







UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA  
SEDE MANIZALES

# Reconstrucción Tridimensional de Piezas con Condiciones Ópticas Complejas



---

Tesis de Maestría 2009

---

**María Fernanda  
Osorio Castro**

mfosorioc@unal.edu.co

**Directores:**

**Flavio A. Prieto**

**Augusto E. Salazar**

---

DIEEC

Universidad Nacional de  
Colombia Sede Manizales

Grupo de Percepción y Control

Inteligente

# **Reconstrucción Tridimensional de Piezas con Condiciones Ópticas Complejas**

por:

**María Fernanda Osorio Castro**

TESIS DE MAESTRÍA

Presentada a:

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

En cumplimiento de los Requerimientos

para el Grado de

**MAGISTER EN INGENIERÍA - AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Directores:

Flavio A. Prieto

Augusto E. Salazar

**Universidad Nacional de Colombia**

**Sede Manizales**

*A mi familia y amigos.*



---

# Resumen

Los objetos especulares, transparentes y translúcidos presentan problemas en la adquisición con las técnicas de escaneo tradicionales, debido a las propiedades de reflectancia y transmitancia propias de estas superficies. En este trabajo se presenta una técnica de adquisición no invasiva para objetos especulares, y otra para objetos transparentes y translúcidos. El sistema utiliza el digitalizador Minolta Vivid 9i, como fuente de iluminación una lámpara ultravioleta para el caso de las piezas especulares o una lámpara infrarroja para los transparentes y translúcidos. Con estas lámparas se controla la iluminación ambiente y contrarresta los efectos adversos causados por las propiedades ópticas de estas superficies.

Los resultados experimentales muestran que las técnicas propuestas generan modelos tridimensionales precisos a partir de diferentes superficies especulares, transparentes y translúcidas. El rendimiento de las técnicas es evaluado comparando la superficie adquirida con la técnica propuesta, contra la superficie adquirida del mismo objeto pintado con un polvo que suprime los efectos no deseados de las propiedades ópticas.

---

# Abstract

Specular, transparent and translucent objects present problems in the traditional 3D scanning techniques due to reflectance and transmittance properties. In this work, it is presented a non-invasive specular-object acquisition technique and another for transparent and translucent objects. The system utilizes a Minolta Vivid 9i Non Contact 3D Digitizer, an ultraviolet lamp for specular pieces and an infrared lamp for transparent and translucent pieces. With this lamps, controls the ambient lighting and counteracts the adverse effects caused by the optical properties of this kind surfaces.

Experimental results show that the proposed techniques can generate accurate 3D models of objects with different specular, transparent and translucent surfaces. The technique performance is evaluated by comparing the acquired surface, against the acquisition obtained model painted to suppress the unwanted effects of the optics properties.



---

# Objetivos

## Objetivo General

- Desarrollar e implementar una técnica de digitalización de piezas cuyas características físicas, como tamaño e índice de reflexión y refracción de la superficie, representan condiciones ópticas críticas dado el sistema de captura basado en luz estructurada. Esta técnica está orientada a la reconstrucción, integrando el proceso de adquisición con una serie de evaluaciones de consistencia que determinan los datos pertenecientes a la textura y geometría del objeto, generando así modelos 3D precisos.

## Objetivos Específicos

- Definir un protocolo de adquisición en el que se establecen las condiciones de iluminación y orientación de los dispositivos de captura que asignen un valor de confiabilidad, empleando diferentes sistemas de captura que involucren el uso de escáner de rango, cámaras fotográficas y sistemas híbridos.
- Eliminar las medidas falsas en las imágenes de rango adquiridas mediante evaluaciones locales, las cuales se basan en criterios de confiabilidad dados por las condiciones en el proceso de adquisición, como lo es el comportamiento de la normal de un punto en el objeto respecto al sensor.

- Determinar la veracidad mediante evaluaciones globales, de la nube de puntos obtenida después de utilizar un método de registro tradicional. Estas evaluaciones se basan en la consistencia de las coordenadas y la visibilidad de los puntos en el modelo formado por todas las vistas en relación a la línea del sensor en cada una de estas posiciones.
- Integrar el proceso de adquisición con las pruebas locales y globales para establecer los valores de confiabilidad que garanticen la reconstrucción de un modelo tridimensional lo más fiel posible a la pieza original.

---

# Índice

Lista de figuras	x
Lista de tablas	xi
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	<b>4</b>
2.1 Sistemas de Captura . . . . .	4
2.1.1 Escáner de Rango . . . . .	4
2.1.2 Cámara Fotográfica . . . . .	6
2.2 Reconstrucción Tridimensional . . . . .	7
2.2.1 Imágenes de Rango . . . . .	8
2.2.2 Método de Triangulación . . . . .	8
2.2.3 Adquisición . . . . .	10
2.2.4 Registro . . . . .	10
2.2.5 Integración . . . . .	13
2.3 Propiedades Ópticas de los Materiales . . . . .	14
<b>3 Adquisición de Superficies Ópticamente Adversas</b>	<b>17</b>
3.1 Revisión de la Literatura . . . . .	17
3.1.1 Objetos Especulares . . . . .	17
3.1.2 Objetos Transparentes y Translúcidos . . . . .	23
3.2 Propiedades Ópticas de los Materiales . . . . .	26
3.2.1 Propiedades de los Objetos Metálicos y Cerámicas . . . . .	29

---

3.2.2	Propiedades de los Objetos Transparentes y Translúcidos . . . . .	32
3.3	Resultados Experimentales . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>38</b>
4.1	Montaje Experimental . . . . .	38
4.1.1	Experimento I: Adquisición sin condiciones de iluminación controlada . .	38
4.1.2	Experimento II: Adquisición con condiciones de iluminación controlada .	40
4.1.3	Experimento III: Adquisición Pieza Pintada y sin condiciones de iluminación controlada (Ground Truth) . . . . .	44
4.2	Análisis y Discusión de Resultados . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>56</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>62</b>

---

# Lista de figuras

2.1	Escáner de rango VIVID 9i . . . . .	5
2.2	Método de triangulación escáner VIVID 9i [6] . . . . .	5
2.3	Proceso de Reconstrucción 3D . . . . .	7
2.4	Principio de Triangulación [10] . . . . .	8
2.5	Obtención de profundidad mediante luz estructurada . . . . .	9
2.6	Registro de dos imágenes de rango . . . . .	12
2.7	Modelo 3D . . . . .	14
2.8	Reflexión de la luz . . . . .	16
3.1	Sistema planteado para la distorsión de forma [20] . . . . .	19
3.2	Reconstrucción usando el método de [29] . . . . .	20
3.3	Reconstrucción usando el método de [34] . . . . .	22
3.4	(a)Fotografía objeto transparente (b)Reconstrucción con el método de [35] . . . . .	24
3.5	Objeto translúcido reconstruido con el método de Chen et al. [40] . . . . .	24
3.6	Objeto transparente reconstruido con el método de Hullin et al. [42] . . . . .	25
3.7	Geometría de la reflexión lambertiana . . . . .	27
3.8	Geometría de la reflexión especular . . . . .	28
3.9	Reflectancia vs. Longitud de Onda para Au, Ag, Cu y Al . . . . .	31
3.10	Geometría de la refracción . . . . .	32
3.11	Transmitancia vs. Longitud de Onda en el dominio de ondas IR . . . . .	35
3.12	(a), (c) Objeto especular (b), (d) Una vista adquirida iluminando el objeto (a) y (c) con luz UV-A . . . . .	36

---

3.13 (a) Objeto transparente (c) Objeto translúcido (b),(d) Una vista adquirida iluminando el objeto (a) y (c) con luz IR . . . . .	37
4.1 Montaje de adquisición . . . . .	40
4.2 Resultados de adquisición implementando el Experimento I . . . . .	41
4.3 Resultados de adquisición implementando el Experimento II . . . . .	45
4.4 Resultados de adquisición implementando el Experimento III . . . . .	46
4.5 Objetos especulares. (a),(b) Metal plateado (c),(d) Metal dorado (e),(f) Cerámicas	47
4.6 Objetos transparentes y translúcidos. (a),(b) Translúcidos (c),(d) Transparentes	48
4.7 Comparación entre resultados Experimentos 2 y 3 para los objetos especulares .	50
4.8 Comparación entre resultados Experimentos 2 y 3 para los objetos transparentes y translúcidos . . . . .	51

---

# Lista de tablas

2.1	Especificaciones lente Wide . . . . .	6
2.2	Especificaciones lente Middle . . . . .	6
2.3	Especificaciones lente Tele . . . . .	6
2.4	Características de la cámara Sony DSC - F717 . . . . .	7
3.1	Distribución Espectral . . . . .	29
3.2	Reflectancia de metales con $\lambda = 350$ nm y $\lambda = 750$ nm . . . . .	32
4.1	Porcentaje de Desviación Figura 4.7a . . . . .	49
4.2	Porcentaje de Desviación Figura 4.7b . . . . .	52
4.3	Porcentaje de Desviación Figura 4.7c . . . . .	52
4.4	Porcentaje de Desviación Figura 4.7d . . . . .	52
4.5	Porcentaje de Desviación Figura 4.7e . . . . .	53
4.6	Porcentaje de Desviación Figura 4.7f . . . . .	53
4.7	Porcentaje de Desviación Figura 4.8a . . . . .	53
4.8	Porcentaje de Desviación Figura 4.8b . . . . .	54
4.9	Porcentaje de Desviación Figura 4.8c . . . . .	54
4.10	Porcentaje de Desviación Figura 4.8d . . . . .	55
4.11	Adquisición de una vista realizando un barrido de ángulos (Figura 4.5a) . . . . .	55
4.12	Adquisición de una vista realizando un barrido de ángulos (Figura 4.6a) . . . . .	55





# Introducción

---

La representación y reconstrucción de formas tridimensionales (3D) ha tenido un gran desarrollo en investigaciones de visión en las últimas dos décadas. El incremento de estas técnicas de digitalización ha permitido modelar la geometría de objetos y escenas del mundo real, aumentando así la capacidad de análisis e interacción con estos. El interés en estas técnicas surge debido a que estos modelos tienen aplicaciones en una amplia variedad de campos. Los datos 3D pueden ser descritos, almacenados y representados para diferentes aplicaciones como bases de datos de librerías digitales, enciclopedias en línea, museos virtuales, diseño industrial, automatización de manufactura, arqueología, robots inteligentes, entre otros.

Las tecnologías de digitalización y visualización 3D permiten una representación que contiene tanto la geometría del objeto como la apariencia de la superficie. La aplicación de este tipo de representaciones en museos virtuales, permite al usuario ver, manipular y estudiar prácticamente todo el contenido del museo en un lugar físicamente separado de este y en cualquier momento.

En este trabajo se propone la identificación y solución de los problemas que se afrontan en la digitalización de objetos que presentan condiciones ópticas complejas, complejidad dada por el tamaño y las características ópticas del material del cual está hecho el objeto. Se realiza un enfoque en piezas orfebres del patrimonio cultural Colombiano, con el fin de obtener una base de datos para la representación virtual del Museo de Oro del Banco de la República, en el marco del proyecto “Servicios de información basados en patrimonio cultural Colombiano sobre Renata: Caso Museo del Oro”. Este proyecto busca que los científicos Colombianos y el público en general del Museo del Oro del Banco de la República puedan interactuar con reproducciones

de alta calidad de piezas de nuestro legado cultural, mediante el uso de equipos hápticos.

Las técnicas hasta ahora empleadas son efectivas para capturar y reconstruir la forma y apariencia de piezas de material homogéneo, es decir superficies cuyas propiedades reflectivas se mantienen fijas o con variaciones mínimas. Las piezas de materiales no homogéneos presentan una superficie altamente reflectiva, como es el caso de las cerámicas y metales, o son refractivas como los vidrios y plásticos. La reconstrucción de la geometría de este tipo de piezas es complicada, para los altamente reflectivos, por el hecho que la luz reflejada por la superficie satura el sensor de la cámara; y en el caso de los refractivos, porque la luz traspasa el objeto y el sensor no captura nada. En ambos casos se presentan dos problemas en los datos a adquirir: información errónea y ausencia de información. Para solucionar este problema se desarrollaron técnicas de adquisición que contrarrestan los efectos adversos producidos en el proceso de captura, originados por las propiedades físicas de reflexión y refracción. El enfoque de las técnicas propuestas es el control de las condiciones de iluminación en el espacio de adquisición; para el caso de las superficies especulares, las piezas son iluminadas con luz ultravioleta y para las piezas transparentes y translúcidas se emplea como fuente de iluminación, luz infrarroja.

Los métodos para adquisición de información 3D se clasifican en métodos de contacto y sin contacto, siendo este último el más utilizado en las investigaciones propuestas en los últimos años. Este método se caracteriza por varios aspectos: la precisión, el tiempo de medición, la complejidad del objeto medido y los costos [1], [2], [3]. La mayoría de las técnicas sin contacto existentes se basan en la triangulación activa, una de estas usa luz estructurada proyectando patrones de franja acompañado del procesamiento de imágenes basado en el análisis de franjas [4], [5]. Otra de las técnicas de triangulación activa más usadas, y la empleada en este trabajo, es la digitalización por láser con escáner de rango.

Algunas de las técnicas que han trabajado con este tipo de piezas empleando escáner de rango solucionan los problemas presentes en la adquisición manipulando las piezas, es decir las pintan con sustancias o polvos que las dejan opacas. Esta forma de solucionar el problema tiene como consecuencia otros inconvenientes: discrepancias en la información real y la adquirida, e invasividad de las piezas.

Ya que el mayor inconveniente que presenta la adquisición en este caso es la irregularidad óptica del material de las piezas, se hace necesario establecer una técnica de captura donde no haya pérdida de información y se asegure que la información adquirida pertenece realmente a la geometría de la piezas. Las condiciones a tener en cuenta para establecer el campo de captura son el tipo de iluminación, la orientación y ubicación del dispositivo de captura respecto a la pieza y la ubicación de la fuente de iluminación respecto a la pieza y el dispositivo de captura. Como ya se tiene establecido el dispositivo de captura, el siguiente paso es elegir el tipo de iluminación adecuada para la adquisición de piezas altamente reflectivas y de igual forma para las refractivas.

En este trabajo se realiza un acercamiento a la solución del problema de adquisición de objetos con características ópticas adversas. En el Capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos referentes al proceso de reconstrucción 3D, los sistemas de captura utilizados y las propiedades ópticas de los materiales. En el Capítulo 3 se introducen las técnicas de adquisición planteadas, iniciando con una revisión literaria de los trabajos realizados en este campo, fundamentos necesarios sobre las propiedades de piezas especulares y transparentes y los resultados obtenidos con las técnicas planteadas. El Capítulo 4 contiene la descripción del montaje experimental de las técnicas propuestas y los resultados obtenidos en el proceso de registro 3D. Finalmente en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.