema destruye la ventana creada y regresa el control a la ventana principal del sistema.
6. Finaliza el caso de uso.

Flujos alternativos: Ninguno.

Excepciones:

- E1. El archivo de imagen a proyectar no existe.
 - a) El sistema indica que el archivo de imagen no ha sido encontrado.
 - b) Vuelve al flujo principal, paso 3.

Prioridad: Alta.

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: Ninguna.

Requerimientos especiales: Ninguno.

NOMBRE: Controlar captura.

Actor: Sistema.

Descripción: Se controla el proceso de captura de imágenes.

Disparador: Al dar click sobre el botón "Take Photo".

Precondiciones: Tener iniciada una sesión con la cámara.

Postcondiciones: Ninguna

Flujo normal:

1. El usuario solicita tomar foto.
2. El sistema despliega la imagen a proyectar.
3. El sistema ejecuta la captura de imagen.
4. El sistema espera a que la cámara termine de capturar la imagen dependiendo del tiempo establecido para la captura de la misma.
5. El sistema guarda la imagen a partir de lo indicado en el caso de uso "Configurar ubicación de imágenes capturadas".

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

6. El sistema repite el proceso a partir del punto 1 y hasta que se termine de realizar todas las capturas.
7. Finaliza caso de uso.

Flujos alternativos: Ninguno.

Excepciones:

E1. La cámara se desconecta.

E1.1. El sistema indica que la cámara se ha desconectado antes de finalizar el proceso.

E1.2. Finaliza caso de uso.

E2. No se pudo guardar imagen.

E2.1. El sistema indica que existe un problema al guardar las imágenes.

E2.2. Finaliza caso de uso.

E3. Error al ejecutar la captura de imagen.

E3.1. El sistema indica que existe un problema al capturar la imagen.

E3.2. Finaliza caso de uso.

Prioridad: Alta.

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: Ninguna.

Requerimientos especiales: Espacio de almacenamiento suficiente en la memoria SD de la cámara o en el disco duro de la computadora.

NOMBRE: Cancelar proceso.

Actor: Usuario.

Descripción: Permite cancelar el proceso de proyección o captura de imágenes.

Disparador: Al presionar la tecla escape.

Precondiciones: Haber iniciado el proceso de proyección y captura de imágenes.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

Postcondiciones: Regresar el control a la ventana principal del sistema.

Flujo normal:

1. El usuario solicita terminar el proceso de proyección y captura de imágenes al presionar la tecla escape.
2. El sistema finaliza el proceso de proyección y captura.
3. El sistema devuelve el control a la ventana principal del sistema.
4. Finaliza caso de uso.

Flujos alternativos: Ninguno.

Excepciones: Ninguna.

Prioridad: Media.

Frecuencia de uso: Media.

Reglas de negocio: Ninguna.

Requerimientos especiales: El teclado debe funcionar correctamente.

NOMBRE: Calibración (Calcular tabla).

Actor: Usuario.

Descripción: Calcula y muestra en una tabla los valores ideales y la respuesta de la proyección a partir de las imágenes capturadas, así como una gráfica representando lo mismos.

Disparador: Al dar click sobre el botón "Get Table".

Precondiciones: Contar con las imágenes capturadas.

Postcondiciones: Ninguna.

Flujo normal:

1. El usuario solicita obtener la tabla.
2. El sistema muestra un cuadro de dialogo para elegir la ubicación de las imágenes capturadas.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

3. El usuario escoge la ubicación de la imágenes. (S1)
4. El sistema empieza a calcular la respuesta del proyector a partir de las imágenes dentro del directorio indicado.
5. Se guarda el valor ideal y el resultado en una matriz de 2x255.
6. El sistema muestra la tabla con los valores dentro de la matriz.
7. El sistema muestra una gráfica a partir de los datos contenidos en la tabla, mostrando la respuesta del proyector y la que debería ser la respuesta ideal.
8. Finaliza el caso de uso.

Flujos alternativos:

- S1. El usuario puede cancelar la selección de la ubicación de las imágenes antes del paso 4 del flujo normal.
 - S1.1. Finaliza el caso de uso.

Excepciones:

- E1. El directorio esta vacío.
 - E1.1. El sistema muestra un mensaje indicando que el parámetro no es valido y que se seleccione otro directorio.
 - E1.2. Vuelve al flujo normal, paso 1.
- E2. El directorio contiene más ó menos de 256 imágenes.
 - E2.1. El sistema muestra un mensaje indicando que el índice está fuera de los límites de la matriz y que se seleccione otro directorio.
 - E2.2. Vuelve al flujo normal, paso 1.

Prioridad: Alta.

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: Ninguna.

Requerimientos especiales: El directorio que contiene las imágenes capturadas debe tener 256 imágenes.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

NOMBRE: Calibración (Rango dinámico).

Actor: Usuario.

Descripción: Muestra el valor inicial del rango dinámico, así como el valor final del mismo.

Disparador: Al dar click sobre el botón "Dynamic Range".

Precondiciones: Haber calculado la tabla.

Postcondiciones: Ninguna.

Flujo normal:

1. El usuario solicita obtener el rango dinámico.
2. El sistema empieza a buscar el valor inicial del rango dinámico.
3. El sistema empieza a buscar el valor final del rango dinámico.
4. El sistema muestra el valor inicial y final en una caja de texto.
5. Finaliza el caso de uso.

Flujos alternativos: Ninguno.

Excepciones:

E1. La tabla esta vacía.

E1.1. El sistema muestra un mensaje indicando que el valor es nulo y por lo tanto la tabla esta vacía. Es necesario obtener primero la tabla.

E1.2. Vuelve al flujo normal, paso 1.

Prioridad: Alta.

Frecuencia de uso: Alta.

Reglas de negocio: Ninguna.

Requerimientos especiales: La tabla debe contar con 256 elementos.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

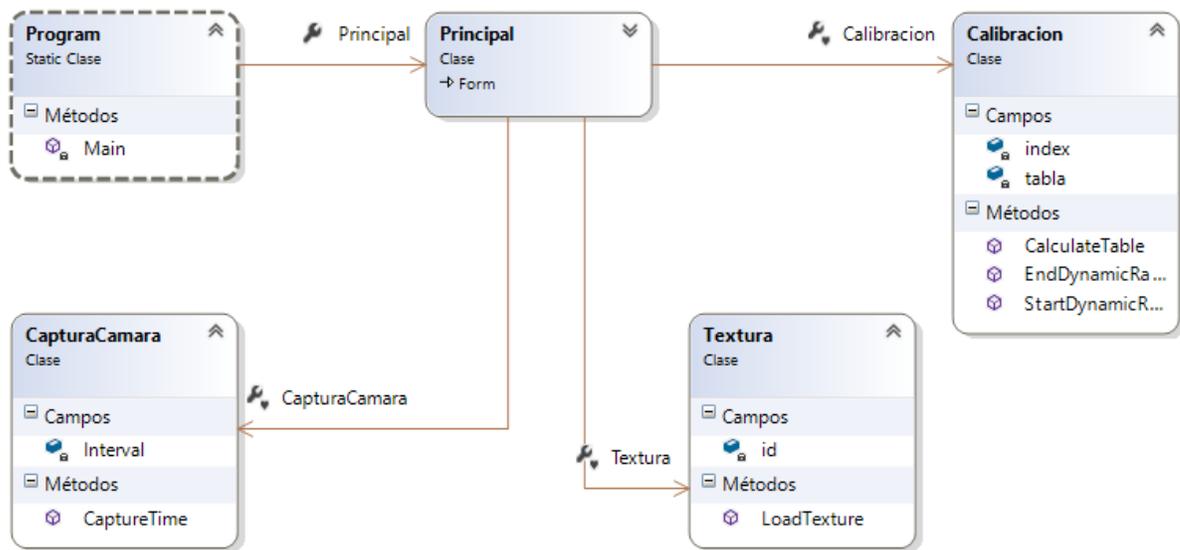


Figura 4.4: Diagrama de clases de la aplicación.

4.2.2. Diagrama de clases y de interacción

El diagrama de clases se muestra en la Fig. 4.4. Como puede observarse está compuesto de cinco clases que están unidas a través de la clase principal. A partir de ella, el software de aplicación permite realizar la configuración para la proyección y la captura de imágenes y el cálculo de la curva de respuesta.

Utilizando las clases, los diagramas de interacción permiten visualizar la comunicación entre las instancias de las clases. Cada diagrama de interacción corresponde a un caso de uso, describiendo la forma en que el actor interactúa con el sistema a través de una llamada a cierto evento. Las Figs. 4.5 a la 4.7 muestran los diagramas de interacción para los casos de uso: preparación del escenario, proyección y captura de imágenes y calibración.

4.2.3. Diagramas de actividades

Para concluir con el diseño del software, los diagramas de actividades muestran el flujo de trabajo que se realiza en cada caso de uso. Se expresa de forma coherente cómo se llevan a cabo las actividades del sistema de calibración radiométrica, así

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

como las decisiones que se toman en cada una de ellas. En las figuras 4.8- 4.11 se muestran los diagramas de actividades referentes al caso de preparación del escenario. En las figuras 4.12 y 4.13 se presentan los diagramas de actividades para el proceso de proyección y captura de imágenes, y de la cancelación del mismo. Por último, en la figura 4.14 se indica el diagrama de actividades para la parte de la calibración radiométrica.

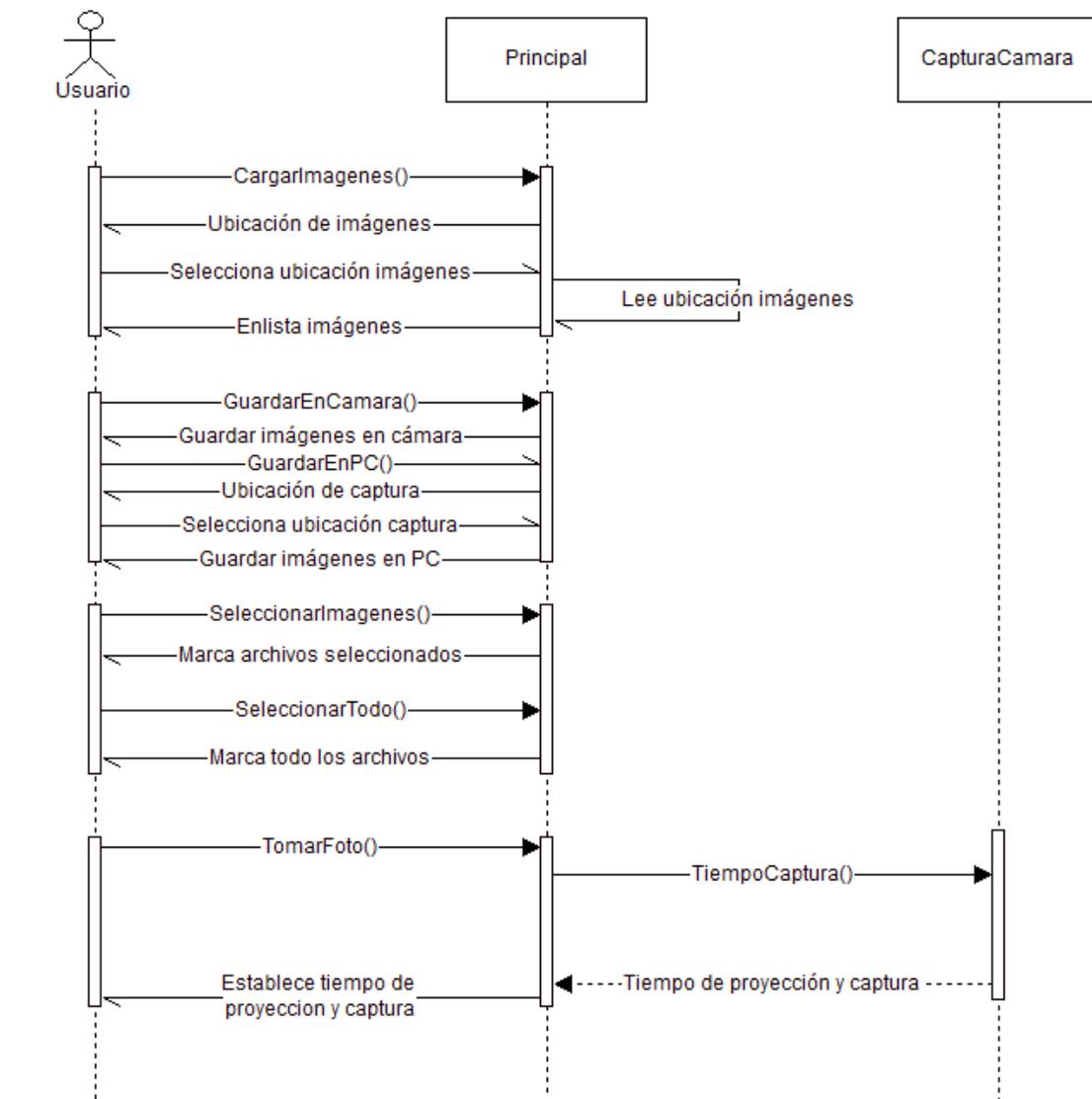


Figura 4.5: Diagrama de interacción que describe la comunicación que existe en la preparación del escenario.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

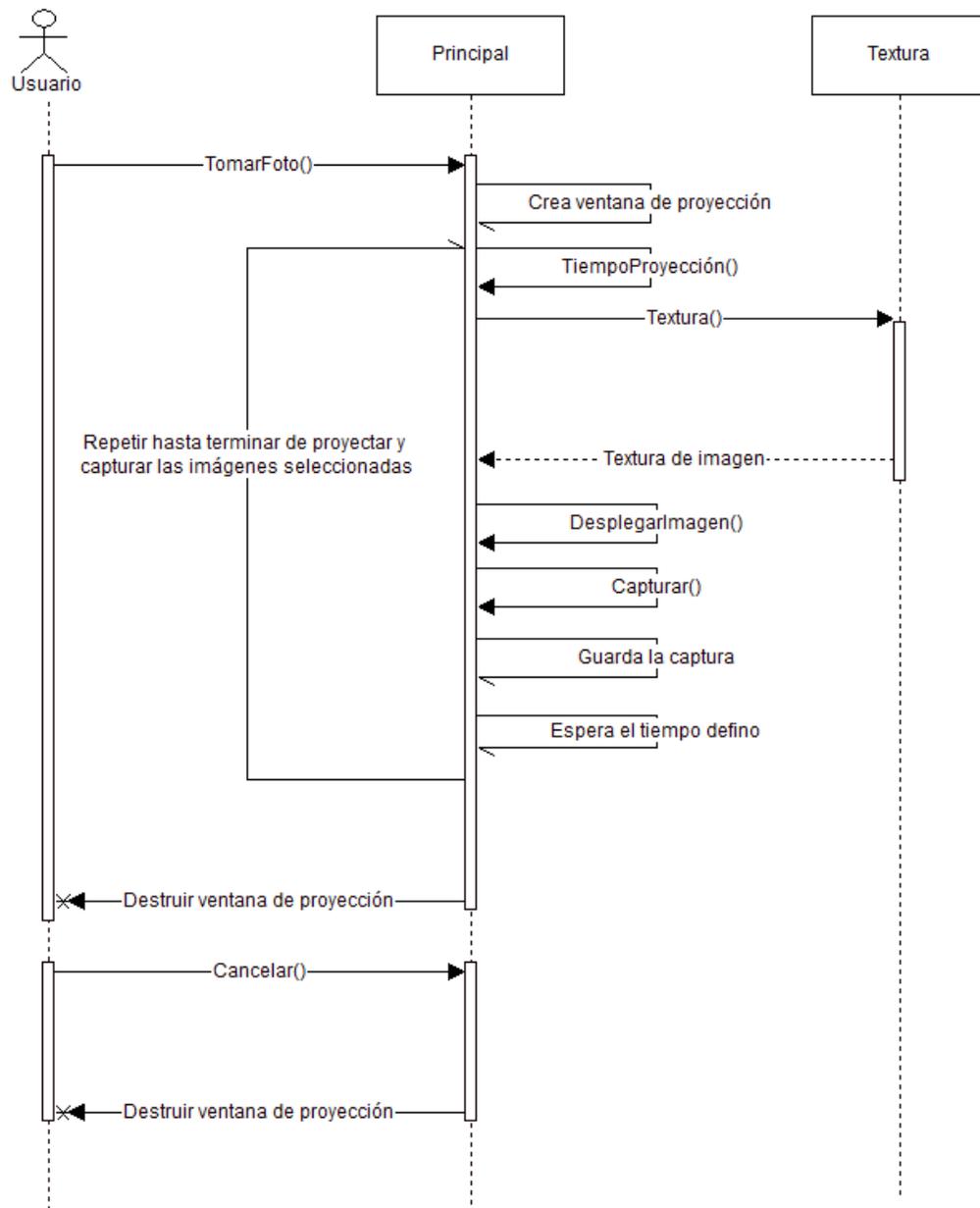


Figura 4.6: Diagrama de interacción que describe la comunicación que existe en la proyección y captura de imágenes.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

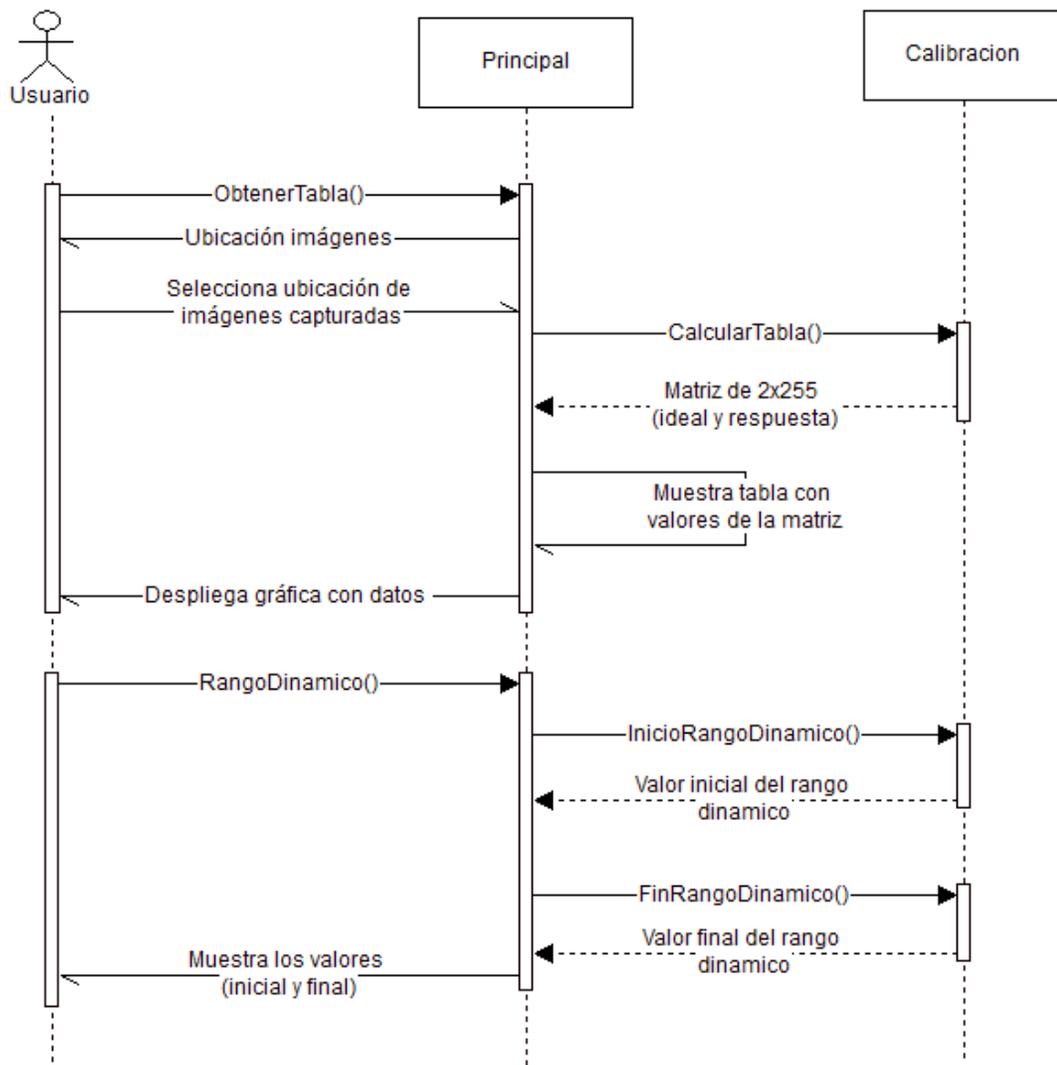


Figura 4.7: Diagrama de interacción que describe la comunicación que existe en la calibración.

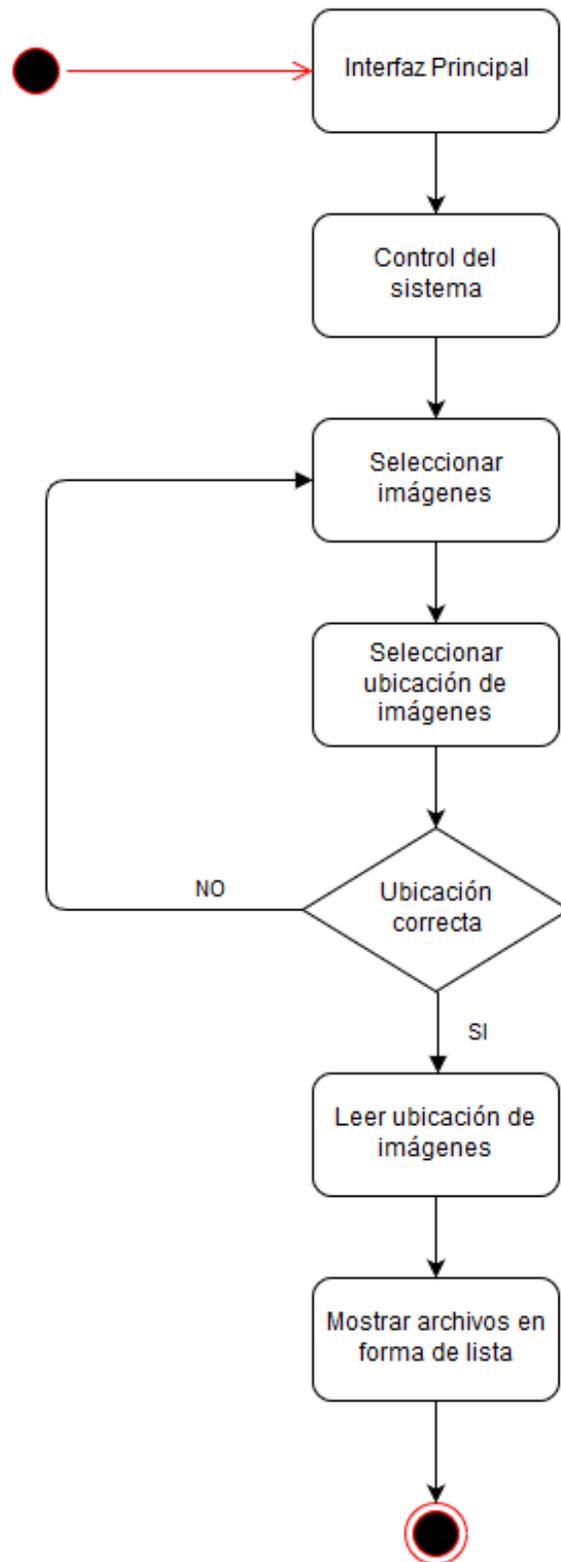


Figura 4.8: Diagrama de actividades para la selección de imágenes.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

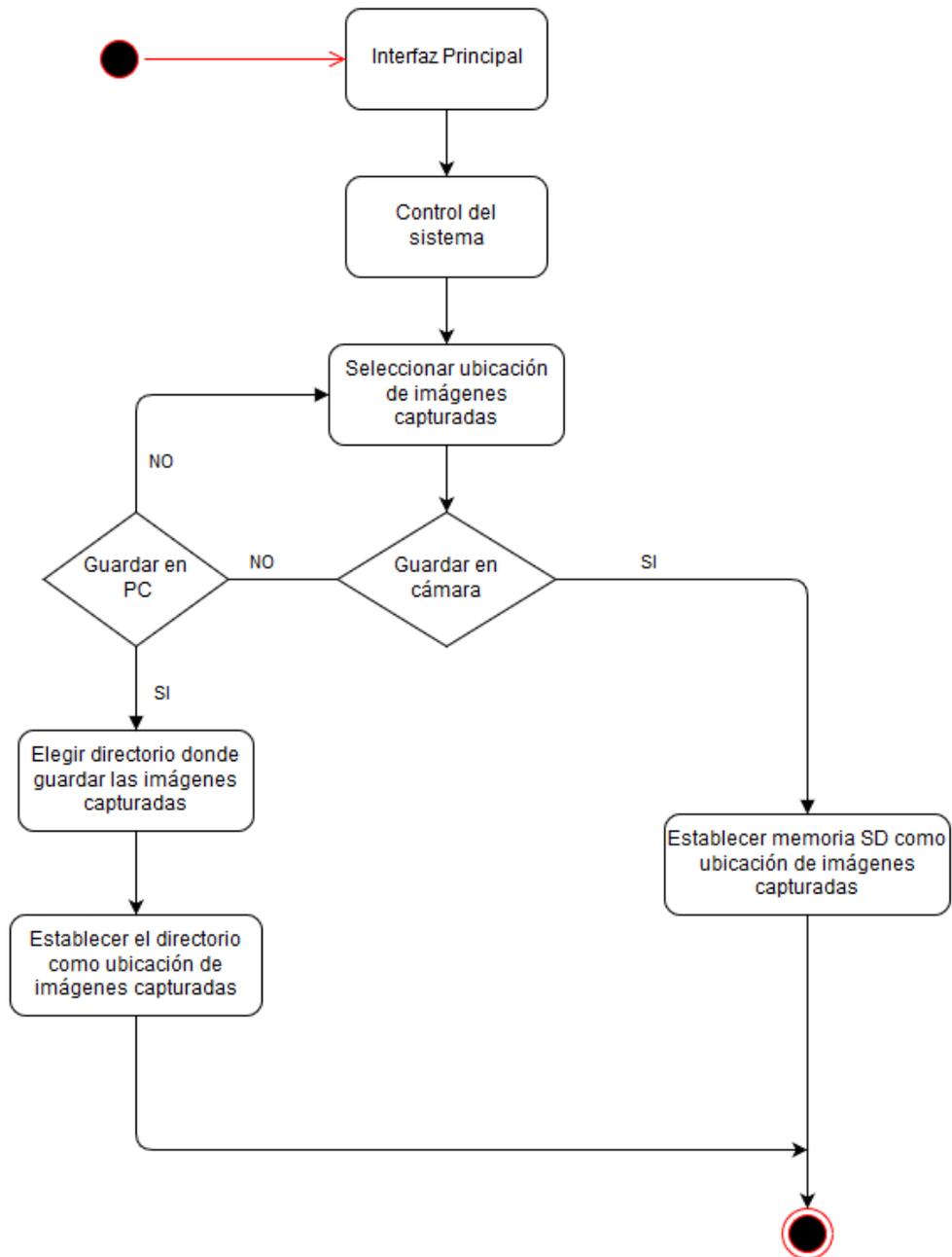


Figura 4.9: Diagrama de actividades para la ubicación de las imágenes capturadas.

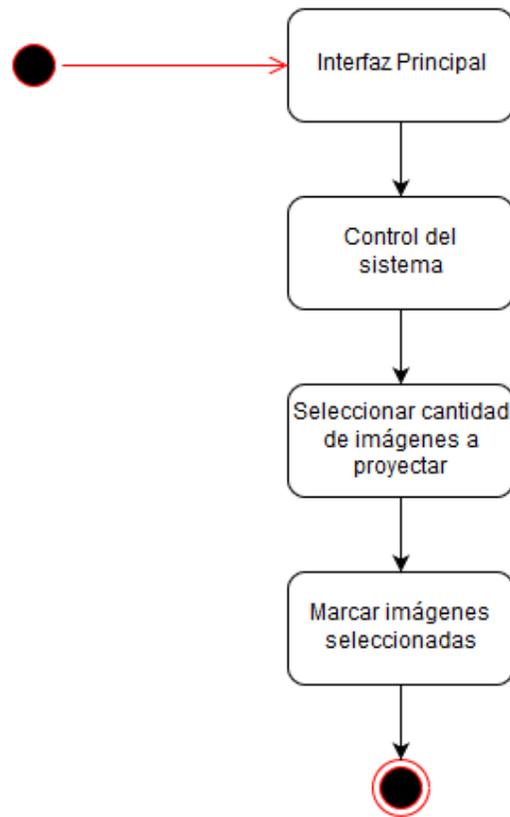


Figura 4.10: Diagrama de actividades para la selección de la cantidad de imágenes a proyectar.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

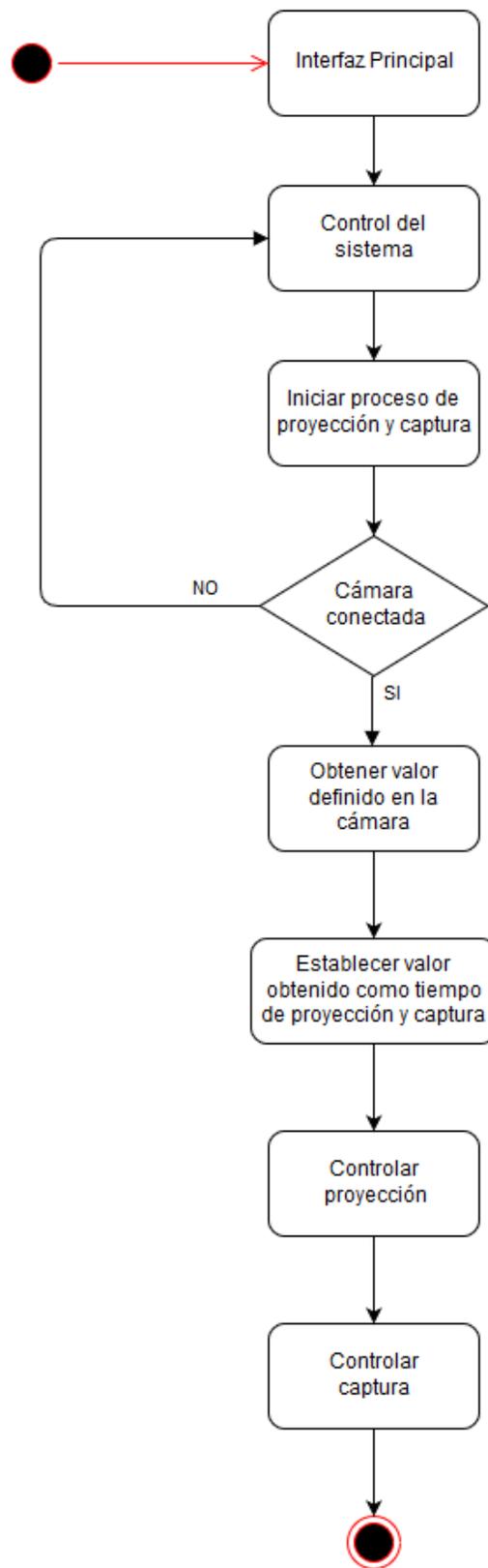


Figura 4.11: Diagrama de actividades para obtener el tiempo de proyección y captura.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

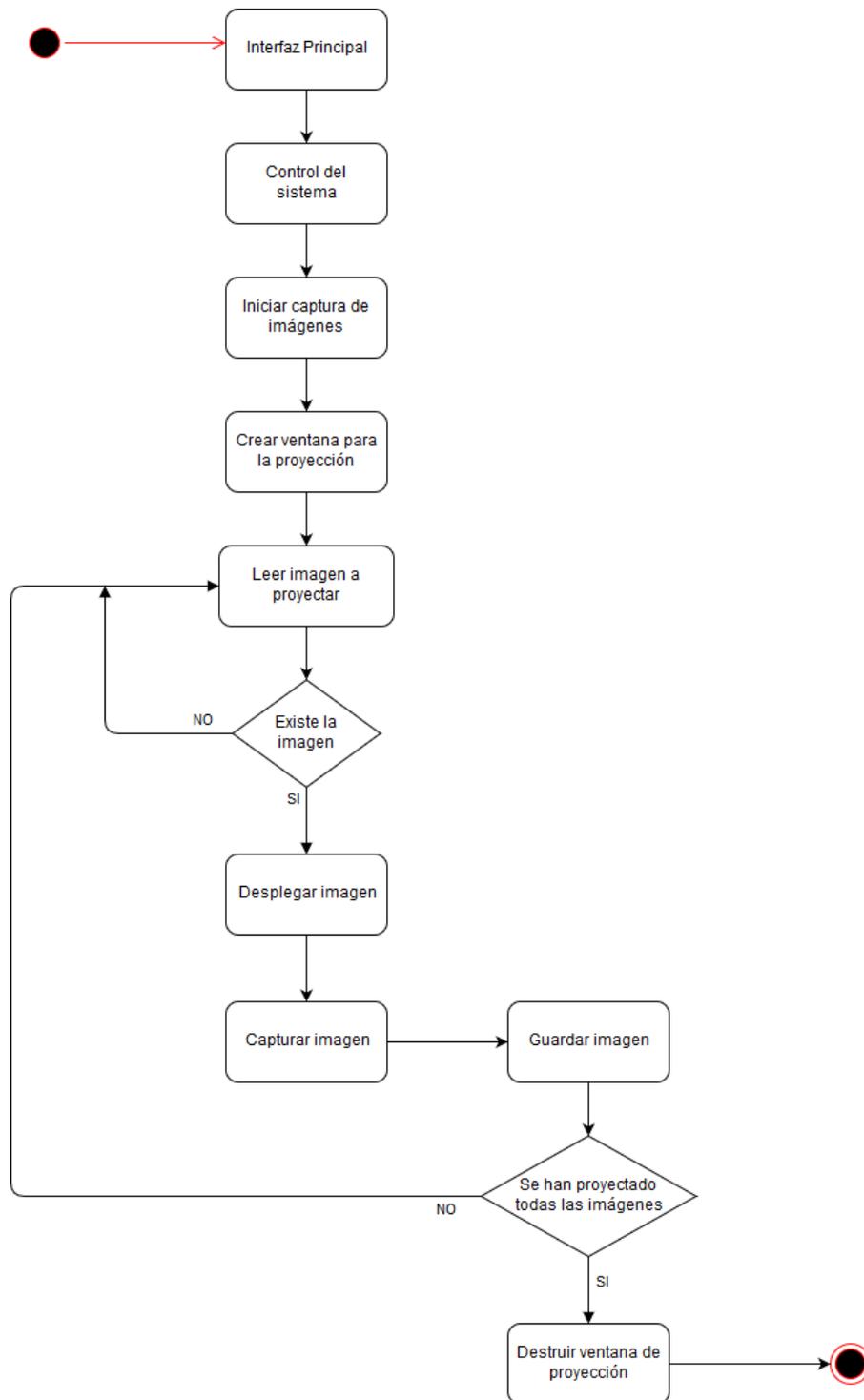


Figura 4.12: Diagrama de actividades para el proceso de proyección.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

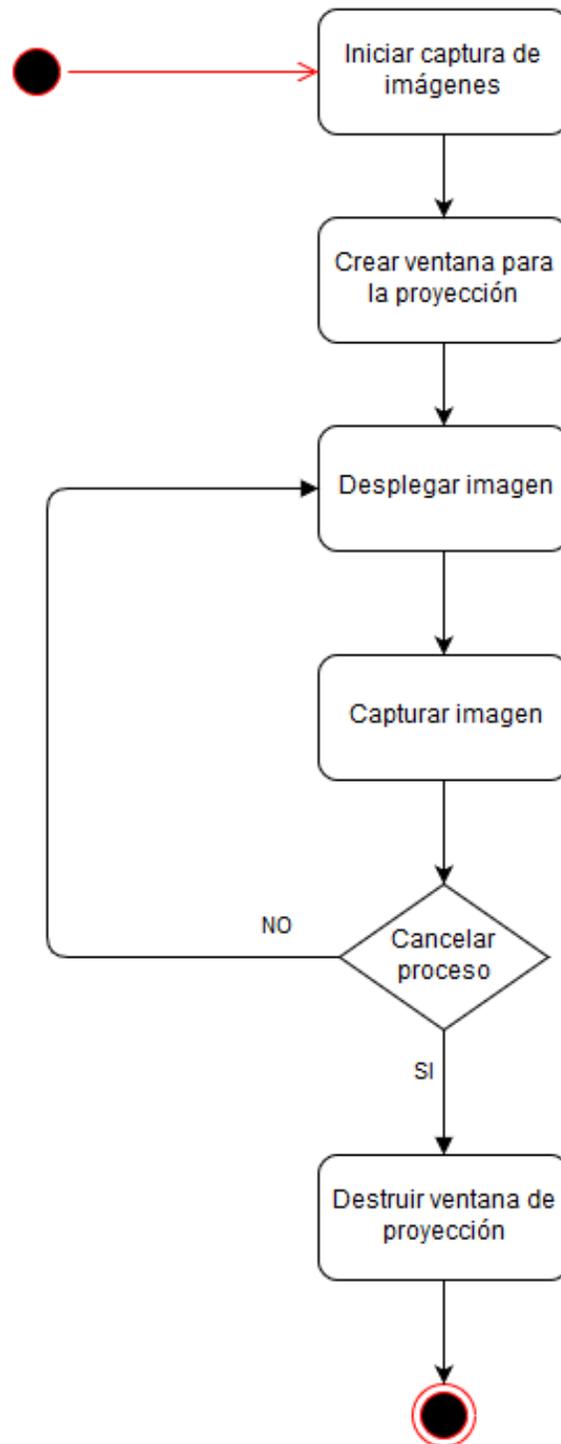


Figura 4.13: Diagrama de actividades para la cancelación del proceso de captura.

CAPÍTULO 4. SOFTWARE DE APLICACIÓN

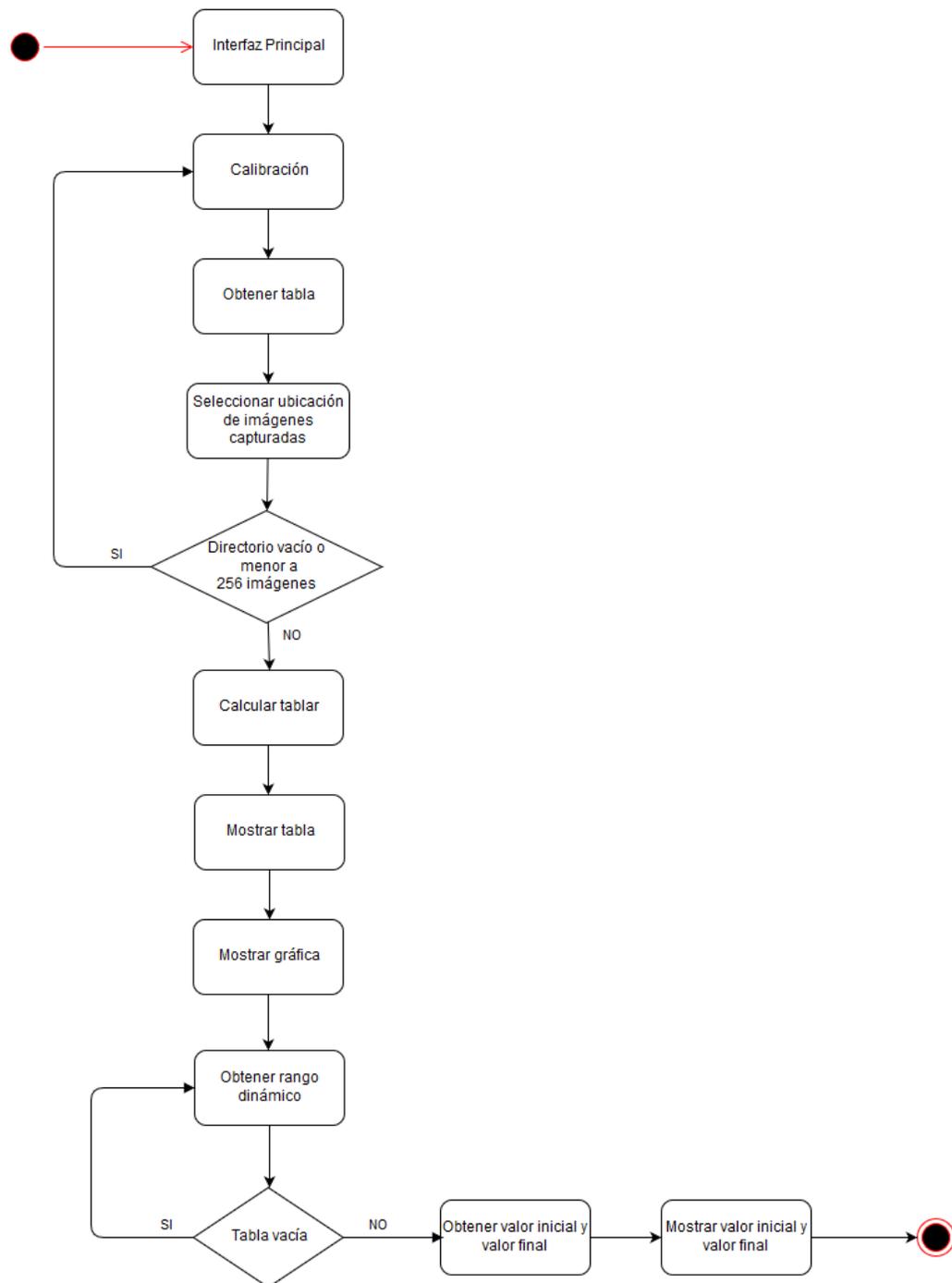


Figura 4.14: Diagrama de actividades para el proceso de calibración radiométrica.

Capítulo 5

Experimentos y resultados

En este capítulo se presenta la implementación del software de rectificación, basándose en el análisis y el diseño del capítulo anterior, tomando en cuenta lo indicado en cada uno de los diagramas presentados. La herramienta de software se usó como parte de un sistema PDP para la reconstrucción tridimensional.

5.1. Experimentación

En la Figura 5.1 se muestra la estructura de la interfaz para el sistema propuesto, indicando el camino que se lleva a cabo para el proceso de la proyección y captura, así como para la rectificación. Así mismo, en la Figura 5.2 se presenta la ventana principal de la interfaz. Como se puede ver, se inicia en la pestaña de la proyección y captura, esto se debe a que antes de realizar el proceso de rectificación, es necesario preparar el escenario de proyección y captura, ya que a partir de esto es como entra en función el proceso de rectificación.

Cabe mencionar que, para que se pueda habilitar el uso de la interfaz es necesario iniciar una sesión con la cámara, así como se muestra en la Figura 5.2. Esto permitirá controlar la cámara para tener acceso a sus funciones y su configuración, como lo es el caso de obtener el tiempo para la proyección y captura. De igual forma en la Figura 5.3 se presenta el sistema propuesto, el cual esta con-

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

formado por una cámara, un proyector y una computadora ejecutando el software desarrollado.

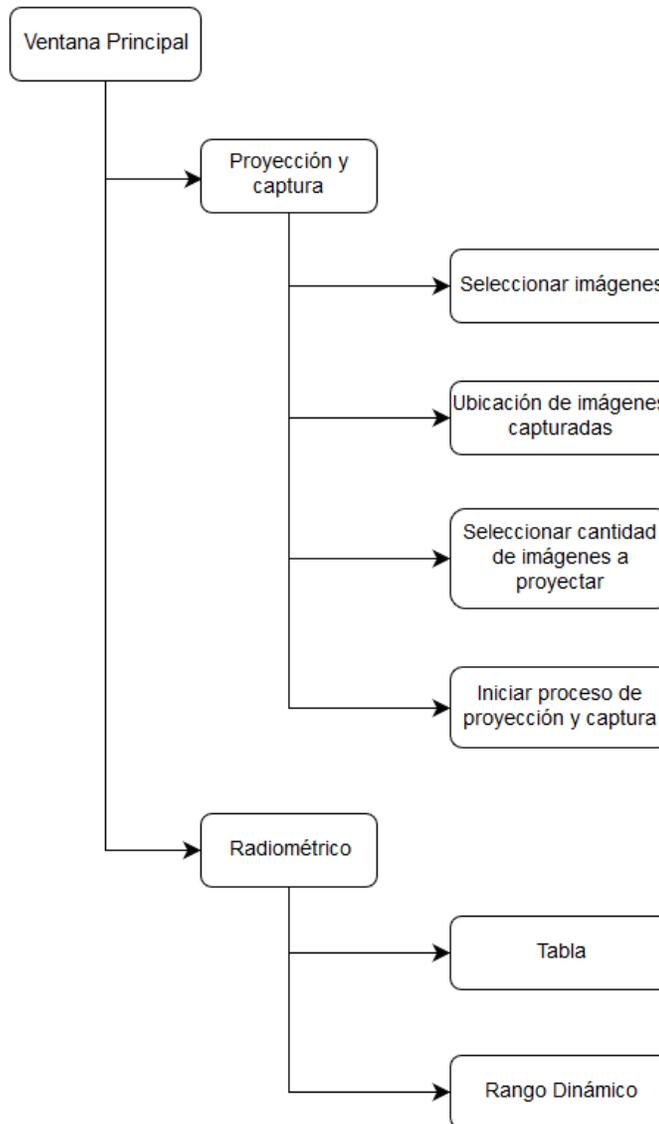


Figura 5.1: Estructura de la interfaz del sistema propuesto.

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

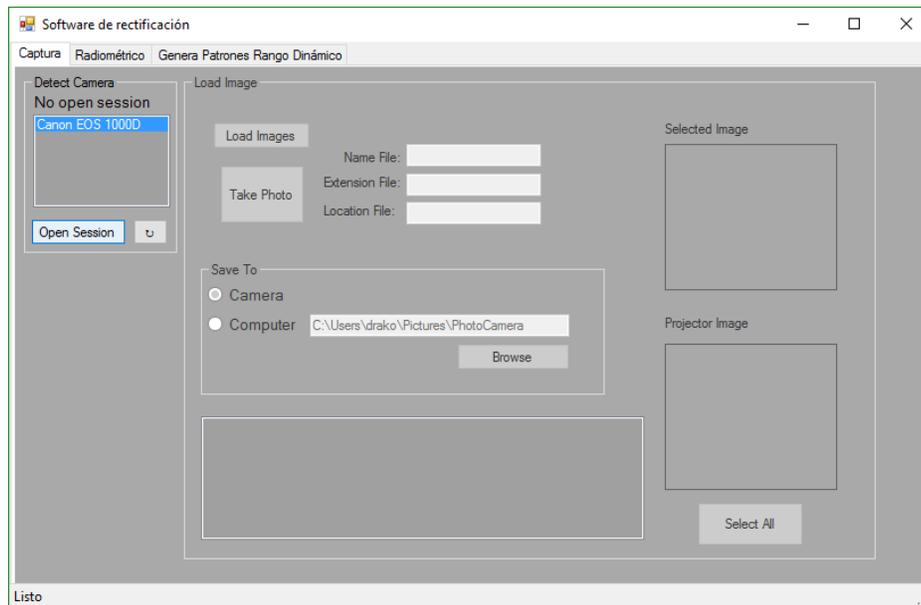


Figura 5.2: Interfaz principal del sistema propuesto.



Figura 5.3: Sistema de rectificación conformado por una cámara, un proyector y una computadora.

Como ya se mencionó, la preparación del escenario es el primer paso a realizar antes de la rectificación. Esto incluye la carga de imágenes a proyectar, la selección de la ubicación de las imágenes capturadas, la selección de la cantidad

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

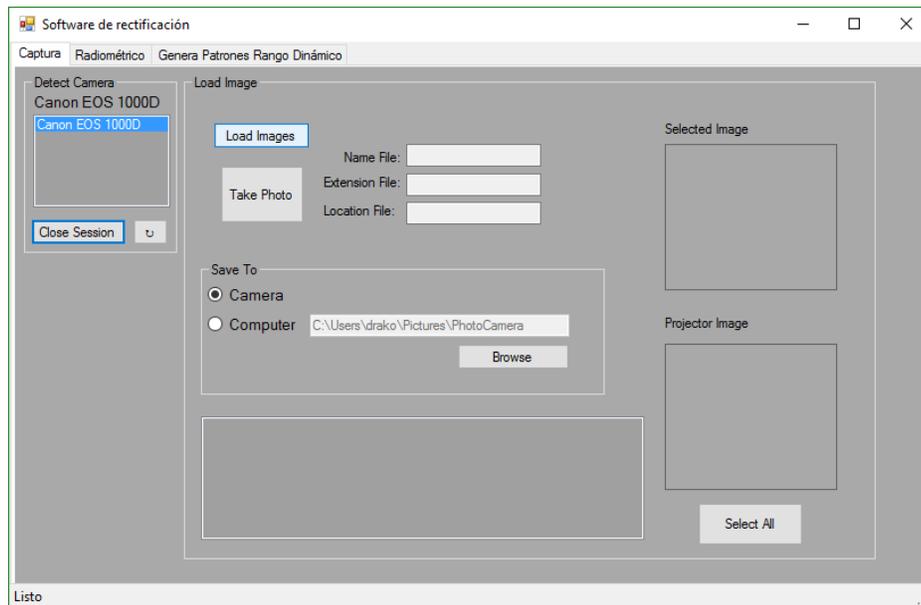


Figura 5.4: Interfaz principal habilitada.

de imágenes a proyectar y el inicio del proceso de proyección y captura. En la Figura 5.4 se muestra la interfaz principal habilitada y así mismo indica una sesión iniciada con la cámara.

Para aperturar las imágenes que se proyectaran, se da clic sobre el botón “Load Images” y posteriormente escoger la carpeta que contiene dichas imágenes. En la Figura 5.5 se muestra el cuadro de dialogo para elegir el directorio donde se ubican las imágenes que se desean proyectar. Por otra parte, en la Figura 5.6 se puede ver como se despliegan las imágenes encontradas en el directorio en forma de lista.

Ya que se cuenta con las imágenes a proyectar, se requiere indicar la ubicación de las imágenes capturadas. La cámara cuenta con la función de guardar las capturas en la memoria SD de la misma o en la computadora. En la Figura 5.7 se muestran las dos opciones a escoger. Por defecto, la opción “Camera” está seleccionada, pero si se selecciona la opción “Computer” será necesario indicar el directorio donde se guardarán las capturas. En la Figura 5.8 se muestra el cuadro de dialogo que se despliega al dar clic sobre el botón “Browse” donde se puede

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

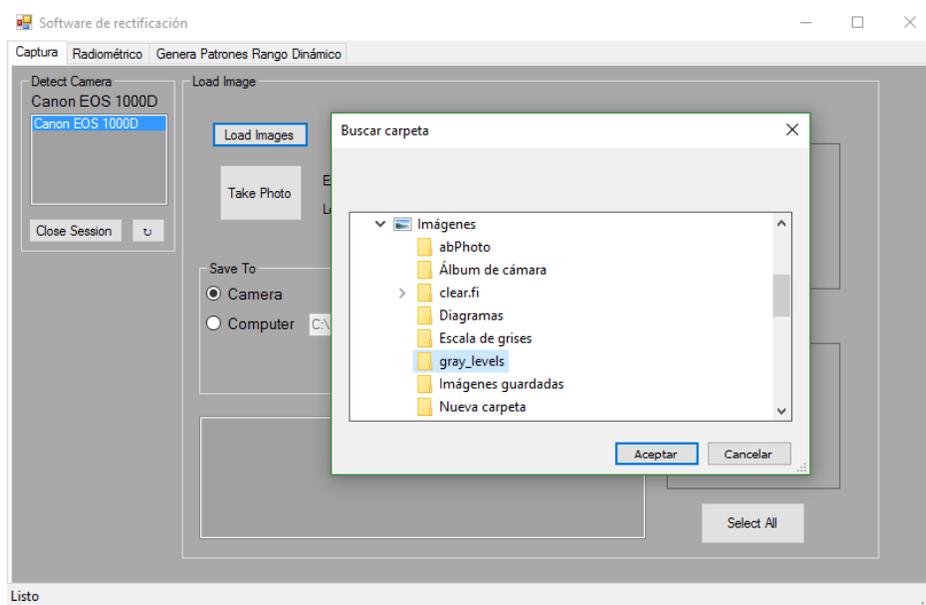


Figura 5.5: Ventana para escoger la carpeta que contiene las imágenes a proyectar.

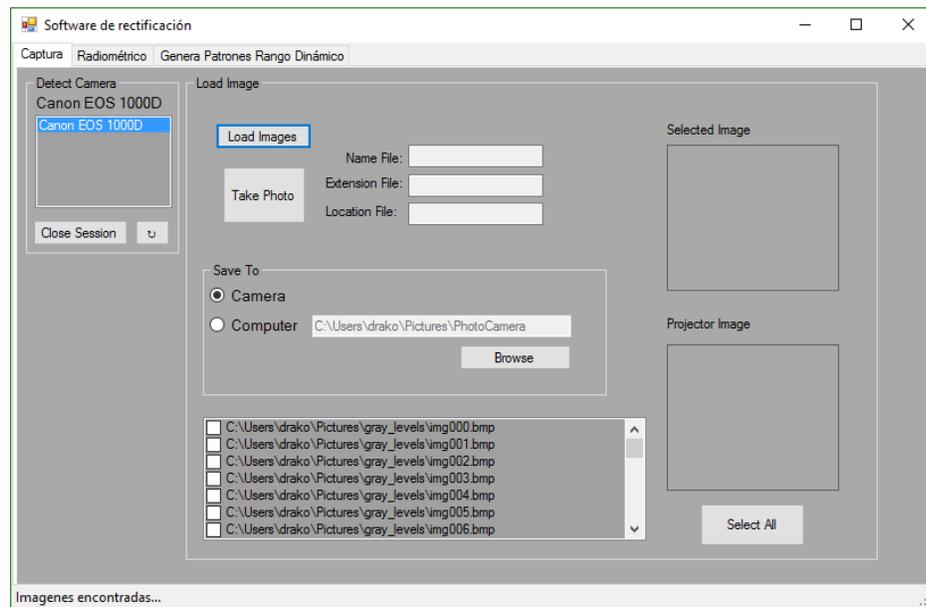


Figura 5.6: Despliegue de imágenes encontradas en forma de lista.

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

escoger dicho directorio.

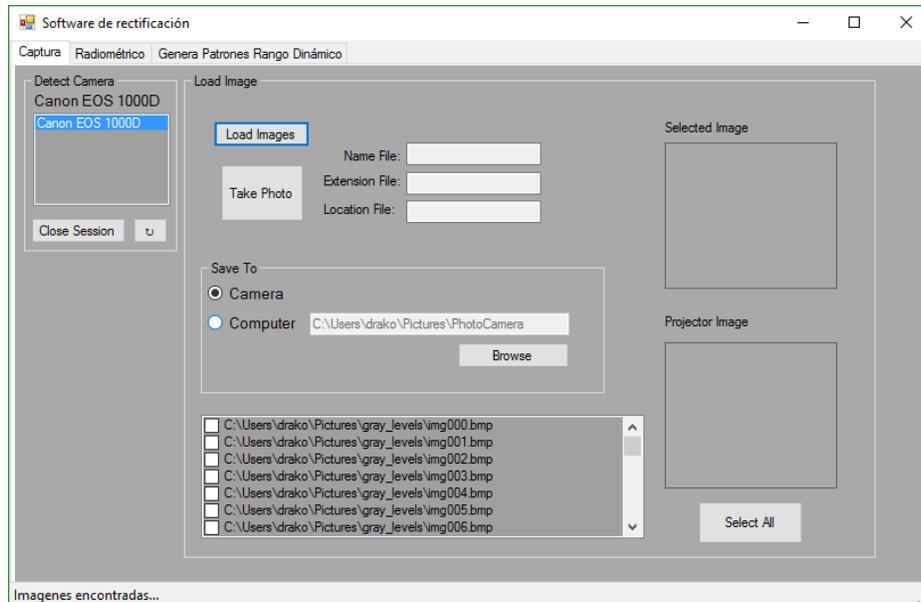


Figura 5.7: Selección de la ubicación de imágenes capturadas.

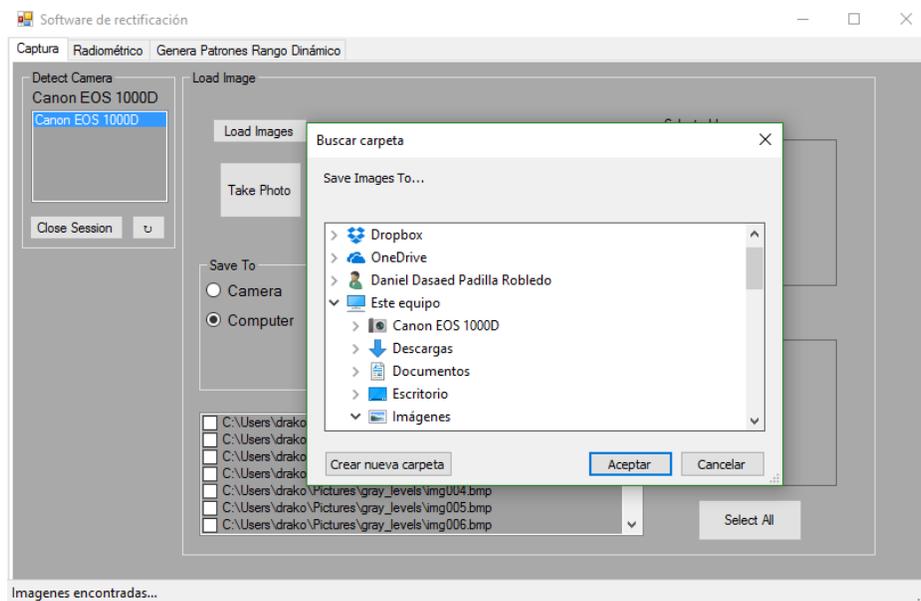


Figura 5.8: Ventana para indicar la ubicación de las imágenes capturadas.

Por último, antes de iniciar el proceso de proyección y captura se necesita escoger la cantidad de imágenes que se van a proyectar. Ya que las imágenes

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

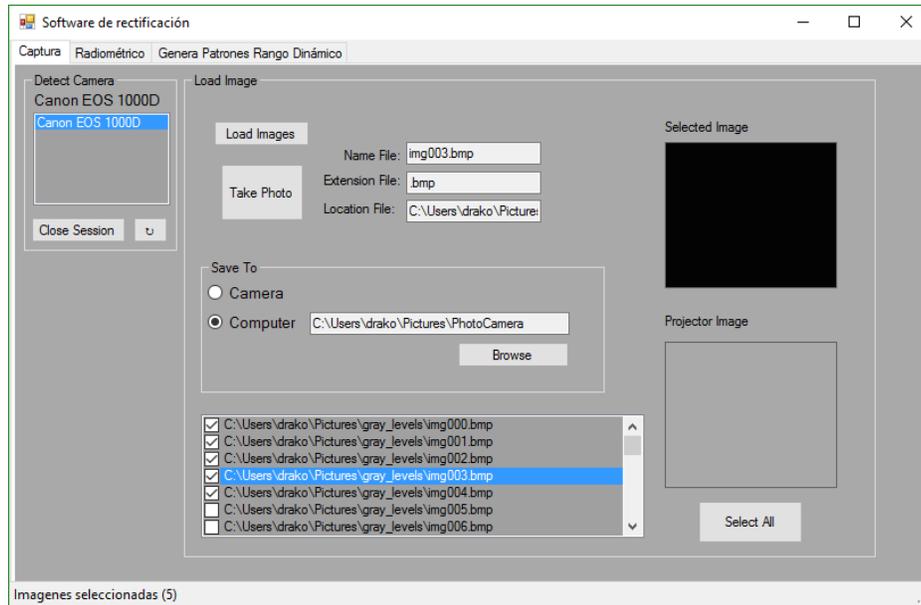


Figura 5.9: Selección de la cantidad de imágenes a proyectar.

se muestran en forma de lista, se puede escoger una cierta cantidad de ellas al seleccionarlás y marcándolas con una paloma. En la Figura 5.9 se muestran algunas imágenes seleccionadas y se puede ver como en la barra de estado se indica el número de imágenes seleccionadas.

Por otra parte, es posible seleccionar todas las imágenes al dar clic sobre el botón “Select All”. En la Figura 5.10 se puede observar como se seleccionan todas la imágenes y la barra de estado de la cantidad de imágenes seleccionadas. Cabe mencionar que cuando se selecciona una imagen se muestra el nombre, la extensión y la ubicación de la misma en diferentes cajas de texto, así como su visualización.

Teniendo todo lo anterior se puede llevar a cabo la proyección y captura de imágenes. Al dar clic sobre el botón “Take photo” el proceso se inicia, desplegándose las imágenes y al mismo tiempo se toman las fotos. En la Figura 5.11 se muestra el sistema trabajando, desplegando imágenes en escala de grises y capturando-las. Es en esta parte donde el software obtiene el tiempo definido en la cámara y lo establece como el intervalo de proyección y captura. Se debe especificar en

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

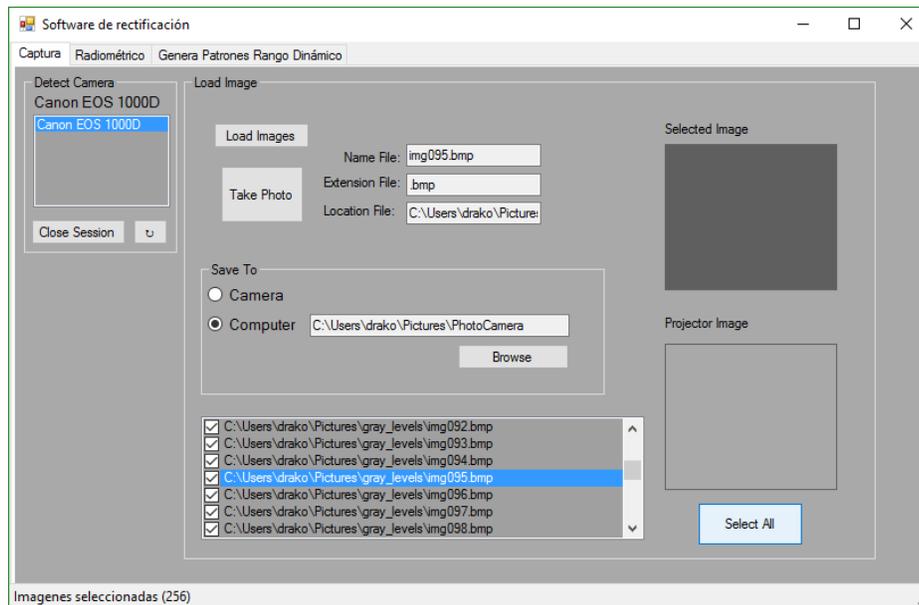


Figura 5.10: Selección de todas las imágenes para proyectarse.

este punto que primero se capturan las 256 imágenes en escala de grises para así continuar con el proceso de calibración.

Ya que se cuentan con las imágenes capturadas en escala de grises, se puede llevar a cabo el proceso de calibración. Para esto, se pasa a la siguiente pestaña, donde se obtiene la tabla al pulsar sobre el botón “Get Table”. En la Figura 5.12 se muestra el cuadro de dialogo desplegado para la selección del directorio que contiene la imágenes capturadas. Una vez que se selecciona el directorio, se muestra la tabla con los resultados y una gráfica a partir de la misma Figura 5.13.

Por último, se procede a obtener el rango dinámico a partir de la tabla. Al dar clic sobre el botón “Dynamic Range” el software obtiene el valor inicial y final del rango y los muestra en las cajas de texto. En la Figura 5.14 se presentan los resultado del rango dinámico.

Una vez obtenidos los valores del rango dinámico, pueden usarse en la generación de las imágenes de patrones de franjas. La generación de patrones de franjas se lleva a cabo en un programa realizado en Matlab, donde solo es necesario indicar el valor inicial del rango dinámico, al igual que el valor final del mismo y las

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS



Figura 5.11: Sistemas proyectando imágenes en escala de grises.

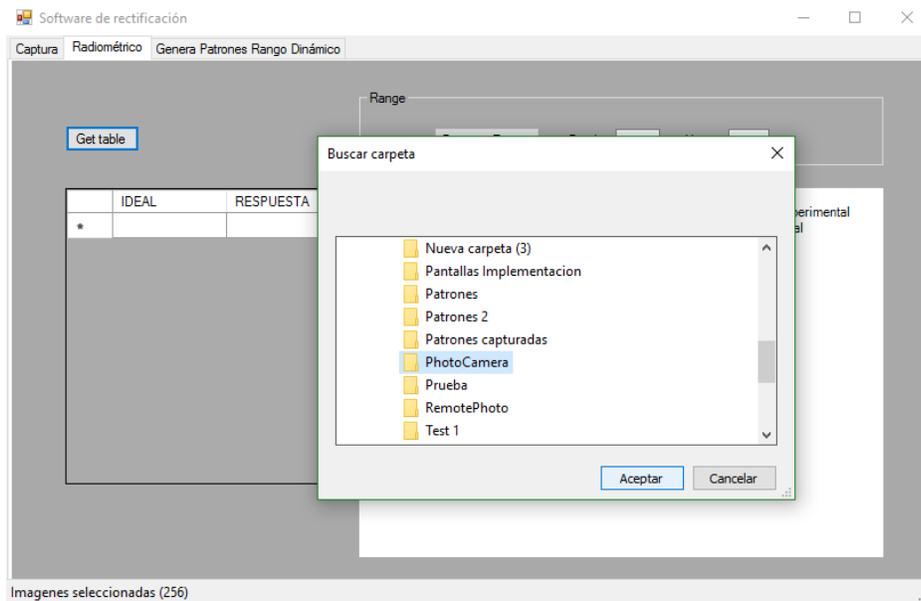


Figura 5.12: Selección del directorio de imágenes capturadas.

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

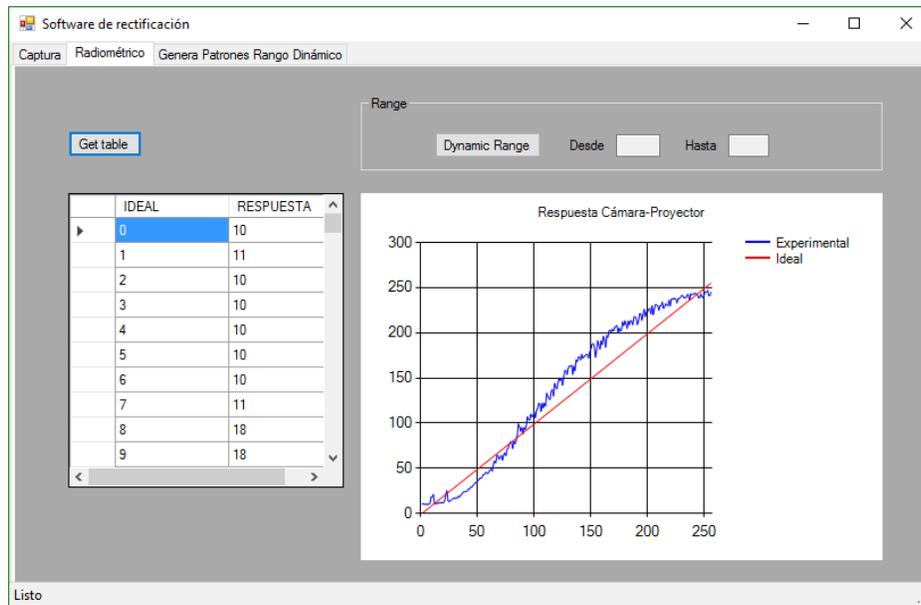


Figura 5.13: Tabla con resultados y gráfica de la misma.

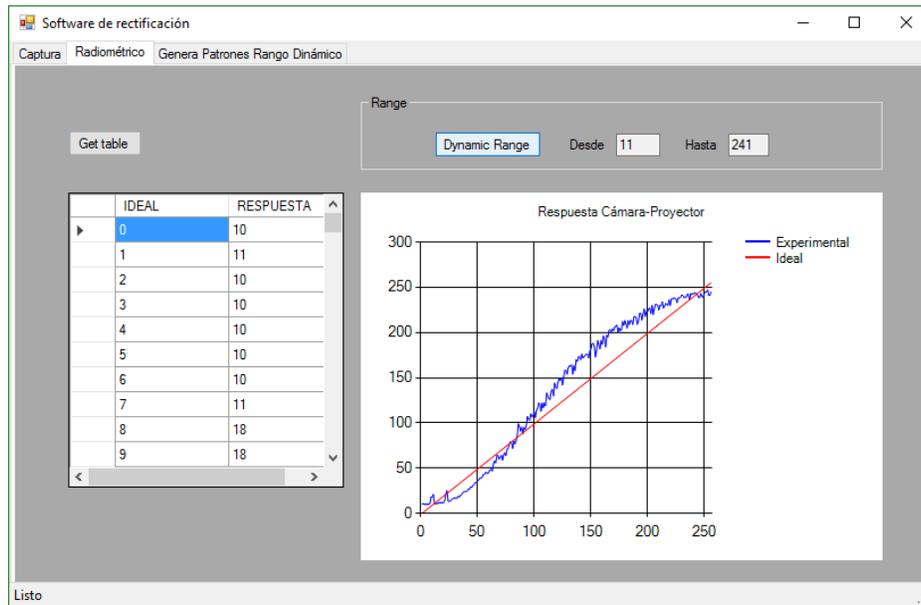


Figura 5.14: Resultado del rango dinámico.

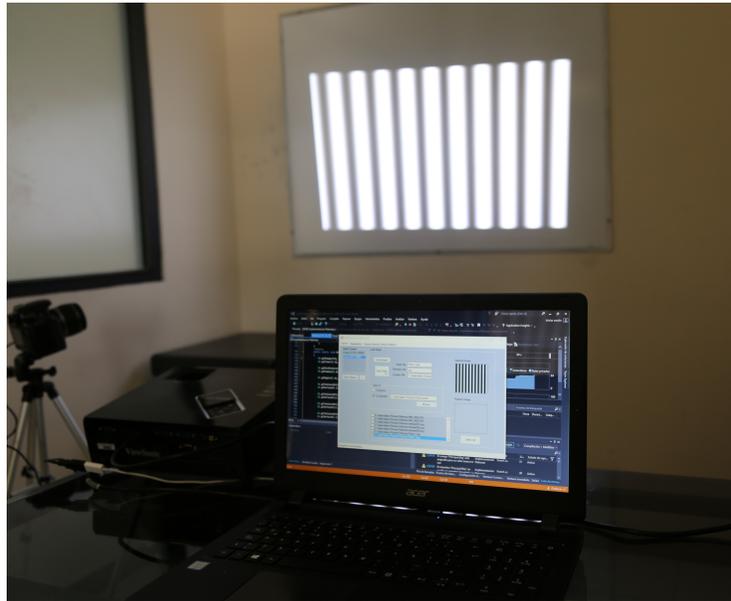


Figura 5.15: Sistema proyectando patrones de franjas.

dimensiones de las imágenes. Ya que se han generado, se procede a proyectarlas sobre una superficie. Para esto se sigue el mismo procedimiento empleado en la proyección de imágenes en escala de grises, solo que en este caso se cargan las imágenes de patrones de franjas y se seleccionan las que se desean proyectar. En la Figura 5.15 se muestra el sistema llevando a cabo el proceso de proyección y captura de patrones de franjas. Posteriormente se podrá seguir con la reconstrucción tridimensional, para lo cual se usa otro programa realizado, de igual forma, en Matlab.

5.2. Reconstrucción 3D

En esta sección se muestran los resultados de la reconstrucción tridimensional usando el método de rectificación radiométrica. Se utilizó el software desarrollado para la proyección y captura de los patrones sinusoidales, así como para conocer la curva de respuesta del proyector y el rango dinámico.

El proceso de reconstrucción 3D basado en el método PDP consiste de los

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

siguientes pasos:

1. Configuración del sistema cámara-proyector.
2. Calibración geométrica del sistema cámara-proyector.
3. Proyección de los patrones sinusoidales sobre un objeto de prueba.
4. Calculo de la fase usando las imágenes capturadas.
5. Triangulación de las parejas de puntos en la cámara y el proyector.
6. Visualización de la nube de puntos triangulados.

En nuestros experimentos usamos un sistema básico que consiste de una cámara y un proyector como se mostró anteriormente. Se utilizó un proyector ViewSonic PJD7820HD DLP, resolución de 1980×1080 pixeles con un brillo de 3000 lúmenes; una cámara Canon EOS 1000D con 10 megapíxeles, velocidad de captura a 1/4000 a 30 segundos, y una lente Canon con distancia focal de 18-55 mm.

5.2.1. Calibración geométrica

Antes de iniciar con la explicación del proceso de reconstrucción tridimensional, es necesario describir algunos conceptos fundamentales de óptica Trucco y Verri (1998). En la figura 5.16 se muestran los elementos que conforman un dispositivo de imagen, es decir la cámara, la cual consiste de una *apertura*, que es donde entran los rayos de luz, los cuales pasan por el *sistema óptico*, para posteriormente registrarse en la *pantalla*, todos estos se encuentran a lo largo de un *eje óptico*. Los objetos reflejan los rayos de luz que dan sobre ellos a partir de una fuente de luz, por ejemplo el sol, y estos entran por la apertura, la cual es muy pequeña y no se distingue, pero permite enfocar la imagen para que exista una correspondencia punto a punto entre el mundo real y la pantalla de la cámara al entrar un solo rayo de cada uno de los puntos que conforman el o los objetos en

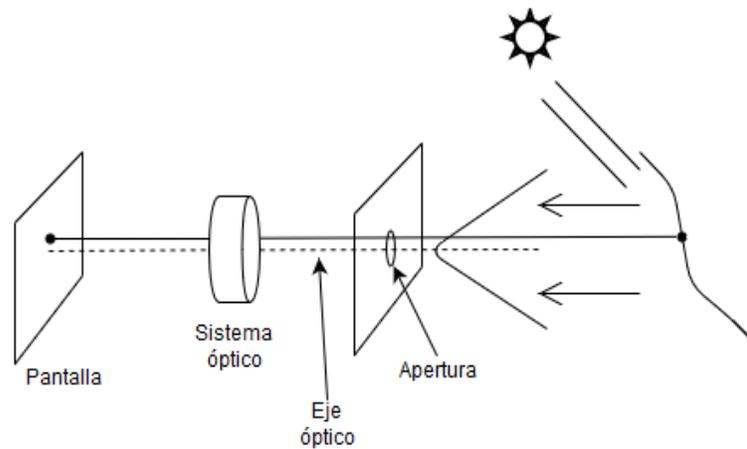


Figura 5.16: Elementos de un dispositivo de imagen

cuestión, a esto se le llama *pinhole*. Por lo tanto, la información que se obtenga de un escenario no se perderá, lo cual ocurriría si la apertura fuera más grande ya que se perdería esa correspondencia al entrar mas rayos reflectados por un solo punto.

Otra forma de enfocar la imagen se logra usando lentes delgadas. En la figura 5.17 se muestra como esta compuesto geoméricamente el lente de una cámara. Estos están conformados por dos elementos: un *eje óptico* que cruza a través del centro del lente O y dos puntos, F_l y F_r , llamados enfoque izquierdo y derecho, ubicados sobre el eje óptico, uno de cada lado del lente y a la misma distancia de O . La *distancia focal* es el punto donde convergen todos los rayos y se indica por la letra f .

5.2.2. Modelo de perspectiva de la cámara

En este punto, se explica como se forma una imagen. Para esto se requiere hacer una union de los puntos de una escena y los que se registran en la imagen. El marco de referencia de la cámara permite entender como se lleva a cabo la formación de una imagen. En la figura 5.18 se muestra la perspectiva de la cámara. Esta cuenta con el plano de imagen, también denominado π , el eje óptico que atraviesa el plano de imagen hasta O , un punto tridimensional, además del centro

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

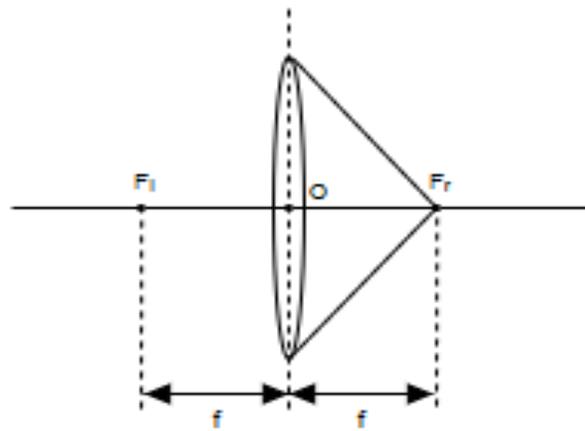


Figura 5.17: Elementos de un lente delgado

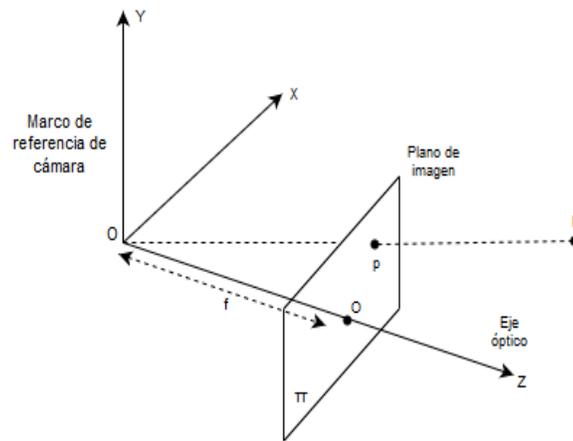


Figura 5.18: Modelo de perspectiva de la cámara

de la imagen o , que es donde intersecta π y el eje óptico. La distancia entre π y O es la distancia focal. Así mismo, existe un punto p , el cual es la representación de P en la imagen.

Considerando O como el origen y sea $P = [X, Y, Z]^T$ y $p = [x, y, z]^T$, puede definirse como el marco de referencia tridimensional. Si suponemos que se conoce X, Y y Z , las coordenadas (x, y) de un punto p , el cual es una imagen de un punto

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

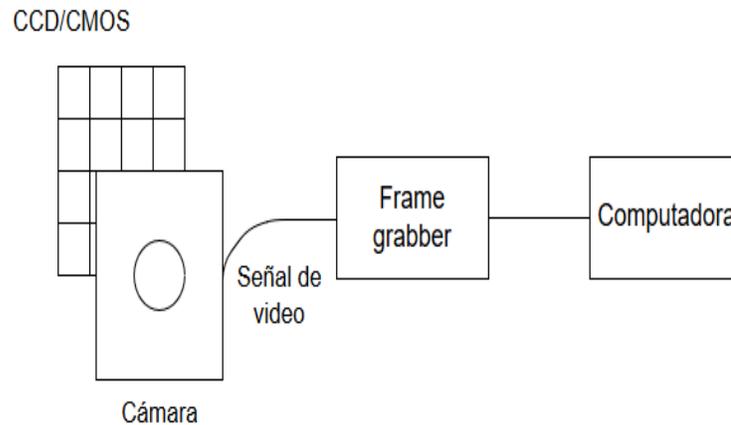


Figura 5.19: Componentes del sistema de adquisición de imágenes digitales

tridimensional $P = [X, Y, Z]$, se obtiene a partir de

$$x = f \frac{X}{Z} \quad (5.1)$$

$$y = f \frac{Y}{Z}. \quad (5.2)$$

Esto puede considerarse como el principio de triangulación.

5.2.3. Adquisición de imagen digital

La adquisición de una imagen digital se lleva a cabo mediante tres componentes de hardware: una cámara, por lo regular del tipo CCD o CMOS, un frame grabber, que permite convertir una señal analógica a una señal digital y una computadora, en donde se procesa la imagen para su posterior visualización. En la figura 5.19 se muestra un diagrama de los componentes de un sistema para la adquisición de una imagen digital.

La cámara CCD cuenta con múltiples fotosensores ordenados en forma de grilla rectangular y de tamaño $H \times W$. Cada uno de los fotosensores registran la luz que entra a la cámara y la convierte en voltaje. Posteriormente se envía la señal obtenida al frame grabber, que convierte esta señal en un arreglo rectangular de $N \times M$ valores enteros y finalmente, se envía a la computadora para procesarla y

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

mostrar la imagen. La imagen puede ser representada como una matriz de píxeles de tamaño $N \times M$ que indican el alto y el ancho de la misma.

Ya que las dimensiones entre lo registrado en la cámara CCD y la imagen digital que se obtiene son diferentes, se presenta un problema en cuanto a la posición de un punto en la cámara CCD y la imagen, ya que no llegan a coincidir en el mismo punto. Si en la imagen se cuenta con un punto (X_{im}, Y_{im}) existe una correspondencia con la cámara CCD en el punto (X_{CCD}, Y_{CCD}) . Por lo tanto, la relación entre los puntos de la cámara CCD y los puntos de la imagen esta dada por

$$X_{im} = \frac{W}{M} X_{CCD} \quad (5.3)$$

$$Y_{im} = \frac{H}{N} Y_{CCD}. \quad (5.4)$$

5.2.4. Parámetros de cámara

Una parte fundamental para el proceso de calibración, es conocer los parámetros de la cámara, que permitirán realizar la misma de un forma más precisa y obteniendo mejores resultados. Estos parámetros son los siguientes:

1. *Externos*: Definen la posición y orientación del marco de referencia de la cámara con respecto a un marco de referencia en el mundo real.
2. *Internos*: Una relación de las coordenadas de los píxeles de una imagen con sus correspondientes coordenadas en el marco de referencia de la cámara.

Los parámetros externos o mejor conocidos como *extrínsecos*, se encargan de determinar la locación y la orientación del marco de referencia de la cámara, que hasta el momento permanece desconocido, con respecto a otro marco de referencia conocido, es decir, el marco de referencia del mundo real. A esto se le conoce como hacer una transformación entre la cámara y el mundo real. Para lograrlo se toman en cuenta los siguientes elementos:

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

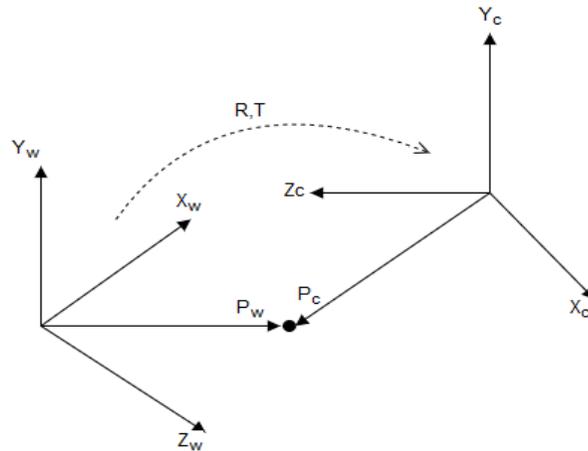


Figura 5.20: Relación entre el marco de referencia de la cámara y el mundo real

- Un vector de translación tridimensional, definido como T , que describe la posición relativa del origen de los dos marcos de referencia.
- Una matriz de 3×3 , definida como R , que brinda los ejes correspondientes de los dos marcos entre sí.

En la figura 5.20 se muestra la relación que existe entre las coordenadas de un punto P en el marco de referencia de la cámara, P_c , y el marco de referencia del mundo real, P_w , la cual está dada por

$$P_c = R(P_w - T), \quad (5.5)$$

donde

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

y

$$T = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}$$

Por otra parte, los parámetros internos o también conocidos como intrínsecos

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

son necesarios para definir las características ópticas, geométricas y digitales de la vista de la cámara. Un elemento de estos parámetros ya ha sido definido como la distancia focal, f . El resto de elementos son la transformación entre las coordenadas de un punto del marco de referencia de la imagen (X_{im}, Y_{im}) y el mismo punto en el plano de la imagen de la cámara (x, y) . Entonces, la transformación entre estos dos marcos de referencia puede expresarse de la siguiente manera

$$x = -(X_{im} - O_x)S_x \quad (5.6)$$

$$y = -(Y_{im} - O_y)S_y \quad (5.7)$$

donde (O_x, O_y) son las coordenadas que representan el centro de la imagen y (S_x, S_y) representan el tamaño del pixel. Por lo tanto, los parámetros intrínsecos que se tienen hasta el momento son: f, O_x, O_y, S_x, S_y .

Las imágenes suelen presentar una distorsión en las esquinas de las mismas, conocida como *distorsión radial*. Este era un problema que se presentaba antes en la imágenes, pero con el paso del tiempo este problema se ha reducido hasta ser casi irreconocible al procesar una imagen. Esta distorsión esta expresada como $r^2 = x_d^2 + y_d^2$. Si consideramos la distorsión radial, entonces

$$x = X_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4)$$

$$y = Y_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4)$$

donde (X_d, Y_d) son la coordenadas de los puntos distorsionados y $r = (X_d^2 + Y_d^2)^{\frac{1}{2}}$. Por último, k_1 y k_2 pasan a formar parte de los parámetros intrínsecos a ser determinados en el proceso de calibración.

5.2.5. Modelo de cámara

Ya que se tiene lo anterior, es posible establecer la relación existente de un punto tridimensional entre el marco de referencia de la cámara y el del mundo real.

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Por lo tanto, las ecuaciones lineales de la perspectiva de proyección están dadas de la siguiente forma

$$-(X_{im} - O_x)S_x = f \frac{R_1^T(P_w - T)}{R_3^T(P_w - T)} \quad (5.8)$$

$$-(Y_{im} - O_y)S_y = f \frac{R_2^T(P_w - T)}{R_3^T(P_w - T)} \quad (5.9)$$

donde R_1 , R_2 y R_3 son el primer, segundo y tercer renglón de R .

Por último, la ecuación lineal de la matriz de la perspectiva de proyección queda de la siguiente manera

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = M_{int} M_{ext} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

donde el lado izquierdo representa la imagen y el lado derecho el mundo real. Además, M_{int} representa los parámetros intrínsecos e indica la transformación entre el marco de referencia del mundo real y la cámara, y M_{ext} representa los parámetros extrínsecos e indica la transformación entre el marco de referencia de la cámara y el marco de referencia de la imagen. Estos tienen la siguiente forma

$$M_{int} = \begin{pmatrix} -f/S_x & 0 & O_x \\ 0 & -f/S_y & O_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

y

$$M_{ext} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -R_1^T T \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -R_2^T T \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -R_3^T T \end{pmatrix}$$

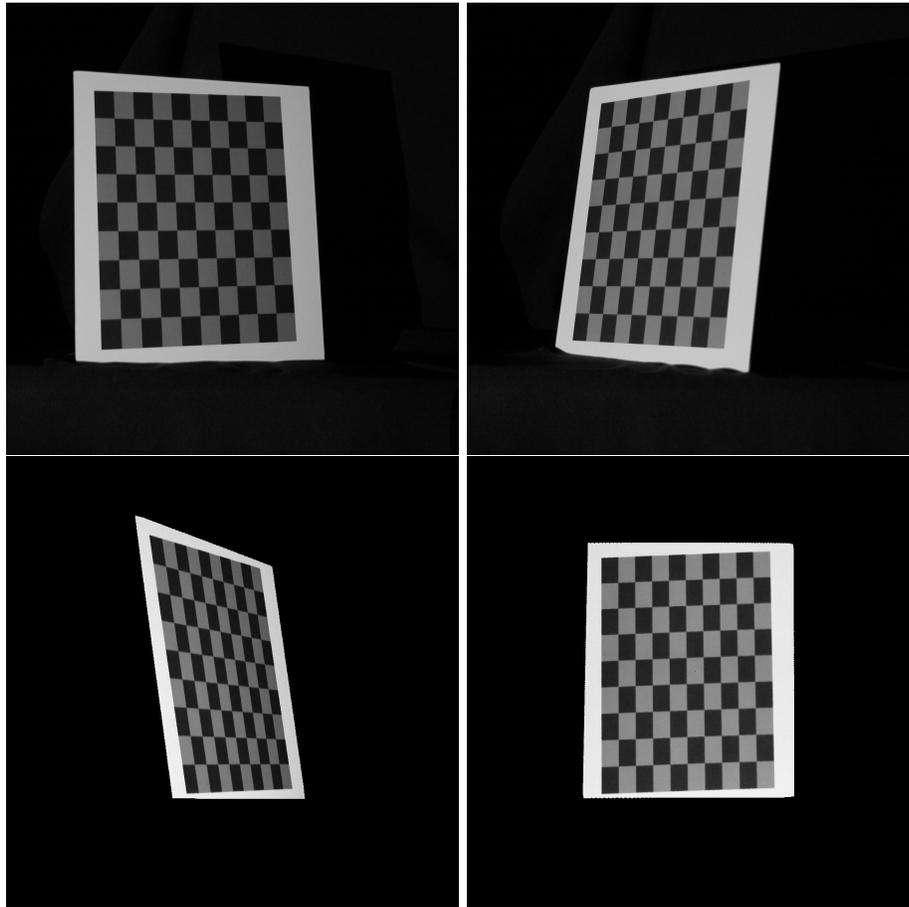


Figura 5.21: Ejemplo de capturas del patrón de calibración: las imágenes en el primer renglón pertenecen a la cámara y las del segundo renglón son generadas desde el punto de vista del proyector.

5.2.6. Calibración del sistema cámara-proyector

La calibración de cámara y proyector consiste en obtener los parámetros exteriores e interiores del sistema. En el primero se determina la relación relativa entre el sistema de referencia de la cámara y el proyector, y en el segundo se determinan el tamaño del pixel, centro óptico, distorsión radial y distancia focal de la cámara y el proyector. Se usó el método propuesto en S. Zhang y Huang (2006) y en B. Li y cols. (2014) que consisten en ver al proyector como un dispositivo de captura, generando imágenes de proyector, es decir, una imagen desde el punto de vista del proyector. Así, con la generación de imágenes de proyector se puede calibrar el sistema como en el caso de una configuración estéreo Lu y cols. (2017).

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

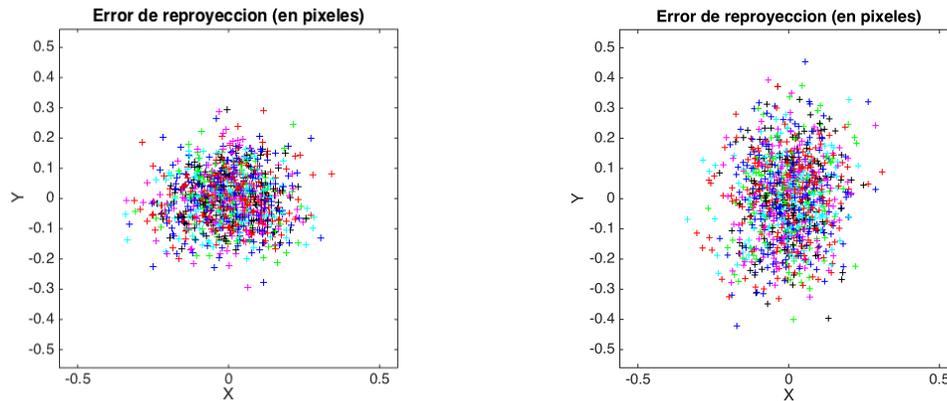


Figura 5.22: Error de reproyección de las esquinas detectadas en las 15 posiciones del patrón de calibración para la cámara (izquierda) y proyector (derecha), respectivamente.

Se usó un patrón de cuadros y se capturaron 15 posiciones del patrón para la calibración del sistema. La Figura 5.21 muestra 2 imágenes del patrón de calibración y sus correspondientes imágenes de proyector. Nótese que la resolución de la imágenes de cámara es de 1936×1288 pixeles y la resolución de las imágenes de proyector es de 1980×1080 pixeles. Se uso el Toolbox de calibración de cámaras desarrollado por Bouguet, J. Y. Bouguet (2008).

La Figura 5.22 muestra el error de reproyección de las esquinas detectadas para las 15 posiciones del patrón de calibración; el cual cuantifica la precisión de los parámetros de calibración obtenidos. En la Figura 5.22(izquierda) se muestra que el error de reproyección de cámara es de precisión subpixel con una desviación estándar (0.11270,0.08941) en el ancho y alto de pixel, respectivamente. Del mismo modo, en la Figura 5.22(derecha) se muestra que el error de reproyección de proyector es de precisión subpixel con una desviación estándar (0.09817,0.14074) en el ancho y alto de pixel, respectivamente.

5.3. Recuperación de la información 3D

Para obtener la información 3D se proyectan los patrones sinusoidales sobre un objeto de prueba como el que se muestra en la Figura 5.23. A partir de las

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

imágenes del objeto con las franjas proyectadas, se calcula la información de fase usando la ecuación (2.11). El mapa de fase es proporcional a la información tridimensional salvo un factor de escala, es decir, la distancia $z(x, y)$ de un punto (x, y) es igual a $z(x, y) = \alpha\Phi(x, y)$ donde α es el factor que se obtiene por medio de los parámetros de calibración del sistema.

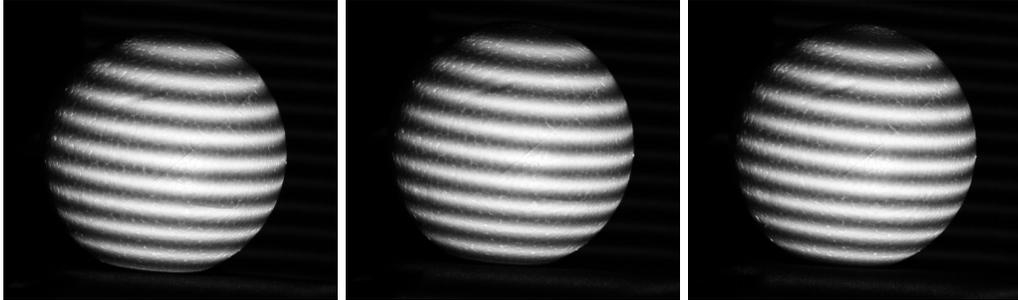


Figura 5.23: Objeto de prueba con franjas proyectadas.

En la Figura 5.24 se muestran las matrices $\phi(x, y)$, $\gamma(x, y)$ y $I'(x, y)$ que se obtuvieron a partir de las imágenes con los patrones proyectados de la Figura 5.23. La Figura 5.25 muestra la información de fase desenvuelta usando el algoritmo de desdoblamiento de fase guiado por calidad. Se usó como mapa de calidad la información de la modulación $\gamma(x, y)$ que se muestra en la Figura 5.24(centro).

Para ver el efecto de la rectificación radiométrica en la reconstrucción 3D, se proyectaron patrones sinusoidales con y sin rectificación. La Figura 5.26 muestra un perfil 3D de la esfera en la Figura 5.23 usando patrones con rectificación. Mientras que en la Figura 5.27 se muestra la reconstrucción de la esfera usando patrones sin rectificación. En ambos casos se usó el algoritmo de detección de fase de 3 pasos. Como puede verse, la calibración radiométrica mejora la precisión de la información 3D.

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

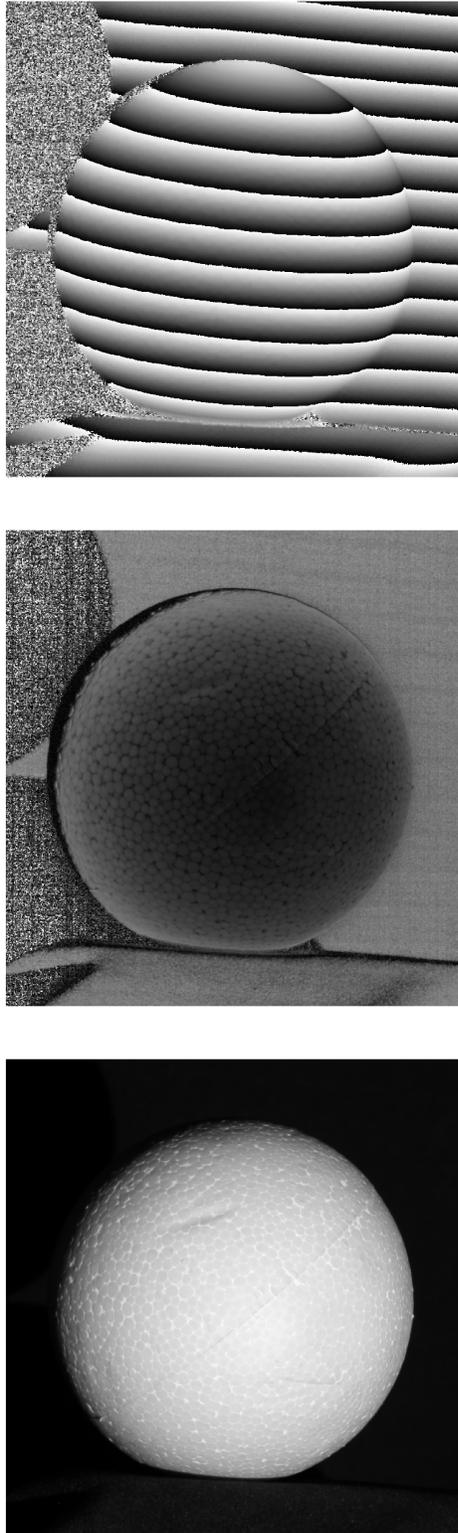


Figura 5.24: Visualización de la fase envuelta $\phi(x, y)$ (arriba), la información de modulación $\gamma(x, y)$ (centro) y el promedio de las imágenes $I'(x, y)$ (abajo). Las matrices $\phi(x, y)$, $\gamma(x, y)$ y $I'(x, y)$ fueron normalizadas al intervalo $[0, 1]$ y escaladas a escala de grises para poder visualizarlas.

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

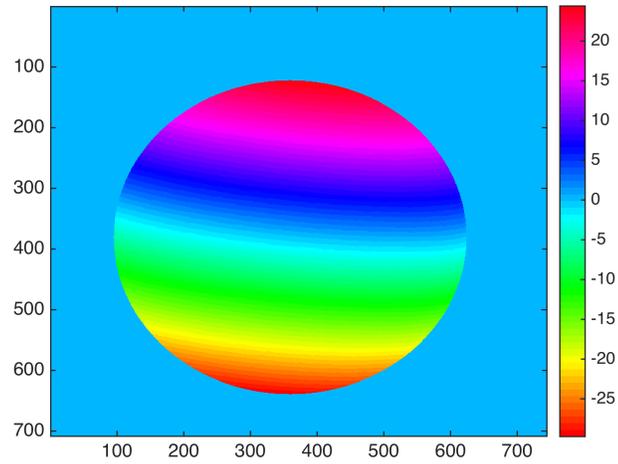


Figura 5.25: Mapa de fase desenvuelto usando el algoritmo de desenvolvimiento de fase guiado por calidad.

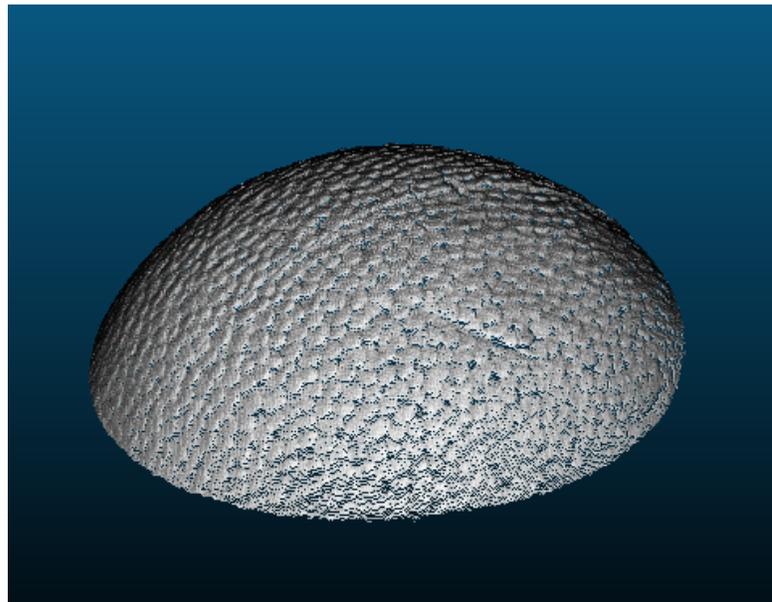


Figura 5.26: Reconstrucción 3D por proyección digital de patrones usando rectificación radiométrica.

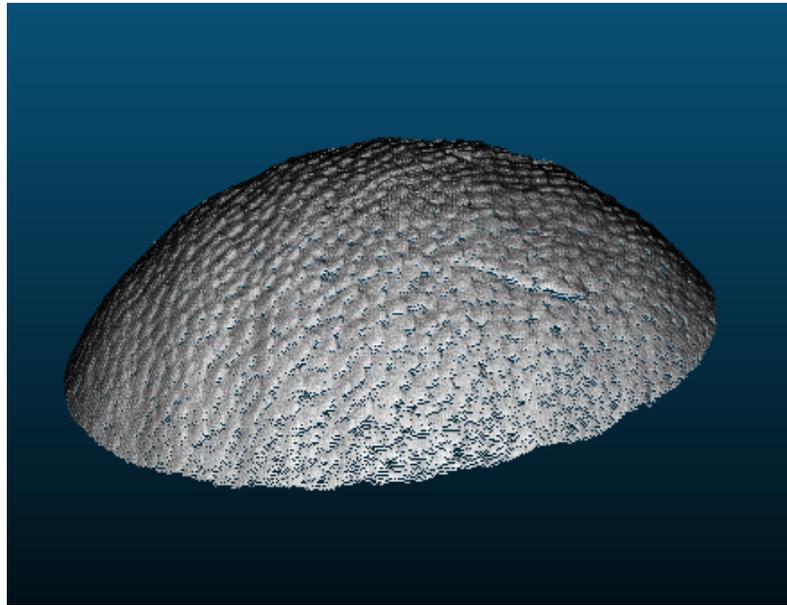


Figura 5.27: Reconstrucción 3D por proyección digital de patrones sin usar rectificación radiométrica.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo de tesis se propuso y se desarrollo un nuevo método de calibración radiométrica basado en interpolación polinomial, que brindo una mejora en los resultados al eliminar sustancialmente la distorción producida por el proyector. Para lograrlo se necesito del análisis de algoritmos de calibración radiométrica que, como ya se explico en el estado del arte, se dividen en dos tipos: activos y pasivos. El método que se desarrollo es de tipo activo, lo que brinda menos tiempo de procesamiento, ademas de que pueden ser utilizados en aplicaciones de alta velocidad.

Se pudo observar como los patrones de franjas se modificaron de tal forma que al momento de ser proyectos, la distorción γ se elimino con la respuesta del proyector. Esto debido al ajuste polinomial que se aplico a la curva de respuesta del proyector y así poder calcular el polinomio inverso, con lo cual se pudo generar nuevos patrones de franjas sinusoidales, denominados patrones inversos. Así mismo se describieron los pasos del método de rectificación radiométrica, que permiten comprender mejor como es su funcionamiento y el proceso que se lleva a cabo.

Con la ayuda de una herramienta desarrollada con fines de automatización del proceso de proyección y captura de patrones sinusoidales, así como del análisis de la respuesta del proyector, se valido la propuesta del sistema de calibración

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

radiométrica. De igual forma se realizaron las pruebas necesarias del sistema desarrollado y un experimento con el cual se obtuvieron los resultados antes mencionados. Se describió el diseño de esta herramienta mediante la realización de diagramas UML, que permiten comprender como interactúa el usuario con dicha herramienta y los procesos que se llevan a cabo dentro de la misma.

A futuro se pueden hacer mejoras en cuanto al tiempo que requieren algunos procesos para llevarse a cabo. Por ejemplo, la proyección y captura de imágenes es un proceso tardado ya que se necesita proyectar 256 imágenes en escala de grises y capturar las mismas, lo cual sin el uso de una cámara fotográfica de alta velocidad se vuelve algo tardado. Se podría, en este caso, usar una cámara de video que permita capturar estas 256 imágenes de forma rápida y sin tener que realizar muchas tomas, como en el caso de la cámara fotográfica.

Apéndice A

Apéndices y anexos

A.1. Algoritmo de detección de fase basado en mínimos cuadrados

Sea $I(x, y) = I'(x, y)(1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta(t)])$ la intensidad de los patrones de interferencia donde $I'(x, y)$ es la intensidad media, $\gamma(x, y)$ la modulación de la información y $\delta(t)$ es el corrimiento de fase. Usando la siguiente relación trigonométrica

$$\cos(\phi + \delta) = \cos \phi \cos \delta + \sin \phi \sin \delta$$

obtenemos

$$\begin{aligned} I(x, y) &= I'(x, y) + \gamma(x, y)I'(x, y) \cos \phi(x, y) \cos \delta(t) \\ &\quad - \gamma(x, y)I'(x, y) \sin \phi(x, y) \sin \delta(t). \end{aligned}$$

Sean,

$$\begin{aligned} x_0 &= I'(x, y) \\ x_1 &= \gamma(x, y)I'(x, y) \cos \phi(x, y) \\ x_2 &= -\gamma(x, y)I'(x, y) \sin \phi(x, y) \end{aligned}$$

APÉNDICE A. APÉNDICES Y ANEXOS

de la ecuación anterior tenemos $I(x, y) = I(\delta(t)) = x_0 + x_1 \cos \delta(t) + x_2 \sin \delta(t)$. Así, desde lo anterior podemos ver que:

$$\begin{aligned} \tan \phi &= -\frac{-\gamma(x, y)I'(x, y) \sin \phi(x, y)}{\gamma(x, y)I'(x, y)\cos \phi(x, y)} \\ &= \frac{\sin \phi(x, y)}{\cos \phi(x, y)} \\ \Rightarrow \tan \phi &= \frac{-x_2}{x_1}. \end{aligned}$$

Sea,

$$\begin{aligned} x_1^2 + x_2^2 &= x_0^2 \gamma^2(x, y) \cos^2 \phi(x, y) + x_0^2 \gamma^2(x, y) \sin^2 \phi(x, y) \\ &= x_0^2 \gamma^2(x, y) [\cos^2 \phi(x, y) + \sin^2 \phi(x, y)] \\ &= x_0^2 \gamma^2(x, y) \end{aligned}$$

entonces $\gamma = (\sqrt{x_1^2 + x_2^2})/x_0$. Sea I_{mk} la medida de patrón de intensidad con un patrón de interferencia proyectado δ_k . Aquí usamos el índice k en lugar de $\delta(t)$, donde k va de 1 hasta n patrones de interferencia. Entonces, los patrones de interferencia medidos son:

$$I_{mk} = x_0 + x_1 \cos \delta_k + x_2 \sin \delta_k$$

con $k > 3$ tenemos un sistema de ecuaciones sobre determinado sin una única solución a las incógnitas existentes. La solución del método de mínimos cuadrados para las incógnitas es de la siguiente forma. Sea $k \geq 3$, definimos el error cuadrado con respecto al patrón de intensidad y medida como $r = (I_{mk} - I(\delta_k))^2$ y el error total como:

$$E_r = \sum_{k=1}^n (I_{mk} - I(\delta_k))^2.$$

El método de mínimos cuadrados trata de minimizar el error total E_r de los patrones de interferencia de intensidad y de medición. El error mínimo se obtiene

APÉNDICE A. APÉNDICES Y ANEXOS

como:

$$\frac{\partial E_r}{\partial x_i} = 0, \quad i = 0, 1, 2.$$

Explícitamente, el error total se expresa como

$$\begin{aligned} E_r &= \sum_{k=1}^n (I_{mk} - I(\delta_k))^2 \\ &= \sum_{k=1}^n (I_{mk} - x_0 - x_1 \cos \delta_k - x_2 \sin \delta_k)^2 \end{aligned}$$

y las derivadas parciales están dadas por

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_r}{\partial x_0} &= \sum_{k=1}^n \frac{\partial E_r}{\partial x_0} = 2 \sum_{k=1}^n (I_{mk} - x_0 - x_1 \cos \delta_k - x_2 \sin \delta_k) = 0 \\ \frac{\partial E_r}{\partial x_1} &= \sum_{k=1}^n \frac{\partial E_r}{\partial x_1} = -2 \sum_{k=1}^n (I_{mk} - x_0 - x_1 \cos \delta_k - x_2 \sin \delta_k) \cos \delta_k = 0 \\ \frac{\partial E_r}{\partial x_2} &= \sum_{k=1}^n \frac{\partial E_r}{\partial x_2} = -2 \sum_{k=1}^n (I_{mk} - x_0 - x_1 \cos \delta_k - x_2 \sin \delta_k) \sin \delta_k = 0. \end{aligned}$$

A.2. Código Mathematica para la solución de la fase

Inter = 3;

Imk[k_]:=Im_k

Ideltak[k_]:=x₀ + Cos [δ_k] x₁ + Sin [δ_k] x₂

Suma de las diferencias cuadradas.

Er = Sum [(Ideltak[i] – Imk[i])², {i, 1, Inter}]

(–Im₁ + x₀ + Cos [δ₁] x₁ + Sin [δ₁] x₂)² +

(–Im₂ + x₀ + Cos [δ₂] x₁ + Sin [δ₂] x₂)² +

(–Im₃ + x₀ + Cos [δ₃] x₁ + Sin [δ₃] x₂)²

Derivadas parciales con respecto a x₀, x₁, x₂

APÉNDICE A. APÉNDICES Y ANEXOS

$$\mathbf{Edx0} = D [\mathbf{Er}, x_0]$$

$$\mathbf{Edx1} = D [\mathbf{Er}, x_1]$$

$$\mathbf{Edx2} = D [\mathbf{Er}, x_2]$$

$$2(-\text{Im}_1 + x_0 + \text{Cos}[\delta_1] x_1 + \text{Sin}[\delta_1] x_2) + 2(-\text{Im}_2 + x_0 + \text{Cos}[\delta_2] x_1 + \text{Sin}[\delta_2] x_2) +$$

$$2(-\text{Im}_3 + x_0 + \text{Cos}[\delta_3] x_1 + \text{Sin}[\delta_3] x_2)$$

$$2\text{Cos}[\delta_1](-\text{Im}_1 + x_0 + \text{Cos}[\delta_1] x_1 + \text{Sin}[\delta_1] x_2) + 2\text{Cos}[\delta_2](-\text{Im}_2 + x_0 + \text{Cos}[\delta_2] x_1 + \text{Sin}[\delta_2] x_2) +$$

$$2\text{Cos}[\delta_3](-\text{Im}_3 + x_0 + \text{Cos}[\delta_3] x_1 + \text{Sin}[\delta_3] x_2)$$

$$2\text{Sin}[\delta_1](-\text{Im}_1 + x_0 + \text{Cos}[\delta_1] x_1 + \text{Sin}[\delta_1] x_2) + 2\text{Sin}[\delta_2](-\text{Im}_2 + x_0 + \text{Cos}[\delta_2] x_1 + \text{Sin}[\delta_2] x_2) +$$

$$2\text{Sin}[\delta_3](-\text{Im}_3 + x_0 + \text{Cos}[\delta_3] x_1 + \text{Sin}[\delta_3] x_2)$$

Busca una solución para $\partial_{x_k} \mathbf{Er} = 0$.

$$\mathbf{Sol} = \text{Solve} [\{\mathbf{Edx0} == 0, \mathbf{Edx1} == 0, \mathbf{Edx2} == 0\}, \{x_0, x_1, x_2\}];$$

$$\text{Print}[\mathbf{Sol}[[1, 1]]]$$

$$\text{Print}[\mathbf{Sol}[[1, 2]]]$$

$$\text{Print}[\mathbf{Sol}[[1, 3]]]$$

$$x_0 \rightarrow -((\text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_2] \text{Im}_1 - \text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_3] \text{Im}_1 - \text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_1] \text{Im}_2 + \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_3] \text{Im}_2 +$$

$$\text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_1] \text{Im}_3 - \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_2] \text{Im}_3) /$$

$$(-\text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_1] + \text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_1] + \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_2] - \text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_2] - \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_3] +$$

$$\text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_3]))$$

$$x_1 \rightarrow -(\text{Sin}[\delta_2] \text{Im}_1 - \text{Sin}[\delta_3] \text{Im}_1 - \text{Sin}[\delta_1] \text{Im}_2 + \text{Sin}[\delta_3] \text{Im}_2 + \text{Sin}[\delta_1] \text{Im}_3 - \text{Sin}[\delta_2] \text{Im}_3) /$$

$$(\text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_1] - \text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_1] - \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_2] + \text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_2] + \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_3] -$$

$$\text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_3])$$

$$x_2 \rightarrow -(-\text{Cos}[\delta_2] \text{Im}_1 + \text{Cos}[\delta_3] \text{Im}_1 + \text{Cos}[\delta_1] \text{Im}_2 - \text{Cos}[\delta_3] \text{Im}_2 - \text{Cos}[\delta_1] \text{Im}_3 +$$

$$\text{Cos}[\delta_2] \text{Im}_3) /$$

$$(\text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_1] - \text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_1] - \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_2] + \text{Cos}[\delta_3] \text{Sin}[\delta_2] + \text{Cos}[\delta_1] \text{Sin}[\delta_3] -$$

$$\text{Cos}[\delta_2] \text{Sin}[\delta_3])$$

Desplazamientos de la fase.

APÉNDICE A. APÉNDICES Y ANEXOS

(* Desplazamientos para $k = 3^*$)

`shift = Table [$\delta_i \rightarrow (i - 2) \frac{2\pi}{\text{Inter}}$, {i, 1, Inter}] ;`

`MatrixForm[shift]`

$$\begin{pmatrix} \delta_1 \rightarrow -\frac{2\pi}{3} \\ \delta_2 \rightarrow 0 \\ \delta_3 \rightarrow \frac{2\pi}{3} \end{pmatrix}$$

Calcula solución para los valores de desplazamiento de fase.

`Unknowns = FullSimplify[Sol/.shift];`

`Phase1 = FullSimplify [$\frac{-\text{Unknowns}[[1,3,2]]}{\text{Unknowns}[[1,2,2]]}$]`

`gamma1 = FullSimplify [$\frac{\sqrt{\text{Unknowns}[[1,2,2]]^2 + \text{Unknowns}[[1,3,2]]^2}}{\text{Unknowns}[[1,1,2]]}$]`

$$\frac{\sqrt{3}(-\text{Im}_1 + \text{Im}_3)}{\text{Im}_1 - 2\text{Im}_2 + \text{Im}_3}$$

$$\frac{2\sqrt{\text{Im}_1^2 + \text{Im}_2^2 - \text{Im}_2\text{Im}_3 + \text{Im}_3^2 - \text{Im}_1(\text{Im}_2 + \text{Im}_3)}}{\text{Im}_1 + \text{Im}_2 + \text{Im}_3}$$

Referencias

- Bell, T., Li, B., y Zhang, S. (2016). Structured light techniques and applications. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.
- Bouguet, J. Y. (2008). *Camera calibration toolbox for Matlab*. Descargado de http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- Cruz-Santos, W., López-García, L., Rueda-Paz, J., y Redondo-Galvan, A. (2016). Improved adjoin-list for quality-guided phase unwrapping based on red-black trees. En *Spie optical engineering+ applications* (pp. 99600B–99600B).
- Geng, J. (2011, Jun). Structured-light 3d surface imaging: A tutorial. *Adv. Opt. Photon.*, 3(2), 128–160. Descargado de <http://aop.osa.org/abstract.cfm?URI=aop-3-2-128> doi: 10.1364/AOP.3.000128
- Ghiglia, D., y Pritt, M. (1998). *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software*. Wiley. Descargado de <http://books.google.com.mx/books?id=pQtTAAAAMAAJ>
- Guo, H., He, H., y Chen, M. (2004, May). Gamma correction for digital fringe projection profilometry. *Appl. Opt.*, 43(14), 2906–2914. Descargado de <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-43-14-2906> doi: 10.1364/AO.43.002906
- Hoang, T., Pan, B., Nguyen, D., y Wang, Z. (2010, Jun). Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry. *Opt. Lett.*, 35(12), 1992–1994. Descargado de <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-35-12-1992> doi: 10.1364/OL.35.001992

REFERENCIAS

- Huang, J., Wang, Z., Gao, J., y Xue, Q. (2013). Projector calibration with error surface compensation method in the structured light three-dimensional measurement system. *Optical Engineering*, 52(4), 043602-043602. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.52.4.043602> doi: 10.1117/1.OE.52.4.043602
- Huang, P. S., Zhang, C., y Chiang, F.-P. (2003). High-speed 3-d shape measurement based on digital fringe projection. *Optical Engineering*, 42(1), 163–168.
- Li, B., Fu, Y., Wang, Z., y Zhang, J. (2015). High-speed, high-accuracy 3d shape measurement based on binary color fringe defocused projection. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, 10(0). Descargado de http://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/15038
- Li, B., Karpinsky, N., y Zhang, S. (2014, Jun). Novel calibration method for structured-light system with an out-of-focus projector. *Appl. Opt.*, 53(16), 3415–3426. Descargado de <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-53-16-3415> doi: 10.1364/AO.53.003415
- Li, Z., y Li, Y. (2011, Jan). Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry. *Opt. Lett.*, 36(2), 154–156. Descargado de <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-36-2-154> doi: 10.1364/OL.36.000154
- Liu, K., Wang, Y., Lau, D. L., Hao, Q., y Hassebrook, L. G. (2010, Mar). Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry. *J. Opt. Soc. Am. A*, 27(3), 553–562. Descargado de <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-27-3-553> doi: 10.1364/JOSAA.27.000553
- Lu, P., Sun, C., Liu, B., y Wang, P. (2017, Feb). Accurate and robust calibration method based on pattern geometric constraints for fringe projection profilometry. *Appl. Opt.*, 56(4), 784–794. Descargado de <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-56-4-784> doi: 10.1364/AO.56.000784

REFERENCIAS

- Malacara, D. (2007). *Optical shop testing*. Wiley. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=qMHKB1mKFr4C>
- Malacara, Z., y Servín, M. (2016). *Interferogram analysis for optical testing, second edition*. CRC Press. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=PXzDpD742a8C>
- Peng, J., Liu, X., Deng, D., Guo, H., Cai, Z., y Peng, X. (2016, Sep). Suppression of projector distortion in phase-measuring profilometry by projecting adaptive fringe patterns. *Opt. Express*, 24(19), 21846–21860. Descargado de <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-24-19-21846> doi: 10.1364/OE.24.021846
- Peng, J.-Z., Ouyang, H.-K., Yu, Q., Yu, Y.-J., y Wang, K.-S. (2014). Phase error correction for fringe projection profilometry by using constrained cubic spline. *Advances in Manufacturing*, 2(1), 39–47.
- Trucco, E., y Verri, A. (1998). *Introductory techniques for 3-d computer vision*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR.
- Xu, Y., Ekstrand, L., Dai, J., y Zhang, S. (2011, Jun). Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing. *Appl. Opt.*, 50(17), 2572–2581. Descargado de <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-50-17-2572> doi: 10.1364/AO.50.002572
- Zhang, S. (2015, May). Comparative study on passive and active projector nonlinear gamma calibration. *Appl. Opt.*, 54(13), 3834–3841. Descargado de <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-54-13-3834> doi: 10.1364/AO.54.003834
- Zhang, S., y Huang, P. S. (2006). Novel method for structured light system calibration. *Optical Engineering*, 45(8), 083601-083601-8. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1117/1.2336196> doi: 10.1117/1.2336196

REFERENCIAS

- Zhang, S., y Huang, P. S. (2007). Phase error compensation for a 3-d shape measurement system based on the phase-shifting method. *Optical Engineering*, 46(6), 063601–063601.
- Zhang, S., y Yau, S.-T. (2007, Jan). Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector. *Appl. Opt.*, 46(1), 36–43. Descargado de <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-46-1-36> doi: 10.1364/AO.46.000036
- Zhang, X., Zhu, L., Li, Y., y Tu, D. (2012, Jun). Generic nonsinusoidal fringe model and gamma calibration in phase measuring profilometry. *J. Opt. Soc. Am. A*, 29(6), 1047–1058. Descargado de <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-29-6-1047> doi: 10.1364/JOSAA.29.001047