2 Fundamentos Teóricos

2.1 Sistemas de Captura

2.1.1 Escáner de Rango

El escáner de rango que posee la Universidad Nacional de Colombia, y con el cual se realizaron las adquisiciones, es el digitalizador 3D no invasivo VIVID 9i de Konica Minolta (ver Figura 2.1). El VIVID 9i está basado en el principio de triangulación, los objetos son escaneados con un rayo láser clase II, la luz reflejada desde la superficie entra a la cámara CCD (Charge-Coupled Device). La distancia al objeto se obtiene con el ángulo de reflexión del láser, el ángulo de incidencia de la luz reflejada desde el objeto al CCD y la distancia fija entre el láser y el CCD de la cámara (Figura 2.2).

Las medidas de la superficie del objeto son obtenidas mediante triangulación y convertidas a una malla de polígonos. El VIVID 9i obtiene máximo 640x480 puntos en 2.5 segundos por cada rastreo, adquiriendo simultáneamente la superficie y los datos de color de los puntos. Por tanto es ideal para capturar datos para el diseño de prototipos y modelos con una alta calidad y una reducción del tiempo de adquisición. El VIVID 9i tiene 3 tipos de lentes: Wide, Middle y Tele. En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se presenta la relación entre distancia del láser al objeto y las dimensiones del objeto para la operación adecuada de cada lente. El lente se escoge de acuerdo al tamaño de la pieza a digitalizar.

Figura 2.1: Escáner de rango VIVID 9i

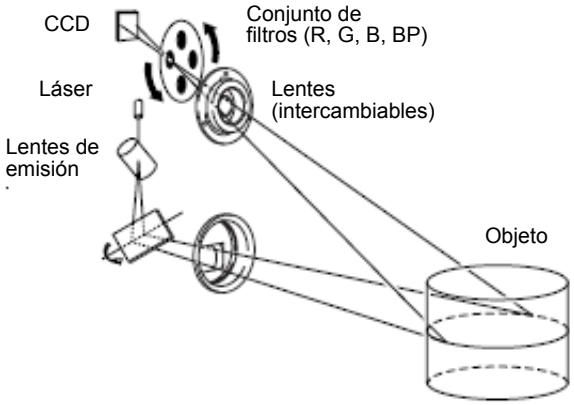


Figura 2.2: Método de triangulación escáner VIVID 9i [6]

Distancia (mm)	Dimensiones del objeto (mm)	
	Horizontal	Vertical
500	299	224
600	359	269
800	478	359
1000	598	449
2500	1495	1121

Tabla 2.1: Especificaciones lente Wide

Distancia (mm)	Dimensiones del objeto (mm)	
	Horizontal	Vertical
500	165	124
600	198	148
800	263	198
1000	329	247
2500	823	618

Tabla 2.2: Especificaciones lente Middle

Distancia (mm)	Dimensiones del objeto (mm)	
	Horizontal	Vertical
500	93	69
600	111	83
800	148	111
1000	185	139
2500	463	347

Tabla 2.3: Especificaciones lente Tele

2.1.2 Cámara Fotográfica

Para la adquisición de información 2D (fotografías) se utilizó la cámara Sony DSC - F717 la cuál consta de un arreglo de sensores CCD. Las características de esta cámara está detalladas en la Tabla 2.4.

Resolución máxima	2560 x 1920
Píxeles efectivos	4.9 millones
Tamaño del senor	8.8 x 6.6 mm
Formatos	JPG (con compresión) y TIFF (sin compresión)
Niveles de calidad	Estándar y Fino

Tabla 2.4: Características de la cámara Sony DSC - F717

2.2 Reconstrucción Tridimensional

La reconstrucción 3D es el proceso mediante el cual, objetos reales, son reproducidos en la memoria de un computador, manteniendo sus características físicas (dimensiones, volumen y forma). El proceso de reconstrucción, involucra las etapas de: adquisición, registro e integración. Por lo general se requieren varias imágenes de rango para reconstruir un objeto, ya que una sola vista no es suficiente para cubrir toda la geometría del mismo. Es por esto que es necesario adquirir y registrar múltiples imágenes de rango para obtener una sola nube de puntos que represente al objeto. El proceso que se debe seguir para pasar de un objeto del mundo real a su reproducción computacional, es detallado en la Figura 2.3.

Figura 2.3: Proceso de Reconstrucción 3D

La primera etapa del proceso, es decir la adquisición, consiste en el sensado del objeto utilizando un dispositivo de captura, con lo cual se obtienen una serie de imágenes de rango que representan cada una de las vistas necesarias para reconstruir el objeto. La etapa de registro es el proceso en el cual todas las imágenes adquiridas son llevadas al mismo sistema de coordenadas. Finalmente en la etapa de integración se eliminan los datos redundantes producidos por la información repetida en las múltiples vistas registradas, se generan datos en regiones donde no hay información (llenado de huecos) y se representa el modelo como una malla de polígonos, por lo general triángulos.

2.2.1 Imágenes de Rango

Las imágenes de rango son la representación bidimensional de la ubicación espacial de los puntos muestreados de la superficie de una escena. Generalmente se visualizan como imágenes 2D en escala de grises, donde los valores de intensidad representan la distancia medida desde la superficie de la escena hasta el sensor a lo largo de la línea de captura del mismo. Por lo tanto, una imagen de rango reproduce la estructura 3D de una escena. Las imágenes de rango son una clase especial de imágenes digitales, conocidas como imágenes de profundidad. La codificación que se usa con mayor regularidad muestra en tonos más claros distancias menores y en tonos oscuros distancias mayores [7].

2.2.2 Método de Triangulación

Este es el método más utilizado para adquisición de información 3D usando dispositivos ópticos [8], [9]. El objeto es iluminado con el láser del proyector desde un punto y captado por el sensor desde otro. El ángulo del rayo de luz (α), el ángulo del punto de vista (β) y la línea base entre la fuente de luz y el sensor (D) definen la geometría de triangulación, de donde se calcula la forma 3D (Figura 2.4).

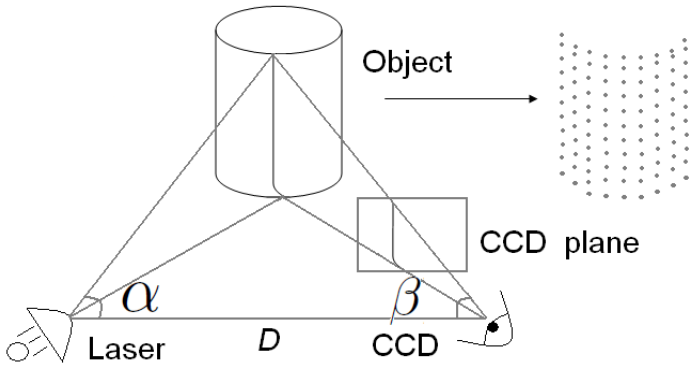


Figura 2.4: Principio de Triangulación [10]

La proyección del láser proporciona una silueta que es captada por el sensor. Con base en la posición y orientación del sensor respecto a la escena y con la información de los parámetros internos del sensor, se pueden calcular los valores de profundidad que representan la silueta. El conjunto de los valores de profundidad dado por las siluetas conforman los datos de una imagen de rango.

El principio básico es el siguiente: un patrón de luz es proyectado sobre la escena, lo cual permite que el sensor capte esta escena [11]. Las coordenadas (X, Y, Z) de un punto de la escena respecto a un sistema de coordenadas situado en el centro óptico del sensor, pueden obtenerse por triangulación con la Ecuación 2.1 obtenida a partir de la Figura 2.5:

$$(X, Y, Z) = \frac{b}{f \cos\theta - u}(u, v, f) \tag{2.1}$$

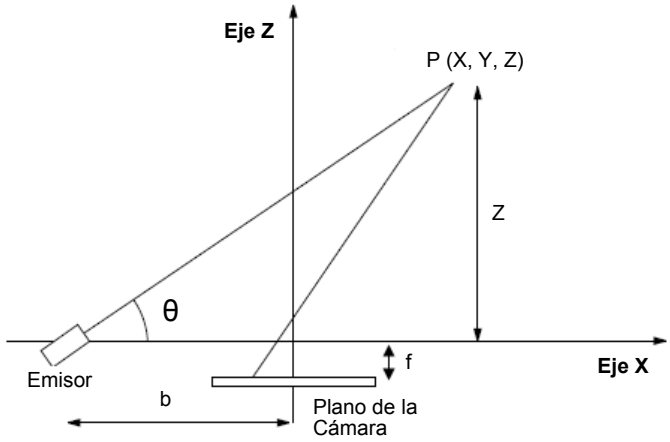


Figura 2.5: Obtención de profundidad mediante luz estructurada

Donde b es la línea base o distancia de separación entre los centros ópticos del emisor y la cámara, f es la distancia focal de la lente de la cámara, u y v corresponden a la posición del punto en el plano de la imagen, y θ es el ángulo de proyección del haz respecto al eje x.

2.2.3 Adquisición

Las imágenes de rango son fuente de información para la reconstrucción parcial de superficies. Sin embargo, dado que cada imagen capta la escena desde un punto de vista específico, no es suficiente con una toma para reconstruir un modelo completo, por lo tanto es necesario adquirir varias imágenes para cumplir con dicho objetivo [7].

La primera etapa en el proceso de reconstrucción, consiste en adquirir las imágenes de las escenas en cuestión mediante la utilización de cualquier sensor de captura. El método más utilizado para la adquisición de imágenes de rango es el de triangulación. Los sistemas de captura de este tipo se componen de un proyector de luz estructurada, que, como su nombre lo indica, proyecta patrones como puntos, líneas, rejillas, etc., y por un sensor, típicamente un CCD. Para entender el proceso de reconstrucción 3D, se detallan los pasos seguidos en la reconstrucción de una pieza orfebre perteneciente al legado cultural colombiano. La adquisición de datos se realiza con el escáner VIVID 9i. Lo primero a tenerse en cuenta es el tipo de lente a usarse, el VIVID 9i tiene 3 tipos de lentes como se había mencionado anteriormente. El lente empleado es el Tele, por ser el más adecuado para mediciones precisas de objetos pequeños [6], evitando posibles distorsiones en la imagen.

En una toma con escáner de rango, la imagen 3D obtenida es una vista del modelo, lograda por triangulación objeto, cámara y láser; por tanto se recoge la información de los puntos en los que alcanza a incidir el láser y que la cámara captura [12]. Para una reconstrucción total de la pieza, es necesario hacer la captura de varias vistas que se complementen; con este objeto las pruebas de registro se ejecutaron girando al modelo ubicado sobre una tornamesa cada 30° en un rango de 0° a 360°. En la Figura 2.6a y Figura 2.6b se presentan dos vistas adquiridas con el escáner de rango.

2.2.4 Registro

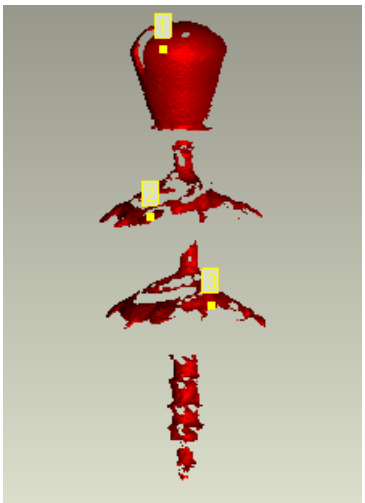
Una vez que la etapa de adquisición culmina con la digitalización de la superficie del objeto y se realiza la visualización de las imágenes en un sistema de coordenadas único, se obtienen dife-

rentes vistas que se superponen unas a otras, sin coherencia alguna. El propósito del registro es alinear estas vistas de tal manera que la forma del objeto sea recuperado con la mayor precisión posible. El registro es una etapa del proceso de reconstrucción 3D, que consiste en emparentar dos o más imágenes, que pueden ser tomadas en diferentes momentos, desde diferentes sensores o desde diferentes puntos de vista. Dado que una simple vista de rango puede contener únicamente los puntos en la escena que son visibles al sensor, es necesario unir múltiples vistas de rango en un único conjunto de puntos, para obtener el modelo completo de la escena. El registro consiste en obtener una transformación (translación y rotación) que permita llevar un par de vistas de rango al mismo sistema de coordenadas [13].

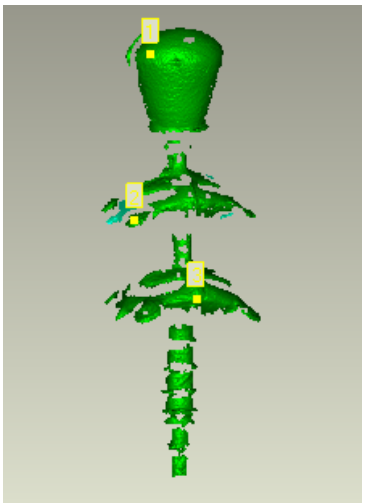
Tras haber realizado múltiples capturas en diferentes ángulos con el modelo situado sobre la tornamesa, se somete cada vista a una depuración en la que se eliminan los puntos que no corresponden al objeto, estas áreas se reconocen por el gran número de agujeros y errores de percepción debido a la orientación del escáner. Una vez se ha eliminado la información innecesaria, se hace el acople de todas las vistas, trabajando por pares de acuerdo a la información que tienen en común, para así lograr un modelo completo en dimensión y forma (ver Figura 2.6). Para registrar dos vistas, deben haber por lo menos tres correspondencias no colineales, esta tarea se realiza con un software espcializado.

Para realizar el proceso de registro se toman dos imágenes que contengan datos de diferentes partes del mismo objeto, pero que tengan puntos en común. Las Figuras 2.6a y 2.6b corresponden a dos vistas de un objeto a los cuales, manualmente, se les coloca tres puntos que permiten el alineamiento de ambas vistas en un solo plano de coordenadas, dando como resultado la imagen de la Figura 2.6c, donde se aprecia la contribución de la Vista 1 (color rojo) y la Vista 2 (color verde); las coordenadas que se toman como referencia son las de la Vista 1. Este proceso se sigue con las imágenes restantes, tomando como plano de referencia el sistema de coordenadas del conjunto de imágenes que ya se han alineado, de esta forma se logra que todos los datos sean alineados en un mismo plano de coordenadas.

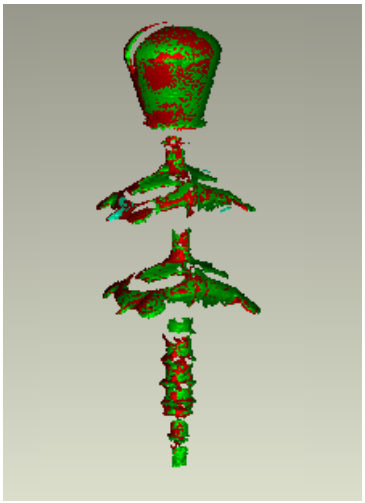
Durante el registro pueden ocurrir errores por diferentes causas, las más frecuentes se originan en la mala escogencia de los puntos en común entre las imágenes provocando que no



(a) Vista 1



(b) Vista 2



(c) Registro de las vistas 1 y 2

Figura 2.6: Registro de dos imágenes de rango

encajen entre si, produciendo desplazamientos del mismo punto de una imagen a la otra, huecos y translapamientos.

2.2.5 Integración

La integración es una etapa que consiste en obtener una representación computacional suave y continua del objeto. Una vez se han registrado las diferentes imágenes de rango utilizadas para el proceso de reconstrucción, se tiene un conjunto de datos en el espacio 3D cuya conectividad y relación aún no está muy bien definida, debido a que los datos registrados en la etapa previa generan superficies parciales que poseen huecos, intersecciones poligonales, falsos bordes, entre otros. En este proceso se busca eliminar toda la información redundante presente en aquellos casos en que se realiza un gran número de tomas del objeto en regiones con poca variación en su superficie, de tal manera, que se debe lograr llevar los datos a una representación única que defina de manera precisa la geometría del objeto.

El problema general de integración se puede dividir en dos partes fundamentales: la eliminación de discontinuidades en la superficie, y el llenado de agujeros de tamaño relativamente pequeños con respecto a algún valor predefinido. Los algoritmos de integración se pueden clasificar en una de cuatro categorías, que resultan de la combinación de dos variantes en el proceso: el tipo de información supuesta a priori, y el tipo de método utilizado para la obtención de la aproximación de la superficie [10].

El modelo resultante es una malla de polígonos, en este caso triángulos. Los archivos son exportados en formato VRML (*.wrl) y PLY (*.ply). VRML (Virtual Reality Modeling Language) es un formato estándar para la representación de modelos 3D; está basado en texto y fue diseñado principalmente para la visualización de gráficos en 3D en la web. El formato PLY es conocido como Polygon File Format o Stanford Triangle Format; es utilizado para adquisiciones de alta resolución. Este formato fue diseñado fundamentalmente para almacenar datos de escáneres 3D, dando una descripción de un objeto como una lista de polígonos planos. Al terminar estas tres etapas se obtiene el modelo 3D de la pieza escogida Figura 2.7.

Figura 2.7: Modelo 3D

2.3 Propiedades Ópticas de los Materiales

Las propiedades ópticas corresponden a la interrelación entre un material y las radiaciones electromagnéticas en forma de ondas o partículas de energía, conocidas como fotones. Estas radiaciones pueden tener características que entren en nuestro espectro de luz visible, o ser invisibles para el ojo humano.

El concepto de fotón se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en forma de energía, como ocurre con el efecto fotoeléctrico o la luminiscencia. El concepto de onda suele emplearse para explicar la propagación de la luz y algunos de los fenómenos de formación de imágenes. En las ondas de luz, como en todas las ondas electromagnéticas, existen campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio, que fluctúan con rapidez. La longitud de onda es la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma fase, es decir, puntos que ocupan posiciones equivalentes en la onda. Por ejemplo, la longitud de onda es igual a la distancia que va de un máximo de la onda sinusoidal a otro, o de un mínimo a otro. La luz emitida por las fuentes luminosas es capaz de viajar a través de materia o en ausencia de ella, aunque no todos los medios permiten que la

luz se propague a través de ellos. Desde este punto de vista, las diferentes sustancias materiales se pueden clasificar en opacas, transparentes y translúcidas. Aunque la luz es incapaz de traspasar las opacas, puede atravesar las otras dos. Al interactuar con la estructura electrónica o cristalina de un material, los fotones de una fuente externa crean varios fenómenos ópticos. Si los fotones incidentes interactúan con los electrones de valencia pueden ocurrir varias cosas: los fotones ceden energía al material, en cuyo caso hay absorción; o puede ser que cuando los fotones aportan energía, de inmediato el material emite electrones de idéntica energía, de forma que se produce reflexión. También puede que los fotones no interactúen con la estructura electrónica del material, en ese caso ocurre la transmisión. En cualquiera de estos tres casos, la velocidad de los fotones cambia; este cambio propicia la refracción.

La reflexión luminosa es un fenómeno en virtud del cual la luz al incidir sobre la superficie de los cuerpos cambia de dirección, invirtiéndose el sentido de su propagación. La visión de los objetos se lleva a cabo precisamente gracias al fenómeno de la reflexión. Un objeto cualquiera, a menos que no sea una fuente en sí mismo, permanecerá invisible en tanto no sea iluminado. Los rayos luminosos que provienen de la fuente se reflejan en la superficie del objeto y revelan al observador los detalles de su forma y su tamaño. Cuando un haz de fotones golpea un material, éstos interactúan con los electrones de valencia y ceden su energía. Cuando las bandas de valencia no están totalmente ocupadas, cualquier radiación, de casi cualquier longitud de onda, excita a los electrones hacia niveles superiores de energía. Podría esperarse que, si los fotones son totalmente absorbidos, no se reflejara luz y el material aparecería de color negro. Sin embargo, cuando fotones de longitud casi idéntica vuelven a ser emitidos, mientras que los electrones excitados regresan a sus niveles inferiores de energía, ocurre la reflexión. Dado que la totalidad del espectro visible se refleja, los materiales con esta propiedad tienen un color blanco o plateado (en los metales). La reflectividad R da la fracción del haz incidente que se refleja y está relacionada con el índice de refracción. Los materiales con alto índice de refracción tienen mayor reflectividad que aquellos cuyo índice es bajo. La reflectividad y el índice de refracción varían con la longitud de onda de los fotones.

De acuerdo con las características de la superficie reflectora, la reflexión luminosa puede ser especular o difusa. La reflexión especular tiene lugar cuando la superficie es perfectamente

lisa. Un espejo o una lámina metálica pulimentada reflejan ordenadamente un haz de rayos conservando la forma del haz. La reflexión difusa se da sobre los cuerpos de superficies más o menos rugosas. En ellas un haz paralelo, al reflejarse, se dispersa orientándose los rayos en direcciones diferentes.

Las leyes que rigen el comportamiento de la luz se establecen a partir de la reflexión especular. Se denominan genéricamente leyes de la reflexión. Si S es una superficie especular, se denomina rayo incidente al que llega a S, rayo reflejado al que emerge de ella como resultado de la reflexión y punto de incidencia O al punto de corte del rayo incidente con la superficie S. La recta N, perpendicular a S por el punto de incidencia, se denomina normal (ver Figura 2.8).

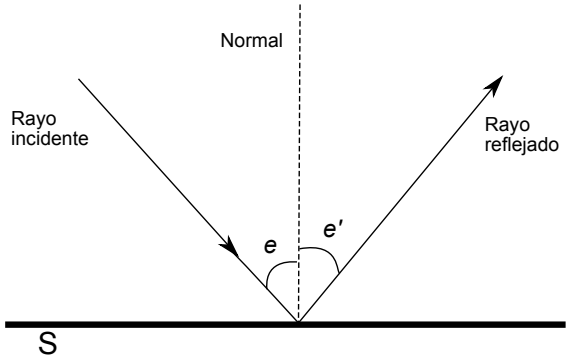


Figura 2.8: Reflexión de la luz

El ángulo de incidencia e es el formado por el rayo incidente y la normal. El ángulo de reflexión e' es el que forma la normal y el rayo reflejado. Con la ayuda de estos conceptos auxiliares pueden anunciarse las leyes de la reflexión en los siguientes términos:

- Primera Ley: El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran sobre un mismo plano.
- Segunda Ley: El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión ($e = e'$).

3 Adquisición de Superficies Ópticamente Adversas

3.1 Revisión de la Literatura

Los objetos clasificados como homogéneos presentan una uniformidad dada por la ausencia de variaciones en las características de reflexión de la superficie. Algunos de los métodos que se han enfocado en este tipo de piezas [14], [15], [16], [17] asumen que las propiedades reflectivas se mantienen fijas, suposición que no es práctica para la mayoría de los casos.

Por otra parte los materiales no homógeneos presentan una superficie altamente reflectiva o especular, la reconstrucción de la geometría de este tipo de objetos es complicada por el hecho que la luz es reflejada fuera de la superficie y además satura el sensor de la cámara. Por lo tanto, no hay rasgos superficiales que pueden ser observados directamente [18]. Como el enfoque de este trabajo son las piezas con condiciones ópticas complejas, se presentará la literatura de los últimos cinco años de los métodos de reconstrucción de este tipo de superficies en dos grupos: objetos especulares y objetos transparentes y translúcidos.

3.1.1 Objetos Especulares

Las piezas adquiridas con los métodos descritos en esta sección, son piezas brillantes como metales, plásticos y cerámicas. Para la reconstrucción de objetos con este tipo de superficies existe un grupo de métodos que usan patrones conocidos los cuales son distorsionados por el efecto de las reflexiones especulares, estas técnicas se enfocan en conocer como la forma del objeto se distorsiona.

Bonfort y Sturm [19] desarrollaron una técnica de multi vista que reconstruye los vóxeles de una superficie especular usando una cámara calibrada. Una escena calibrada (dada por un patrón de calibración) es reflejada por la superficie especular en el plano de la cámara. El algoritmo primero calcula la normal para cada vóxel en cada vista, y después descarta los vóxeles cuyas normales no son consistentes en las diferentes vistas.

Tarini *et al.* [20] obtienen la geometría 3D de este tipo de superficies, observando las imágenes generadas por los objetos cuando están cerca de un monitor que proyecta un patrón sobre ellas. La forma del objeto es recuperada observando como la reflexión del patrón proyectado se distorsiona sobre el objeto, este proceso recibe el nombre de distorsión de forma. Para representar la distorsión usan un ambiente mate [21], [22] que es un modo general de modelar las interacciones ópticas entre el objeto y su entorno. Con las imágenes capturadas en el ambiente mate se procede a reconstruir el objeto en forma de mapa de normales y mapa de profundidad. Con la posición espacial del monitor, y la normal tentativa de cada píxel, se obtiene el valor de profundidad de cada uno de los píxeles de la imagen. De esta forma se consigue una estructura de datos 2D que almacena para cada punto la distancia del objeto escaneado a lo largo del rayo correspondiente. El modelo completo es construido usando técnicas conocidas para múltiples imágenes de rango como el algortimo ICP o la representación volumétrica [23], [24], [25], [26]. El sistema planteado se puede observar en la Figura 3.1, donde la Figura 3.1a es el objetivo fotografiado mientras el monitor refleja sobre el un patrón, la Figura 3.1b son las imágenes capturadas usadas para crear el ambiente mate, la Figura 3.1c es la combinación de las imágenes obtenidas, la Figura 3.1d) muestra el mapa de normales y mapa de profundidad y la Figura 3.1e representa la imagen de rango obtenida. Este planteamiento tiene como desventaja que el área de exploración es limitada, problema que es resuelto aumentando drásticamente el costo de hardware.

Otra clase de algoritmos inspecciona la reflexión de forma diferente. Cuando la luz es reflejada directamente es muy difícil para el sensor detectar los puntos de la superficie, sin embargo la información reflejada puede ser usada para reconstruir estos puntos de la superficie. Las técnicas que usan esta observación son llamadas forma de especularidad, estos detalles también

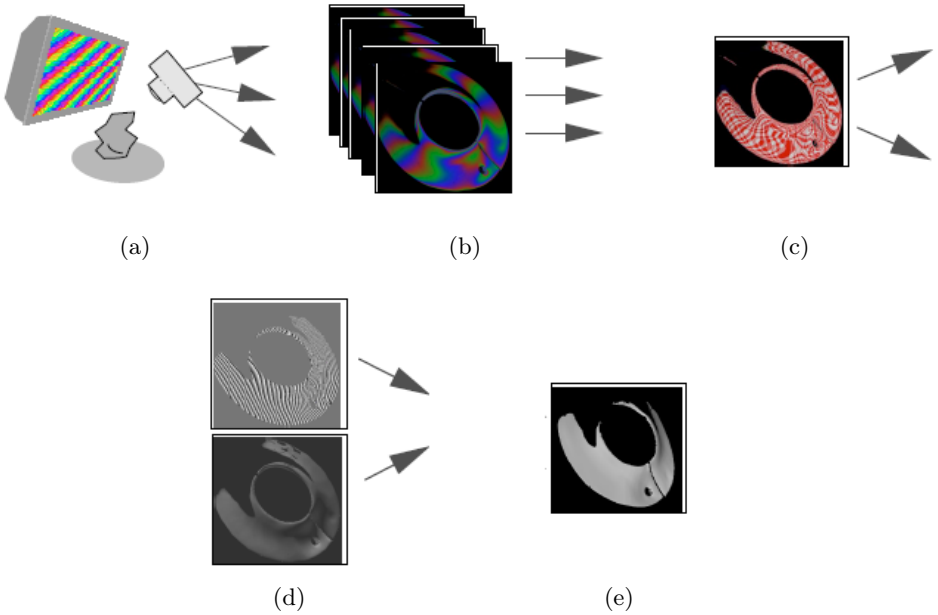


Figura 3.1: Sistema planteado para la distorsión de forma [20]

son conocidos como mesostructuras.

Wang y Dana [27] proponen usar un dispositivo de medida BRDF (Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional), el cual permite precisar la distribución angular de la radiación reflejada en una superficie [28], para recuperar la información de la normal de la superficie con la variación espacial BRDF, es decir la Función de Textura Bidireccional). El sistema usa un doble dispositivo óptico, una sección de espejo parabólico es colocada encima de la superficie tal que su foco incide sobre la superficie, usando luz paralela que cambia por una abertura móvil, hace posible que la luz incidente tome diferentes direcciones. Simultáneamente, la proyección ortográfica de la superficie por un rayo dividido permite detallar porciones densas 2D de BRDF. Detectando el punto de intensidad más alto en esta información, se puede encontrar la dirección de la principal reflexión de la superficie bajo la iluminación incidente, permitiendo extraer la normal de la superficie. Moviendo el espejo a través del plano del objeto, se puede alcanzar un muestreo 2D de la variación espacial BRDF y normales de la superficie. La superficie entonces se obtiene integrando la información de la normal.

Chen *et al.* [29] proponen un acercamiento más simple usando un dispositivo de muestreo hecho a mano, compuesto solamente de una cámara de vídeo y una fuente luminosa. Alrededor del objeto y a una distancia grande comparada al tamaño de este es movida la fuente luminosa, la dirección de iluminación es recuperada de cuatro esferas especulares colocadas en el campo visual de la cámara. Un umbral aplicado a los cuadros de vídeo permite identificar los reflejos especulares usados para recuperar la normal de la superficie. La etapa de muestreo tiene una realimentación, mostrando la densidad de muestreo de cada punto en el tiempo. Así, suficientes datos pueden ser acumulados para tener una reconstrucción densa del campo normal de la superficie. Otra vez, el campo normal es integrado para obtener la forma de la superficie final. La desventaja que presenta esta técnica es que requiere de muchas imágenes para la reconstrucción. En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de un objeto con el mapa normal recuperado y la reconstrucción de su forma.

(a) (b) (c)

Figura 3.2: Reconstrucción usando el método de [29]

Mientras que las técnicas anteriores asumen superficies aproximadamente planas, Ma *et al.* [30] consideran la recuperación de normales con una alta resolución para superficies geométricamente arbitrarias. Los autores emplean iluminación gradiente sobre el objeto a reconstruir. Uniendo las normales de las superficies de tres imágenes tomadas bajo iluminación gradiente y una bajo iluminación constante, recuperan las normales de superficies de objetos arbitrarios. Ya que la mayor parte de superficies encontradas en los objetos del mundo real combinan la reflexión difusa y especular, los autores proponen separar los dos componentes usando polarización lineal o esférica. Un conjunto separado de normales es calculado para las reflexiones difusas y especulares. Usando luz estructurada y las normales de las reflexiones especulares sumamente

detalladas, ellos recuperan la superficie de los modelos con alta resolución. Sin embargo, su método requiere fuentes luminosas polarizadas las cuales son costosas.

Park y Kak [31] presentan un método de adquisición y reconstrucción 3D para modelar objetos especulares. Imágenes de rango multi-pico es un concepto introducido por ellos para recopilar la información de rango teniendo en cuenta los efectos de interreflexiones presentes en la adquisición de este tipo de objetos, la idea básica es almacenar múltiples medidas de rango correspondientes a todos los picos existentes garantizando de esta forma que uno de los puntos almacenados corresponda verdaderamente al punto iluminado. Las medidas falsas causadas por las reflexiones mutuas son eliminadas iterativamente mediante pruebas de suavidad local y consistencia global. Para cada vista, la imagen de rango multi-pico es almacenada para representar los efectos de las interreflexiones. Esta información es sometida a una prueba que recibe el nombre de *test* de suavidad local, la cual elimina iterativamente todos los puntos determinados como no suaves, esto se estima con el cálculo de las normales. Después de esto se hace registro de todas las vistas adquiridas. Seguido a esto se eliminan los puntos con altas inconsistencias, para esto se usa la prueba llamada *test* de consistencia global, la cual se basa en dos criterios: consistencia de coordenadas y consistencia de visibilidad. Finalmente, realizan la integración adaptando el método de Curless y Levoy [32].

El mismo año Park y Kak presentan modificaciones al método planteado [33]. En el primer acercamiento los parámetros de restricción de las pruebas son seleccionados manualmente sin una justificación experimental de su escogencia; además la implementación de la consistencia de visibilidad causa ocasionalmente situaciones donde las medidas verdaderas reciben altos valores de inconsistencia. Para resolver estas limitaciones, realizan varios experimentos que determinan los valores que se deben fijar como umbrales en las pruebas de suavidad global y consistencia local. De esta forma generan modelos 3D precisos de objetos especulares con formas complejas.

En [34] retoman este método realizando variaciones en las pruebas aplicadas para examinar los efectos de los parámetros usados en estas. El proceso de eliminación de medidas falsas es planteado en dos etapas. La primera es llamada *test* local y consiste en una prueba de superficie local y una de visibilidad local, estas dos pruebas son aplicadas en cada imagen de rango por

separado. La segunda etapa consiste de una prueba para determinar las regiones apartadas y otra para observar la consistencia global de los datos, ambas pruebas se realizan sobre todas las imágenes de rango, por esto recibe el nombre de *test* global. Para evaluar el desempeño del método obtienen datos de referencia al pintar las piezas antes de adquirirlas, de esta forma se suprimen las propiedades de la superficie que causan dificultades en la adquisición. Los resultados obtenidos indican una mejora frente a los métodos tradicionales para construir modelos 3D de objetos con características ópticas complejas. Sin embargo el costo computacional es elevado ya que se deben realizar pruebas sobre cada información de rango de cada una de las vistas y después sobre todas las imágenes de rango registradas.

En la Figura 3.3 se muestra los resultados obtenidos en las diferentes pruebas y el resultado final de la integración. En la Figura 3.3a se observa el objeto adquirido, en la Figura 3.3b se muestran los datos originales donde los puntos azules representan las medidas verdaderas y los puntos rojos las falsas. En las Figuras 3.3c y 3.3d muestran los datos después de la convergencia de las pruebas locales, 3.3e y 3.3f representan los datos después de la convergencia de las pruebas globales. Finalmente en las Figuras 3.3g y 3.3h se observa el modelo 3D integrado.

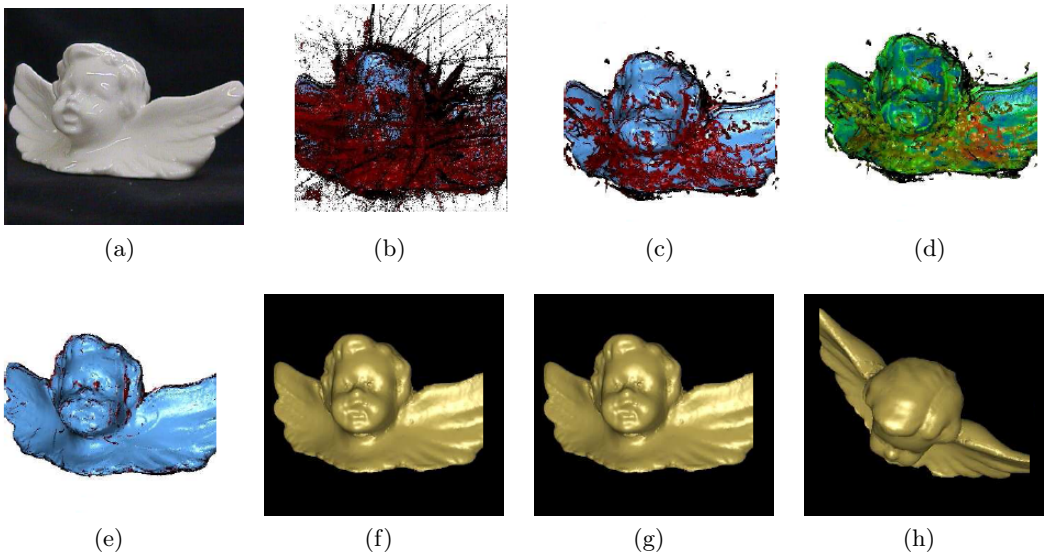


Figura 3.3: Reconstrucción usando el método de [34]

Las técnicas anteriormente mencionadas para la adquisición de piezas especulares presentan desventajas respecto a la técnica planteada en este trabajo, el costo en hardware y/o computa-