

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA PARA LA EXTRACCIÓN DE
PARAMETROS MORFOLÓGICOS DE LA EXPRESIÓN NATURAL DEL
ROSTRO HUMANO A PARTIR DE NUBE DE PUNTOS.**

**CARLOS ALBERTO FERNANDEZ PERDOMO
ALEXANDER RAMIREZ MONTENEGRO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2012**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA PARA LA EXTRACCIÓN DE
PARAMETROS MORFOLÓGICOS DE LA EXPRESIÓN NATURAL DEL
ROSTRO HUMANO A PARTIR DE NUBE DE PUNTOS.**

**CARLOS ALBERTO FERNANDEZ PERDOMO
ALEXANDER RAMIREZ MONTENEGRO**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Físico
en la modalidad de trabajo de investigación.

**Director
MAG. MARIO MILVER PATIÑO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2012**

Nota de Aceptación

Director-----

Magister Mario Milver Patiño V.

Jurado-----

Doctor Rubiel Vargas Cañas

Jurado-----

Magister Carlos Augusto Andrade

Fecha de Sustentación: Popayán, octubre 1 de 2012

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.	10
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	12
1.1. ANTROPOMETRÍA FACIAL.	12
1.1.1. Puntos característicos faciales.	12
1.1.1.1. Vista frontal del rostro.	13
1.1.1.2. Vista lateral del rostro.	13
1.2. GENERALIDADES DE RECONSTRUCCIÓN 3D.	15
1.2.1. Triangulación láser.	15
1.2.2. Visión estéreo.	16
1.2.3. Proyección de franjas.	17
2. VISIÓN ESTÉREO UTILIZANDO KINECT.	18
2.1. DESCRIPCIÓN DEL KINECT.	18
2.2. MODELO Y CALIBRACIÓN DE UNA CÁMARA.	19
2.2.1. Modelado de una cámara.	19
2.2.2. Calibración estereoscópica.	21
2.3. FILTRO BILATERAL.	21
2.4. ALINEAMIENTO O REGISTRO DE NUBES DE PUNTOS.	22
2.4.1. Iteración de puntos cercanos (ICP).	23
2.4.1.1. Taxonomía del ICP.	23
2.5. INTEGRACIÓN VOLUMÉTRICA.	24
2.5.1. Función de distancia signo (SDF).	24
2.5.2. Procesamiento volumétrico de imágenes de profundidad (VRIP).	25
2.5.2.1. Integración en tres dimensiones.	25
2.5.3. Cubos Marchantes (Marching Cubes).	26
3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN.	28
3.1. CONEXIÓN AL PC Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.	28

3.2. ASIGNACIÓN DE COLOR A LA NUBE DE PUNTOS.	29
3.2.1. Calibración estereoscópica.	29
3.2.2. Obtención de nube de puntos.	31
3.2.3. Asignación de color a la nube de puntos.	32
3.3. FILTRADO DE LA INFORMACIÓN.	33
3.3.1. Filtrado por distancia o espacial.	33
3.3.2. Filtrado bilateral.	33
3.4. MODO DE ESCANEEO.	35
3.5. ALINEAMIENTO O REGISTRO DE DATOS.	36
3.5.1. Iteración de puntos cercanos (ICP).	36
3.5.1.1. Selección de puntos.	37
3.5.1.2. Coincidencia de puntos.	37
3.5.1.3. Peso de parejas correspondientes.	37
3.5.1.4. Rechazo de parejas correspondientes.	37
3.5.1.5. Estimación de la transformación rígida.	37
3.6. INTEGRACIÓN DE LOS DATOS.	38
3.6.1. Definición del volumen y voxelización.	38
3.6.2. Teselado de la imagen de rango.	39
3.6.3. Cálculo de pesos de la malla.	40
3.6.4. Proceso de integración.	41
3.7. ESCANEEO Y RECONSTRUCCIÓN.	43
3.7.1. Escaneo.	43
3.7.2. Reconstrucción tridimensional.	44
3.8. MEDICIÓN DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS DEL ROSTRO.	45
3.8.1. Validación del sistema.	45
4. RESULTADOS.	47
4.1. ASIGNACIÓN DE COLOR A LA NUBE DE PUNTOS.	47
4.2. FILTRADO DE LA INFORMACIÓN.	48

4.2.1. Filtrado espacial.	48
4.2.2. Filtrado Bilateral.	49
4.3. ALINEAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.	50
4.3.1. Angulo entre las nubes de puntos consecutivas.	50
4.3.2. Ruido en la nube de puntos.	51
4.4. INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN.	52
4.5. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA.	53
CONCLUSIONES.	60
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXO 1. INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN Y MEDICIÓN.	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Nomenclatura de puntos frontales característicos del rostro humano.	13
Tabla1 1.2. Nomenclatura de los puntos laterales característicos del rostro humano.	13
Tabla1 1.3. Mediciones de la línea de referencia vertical.	14
Tabla1 1.4. Mediciones de la línea de referencia horizontal.	14
Tabla1 3.1. Parámetros de calibración obtenidos.	30
Tabla1 3.2. Lista de pares de puntos a medir.	45
Tabla1 4.1. Medidas tomadas con el calibrador o vernier.	54
Tabla1 4.2. Medidas obtenidas a través del sistema.	54
Tabla1 4.3. Error relativo entre la medida manual y la medida digital.	57
Tabla1 4.4. Tabla de valores manuales y medidos por el sistema.	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.	
Figura 1.1.	Puntos característicos faciales del rostro humano.	13
Figura 1.2.	Taxonomía de métodos activos.	15
Figura 1.3.	Geometría óptica para triangulación láser por rotación.	16
Figura 1.4.	Geometría de la proyección de franjas.1	17
Figura 2.1.	Elementos del sensor Kinect.	18
Figura 2.2.	Modelo pin-hole.	19
Figura 2.3.	Modelo pin-hole de una cámara.	20
Figura 2.4.	Filtro bilateral, suavizando de una imagen conservando sus bordes.	22
Figura 2.5.	Representación del algoritmo ICP.	24
Figura 2.6.	Función de distancia signo sin pesos en 3D.	25
Figura 2.7.	Seudocódigo integración volumétrica.	26
Figura 2.8.	Funcionamiento del algoritmo cubos marchantes en 2D.	26
Figura 2.9.	Combinaciones de cubos.	27
Figura 3.1.	Información entrega por el Kinect	28
Figura1 3.2.	Imagen del patrón de ajedrez. 1	29
Figura1 3.3.	Seudocódigo general del proceso de calibración.1	30
Figura1 3.4.	Nube de puntos. 1	31
Figura1 3.5.	Asignación de color a la nube de puntos.1	32
Figura1 3.6.	Seudocódigo del filtro bilateral.1	34
Figura1 3.7.	Modo de escaneo.1	35
Figura 3.8.	Concepto de transformación entre parejas de vistas.	36
Figura 3.9.	Seudocódigo de ICP.	38
Figura1 3.10.	Volumen predefinido voxelizado.1	39
Figura 3.11.	Teselado imagen de profundidad.	39
Figura 3.12.	Localización del sistema de visión en el espacio global.	40
Figura1 3.13.	Cálculo de pesos.1	41
Figura1 3.14.	Cálculo de la distancia signo.1	42
Figura 3.15.	Esquema general de sistema implementado.	43
Figura1 3.16.	Captura de pantalla de interfaz de escaneo.1	44
Figura1 3.17.	Disposición de los puntos de medida.1	45
Figura 3.18.	Interfaz de medición e interacción.	46
Figura 3.19.	Ubicación de puntos en la superficie.	46
Figura 4.1.	Mapeo inicial de color sobre la nube de puntos.	47
Figura 4.2.	Mapeo mejorado de color sobre puntos.	48
Figura 4.3.	Nube de puntos aplicándole filtro espacial.	49
Figura 4.4.	Filtro bilateral.	49
Figura 4.5.	Alineamiento de nubes de puntos 1.	50
Figura 4.6.	Alineamiento de nubes de puntos 2.	51
Figura 4.7.	Alineamiento de nubes de puntos 3.	52
Figura 4.8.	Voxelización del espacio de 128x128x128	53

Figura 4.9.	Voxelizacion del espacio de 512x512x512	53
Figura 4.10.	Distancias medidos vs Desviación estándar relativa.	55
Figura 4.11.	Sección de reconstrucción.	55
Figura 4.12.	Valor real y valor medido.	56
Figura 4.13.	Reconstrucción bajo condiciones distintas ambientales	57
Figura 4.14.	Distribución de puntos a medir.	58

INTRODUCCIÓN

La obtención de los parámetros morfológicos del rostro humano es un procedimiento que se realiza de manera manual, por lo tanto requiere mucho tiempo y en muchos casos es imprecisa, debido a la valoración subjetiva de quien realiza las medidas y además la realización de estas estas medidas se hacen sobre tejidos blandos. Buscando mejorar la eficiencia del proceso de obtención de dichas medidas, desde inicios de los años 80 se han venido sistematizando este proceso bajo el nombre de fotogrametría del rostro. Sin embargo, estos trabajos tradicionalmente se han basado en medidas bidimensionales, que introducen errores debido a la forma tridimensional del rostro y a la calibración de la cámara. De aquí la importancia de realizar una reconstrucción tridimensional del rostro humano que sirva como herramienta para realizar medidas faciales.

La reconstrucción tridimensional de objetos y ambientes es un tópico importante en el campo de la visión computacional, donde existen varios tipos de equipos para la adquisición de imágenes de rango o nube de puntos que pueden ser empleados. En la actualidad los sistemas se basan en técnicas ópticas como triangulación [1], interferometría [2], visión estéreo [3], imágenes de radar [4], proyección de patrones [2], entre otras, que brindan resultados satisfactorios en cuanto a objetos inanimados. En la reconstrucción del rostro humano las técnicas de contacto mecánico no son favorables debido a que son invasivas y ocasionan cambios en la expresión del rostro durante todo el escaneo, también las técnicas ópticas convencionales perturban la expresión del rostro debido a que proyectan patrones con niveles de energía que afectan tanto la visión como la piel.

La reconstrucción tridimensional como herramienta para extraer parámetros morfológicos o biométricos, son de gran utilidad en diferentes campos como: medicina estética, multimedia y entretenimiento, seguridad y en la industria cinematográfica y televisiva.

Gracias al avance tecnológico, se han desarrollado dispositivos que son capaces de obtener nubes de puntos usando patrones en el rango del infrarrojo cercano, estos dispositivos se conocen como cámaras de profundidad. Este tipo de dispositivo es idóneo para la reconstrucción del rostro humano ya que no genera ninguna incomodidad al momento del escaneo.

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un sistema de reconstrucción facial basado en la adquisición de nubes de puntos a través de una cámara de profundidad, que proyecta radiación en el rango del infrarrojo cercano, de manera que no perturbe la expresión natural del rostro y permita la extracción de parámetros morfológicos del rostro humano.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1 – Describe brevemente la antropometría facial y los parámetros morfológicos del rostro y como a evolucionado hasta la actualidad. También una breve descripción de las técnicas de reconstrucción tridimensional mas utilizados actualmente.

Capítulo 2 – Describe rápidamente de los procesos para obtener una reconstrucción tridimensional, captura de la información, filtrado, alineamiento e integración.

Capítulo 3 – Describe como esta conformado el sistema implementado en este trabajo así como las técnicas empleadas.

Capítulo 4 – Describe los resultados obtenidos con el sistema implementado, así como el análisis de los mismos.

Posteriormente, se presentan las conclusiones con base en: resultados obtenidos, problemas, ventajas y desventajas del sistema.

Por ultimo se anexa un manual de usuario del sistema, donde podrá conocer las diferentes herramientas de la aplicación.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. ANTROPOMETRÍA FACIAL

La antropometría es la ciencia que estudia las medidas del cuerpo humano a partir de relaciones de tamaño, peso y proporciones [5]. La antropometría facial se encarga de medir la superficie de la cabeza y del rostro. Se originó durante el renacimiento y sus métodos fueron definidos por las reglas de expresión del neoclasicismo, que expresa la calidad de las relaciones entre varias partes del cuerpo humano [6]. La introducción de medidas individuales en cabeza y rostro, desarrolladas principalmente para la medida del cráneo, data de la segunda mitad del siglo XIX [6]. La antropometría experimentó un renacimiento hace tres décadas cuando los médicos comenzaron a usar las medidas en la superficie de pacientes con deformidades craneofaciales congénitas o adquiridas y gradualmente ganó reconocimiento como un método objetivo para determinar cambios en la morfología de los tejidos blandos de la cara, permitiendo el establecimiento de los rasgos característicos del ser humano de acuerdo a su raza, sexo y a las diferentes anomalías faciales dentro de una población determinada[6].

La antropometría directa ha sido utilizada por mucho tiempo como el método clásico para determinar las medidas corporales; sin embargo, la forma manual en que se realizan las medidas introduce errores debido al proceso de medida y a que no existe un punto de referencia que se pueda considerar estable cuando se entra en contacto con tejidos blandos. Para subsanar estos problemas, a partir de los 80's se introdujo un método indirecto, denominado fotogrametría, en el que las medidas se realizan utilizando fotografías [7]. Sin embargo, estos trabajos tradicionalmente se han basado en medidas bidimensionales, que introducen errores debido a la forma tridimensional del rostro [8], en especial por sus curvaturas y relieve. En la actualidad, las investigaciones apuntan al desarrollo de sistemas antropométricos utilizando técnicas de reconstrucción 3D [9], ya que están en capacidad de medir de una manera más precisa la superficie del rostro, considerando su topografía, lo que permitiría obtener conclusiones más acertadas en los campos donde se utiliza, como son el análisis forense [10], estudios antropológicos [11], cirugía reconstructiva y estética [12], entre otros.

1.1.1. Puntos característicos faciales

La medición del rostro está determinada por planos y puntos característicos, estos últimos clasificados de acuerdo a su naturaleza de blandos o duros. A continuación se describen los puntos característicos del rostro humano.

1.1.1.1. Vista frontal del rostro

Visto de frente, el rostro humano posee puntos característicos distribuidos a lo largo de las seis regiones del complejo facial, las cuales permiten establecer las diferentes medidas para el estudio antropométrico. Estos puntos son nombrados en la tabla 1.1, mientras que en la figura 1.1a se presenta su ubicación en el rostro.

Tabla 1.1. Nomenclatura de los puntos frontales característicos del rostro humano

Punto	Abreviatura	Punto	Abreviatura
Eurión	eu	Alar	al
Cigión	zy	Queilión	ch
Nasión	n	Estomión	sto
Gnación	gn	Endocanto	en
Subnasal	sn	Exocanto	ex

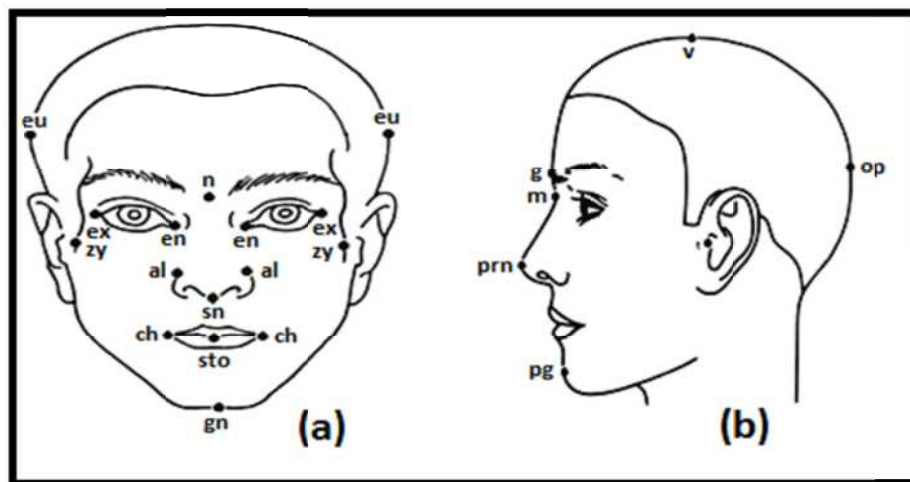


Figura 1.1. Puntos característicos faciales del rostro humano. a. Vista frontal. b. Vista lateral [2].

1.1.1.2. Vista lateral del rostro

La vista lateral del rostro se caracteriza por los puntos presentados en la tabla 1.2, mientras que en la figura 1.1b se describe su ubicación en la vista lateral del rostro.

Tabla 1.2. Nomenclatura de los puntos laterales característicos del rostro humano

Punto	Abreviatura	Punto	Abreviatura
Glabela	g	Punta Nasal	prn
Opistocráneo	op	Sellión	m
Vértex	v	Pogonión	pg

Para el establecimiento de las medidas faciales se tienen las líneas de referencia verticales y las horizontales. Algunas de ellas se presentan en las tablas 1.3 y 1.4.

Tabla 1.3. Mediciones de la línea de referencia vertical [6]

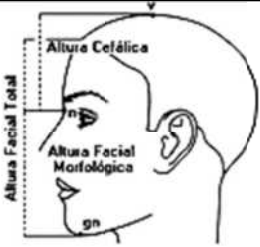



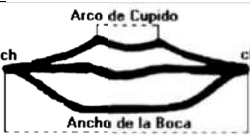
Medición	
<p>Altura Facial Total: Distancia existente entre la línea del pelo y el mentón.</p>	
<p>Altura de la Frente: Distancia existente entre la línea del pelo y la Glabella.</p>	

Tabla 1.4. Mediciones de la línea de referencia horizontal [6].

Medición	
<p>Distancia Interpupilar (DIP): Distancia entre los centros de ambas pupilas con los ojos mirando directamente hacia delante</p>	
<p>Anchura de la Abertura Palpebral: Distancia existente entre la comisura interna y externa de cada ojo.</p>	 <p>1 Anchura de la Abertura Palpebral 2 Anchura Biocular 3 Anchura Intercantal</p>
<p>Distancia entre Comisuras Externas- Distancia Biocular: Distancia existente entre las comisuras externas de ambos ojos</p>	
<p>Distancia entre comisuras Internas- Distancia Intercantal: Distancia existente entre las comisuras internas de ambos ojos</p>	
<p>Ancho de la Boca (En Reposo): Distancia entre uno y otro Queilión</p>	
<p>Arco de Cupido: Distancia entre las columnas del philtrum a nivel del labio superior.</p>	

1.2. GENERALIDADES DE RECONSTRUCCIÓN 3D

Para obtener la reconstrucción 3D de un objeto, es necesario adquirir los datos que representan la información espacial de su superficie. Un gran número de métodos para adquirir la información tridimensional de un cuerpo han sido desarrollados. Los más utilizados se encuentran en la categoría de no contacto y se dividen principalmente en dos ramas, pasivos y activos [13]. Los métodos pasivos no interactúan con el objeto mientras que los activos si interactúan con él [13]. En la figura 1.2 se presenta el árbol taxonómico de los métodos activos.

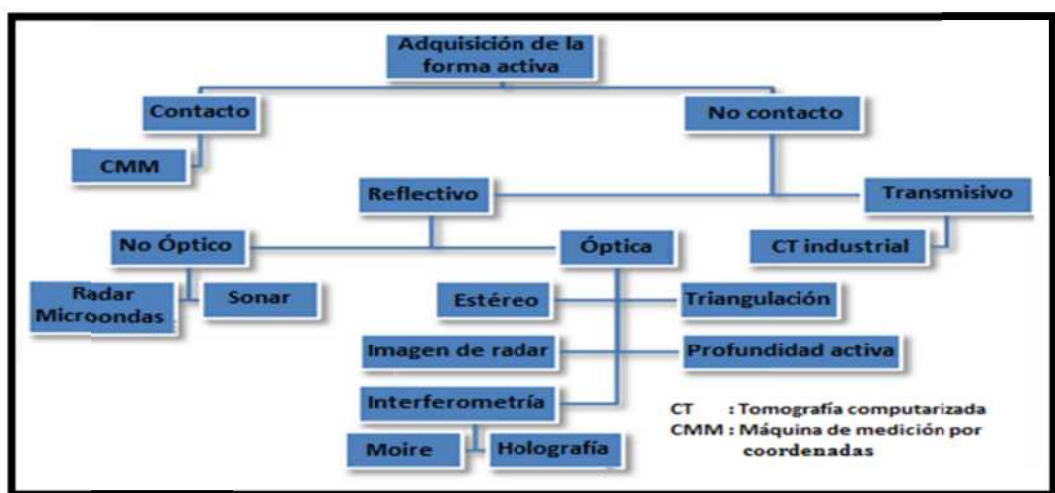


Figura 1.2. Taxonomía de métodos activos.

Actualmente el método que más fuerza ha adquirido debido a su sencillez, fácil adaptación y bajo costo es el método de triangulación láser [14], su implementación hardware no es muy complicada y genera buena resolución superficial. Otro método ampliamente usado es el de visión estéreo, el cual emula el funcionamiento del sistema visual humano. También se utiliza la proyección de franjas, técnica que imita el comportamiento de los patrones de interferencia.

1.2.1 Triangulación láser

El principio de triangulación láser se centra en el uso de una línea láser de escaneo [14]. La línea es proyectada sobre la superficie del objeto de estudio para observar su deformación por medio de un sistema formador de imágenes. Se determina la topografía de la superficie del objeto bajo estudio a partir del corrimiento que tiene la línea proyectada respecto a una línea base tomada como referencia [15].

Una configuración básica de reconstrucción 3D por triangulación láser por rotación se muestra en la figura 1.3.

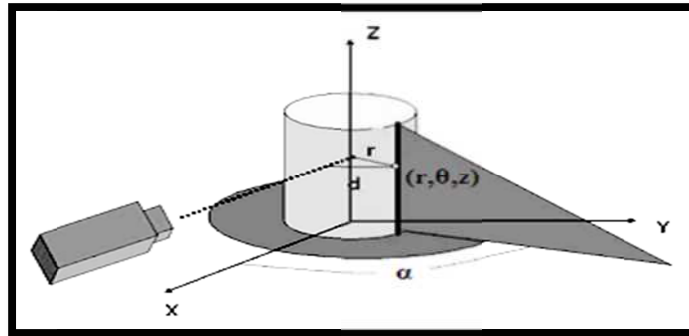


Figura 1.3. Geometría óptica para triangulación láser por rotación.

El eje óptico del sistema de observación y el plano láser proyectado forman un ángulo de inclinación α . El desplazamiento lateral d que sufre cada punto de la línea proyectada respecto a una línea de referencia depende de éste ángulo de inclinación, de la topografía del objeto y de su coordenada radial respecto al eje de rotación. Utilizando un sistema de coordenadas cilíndricas con el eje z coincidiendo con el eje de rotación, las coordenadas (r, θ, z) de un punto P sobre la topografía del objeto se determinan por [16]:

$$r = \frac{d}{\text{sen}(\theta)} \quad (1.1)$$

$$\theta = nk \quad (1.2)$$

Donde n es el número de la rotación correspondiente y k es el ángulo mínimo de rotación de la base.

1.2.2. Visión estéreo

Un sistema de adquisición de imágenes con una cámara fija relaciona una escena del espacio tridimensional con los datos captados en una serie o secuencia de imágenes bidimensionales. Sin embargo, una imagen bidimensional no da información suficiente en cuanto a la profundidad de los objetos de la escena, ya que esa información se pierde al proyectarse todos los puntos de una línea que pase por el centro óptico de la cámara sobre un mismo píxel [17].

Si en vez de disponer de una única secuencia, se tienen las imágenes de un mismo objeto tomadas desde distintos puntos de vista, es posible utilizar esta información para reconstruir, total o parcialmente, la escena que se ha grabado [17]. A esto se le conoce como reconstrucción estéreo.

La estereovisión surge, no sólo como un paso natural en la evolución de la visión computacional, al imitar el sistema visual humano, sino como una forma de poder obtener información adicional de la escena, que con una única imagen es imposible de conseguir. Para poder obtener la información tridimensional es indispensable conocer las coordenadas espaciales de los sistemas formadores de imágenes y establecer una correspondencia entre los puntos de las imágenes capturadas utilizando geometría epipolar [18].

1.2.3. Proyección de franjas

En esta técnica se proyecta un patrón de franjas senoidales sobre el objeto que se desea reconstruir y con la ayuda de un sistema de captura de imágenes se registra el patrón de franjas deformado por la presencia de la muestra. En la figura 1.4 se presenta una configuración típica utilizada en este tipo de sistemas, donde **P** representa la posición del proyector y **E** es la posición del sistema de captura. Si la distancia entre el sensor y el plano de referencia es grande, comparada con el espaciamiento entre las franjas y bajo observación normal, la relación entre la altura h de un punto (x,y) sobre el objeto y su fase viene dada por [19]:

$$h(x, y) = \frac{L\varphi_{CD}}{2\pi df} \quad (1.3)$$

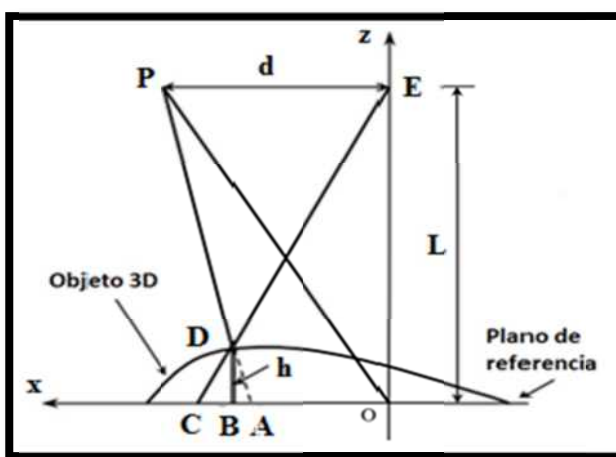


Figura 1.4. Geometría de la proyección de franjas [12].

Siendo L la distancia entre el sensor y el plano de referencia, d la separación entre el proyector y la cámara, f es la frecuencia espacial del patrón de franjas y φ_{CD} es el cambio de fase que sufre el patrón proyectado y que contiene la información de la altura del objeto. Para determinar la fase se utiliza generalmente el método de desplazamiento de fase [20].

2. VISIÓN ESTÉREO UTILIZANDO KINECT

2.1. DESCRIPCIÓN DEL KINECT

Gracias al avance tecnológico, en el año 2010 Microsoft, con la ayuda de PrimeSense, desarrolló un sensor para controlar e interactuar con la videoconsola Xbox 360. Este dispositivo entro al mercado bajo el nombre de Kinect.

El sensor Kinect se encuentra en la categoría de los métodos activos de no contacto mencionados en el capítulo1, con unas características especiales frente a los de más métodos y sistemas existentes, brindado así las siguientes ventajas: fácil manipulación, fácil conectividad al computador y bajo costo.

El sensor Kinect esta conformado por dos cámaras una de infrarrojo cercano y otra de luz visible (RGB), además cuenta con un emisor láser de infrarrojo cercano que proyecta luz estructurada y que sirve para que la cámara de infrarrojo calcule una imagen de profundidad de la escena [21]. En la figura 2.1 se presenta una imagen de este dispositivo, donde se puede observar la disposición de los elementos que lo conforman.

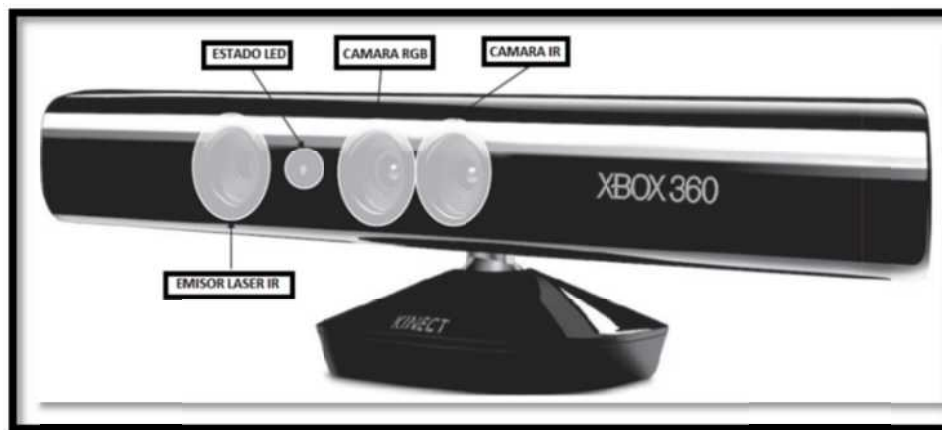


Figura 2.1 Elementos del sensor Kinect.

La información del sensor es transmitida por comunicación USB 2.0 y dependiendo de los controladores se puede acceder a las imágenes de profundidad, IR y RGB. Existen tres herramientas que permiten conectar el sensor al computador: la primera es OpenKinect de código abierto [22], la segunda es OpenNI de la PimeSense [23] y la tercera es Kinect Windows SDK [24]. Con la ayuda de cualquiera de ellas es posible acceder a la imagen de profundidad, con la cual se obtiene la nube de puntos que es la base de este trabajo.

Este sensor tiene las siguientes características [25]:

- Resolución de la imagen de profundidad: 640X480 píxeles.
- Resolución de la imagen de color (RGB): 640X480 píxeles.
- Velocidad de captura: 60 fps.
- Rango de operación: 0.8m a 3.5m.
- Resolución espacial x/y: 0.003m a 2m de distancia.
- Resolución de profundidad: 0.01m a 2m de distancia.

2.2. MODELO Y CALIBRACIÓN DE UNA CÁMARA

La visión estereoscópica consiste en la utilización de dos cámaras (par estéreo) para extraer información tridimensional del entorno. Es decir, tiene por objetivo realizar una reconstrucción de la estructura tridimensional del espacio a partir de la adquisición simultánea de dos imágenes [26].

El sistema de visión humano puede modelarse mediante un par de cámaras que representan cada uno de los ojos. Cada cámara está definida por un conjunto de parámetros que identifican su posición en el espacio tridimensional y sus posibles distorsiones. Estos parámetros se calculan por medio de la calibración de las cámaras [27].

2.2.1. Modelado de una cámara

El modelo básico de una cámara se conoce como modelo pin-hole, y está basado en el principio óptico de la cámara oscura, tal como se muestra en la figura 2.2.

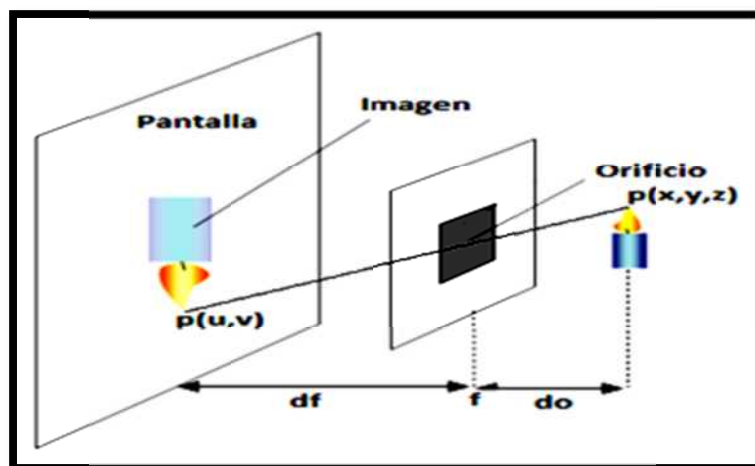


Figura 2.2. Modelo pin-hole.

Mediante este modelo, la cámara traslada la información de un punto de la escena $p(x,y,z)$ a un punto sobre el plano imagen $p(u, v)$ a través de una transformación lineal, donde están

involucradas la distancia focal f de la cámara y la distancia z a la que se encuentra el objeto[27]. Matemáticamente el modelo pin-hole se expresa como:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{f}{z} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

El modelo para una cámara, siguiendo el planteamiento de modelo pin-hole, se muestra en la figura 2.3 [27].

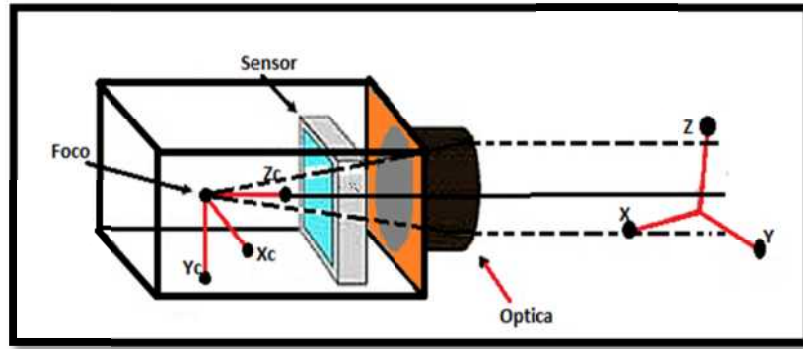


Figura 2.3 Modelo pin-hole de una cámara.

El sistema formador de imágenes completo implica la adición de rotaciones y translaciones debido a la presencia de elementos ópticos y se expresa según la relación siguiente [26]:

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Dónde (X_w, Y_w, Z_w) Son las coordenadas de un punto de la escena, (u, v) son las coordenadas del píxel correspondiente a la proyección del punto anterior, (u_0, v_0, f, dx, dy) son los parámetros intrínsecos de calibración, que son propios del sistema de adquisición, mientras que (r_{ij}, t_k) representan los parámetros extrínsecos de calibración en las direcciones respectivas. Una descripción detallada de estos parámetros se puede encontrar en [26] y [27].

La ecuación (2.2) se puede reescribir como:

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = M_{int} M_{ext} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = M_{3x4} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Dónde M_{int} y M_{ext} son los parámetros intrínsecos y extrínsecos, respectivamente.

2.2.2. Calibración estereoscópica.

En este proceso se calcula la relación entre un punto (X_w, Y_w, Z_w) con coordenadas en el sistema de referencia de la cámara derecha (X', Y', Z') y el mismo punto expresado en el sistema de referencia de la cámara izquierda (X, Y, Z) . Es decir, se calcula la matriz de transformación entre los sistemas de coordenadas de la cámara izquierda y de la cámara derecha [26].

Los pasos a seguir son [26]:

- Calibrar cada cámara a partir de un sistema de referencia único. Esto suministra información de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras \mathbf{M} y \mathbf{M}' .
- Separar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada cámara.

Con lo anterior se puede obtener la matriz de transformación que relaciona la cámara izquierda con la derecha, lo cual se muestra en la ecuación (2.4):

$$\mathbf{M}_{ext}^s = \mathbf{M}_{ext}^{-1} \mathbf{M}'_{ext} \quad (2.4)$$

2.3. FILTRO BILATERAL

El filtro bilateral es un filtro no lineal que suaviza la imagen pero mantiene fuertemente los bordes. Ha sido usado en varios contextos como eliminación de ruido, edición de textura, re-iluminación, administración de tono, *demosaiicing*, estilización y estimación del flujo óptico [28].

El filtro bilateral es también definido como el promedio del peso de los vecinos cercanos de un píxel de manera similar a la convolución gaussiana. La diferencia es que el filtro bilateral toma en cuenta la diferencia en valor con los vecinos para preservar los bordes mientras se suaviza. La idea clave del filtro bilateral es que para un píxel que influye a otro píxel, debería no solo depender de la ubicación más cercana sino también de un valor de similaridad [28].

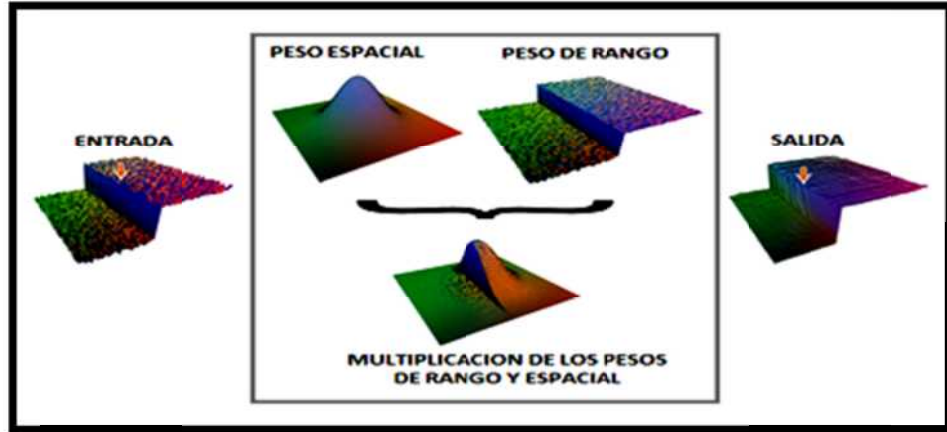


Figura 2.4 Filtro bilateral, suavizado de una imagen conservando sus bordes [28].

El filtro bilateral, denotado $\mathbf{BF}[I]$, es definido por[28]:

$$\mathbf{BF}[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q \quad (2.5)$$

Donde el factor de normalización W_p asegura que la suma de los pesos de los píxeles sea:

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) \quad (2.6)$$

Los parámetros σ_s y σ_r especifican la cantidad de filtrado de la imagen I . La ecuación (2.6) es el promedio de los pesos normalizados, donde G_{σ_s} es el peso espacial gaussiano que disminuye la influencia de la distancia de los píxeles, G_{σ_r} es un rango gaussiano que disminuye la influencia del píxel q , donde su valor de intensidad difiere de I_p [28]. En la figura 2.4 se ilustra como los pesos son calculados para píxeles cerca al borde de una imagen de entrada y como resultado un suavizado de la imagen conservando sus bordes.

2.4. ALINEAMIENTO O REGISTRO DE NUBES DE PUNTOS

El proceso de alineamiento o registro de nube de puntos se basa en dos pasos básicos: La estimación de la transformación de alineamiento y un proceso iterativo para el refinamiento de esta estimación [29].

Una definición mas rigurosa del alineamiento de dos vistas de una superficie es cuando cualquier par de puntos (p_i, q_i) desde las dos vistas, que representen el mismo punto de la superficie, puedan ser llevados a coincidir mediante una transformación rígida[30].El

método más conocido para el proceso de alineamiento es el denominado como ICP, Iteración de Puntos Cercanos [31].

2.4.1. Iteración de puntos cercanos (ICP).

Un reciente método de refinamiento en el alineamiento de datos es el algoritmo de iteración de puntos cercanos (ICP), introducido por primera vez por Besl y McKay [31]. ICP es un procedimiento iterativo de mínimos cuadrados entre puntos de una vista y los respectivos puntos más cercanos de la otra vista [32]. Dadas dos nubes de puntos en distintas vistas \mathbf{P} y \mathbf{Q} , entonces:

$$\forall p_i \in \mathbf{P}, \exists q_j \in \mathbf{Q}. \ni \|T p_i - q_j\| = 0 \quad (2.7)$$

En (2.7), para cualquier punto de la nube \mathbf{P} , hay un punto en la nube \mathbf{Q} que representan el mismo punto tanto en \mathbf{P} y \mathbf{Q} . $T p_i$ es el resultado de aplicar la transformación rígida sobre los puntos de \mathbf{P} [33].

Tomando $\mathbf{Pc} = \{p_i\}$ como un conjunto de puntos que van a ser alineados con un conjunto de puntos modelo $\mathbf{Qc} = \{q_i\}$, donde $N_x = N_p$ son el número de puntos correspondientes que hay entre \mathbf{P} y \mathbf{Q} . La ecuación (2.7) se puede describir así [34]:

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|q_i - \mathbf{R} p_i - \mathbf{t}\|^2 \quad (2.8)$$

Donde \mathbf{R} es la matriz de rotación y \mathbf{t} el vector de traslación de la transformación rígida \mathbf{T} .

2.4.1.1. Taxonomía del ICP.

El algoritmo del ICP se basa en varios pasos importantes para su implementación:

1. **Selección** del conjunto de puntos en una o ambas mallas.
2. **Coincidencia** de estos puntos en la otra malla o nube.
3. **Pesando** las parejas correspondientes.
4. **Rechazo** de ciertos pares que no correspondan.
5. **Transformación Rígida** según los puntos correspondientes.

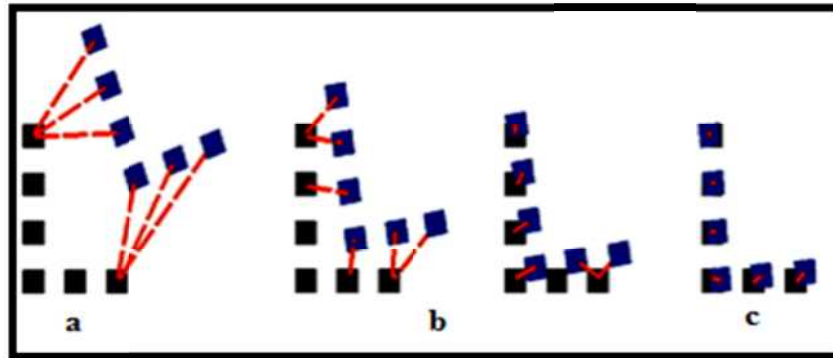


Figura 2.5 Representación del algoritmo ICP.

Una descripción mas detalla de la taxonomía del ICP se encuentra en [35]. El concepto del ICP se ilustra en la figura 2.5, donde en 2.5a se representan dos nubes de puntos, y una de ellas se desea alinear con otra, aplicando los 5 pasos del algoritmo de ICP se realiza la aproximación de la transformación rígida. Una vez aplicada la transformación se llega a 2.5b, y al aplicar el ICP iterativamente se puede llegar a 2.5c, con una buena aproximación del alineamiento.

2.5. INTEGRACIÓN VOLUMÉTRICA

La integración volumétrica consiste en encontrar o estimar la mejor superficie que representa un objeto a partir de un conjunto de nubes de puntos que se encuentran en un mismo sistema de referencia. A continuación se describen algunos aspectos que se deben tener en cuenta para que este proceso sea exitoso.

2.5.1. Función de distancia signo (SDF).

Una idea clave en la búsqueda de una superficie es estimar de manera fiable la función de distancia signo de la superficie, es decir, la distancia entre un punto determinado a un punto en la superficie, indicando con signo negativo o positivo si el punto está dentro o fuera de la superficie cerrada [36]. La SDF consiste de valores de distancias más cortas desde un voxel (mínima parte en que se divide el espacio) a un sólido en el espacio. Estas distancias pueden ser tanto positivas como negativas. Si el signo es negativo, el voxel está localizado dentro del sólido, si este es positivo, el voxel está afuera [37].

Desde un punto de vista formal, una malla de triángulos \mathbf{M} es un conjunto infinito de puntos que describen la superficie de la malla. La distancia signo es una medida tanto de la función distancia $dist_M$ y la función signo $sign_M$. La combinación de ambas es llamada la función de distancia signo [37].

$$SDF_M(p) = sign_M(p) \cdot dist_M(p) \quad (2.9)$$

La función de distancia signo (SDF) se define en la ecuación (2.9) para un punto p cercano a la malla. Hay varias formas de calcular la función distancia signo, entre ellas está la presentada por Curlees y Levoy [38], [39], conocido como el método VRIP (Procesamiento volumétrico de imágenes de profundidad) [38] o integración volumétrica [37].

2.5.2. Procesamiento volumétrico de imágenes de profundidad (VRIP)

Esta técnica se usa para calcular la SDF, se basa en representar la función de distancia signo $D(x)$ por muestreos. La función es el peso de la distancia signo de cada punto x cercano a la superficie a lo largo de la línea de visión del sensor [39]. La construcción de esta función se basa en el cálculo de la función de distancia signo y la función de pesos de cada imagen de profundidad. Esto genera un acumulativo de funciones de distancia signo $D(x)$ y un acumulativo de funciones de peso $W(x)$, de estos acumulativos es posible extraer una iso-superficie que representa la superficie del objeto, donde $D(x)=0$ [39]. La figura 2.6 ilustra este procedimiento:

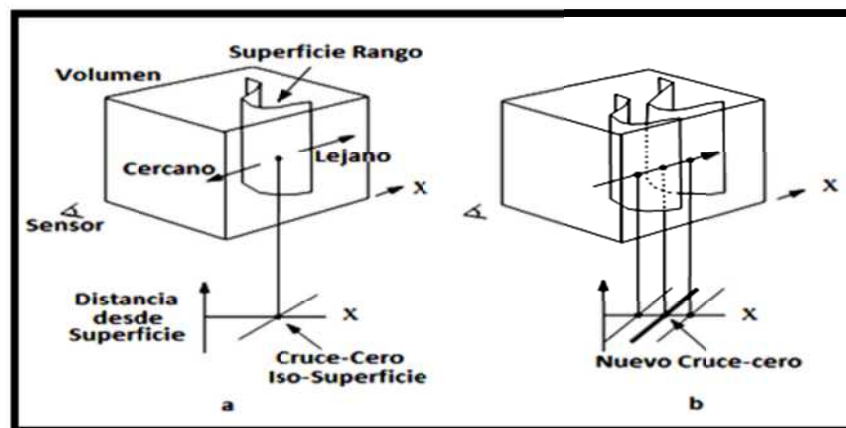


Figura 2.6 Función de distancia signo sin pesos en 3D. **(a)** Reconstrucción de superficie de una sola imagen de profundidad. **(b)** Reconstrucción de superficie de dos imágenes de profundidad [39].

2.5.2.1. Integración en tres dimensiones

El pseudocódigo presentado en [38] se muestra en la figura 2.7. Estos pasos descritos están bien detallados en [39] y además en [36] se tiene una idea más clara de cómo se desarrolla el cálculo de la SDF usando la integración volumétrica. El concepto teselado se explica en la sección [3.6.2].

1. Para cada voxel se configura los pesos en cero.
2. Para cada imagen de profundidad:
 - 2.1 Teselado de la imagen de profundidad.
 - 2.2 Calcular los pesos de los vértices.
 - 2.3 Para cada voxel cercano a la superficie.
 - 2.3.1 Encontrar el punto sobre la superficie.
 - 2.3.2 Calcular la distancia signo al punto.
 - 2.3.3 Interpolar peso desde los vértices vecinos.
 - 2.3.4 Actualiza la distancia signo y el peso del voxel.
3. Extrae la superficie en el cruce por cero (iso-superficies)

Figura 2.7 Seudocódigo integración volumétrica.

2.5.3. Cubos marchantes (*Marching Cubes*)

El algoritmo de cubos marchantes se caracteriza por dividir el espacio en pequeños cubos (voxeles). El algoritmo recorre todo el espacio testeando las ocho esquinas de cada voxel y remplazándolo por un conjunto apropiado de polígonos. La suma total de todos los polígonos generados conformaran la superficie aproximada de los datos de entrada [40].

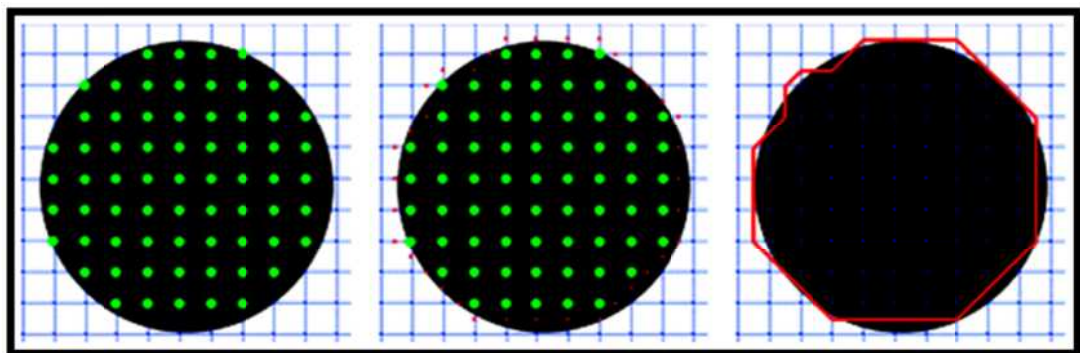


Figura 2.8. Funcionamiento del algoritmo cubos marchantes en 2D [40].

El funcionamiento del algoritmo en dos dimensiones se presenta en la figura 2.8. Se muestra una grilla de cuadrados equivalentes a los voxeles en el espacio tridimensional. Un círculo sólido ha sido dibujado, el cual es la forma que se va a aproximar usando líneas.

El primer paso es calcular las esquinas que están dentro de la forma (representados por puntos verdes). Se puede ahora insertar varios vértices conociendo cuales puntos están adentro y cuales están afuera del círculo, se puede estimar que vértice puede ser posicionado aproximadamente entre una esquina interna y cualquier esquina externa que están conectado por los bordes de una celda. En la imagen central de la figura 2.8 se muestran los

vértices mencionados como pequeños puntos rojos y a la derecha muestra la superficie formada por la unión de los vértices con líneas [40].

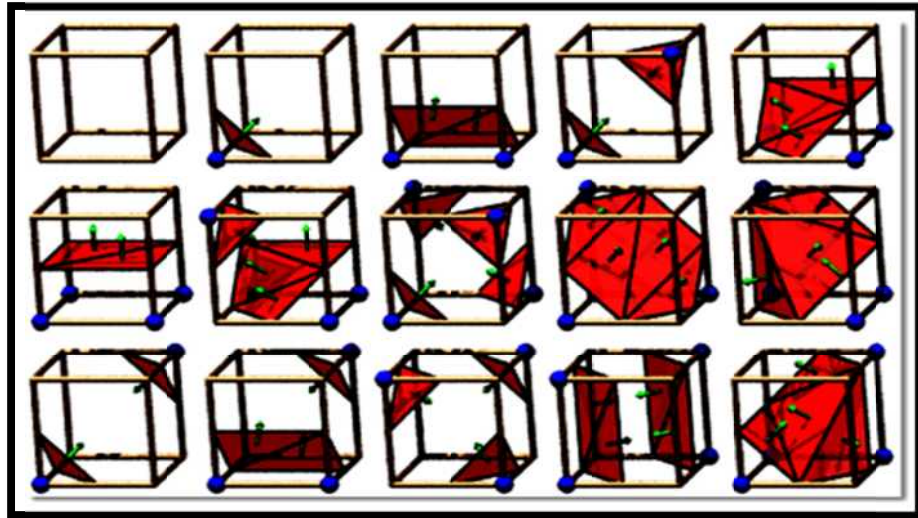


Figura 2.9. Combinaciones de cubos [19].

Ya se explicó el proceso aplicado en dos dimensiones. En un espacio tridimensional un voxel tiene ocho vértices y por lo tanto un potencial de 256 posibles combinaciones del estado de los vértices. Sin embargo, para simplificar el algoritmo se puede reducir la complejidad teniendo en cuenta las combinaciones de la celda que se duplican bajo las siguientes condiciones:

- Rotación por cualquier grado sobre cualquier de los 3 ejes primarios.
- Reflejando la forma a través de cualquier de los 3 ejes primarios.
- Invertiendo el estado de todas las esquinas y volteando las normales de los polígonos relacionados.

Teniendo en cuenta lo anterior, las 256 posibles combinaciones de estado de vértices se resumen en 15 combinaciones. En la figura 2.9 se ilustran las 15 combinaciones resumidas [40]. Las esferas azules denotan las esquinas que han sido testeadas como dentro de la forma y las flechas verdes denotan las normales de la superficie de los triángulos relevantes. Con estas 15 combinaciones y teniendo en cuenta las esquinas de los voxels que representan el objeto, se obtiene el sólido que representa el objeto.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN

El sistema de reconstrucción es el encargado de la adquisición de las imágenes, la asignación de color a la nube de puntos, el filtrado de la información, el alineamiento e integración de datos, la reconstrucción y la extracción de los parámetros morfológicos del rostro. Para realizar la captura de la información se utilizó el sensor Kinect y para el procesamiento de los datos se desarrolló una serie de herramientas con la ayuda de la biblioteca OpenCV. A continuación se hace una breve descripción acerca de los componentes y el funcionamiento del sistema.

3.1. CONEXIÓN AL PC Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.

La conexión del sensor Kinect al PC se hace mediante el framework entregado por PrimeSense, el creador del sensor, que tiene como nombre OpenNI. Mediante este framework se puede hacer la conexión del dispositivo con el PC y adquirir las imágenes de profundidad y de color.

En la figura 3.1 se muestran las imágenes obtenidas con el sensor Kinect, las cuales pueden ser tres, la imagen de color (RGB), la imagen de profundidad (la de interés) y la imagen infrarroja.



Figura 3.1. Información entrega por el Kinect. Imagen de Color (Derecha), Imagen de profundidad (Izquierda), Imagen infrarroja (Abajo).

3.2. ASIGNACIÓN DE COLOR A LA NUBE DE PUNTOS.

Debido al desplazamiento físico que existe entre la cámara de color y la cámara de infrarrojo, no se puede asociar directamente a la imagen de profundidad un color de la imagen de color. Para poder hacerlo, se debe realizar un procedimiento de calibración estéreo.

3.2.1. Calibración estereoscópica.

Para este procedimiento se utilizó la biblioteca OpenCV y su funcionalidad correspondiente a la calibración estéreo. Para aplicar este procedimiento se construyó un patrón tipo tablero de ajedrez que se utilizó como referencia. Las imágenes usadas en este paso fueron la imagen de color y la imagen infrarroja. Debido a que el proyector infrarrojo es activado cuando se adquiere la imagen infrarroja, fue necesario tapar el proyector para que no interfiera en la captura de esta imagen. En la figura 3.2, se presentan las imágenes de color e infrarrojo adquiridas usando el patrón.

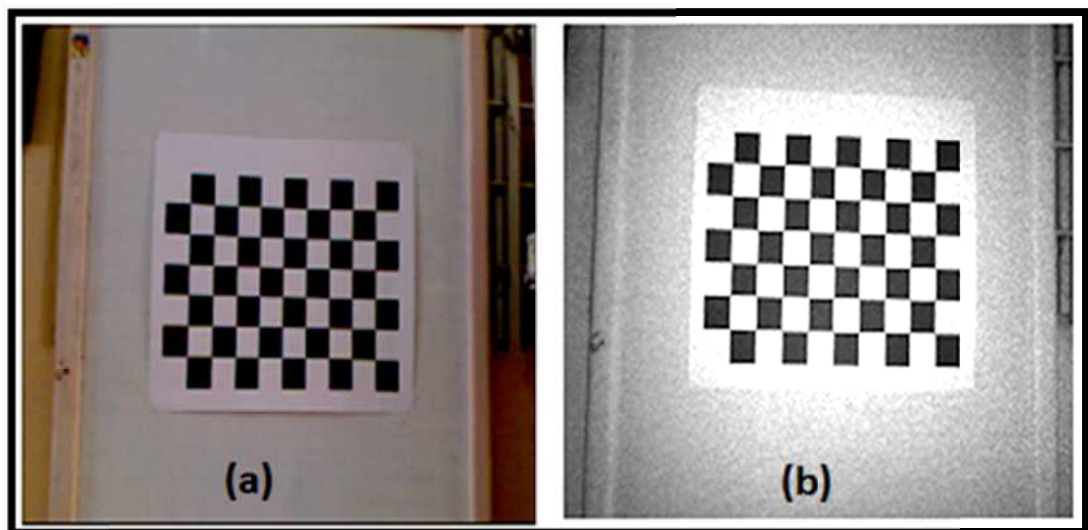


Figura 3.2. Imagen del patrón de ajedrez (a) Color. (b) Infrarroja.

En la figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo que describe la calibración estéreo del sistema. En este proceso la detección de esquinas y la estimación de los coeficientes de distorsión se realizan con la ayuda de OpenCV. El algoritmo de detección de esquinas de Harris [41] es el que utiliza la biblioteca OpenCV.

El objetivo de la calibración es encontrar los parámetros intrínsecos (M_{int}) y los parámetros extrínsecos (M_{ext}) descritos en la sección 2.2.1, que son necesarios para la asignación de color a la nube de puntos.

1. Adquisición de imágenes de color y infrarrojo
2. Detección de esquinas en ambas imágenes
 - 2.1 Se almacenan las esquinas detectadas y se repite el proceso N veces.
3. Estimación de la calibración con las esquinas detectadas en cada frame.

Figura 3.3. Seudocódigo general del proceso de calibración.

Para el proceso de calibración se capturaron 50 imágenes de color e infrarrojo para el cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras del sensor. En la tabla 3.1 se presentan los coeficientes obtenidos.

Tabla 3.1. Parámetros de calibración obtenidos.

PARÁMETROS INTRÍNSECOS		
Parámetro	Cámara RGB	Cámara IR
F_x	507.995087	569.157776
F_y	507.710968	568.796936
C_x	324.513367	330.292084
C_y	254.656281	251.553925
COEFICIENTES DE DISTORSIÓN		
K1	0.254516523	-0.253864497
K2	-0.832507496	0.989673216
K3	0.913924658	-1.30534280
P1	-0.00198123021	-0.000752778621
P2	0.00142819859	0.00514519410
PARÁMETROS EXTRÍNSECOS (cm)		
R_{1,1}	0.999935210	
R_{1,2}	-0.0113074575	
R_{1,3}	-0.00132269843	
R_{2,1}	0.0113053890	
R_{2,2}	0.999934852	
R_{2,3}	-0.00156153436	
R_{3,1}	0.00134026923	
R_{3,2}	0.00154647953	
R_{3,3}	0.999997914	
T_{1,1}	2.058652	
T_{1,2}	-0.130240306	
T_{1,3}	0.776565611	

3.2.2. Obtención de la nube puntos.

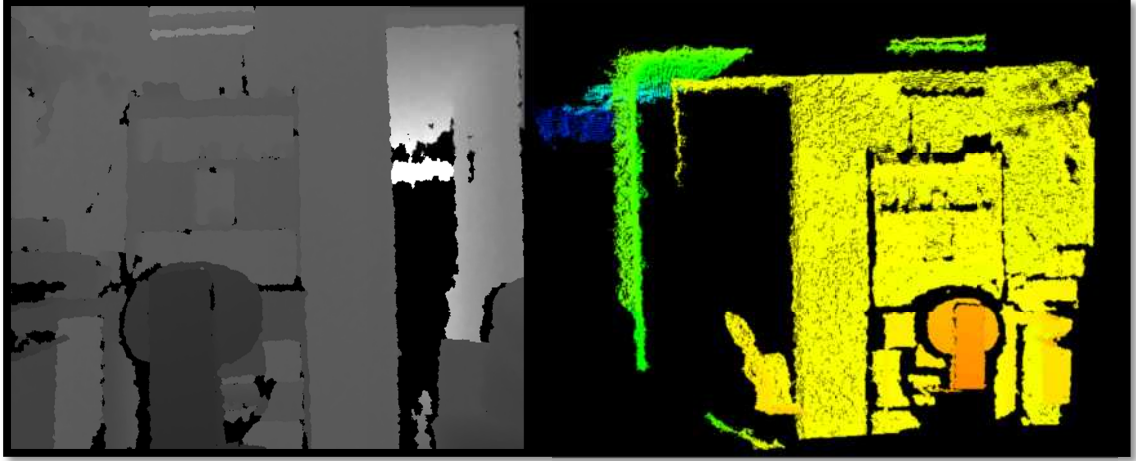


Figura 3.4. Nube de puntos. Imagen de profundidad (Izquierda). Nube de puntos en falso color (Derecha).

Una vez se han obtenido los parámetros intrínsecos de la cámara infrarroja y según el modelo de cámara pin-hole, se tiene que:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Debido a que en la imagen de profundidad obtenida cada posición en píxeles tiene asociado un valor de profundidad con respecto al sensor, (3.1) se transforma en:

$$D(u, v) \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Donde $D(u, v)$ es el valor de profundidad en la posición de la imagen (u, v) . Para obtener el punto asociado a esa profundidad en la posición (u, v) se calcula la matriz inversa de los parámetros intrínsecos de la cámara infrarroja, por lo que la ecuación (3.2) se convierte en:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = D(u, v) \begin{bmatrix} 1/f_x & 0 & -u_0/f_x \\ 0 & 1/f_y & v_0/f_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Que representa un punto en el mundo real proyectado en el sistema de referencia del sensor. Para la obtención de la nube de puntos en el sistema de referencia del sensor, se toma la imagen de profundidad y se aplica la ecuación (3.3). El resultado obtenido se presenta en la figura 3.4.

3.2.3. Asignación de color a la nube de puntos

Para asignarle color a la nube de puntos es necesario encontrar el color correspondiente a cada punto de la nube, para esto se debe proyectar cada pixel de la imagen de profundidad al sistema de referencia de la cámara y luego aplicar los parámetros extrínsecos obtenidos, lo que relaciona ambas cámaras, la de color y la infrarroja. Con lo anterior se tiene:

$$\begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_{ci} \\ Y_{ci} \\ Z_{ci} \end{bmatrix} + t \quad (3.4)$$

Donde $[X_{cr} Y_{cr} Z_{cr}]$ son los puntos en el sistema de referencia de la cámara de color, que son obtenidos por la aplicación de una rotación R y una traslación t a los puntos $[X_{ci} Y_{ci} Z_{ci}]$, que están en el sistema referencia de la cámara infrarroja. Los coeficientes de rotación y traslación son obtenidos en el proceso de calibración y son los parámetros extrínsecos de la calibración estéreo, de ahí la importancia de la calibración estéreo entre las cámaras a color e infrarroja.



Figura 3.5. Asignación de color a la nube de puntos.

Los puntos ubicados en el sistema referencia de la cámara a color se deben re proyectar al plano imagen de la misma, para ello se hace uso de la ecuación (3.3); pero en este caso los parámetros intrínsecos a utilizar son los de la cámara a color, así:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{D(u,v)} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Aplicando (3.5), se obtiene la posición del pixel en la imagen a color asociado a un punto de la nube. En la figura 3.5, se muestra la nube de puntos adquirida con el sensor y también la nube de puntos con el color asociado.

3.3. FILTRADO DE LA INFORMACIÓN.

El procesamiento de información tridimensional es computacionalmente costoso. Debido a esto, se decidió trabajar con regiones de interés, lo que reduce aproximadamente en dos tercios el tamaño original de las imágenes y se logra realizando un filtrado espacial por profundidad.

Con relación a los puntos de la nube, estos son adquiridos con mucho ruido y se manifiestan en una superficie con muchos altibajos. Para corregir esta situación se utiliza el filtro bilateral, que tiene unas propiedades significativas en el suavizado de la superficie y en la conservación de los bordes.

3.3.1. Filtrado por distancia o espacial.

Los datos de la imagen de profundidad adquirida se encuentran en unidades de milímetros (OpenNI), es decir, que se pueden eliminar de la imagen de profundidad aquellos valores que estén fuera de un rango específico.

$$ROI(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \begin{cases} D(\mathbf{u}, \mathbf{v}) & \text{si } rango\ mínimo \geq D(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \leq rango\ máximo \\ 0 & \text{si } rango\ mínimo \leq D(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \geq rango\ máximo \end{cases} \quad (3.6)$$

Donde $D(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ es el valor de profundidad en posición (\mathbf{u}, \mathbf{v}) de la imagen de profundidad. El rango máximo es definido según las condiciones de la captura, es decir, si se toma mayor información de la imagen de profundidad o no.

3.3.2 Filtrado Bilateral.

El filtro bilateral ayuda a suavizar la imagen sin que afecte sus bordes; esto con el fin de mejorar la superficie obtenida de la nube de puntos. A continuación se describe la implementación del filtrado bilateral explicado en la sección [2.3]:

Inicialmente se debe elegir un valor de δ_S y δ_R con el cual se va a iniciar el cálculo y se elige un máximo:

$$SigmaMax = \max(\delta_S, \delta_S) \quad (3.7)$$

También se define un radio de búsqueda en el que el pixel central va a ser estimado:

$$Radio\ Kernel = 2 * SigmaMax \quad (3.8)$$

Como la búsqueda de vecinos se realiza usando un kernel cuadrado, se define el tamaño del kernel:

$$Tamaño\ Kernel = Radio\ Kernel * 2 + 1 \quad (3.9)$$

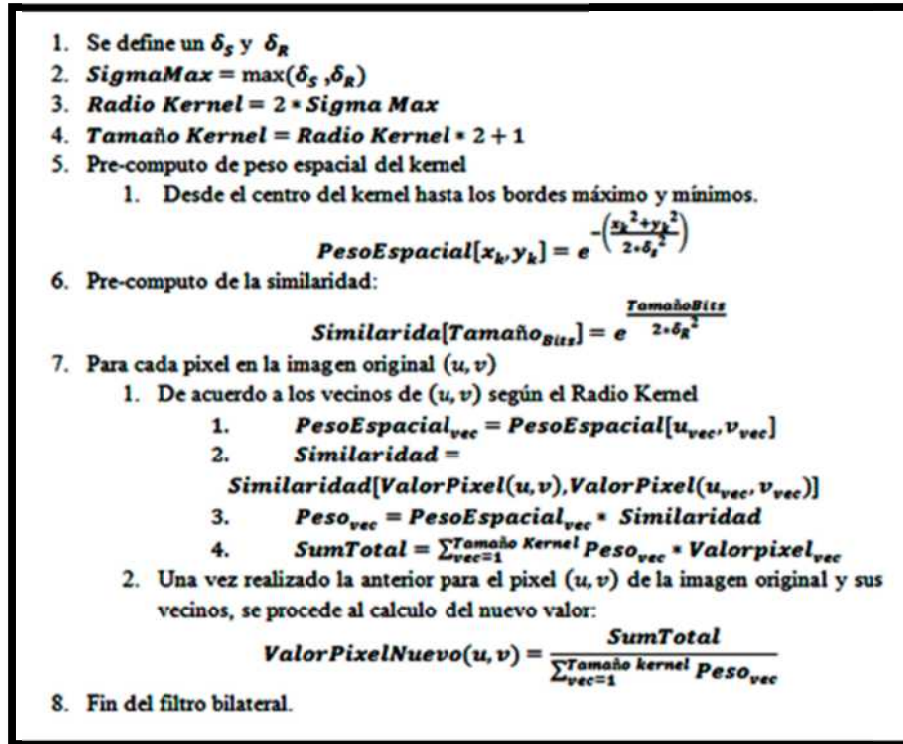


Figura 3.6. Seudocódigo del filtro bilateral.

Para rapidez del algoritmo, se hace un pre-cálculo de los pesos espaciales del kernel y un pre-cálculo de los valores de similaridad basado en el tamaño de bits de la imagen, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$PesoEspacial = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2 \cdot \delta_s^2}} \quad (3.10)$$

$$Similaridad = e^{-i/2 \cdot \delta_R^2} \quad (3.11)$$

Donde (x, y) son las posiciones del kernel usado para el cálculo, e i posee un valor comprendido en el intervalo [0-Tamaño en bits].

Luego, para cada pixel de la imagen a la cual se va aplicar el filtro bilateral, se hace el barrido en cada pixel de los vecinos y se extrae el peso espacial y la similaridad de los pesos pre-calculados anteriormente, según la posición del vecino con respecto al pixel central del kernel, para luego aplicar lo siguiente:

$$Peso_{vec} = PesoEspacial * Similaridad \quad (3.12)$$

Este peso es multiplicado por el valor que tiene el pixel, para luego hacer una sumatoria de todos los vecinos del pixel central de acuerdo al tamaño del kernel, como se ilustra en la ecuación (3.13).

$$SumTotal = \sum_{vec=1}^{Tamaño\ Kernel} Peso_{vec} * Valor\ del\ pixel_{vec} \quad (3.13)$$

Después de haber extraído la suma de los pesos, el nuevo valor asignar al pixel es:

$$Valor\ Pixel\ Nuevo = \frac{SumTotal}{\sum_{vec=1}^{Tamaño\ kernel} Peso_{vec}} \quad (3.14)$$

Donde (3.14) representa el nuevo valor de pixel en cada posición de pixel de la imagen original, es decir, el filtrado bilateral se ha concluido con éxito. En la figura 3.6 se muestra el pseudocódigo del filtro bilateral para su implementación en imágenes de cualquier tamaño en pixeles y profundidad de bits.

3.4. MODO DE ESCANEO.

Para lograr la reconstrucción del rostro de una persona, el modo más básico de escaneo es desplazar el sensor en frente del rostro, como se muestra en la figura 3.7 y además se debe mantener el sensor a una distancia en un rango entre 40 y 60 centímetros para obtener la máxima resolución que ofrece el dispositivo de captura [42].

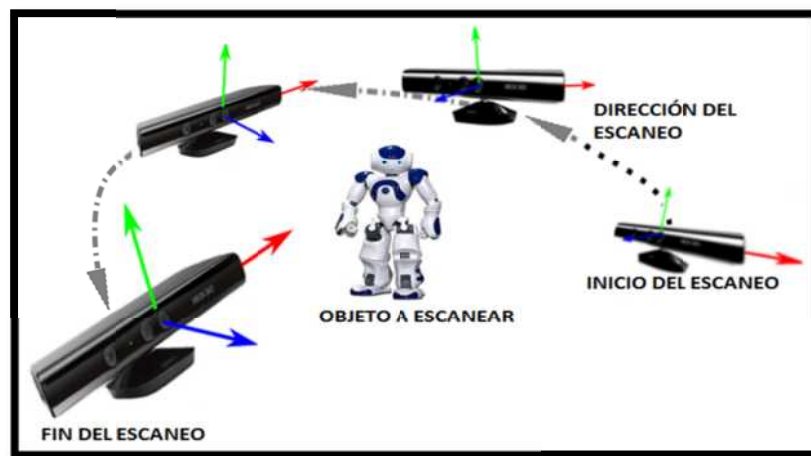


Figura 3.7. Modo de escaneo.

Al final del escaneo se obtienen n-muestras de imágenes de color y profundidad, con las cuales se realizará la reconstrucción de la superficie del rostro. En este proceso de escaneo la interfaz grafica de captura se implementó bajo un modelo de programación en paralelo para aumentar la tasa de muestreo y así disminuir el tiempo de escaneo. Al trabajar con este

modelo de programación se garantiza que la persona a escanear no se cansa y cambia su expresión durante el escaneo, además ayuda en el proceso de alineamiento, el cual se describe en la figura 3.7.

3.5. ALINEAMIENTO O REGISTRO DE DATOS.

El alineamiento de los datos se realiza usando un par de vistas consecutivas en diferente ángulo, es decir, que se obtiene la nube puntos en distintas vistas. Al encontrar la rotación y traslación entre las dos vistas se puede aplicar esta transformación sobre una vista y llevarla al sistema de referencia de la otra vista.

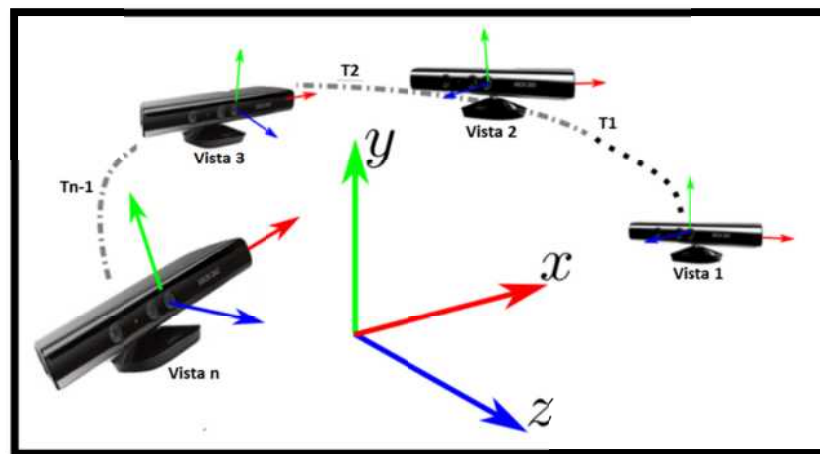


Figura 3.8. Concepto de transformación entre parejas de vistas.

Se ha optado por hallar la matriz de transformación T (Rotación, Traslación) de la vista anterior con respecto a la actual. En la figura 3.8 se muestra este concepto. Esto aplica para cada par de vista, es decir, si se tiene n -vistas de la superficie de un objeto, habrá que calcular $n-1$ transformaciones sucesivas entre parejas de vistas consecutivas.

Para el cálculo de la transformación entre dos vistas se hace uso del algoritmo de iteración de puntos cercanos (ICP).

3.5.1. Iteración de puntos cercanos (ICP)

De acuerdo a la sección 2.4 el ICP tiene cinco pasos fundamentales para calcular la matriz de transformación, que se describen a continuación.

3.5.1.1. Selección de puntos.

En la selección de puntos para la búsqueda de correspondencias se optó por usar todos los puntos de las dos nubes de puntos implicadas en el cálculo de la transformación.

3.5.1.2. Coincidencia de puntos.

Para esta etapa del ICP, se hace uso del criterio de hallar el punto más cercano de la nube fuente a la nube objetivo. Para la búsqueda del punto más cercano se usó la biblioteca FLANN (Biblioteca Rápida para Aproximación de Vecinos Cercanos) [43].

3.5.1.3. Peso de parejas correspondientes.

En [44] se definen algunos criterios de pesos, debido a que la búsqueda de puntos correspondientes se basa en distancia (vecino más cercano en otra nube). Pero además, para realizar una mejor estimación de los puntos correspondientes, también se optó por usar el peso de las normales de los puntos correspondientes.

3.5.1.4. Rechazo de parejas correspondientes.

Este paso está muy relacionado con la asignación de pesos, ya que se pueden estimar mejor los puntos correspondientes, si los pesos están por debajo o por encima de cierto umbral. Se ha optado por rechazar puntos cuya distancia sea mayor a un valor máximo predefinido y con relación a las normales a un valor menor establecido.

3.5.1.5. Estimación de la transformación rígida.

Para la estimación de la transformación rígida se utiliza SVD (Descomposición de Valores Singulares). Para este cálculo se hace uso de la biblioteca VTK, que tiene implementado un procedimiento para el cálculo de la transformación rígida, lo único que se debe hacer es mapear los puntos que son correspondientes entre las dos vistas fuente y objetivo. Para este caso, la vista fuente es la nube de puntos de la vista anterior y la vista objetivo es la nube de puntos de la vista actual.

En la figura 3.9 se muestra el pseudocódigo de la implementación del alineamiento. El algoritmo es un proceso iterativo que se repite j veces para realizar una mejor estimación de la transformación rígida entre dos vistas de la escena 3D en distinto ángulo. Esto es aplicado para todas las vistas adquiridas durante el proceso de escaneo. Las transformaciones son almacenadas para posteriormente ser utilizadas en el proceso de integración de la información.

1. Para n vistas obtenidas durante el escaneo.
2. Se toma la vista anterior, $n - 1(u, v)$, y la vista actual $n(u, v)$.
3. Se obtiene la nube puntos de $n - 1(u, v)$ y $n(u, v)$, nube fuente ($Nu_{fuen}\{p_i\}$) y objetivo ($Nu_{obj}\{p_i\}$) respectivamente.
4. Se hace la búsqueda de vecinos cercanos basado en puntos usando kd-tree de $Nu_{fuen}\{p_i\} \rightarrow Nu_{obj}\{p_i\}$.
5. Calculo de pesos de puntos coincidentes.
 - a. $Pesodistancia = 1 - \frac{Dist(p1_{fuen} p2_{obj})}{Dist_{max}}$
 - b. Calculo de normales entre puntos pares de puntos coincidentes $n1_{fuen}$ y $n2_{obj}$.
 - c. $Peso\ normales = n1_{fuen} \cdot n2_{obj}$
6. Rechazo de puntos correspondientes.
 - a. Si distancia entre $p1_{fuen}$ y $p2_{obj}$ es mayor a un valor máximo de peso por distancia predefinido y el producto $n1_{fuen} \cdot n2_{obj}$ es menor aun valor mínimo de peso de normal mínimo, los puntos son almacenados como correspondientes.
 - b. Si no cumple las condiciones de distancia y normales, el punto es rechazado.
7. Se pasa los puntos coincidentes filtrados al algoritmo de cálculo de la transformación rígida, T , usando SVD. (VTK)
8. La transformación es aplicada a $Nu_{fuen}\{p_i\}$.
9. Se vuelve al paso 4 las j veces que se requiera estimar la transformación
10. Se almacena la transformación calculada de $Nu_{fuen}\{p_i\} \rightarrow Nu_{obj}\{p_i\}$.

Figura 3.9. Seudocódigo de ICP

3.6. INTEGRACIÓN DE LOS DATOS

Para la integración de las nubes de puntos actual y anterior se define un volumen de dimensiones fijas donde ambas vistas serán integradas para obtener una sola superficie, con lo que se garantiza que la información que se encuentra solapada entre las vistas sea unificada.

3.6.1. Definición del volumen y voxelización

El volumen debe tener unas dimensiones definidas de acuerdo a la región de trabajo de escaneo, es decir, si las nubes de puntos están filtradas espacialmente de un rango de 0 a 1 metros, el volumen debe ser un cubo de esas mismas dimensiones para garantizar que los puntos de las dos nubes puedan ser contenidas en dicho volumen. Este espacio creado debe ser voxelizado tal como se muestra en la figura 3.10.

La voxelización va a depender directamente de cuanto se desea dividir el espacio del volumen. A una mayor voxelización, mayor será el detalle a obtener en la reconstrucción, siendo la base principal de la integración volumétrica.

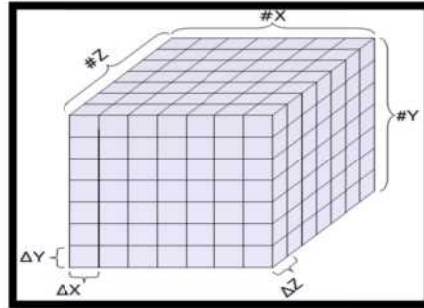


Figura 3.10. Volumen predefinido voxelizado.

El espacio voxelizado, que básicamente es la división del espacio, es realizado mediante Octree, que es una técnica eficiente para la división del espacio. Esta técnica se encuentra implementada en la biblioteca VTK.

3.6.2. Teselado de la imagen de rango

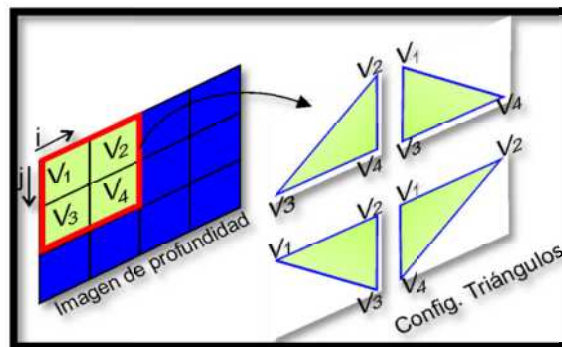


Figura 3.11. Teselado imagen de profundidad.

El teselado es la creación de una malla triangular a partir de una nube de puntos. Para lograrlo se debe tener en cuenta solamente la imagen de profundidad, ya que los puntos de la nube creados son generados a partir de ella y se encuentran en el mismo orden en que se recorre la imagen.

Para obtener el teselado a partir de la imagen de profundidad se toman cuatro puntos de la imagen que estén adjuntos en filas y columnas, luego se encuentran los tres lados más cortos entre los puntos y se usa esto para identificar los tres puntos que pueden formar el triángulo. Además, si un lado tiene un valor mayor a un umbral de distancia, los puntos que forman este lado no conformarán el triángulo, este proceso se muestra a continuación.

Este proceso es aplicado sobre la nube de puntos actual y anterior, luego estas mallas son ubicadas en el espacio voxelizado, una por una, para su posterior procesamiento.

3.6.3. Cálculo de pesos de la malla.

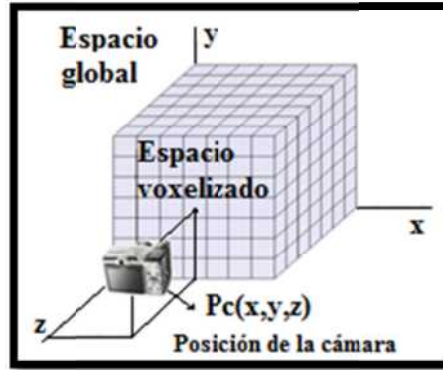


Figura 3.12. Localización del sistema de visión en el espacio global.

Para cada malla se procede a calcular las normales en cada vértice. La normal de un vértice se puede calcular con dos vértices vecinos o más vértices para una mejor estimación de esta.

El volumen voxelizado es un sub-espacio que pertenece a un sistema de referencia global, donde también se encuentra el sistema de referencia de visión encargado de renderizar la escena de este espacio global. El sistema de visión puede ser posicionado en cualquier lugar del sistema de referencia global, pero para este caso el sistema de visión se ubica perpendicular a una de las caras del espacio voxelizado, tal como se ilustra en la figura 3.12.

Esta configuración de la cámara es aplicada a cada malla que se encuentra en el espacio voxelizado. El cálculo de los pesos de la malla depende de la dirección de la vista de la cámara, por lo tanto es necesario indicar la posición del sistema de visión, porque el peso se calcula usando el producto punto entre la dirección de la vista del sistema de visión y la normal de los puntos de la malla, tal como se muestra en la figura 3.13. Donde:

$$\vec{V} = P1(x, y, z) - Pc(x, y, z) \quad (3.15)$$

$$\vec{N}_{p1} = (P2 - P1) \times (P3 - P1) \quad (3.16)$$

El producto punto de (3.15) y (3.16) da como resultado el peso que tiene asociado este vértice, esto se aplica para cada malla.

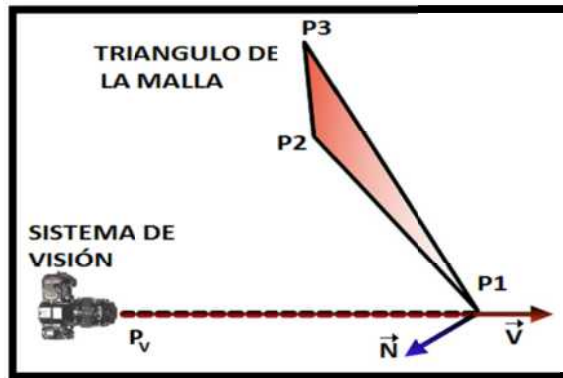


Figura 3.13. Cálculo de pesos.

3.6.4. Proceso de integración.

Inicialmente, la primera malla se ubica en el espacio voxelizado conservando la misma configuración del sistema de visión, como se muestra en la figura 3.12. Al espacio voxelizado se añaden unas características más a mantener, las cuales son la distancia signo, $D(x, y, z)$ y el peso de los vértices $W(x, y, z)$. Esta información es asociada a cada vértice del espacio voxelizado. Al comienzo del proceso $W(x, y, z)$ y $D(x, y, z)$ se inician en cero.

Se localizan los voxeles que contengan la malla, esto brinda la información de cuales son los voxeles más cercanos a ella. Una vez se tienen esos voxeles, se procede a trazar los rayos desde la posición del sistema de visión hasta uno de los vértices del voxel más cercano a la superficie, luego este es prolongado en la misma dirección hasta interceptar la superficie de la malla; dicha intersección brinda un punto localizado en una superficie formada por tres puntos, los cuales son identificados para calcular el peso promedio asociado a este vértice del voxel.

Para calcular la distancia signo se calcula la distancia entre el sistema de visión y el punto de intersección hallado por la prolongación del rayo, menos la distancia entre el sistema de visión y el vértice del voxel más cercano. En la figura 3.14 se muestra más detalladamente este proceso.

De acuerdo a la figura 3.14, la distancia signo es:

$$d(\vec{x}) = d_s - d_v \quad (3.17)$$

Donde:

$$\begin{cases} \text{El vertice del voxel esta afuera de la superficie si } d(\vec{x}) > 0 \\ \text{El verice del voxel es dentro de la superficie si } d(\vec{x}) < 0 \\ \text{El vertice del voxel esta sobre la superficie si } d(\vec{x}) = 0 \end{cases}$$

Una vez calculada la distancia signo y el peso, se actualizan para cada vértice de los voxeles que conforman el espacio de trabajo.

Después de actualizar el espacio voxelizado con la malla inicial, se procede a mover el sistema visión a la posición de la vista actual, usando la transformación rígida hallada durante el proceso de alineamiento de vista anterior y actual. Luego el proceso se vuelve aplicar a la malla de vista actual.

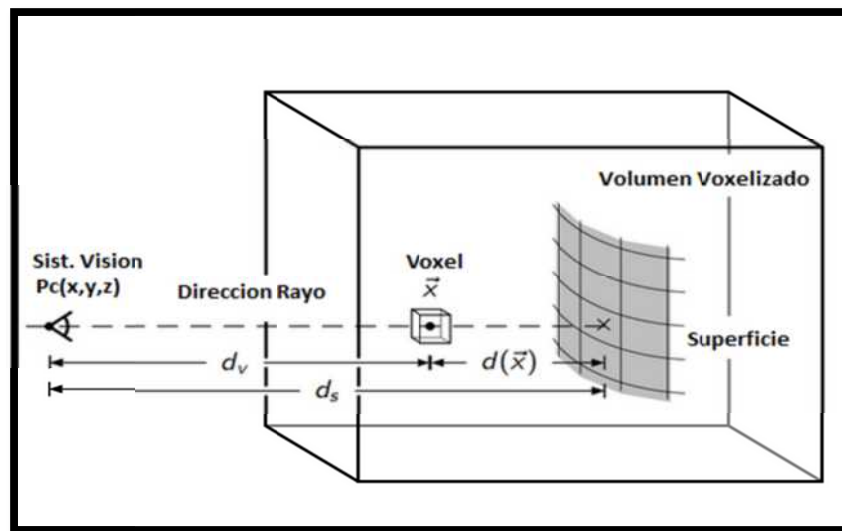


Figura 3.14. Cálculo de la distancia signo.

Este procedimiento es sucesivo entre cada par de vistas del proceso de escaneo. Al procesar todas las vistas se procede a extraer la iso-superficie usando el algoritmo de cubos marchantes (Marching cubes) [45]. La información necesaria para que el proceso se lleve a cabo está en el espacio voxelizado, que contiene la distancia signo almacenada en cada vértice de los voxeles.

El resultado de ejecutar el algoritmo de cubos marchantes es la reconstrucción final, que contiene la información de los puntos, polígonos y color. Esta información es almacenada en un formato de almacenamiento de datos tridimensionales muy utilizado y se conoce como PLY (Poligonal File Format) [46].

Un esquema general del diagrama de bloque del sistema implementado se muestra en la figura 3.15.

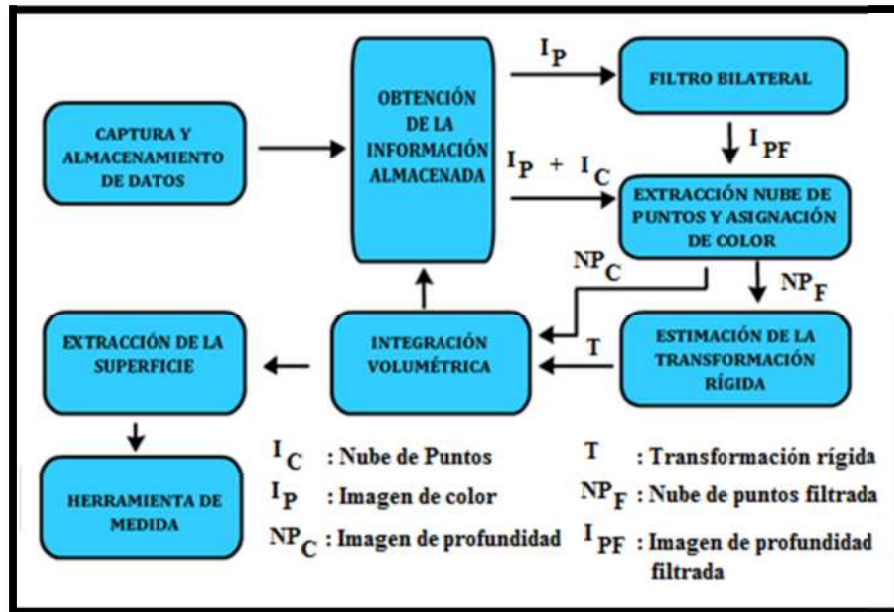


Figura 3.15. Esquema general de sistema implementado.

3.7. ESCANEEO Y RECONSTRUCCIÓN.

Se implementó una interfaz gráfica que integra los procesos anteriormente descritos. La interfaz gráfica del sistema de reconstrucción tridimensional esta dividida en dos partes:

- Escaneo
- Reconstrucción tridimensional.

Esta división se hizo necesaria para que la adquisición de las nubes de puntos sea lo más rápido posible y no incomode a quien se esté reconstruyendo y evitar que la expresión de su rostro cambie durante este proceso.

3.7.1. Escaneo.

El escaneo se refleja en la pestaña de la interfaz gráfica nombrada CAPTURA. Esta integra la adquisición de la imagen de profundidad del sensor Kinect y posteriormente su procesamiento, es decir, el filtro de profundidad que conlleva a la disminución del tamaño de las imágenes a procesar; además se visualiza tanto la imagen de color como la de profundidad para facilitar un adecuado escaneo y se muestra también la tasa de frames por segundo a la que se está capturando y procesando. En la figura 3.16 se presenta la interfaz gráfica desarrollada.

La interfaz brinda la capacidad de iniciar el escaneo, detenerlo, borrarlo o escoger la ubicación donde se quiere almacenar la información capturada. Los escaneos, tanto de la imagen de color como la de profundidad, son almacenados en formato XML para su posterior tratamiento en la reconstrucción tridimensional.

La interfaz es implementada bajo el modelo de programación paralelo en CPU con OpenMP, por lo que es capaz de realizar la captura de la información de color y profundidad con una tasa de muestreo máxima de 55 imágenes por segundo, bajo un equipo con procesador Intel Core i7 2.2 Ghz, con 8 GB de RAM a 1333 MHz.



Figura 3.16. Captura de pantalla de interfaz de escaneo.

3.7.2. Reconstrucción tridimensional.

La reconstrucción tridimensional está habilitada en la pestaña de la interfaz gráfica nombrada RECONSTRUCCIÓN, donde integra todos los métodos anteriormente expuestos para lograr la reconstrucción tridimensional, es decir, cada imagen de profundidad es convertida a nube de puntos con su respectivo color, luego se aplica el filtro bilateral seguido del alineamiento de las nubes, integración volumétrica y cubos marchantes.

La interfaz brinda la capacidad de escoger el directorio donde se encuentra los escaneos en formato XML, escoger el directorio en donde se guardaran los resultados de la reconstrucción (formato PLY), escoger el paso de los escaneos, es decir, que el proceso de reconstrucción por defecto toma los escaneos consecutivos como se almacenaron (uno a uno) o puede modificarse para que los escaneos a procesar salten según un paso previamente establecido.

3.8. MEDICIÓN DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS DEL ROSTRO.

3.8.1. Validación del sistema.

Teniendo en cuenta que el rostro humano está compuesto por tejidos blandos que se deforman fácilmente ante la presencia de una leve presión, se optó por utilizar un maniquí para validar las medidas obtenidas, ya que este brinda una superficie sólida que no se altera cuando se realizan las medidas por contacto directo.

Tabla 3.2 Lista de pares de puntos a medir.

Puntos de medida
P1 y P3
P4 y P5
P7 y P8
P9 y P11
P12 y P13
P2 y P6
P6 y P10
P10 y P14
P2 y P14
P1 y P9
P3 y P11

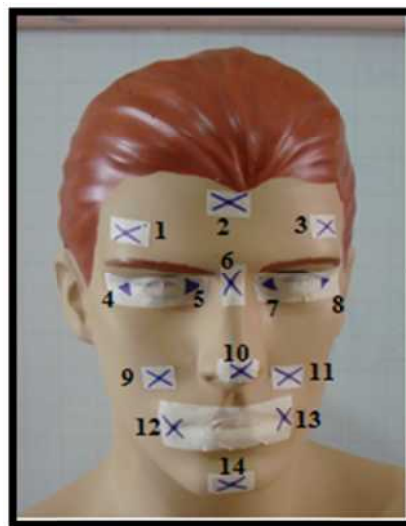


Figura 3.17. Disposición de los puntos de medida.

Se realizaron una serie de medias manuales con un calibrador o vernier, las cuales se encuentran consignadas en la tabla 3.2 y que están basadas en la disposición de puntos mostrados figura 3.17.

Después de realizar las medidas con el calibrador, se procedió a realizar la reconstrucción tridimensional a partir de una serie de escaneos del maniquí. Con la ayuda de la interfaz de medición se procede a tomar las mismas medidas realizadas con el calibrador, para así evaluar el sistema de medición digital con respecto a los valores medidos con el calibrador.

La interfaz grafica de medición y visualización desarrollada se muestra en la Figura 3.18.

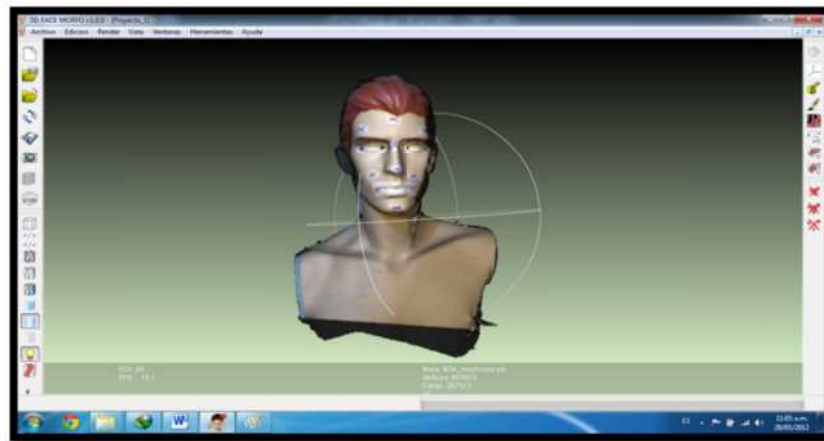


Figura 3.18. Interfaz de medición e interacción

Con esta interfaz se puede realizar la selección de los puntos en la superficie del rostro humano usando el cursor, tal como se muestra en la figura 3.19.

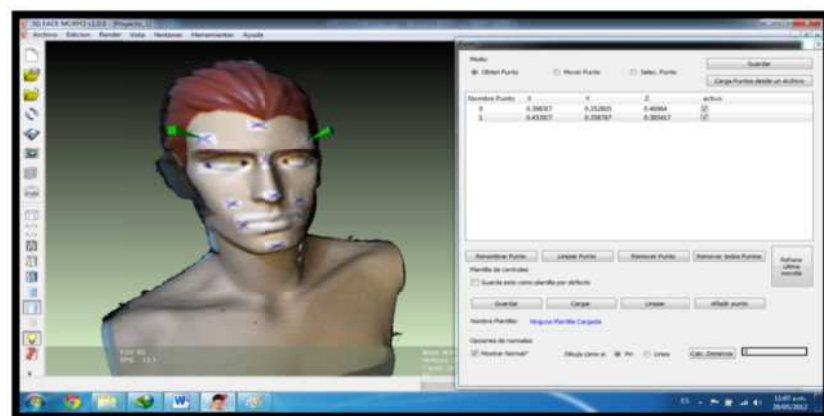


Figura 3.19. Ubicación de puntos en la superficie.

Una vez seleccionados los puntos de interés en la superficie, la interfaz permite calcular la distancia euclidiana entre estos puntos ubicados espacialmente. De esta manera se realiza la medición entre puntos de interés basada en distancia. Al final del documento se anexa un manual de usuario para el manejo de la interfaz.

4. RESULTADOS

4.1. ASIGNACIÓN DE COLOR A LA NUBE DE PUNTOS.

Al asignar color a la nube de puntos obtenida con la imagen de profundidad y teniendo en cuenta que las imágenes de profundidad y color son del mismo tamaño de 640x480, en píxeles, se pensó inicialmente en mapear el color directamente de la imagen RGB sin ningún tratamiento, el resultado obtenido se muestra en la figura 4.1.

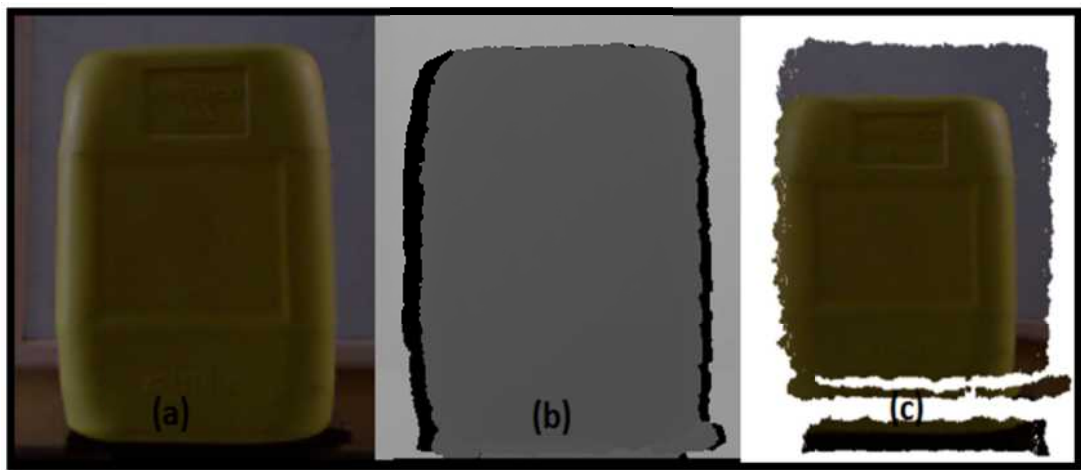


Figura 4.1. Mapeo inicial de color sobre la nube de puntos. (a) Imagen de RGB. (b) Imagen de profundidad (c) Color asignado a la nube de puntos del objeto.

En el proceso de asignación de color a la nube de puntos se observan inconsistencias, las cuales se muestran en la figura 4.1c. El color asignado al objeto tomó valores que no le corresponden, ya que parte del color pertenecen al fondo de la escena. Lo que representa un problema en la asignación de color a la nube de puntos.

Lo anterior se debe a que las cámaras están distanciadas físicamente, por lo tanto la imagen de profundidad y la imagen de color no están en el mismo sistema de referencia. Para solucionar este inconveniente se siguen los pasos de la sección 3.2.3. Los resultados de aplicar este algoritmo se presentan en la figura 4.2.

Como se observa en la figura 4.2, los puntos que tienen color ya representan mejor al objeto, indicando que hay una mejor correspondencia en la asignación de color; aunque la correspondencia no es perfecta, es muy aproximada y mejora notablemente la asignación del color. Esto es debido a varios factores como son resolución del sensor en función de la

distancia, ruido en el rango del infrarrojo cercano y el error introducido en los parámetros de la calibración estéreo.

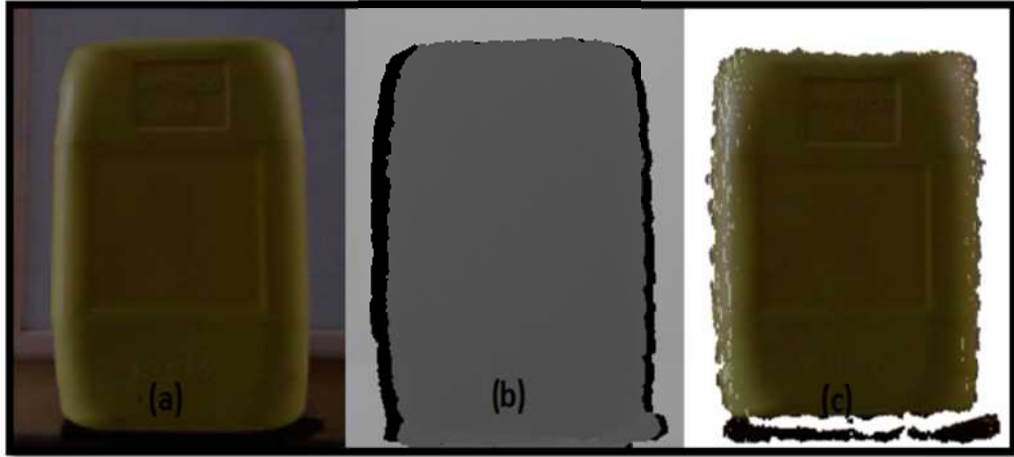


Figura 4.2. Mapeo mejorado de color sobre puntos. (a) Imagen de RGB. (b) Imagen de profundidad (c) Color asignado a la nube de puntos del objeto.

Para mejorar la asignación de color a la nube de puntos teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados, el único parámetro que es posible minimizar es el ruido en el rango del infrarrojo cercano, que se logra realizando la captura en una habitación cerrada.

A pesar de los factores que afectan la asignación de color, los parámetros obtenidos en la calibración ajustan de manera aceptable el color en la nube de puntos, permitiendo que el sistema se desempeñe adecuadamente para la labor que fue diseñado.

4.2. FILTRADO DE LA INFORMACIÓN.

4.2.1. Filtrado espacial.

Se seleccionaron los píxeles que se encuentran dentro a un determinado rango de valores, que para este proyecto están comprendidos entre 0 m y 1 m.

En la figura 4.3 se muestra la nube de puntos original (imagen derecha). Luego de aplicar el filtro espacial, según el rango que se ha predefinido, se obtiene la nube de puntos filtrada espacialmente (imagen izquierda). Se observa que solo el objeto que está más cercano al sistema y dentro del rango permanece en la escena, mientras que los demás, que hacen parte del fondo, son descartados.

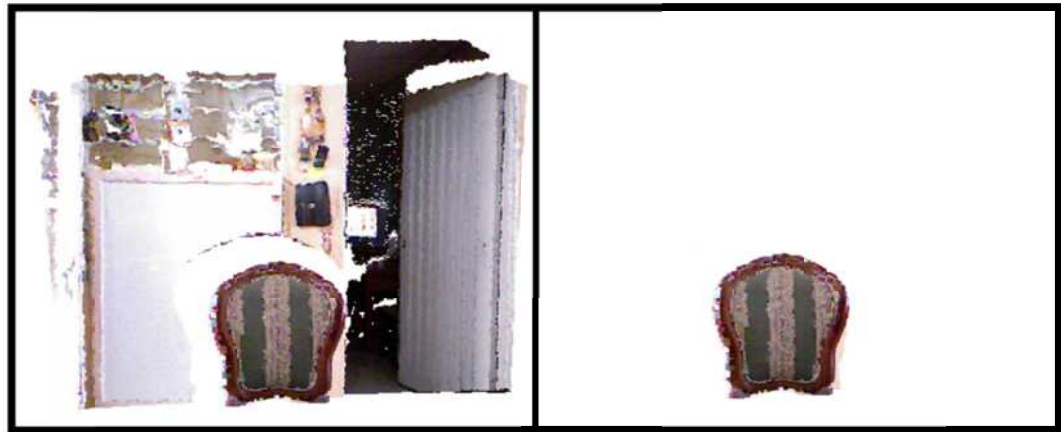


Figura 4.3. Nube de puntos aplicándole filtro espacial.

4.2.2. Filtrado bilateral.

El filtro bilateral descrito en la sección 3.3.2 depende principalmente de dos parámetros, δ_S y δ_R , para suavizar y conservar los bordes. Se realizaron una serie de pruebas, donde se tomaron diferentes valores de estos parámetros para encontrar el mejor resultado que se ajuste a los requerimientos del sistema. Los parámetros que mostraron mejores resultados fueron $\delta_S = 30$ y $\delta_R = 4.5$.

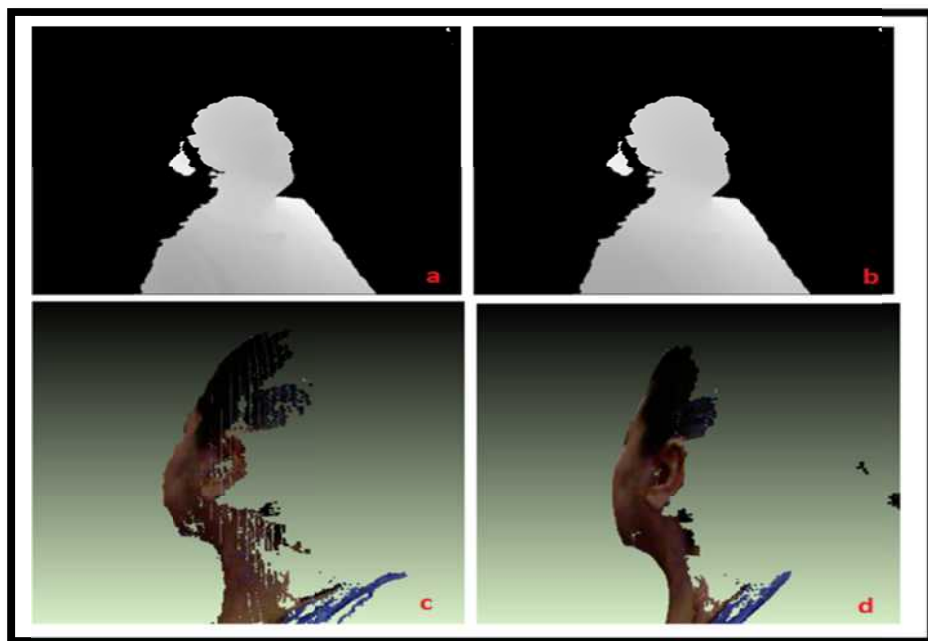


Figura 4.4. Filtro bilateral. a) Imagen de profundidad original, b) imagen de profundidad filtrada, c) nube de puntos original, d) nube de puntos filtrada.

En la figura 4.4a se muestra la imagen de profundidad original. Al aplicarle el filtro bilateral se obtiene una imagen que se muestra en la figura 4.4b. Si se comparan ambas imágenes el cambio no es significativo. Para una mejor visualización y ver el efecto del filtro bilateral, estas imágenes son convertidas a nube de puntos, esto se muestra en la figura 4.4c y 4.4d respectivamente.

Como se observa en la figura 4.4c la superficie se encuentra con muchos altibajos y muy discretizada. En la figura 4.4d se observa el efecto del filtro bilateral donde se suaviza la superficie y se obtiene una mejor continuidad de esta, logrando así una mejor estimación de la transformación rígida.

4.3. ALINEAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

Para este proceso se tuvo en cuenta dos aspectos importantes que influyen en el alineamiento de las nubes de puntos en distintas vistas de la escena, estos parámetros son: ángulo entre dos nubes de puntos consecutivas de la escena y el ruido en cada una de ellas.

4.3.1. Ángulo entre las nubes de puntos consecutivas

Unos de los inconvenientes que se presentó en un principio fue un mal alineamiento de las nubes de puntos utilizando la interacción de puntos cercanos. Esto se originó debido a que la captura y el procesamiento de la información se realizaba a una tasa de muestreo muy baja, lo que conlleva a que un par de nubes de puntos consecutivas posean un ángulo entre ellas muy grande (mayor a 30 grados), que afecta directamente el alineamiento. Esto se ilustra en la figura 4.5.

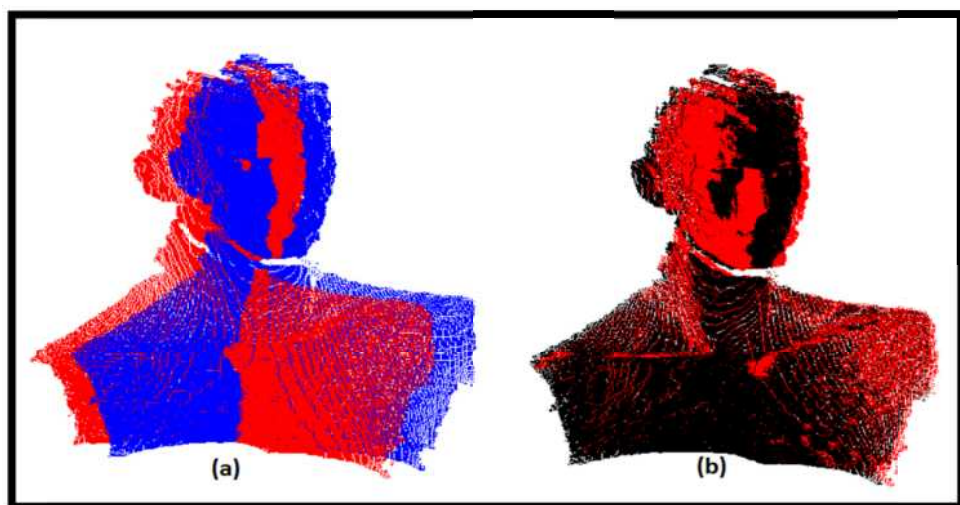


Figura 4.5. Alineamiento de nubes de puntos 1. (a) Dos nubes de puntos con ángulo grande entre ellas sin alinear. (b) Alineamiento de las dos nubes de puntos.

En la figura 4.5a se encuentran dos nubes de puntos (roja y azul) con un ángulo mayor a 30 grados y el alineamiento de éstas se muestra en la figura 4.5b. Se puede observar que el solapamiento es deficiente.

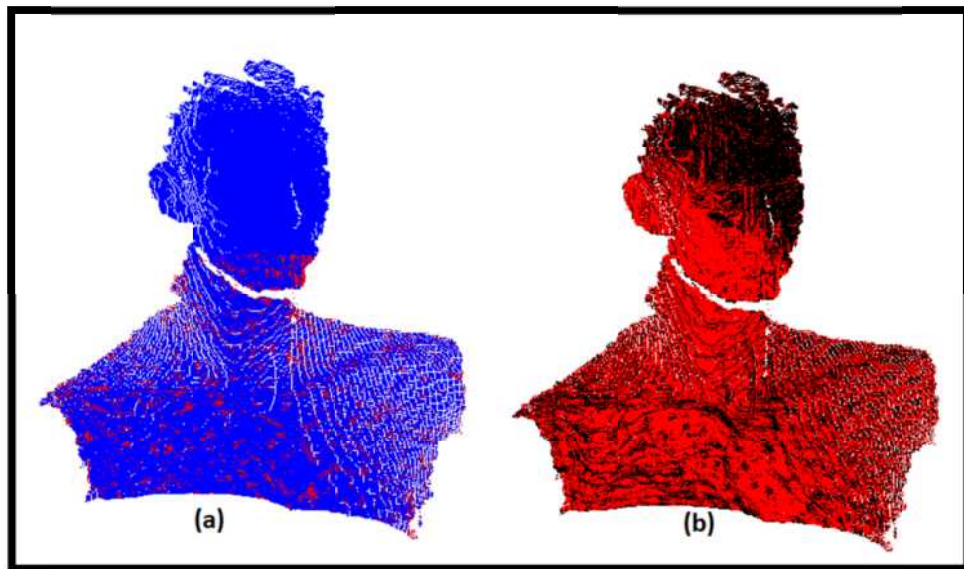


Figura 4.6. Alineamiento de nubes de puntos 2.(a) Dos nubes de puntos con ángulo pequeño entre ellas sin alinear. (b) Alineamiento de las dos nubes de puntos.

Para acelerar la captura y el procesamiento y así mejorar el alineamiento, se optó por realizar una programación en paralelo (multi-hilos), lo que permitió que el ángulo entre cada par de nubes de puntos fuese menor a 5 grados. En la figura 4.6a se encuentran dos nubes de puntos (roja y azul) con un ángulo pequeño y el alineamiento de éstas se muestra en la figura 4.6b. Se puede observar que el solapamiento es muy bueno, ya que hay una buena combinación entre ellas.

4.3.2. Ruido en la nube de puntos

El ruido generado por las fuentes de infrarrojo cercano repercute en las nubes de puntos capturadas y se refleja en una superficie con muchos altibajos, afectando directamente el alineamiento. Para corregir este problema se optó por utilizar un filtro que suavice pero mantenga los bordes, como ya se mencionó anteriormente, el que cumple con estas propiedades es el filtro bilateral.

Para poder visualizar el efecto del filtro bilateral en el alineamiento se utilizan las nubes de puntos de la figura 4.5 (ángulo grande). El resultado del alineamiento con las nubes de

puntos filtradas con el filtro bilateral se muestra en la figura 4.7, donde se observa una mejora en el alineamiento con relación al obtenido en la figura 4.5.

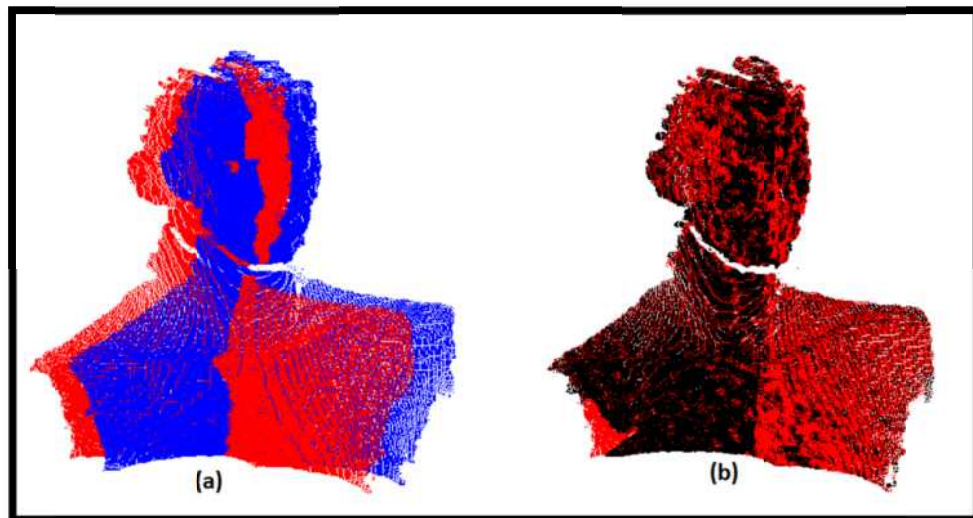


Figura 4.7. Alineamiento de nubes de puntos 3.(a) Dos nubes de puntos con filtro bilateral con ángulo grande entre ellas sin alinear. (b) Alineamiento de las dos nubes de puntos.

En la figura 4.7a se encuentran dos nubes de puntos (roja y azul) con un ángulo mayor a 30 grados y el alineamiento de éstas se muestra en la figura 4.7b. Se puede observar que el solapamiento es mejor que en la figura 4.5b.

4.4. INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestra tanto el espacio voxelizado como la reconstrucción obtenida utilizando dicho espacio. Como se puede observar en la figura 4.8 se tiene una voxelización de $128 \times 128 \times 128$ (X,Y,Z) y el resultado de la reconstrucción del rostro tiene muy poco detalle, lo que es desfavorable para la medición de los parámetros del rostro. Con relación a la figura 4.9 se puede observar una mejor obtención en el detalle de la superficie del rostro, esto se logró aumentando la voxelización, es decir, el espacio fue dividido en $512 \times 512 \times 512$ (X,Y,Z). Esta división del espacio es la máxima que se pudo lograr debido a las características físicas del hardware utilizado.

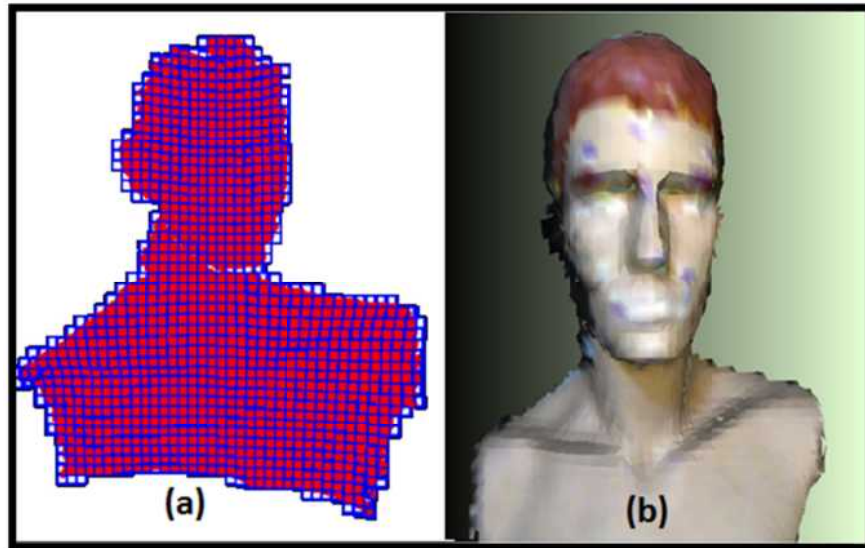


Figura 4.8. Voxelización del espacio de $128 \times 128 \times 128$ (X,Y,Z) y reconstrucción obtenida con esta voxelización.

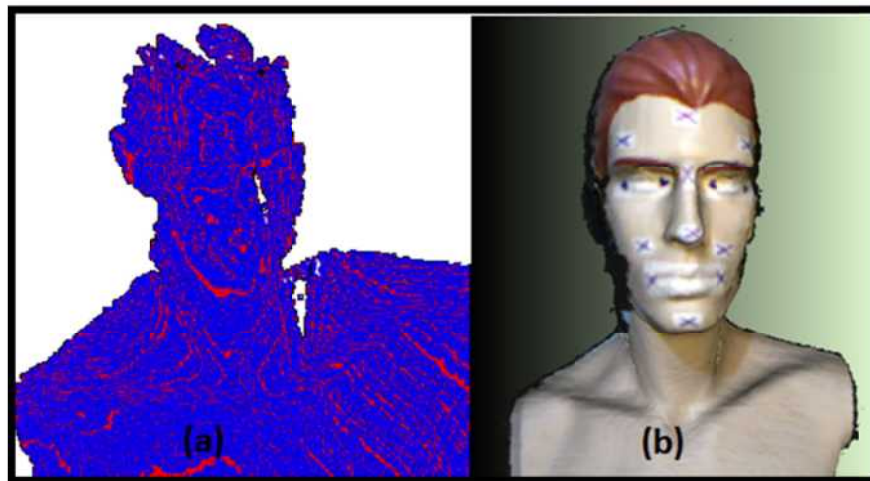


Figura 4.9. Voxelización del espacio de $512 \times 512 \times 512$ (X,Y,Z) y reconstrucción obtenida con esta voxelización.

4.5. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA.

Con el calibrador se realizaron 25 medidas de cada una de las distancias que se encuentran listadas en la tabla 3.2 de la sección 3.8.1, a las cuales se les calculó la media, desviación estándar y desviación estándar relativa, esto se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Medidas tomadas con el calibrador o vernier.

Distancia entre par de puntos	Media(mm)	Desviación estándar (mm)	Desviación estándar relativa (%)
P1 y P3	100,00	0,16	0,16
P4 y P5	44,14	0,13	0,31
P7 y P8	39,19	0,14	0,35
P9 y P11	67,02	0,26	0,39
P12 y P13	57,36	0,25	0,43
P2 y P6	39,95	0,25	0,63
P6 y P10	43,97	0,19	0,45
P10 y P14	69,50	0,15	0,22
P2 y P14	147,59	0,21	0,14
P1 y P9	81,71	0,17	0,21
P3 y P11	77,85	0,13	0,17

Tabla 4.2. Medidas obtenidas a través del sistema.

Distancia entre par de puntos	Media(mm)	Desviación estándar (mm)	Desviación estándar relativa (%)
P1 y P3	98,8411	0,8338	0,8436
P4 y P5	42,1240	1,1159	2,6471
P7 y P8	39,8934	0,8868	2,2231
P9 y P11	66,2122	0,5851	0,8837
P12 y P13	56,8492	0,6328	1,1132
P2 y P6	38,9842	0,5766	1,4792
P6 y P10	43,4098	0,5711	1,3157
P10 y P14	66,3248	0,5249	0,7914
P2 y P14	143,2974	0,6212	0,4335
P1 y P9	75,9176	0,5571	0,7338
P3 y P11	79,2935	0,6374	0,8039

Al igual que las medidas realizadas manualmente, se hicieron 50 reconstrucciones tridimensionales del rostro del maniquí y se realizaron los mismo cálculos anteriormente dichos, esto se muestran en la tabla 4.2. Cabe destacar que los escaneos se realizaron en un entorno cerrado con luz fluorescente para así disminuir el ruido por infrarrojo.

Una representación gráfica de la desviación estándar relativa de las tablas 4.1 y 4.2 se muestra en la figura 4.10.

Como se observa en la figura 4.10a, la desviación estándar relativa de las mediciones reales tiene un máximo de variación de 0.6% lo que indica que los datos son muy precisos. En cuanto a las mediciones digitales se observa que hay dos medidas que arrojan una variación un poco mayor al 2%, esto se debe principalmente a que el color asociado a dicha

superficie no está muy bien definido y esta emborronado, tal como se muestra en la figura 4.11. Aun así, la varianza de los datos es muy buena, lo que indica que la reconstrucción obtenida del rostro del maniquí es fiable y que es sistema de medición implementado tiene una buena repetibilidad al momento de realizar las medidas.

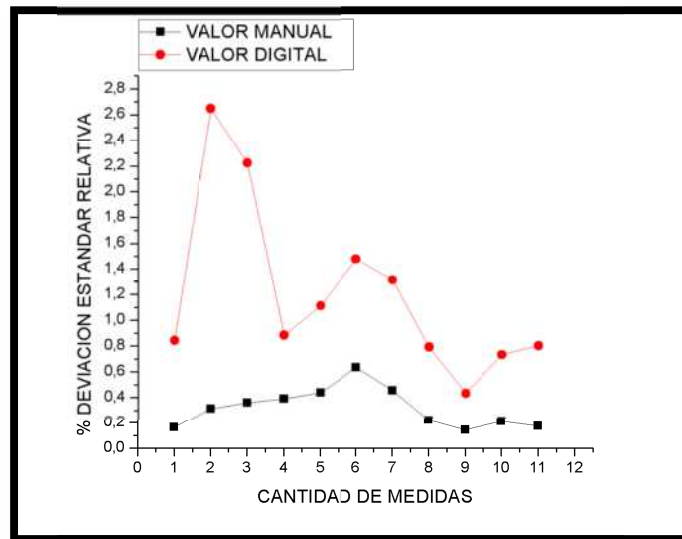


Figura 4.10. Distancias medidas vs Desviación estándar relativa

En la figura 4.12a se grafica la media de las medidas realizadas y en la tabla 4.3 se muestra el error relativo entre las medidas tomadas con el calibrador y las que se tomaron con el sistema digital.

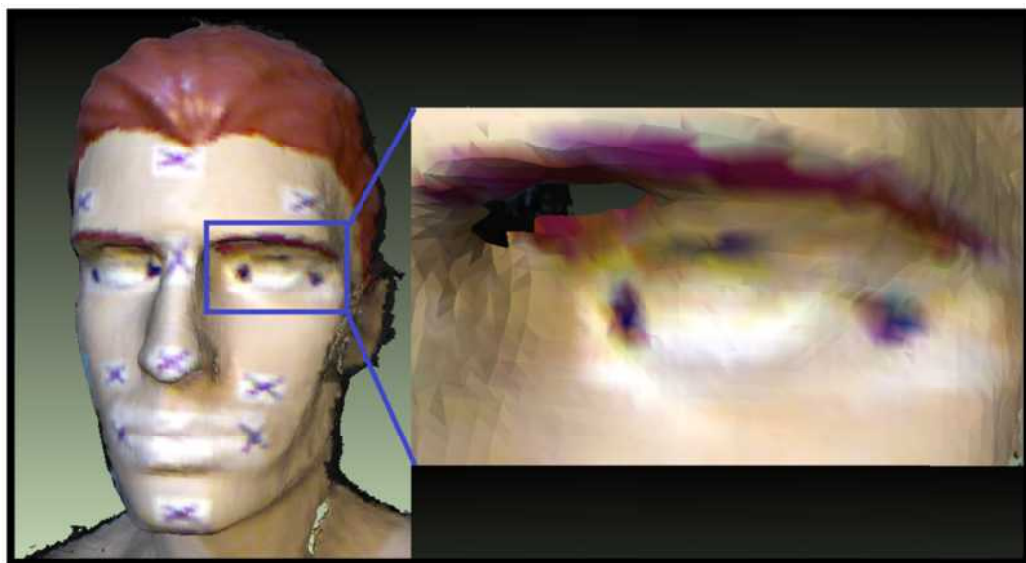


Figura 4.11. Sección de reconstrucción.

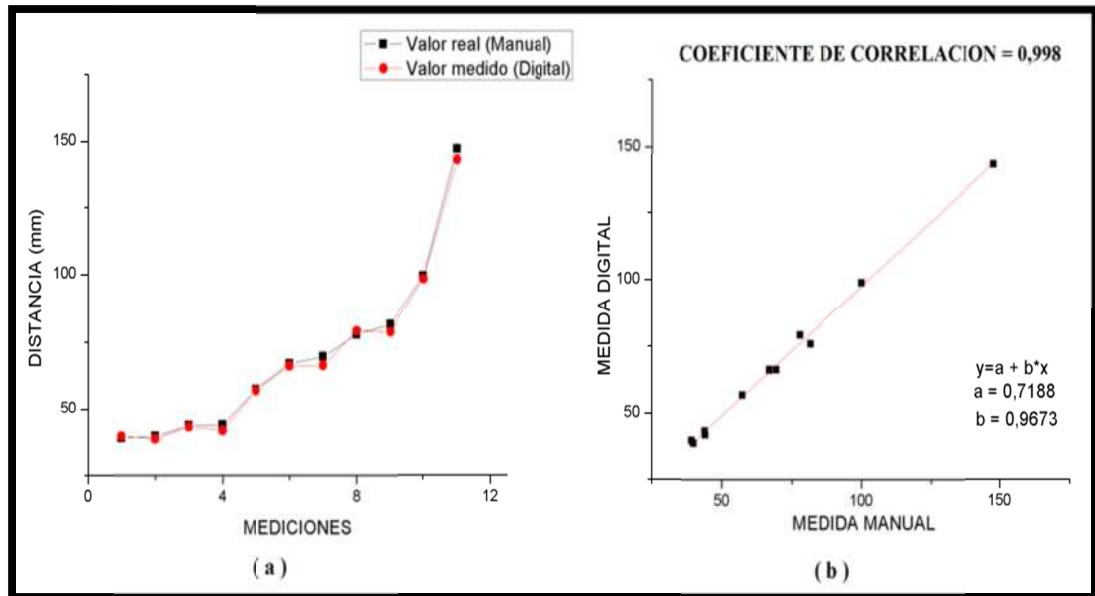


Figura 4.12. Valor real y valor medido. (a) Superposición de las medidas. (b) Diagrama de dispersión de correspondencia y su correlación.

El máximo porcentaje de error relativo obtenido es del 5% lo cual es muy bueno, teniendo en cuenta que dentro de este 5% están todos los errores introducidos en las etapas de la reconstrucción como:

- Asignación de color.
- Alineamiento
- Integración Volumétrica
- Resolución espacial del sensor Kinect.

En la figura 4.12a se observa que los valores medidos digitalmente se ajustan muy bien a los valores reales tomados con el calibrador, corroborando que el error obtenido es aceptable para el sistema.

Para reforzar lo anteriormente dicho se muestra en figura 4.12b la diagrama de dispersión de correspondencia donde se observa una distribución de puntos agrupados formando una línea, indicando que existe una relación fuerte en los datos, además el coeficiente de correlación de Pearson calculado se encuentra entre $0,8 < r < 1$ indicando una correlación muy alta.



Figura 4.13. Reconstrucción bajo condiciones ambientales distintas. (a) Habitación. (b) Iluminación sol.

Tabla 4.3. Error relativo entre la medida manual y la medida digital.

Diferencia entre valor real y valor medido (mm)	Porcentaje de error relativo (%)
1,16	1,16
2,01	4,57
0,69	1,77
0,80	1,20
0,51	0,89
0,96	2,42
0,56	1,27
3,18	4,58
4,29	2,90
2,79	3,42
1,43	1,84

Se prueba el sistema de reconstrucción realizando dos escaneos en distintas condiciones ambientales de una persona. La primera condición ambiental a probar fue en una habitación donde la iluminación del sol es casi nula y la segunda condición ambiental fue en condiciones de iluminación del sol, cabe destacar que esta fue realizada en horas de la tarde cuando la iluminación solar no era tan intensa. En la figura 4.13 se muestra el resultado de la reconstrucción bajo estas condiciones.

Como se puede observar en la figura anterior, la reconstrucción bajo condiciones de iluminación soleadas afectan la superficie de la reconstrucción, pues se nota que la nariz esta deformada. Estas deformaciones influyen en las medidas que se realizan sobre la superficie del rostro.

También se realizaron unas medidas del rostro de esta persona. En la figura 4.14 se ilustran los puntos que se tuvieron en cuenta para tomar las medidas, las cuales se listan en la tabla 4.4. En esta tabla también se muestra el porcentaje de error relativo entre las medidas realizadas en el rostro de la persona y las tomadas digitalmente en las reconstrucciones bajo las condiciones ambientales anteriormente mencionadas.

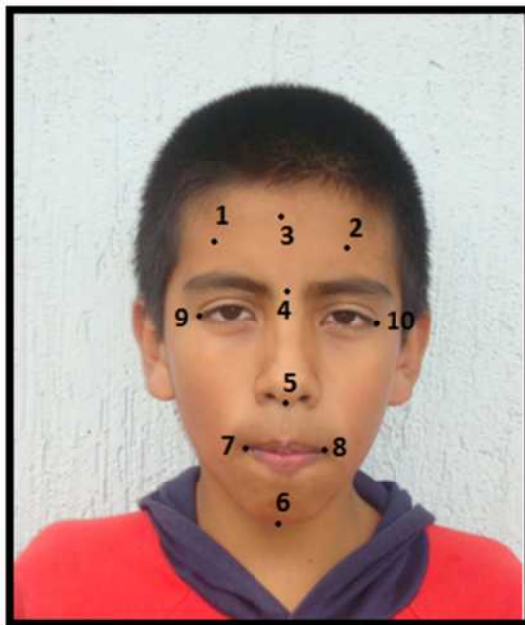


Figura 4.14. Distribución de puntos a medir.

Tabla 4.4. Tabla de valores manuales y medido por el sistema

Puntos de medida	Valor Real (Manual) (mm)	Valor medido (Digital) (mm)		Porcentaje de error relativo(%)	
		Ambiente habitación	Ambiente soleado	Ambiente habitación	Ambiente soleado
P1-P2	73.85	72,89	73,55	1,28	0,40
P3-P4	39.15	38,54	38,99	1,54	0,40
P9-P10	92.85	91,14	89,99	1,83	3,07
P4-P5	57.80	58,07	55,13	0,47	4,61
P3-P5	96.25	97,86	94,26	1,67	2,06
P3-P6	155.45	155,53	158,89	0,052	2,21
P7-P8	42.5	42,27	39,52	0,53	6,99

Como se puede notar en la tabla anterior, el error se incrementó en las condiciones con mayor ruido infrarrojo (Ambiente soleado), esto se esperaba debido a que el sensor Kinect es sensible a este tipo de ruido. Aunque lo anterior no ocurrió en las dos primeras medidas, esto se puede presentar debido a:

- Las deformaciones en la maya de reconstrucción del rostro puede acercar o alejar la medida digital a la medida manual y así minimizar o maximizar el error. Una deformación negativa se puede observa en la figura 4.13b.
- El color asignado a la nube de puntos no fue el apropiado debido a la misma deformación de la maya.

Otro aspecto a destacar es que el error relativo entre las dos condiciones ambientales presenta una diferencia que no es muy alta, lo que indica que en el proceso de reconstrucción, se minimiza considerablemente el ruido introducido durante el proceso de captura de la información.

CONCLUSIONES

En el proceso de escaneo, la mejor forma de obtener la reconstrucción del rostro humano es realizando un barrido semicircular tratando de mantener siempre la cámara en frente y a una distancia en un rango entre 40 y 60 centímetros del rostro. Además, el uso de la paralelización en CPU con OpenMP y el filtrado en profundidad fue efectivo para alcanzar una tasa de muestreo entre 40 a 55 imágenes por segundo, logrando así no incomodar a quien se esté reconstruyendo y evitar que la expresión de su rostro cambie durante este proceso.

El proceso de asignación de color a la nube de puntos fue muy bueno para alcanzar los objetivos propuestos, esto se logró gracias a los parámetros obtenidos en la calibración estereoscópica. A pesar de que los parámetros fueron afectados por la resolución del sensor en función de la distancia y el ruido en el rango del infrarrojo cercano, su cálculo se ajustó de manera aceptable para alinear los sistemas de referencia de la cámara IR y la cámara RGB.

En el proceso de alineamiento se logró una buena estimación de la transformación rígida debido a una programación en paralelo en el proceso de captura, lo cual logra que el ángulo entre las nubes sea menor a 5° grados, además el refinamiento de la estimación de la transformación rígida se logró utilizando el filtro bilateral que mejora la superficie que representa la nube de puntos y así se obtuvo una mejor estimación de las normales que ayudan en la selección de los puntos correspondientes.

Las características del hardware donde se implementó el sistema de reconstrucción, permitió realizar una división máxima del espacio de $512 \times 512 \times 512$ (X,Y,Z), debido a la capacidad de memoria del computador para procesar y visualizar la información. Sin embargo, esta división del espacio se ajustó adecuadamente en el proceso de integración obteniendo buenos resultados en la superficie de la maya.

La interfaz gráfica de captura permite realizar de manera rápida y fiable el escaneo del rostro humano, además brinda la capacidad de iniciar el escaneo, detenerlo, borrarlo o escoger la ubicación donde se quiere almacenar la información capturada en formato XML.

La interfaz gráfica de reconstrucción es muy estable y ofrece la capacidad de escoger el directorio donde se encuentran los escaneos en formato XML y seleccionar el directorio en donde se desea guardar los resultados de la reconstrucción en formato PLY.

La interfaz gráfica de medida permite con facilidad cargar la nube de puntos del rostro humano a estudiar y además cuenta con varias herramientas como la interacción con el ratón para rotar, trasladar, maximizar, minimizar la maya, modos de visualización en maya, puntos y textura, y con una herramienta de medida que permite calcular distancias entre puntos de una manera muy práctica y rápida.

El sistema de reconstrucción 3D presenta ciertas desventajas como: deformaciones en la malla de la reconstrucción del rostro a causa de ruido en el rango del infrarrojo cercano implícito en el ambiente y una asignación inadecuada del color debido a la misma deformación en la malla.

Se implementó una herramienta software para la extracción de parámetros morfológicos del rostro humano a partir de la reconstrucción tridimensional de éste. Teniendo en cuenta que el rostro humano está compuesto por tejidos blandos que se deforman fácilmente, se utilizó un maniquí para validar las medidas obtenidas digitalmente, ya que este brinda una superficie sólida que no se altera al realizar las medidas por contacto directo, brindando así puntos de referencia constantes. El sistema arrojó una buena repetibilidad en las medidas y un porcentaje de error menor al 5% con respecto a las medidas directas.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] W. EGGERT, David. W. FITZGIBBON, Andrew. B. FISHER, Robert. Simultaneous Registration of Multiple Range Views for Use in Reverse Engineering of CAD Model. En: Computer Vision and Image Understanding, Vol 69, No 3, 1998, pp. 253-272.
- [2] MARTINEZ, A. RAYAS, J. FLORES, M. RODRIGUEZ, V. AGUAYO D. Tecnicas ópticas para el contorno de superficies tridimensionales. En: Revista mexicana de física. Vol 51, No 4, 2005, pp. 431-436.
- [3] GARZON, Alberto. Desarrollo de herramientas de apoyo a la estereovisión. Madrid. 2010, 69 p. Trabajo de grado (Ingeniería de telecomunicación). Escuela Politécnica Superior-Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Ingeniería Informática.
- [4] FORO MARITIMO VASCO. Reconstrucción 3D de datos de radar. 2011, 1 p. <http://foro.siccluster.com/sicc/verFicha.do?ididioma=1&idficha=14085&l=1>
- [5] RIBEIRO, R., *et al.* Medidas faciales antropométricas de adultos segundo tipo facial e sexo. En: CEFAC, Vol. 13, No. 2, 2011, pp. 245-252.
- [6] MEJIA, GOMEZ, Maritza Ivonne. Extracción Automática de Características Faciales para el Estudio Antropométrico en Niños entre 5 y 10 Años de la Ciudad de Manizales. Manizales, 2004, 95 p. Trabajo de grado (Ingeniera Electrónica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Grupo Percepción y Control Inteligente.
- [7] FARKAS, L., BRYSON, W., KLOTZ, J. Is photogrammetry of the face reliable? En: Plastic and Reconstructive Surgery. Vol. 66 , No. 3, 1980, pp. 346-55.
- [8] PRIETO, Fabio. SALAZAR, Augusto. Antropometría de la boca a partir de dos vistas. En: DYNA, Vol 77, No 162, 2009, pp. 225-235
- [9] MENEZES, M., SFORZA, C. Morfometria tridimensional (3D) da face. Dental En: Press Journal of Orthodontics. Vol. 15, No. 1, 2010, pp. 13-15
- [10] ASO, J. *et al.* Virtopsia. Aplicaciones de un nuevo método de inspección corporal no invasiva en ciencias forenses. En: Cuadernos de medicina forense, Vol 11, No. 40, 2005, pp. 95-106.

- [11] MURILLO, Miguel. Análisis de la variabilidad morfológica facial en una muestra de personas con ancestros Cundiboyacenses. Bogota, 2010, 103 p. Trabajo de grado (Antropólogo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Humanas. Departamento de Antropología.
- [12] FLÓREZ, M. *et al.* Estructuración y estandarización de la antropometría facial en función de proporciones. En: International Journal of Cosmetic Medicine and Surgery, Vol. 6, No 3, 2004, pp. 10-14
- [13] CURLESS, Lee Brian. New Methods for Surface Reconstruction From Range Images. Silicon Valley, 1997, 189 p. Trabajo doctoral(Filosofo). Universidad de Standford. Departamento de Ingenieria Elcetrica.
- [14] COLLADO FOREST, Josep. New Methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners. Girona, 2004,150 p. Trabajo doctoral (Ingeniería informática). Universidad de Girona. Departamento de electrónica y informática.
- [15] CABEZAS, Luisa Fernanda. Dispositivo óptico de medida 3D de placas de identificación de vehículos. Popayán, 2009, 140p, Trabajo de grado (Ingeniera Física). Universidad del Cauca. Departamento de Física. Grupo de Óptica y Laser.
- [16] PATIÑO, O. MIRANDA, D. MENESES, J. Scanner 3D de Objetos a 360 de observación. En: Revista Colombiana de Física. Vol. 35, No 1, 2003. Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Universidad Industrial de Santander.
- [17] GARZON, Alberto. Desarrollo de herramientas de apoyo a la estereovisión. Madrid. 2010, 69 p. Trabajo de grado (Ingeniería de telecomunicación). Escuela Politécnica Superior-Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Ingeniería Informática,
- [18] FERNÁNDEZ, P. 6DOF Localización y mapeado simultaneo (SLAM) en tiempo real mediante cámara estéreo movida con la mano. Alcalá, 2008, 115 p. Trabajo de maestría (Sistemas electrónicos avanzados). Universidad de Alcalá.
- [19] QUAN, C. *et al.* Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting. En: Optics Communications, Vol. 189, 2001, pp. 21-29
- [20] WU, H., *et al.* A novel design for fiber optic interferometric fringe projection phse-shifting 3D profilometry. En: Optics Communications, Vol. 187, 2001, pp. 347-357
- [21] PRIME SENSE LTD. DEPTH MAPPING USING MULTI-BEAM ILLUMINATION. United State. No: US 2010/0020078 A1. 2010-01-28.

- [22] BLAKE, Joshua. HECTOR, Martin. MACHULISs, Kyle. FISHER, Drew. OpenKinect. Github, 2010, 1p. <https://github.com/OpenKinect>
- [23] PRIMSENSE. OpenNI Downloads. 2011, 1p. <http://www.openni.org/Downloads.aspx>
- [24] MICROSOFT. Kinect for Windows. Microsoft. 2012, 1p. <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>
- [25] UNIVERSITY TECHNIC MUNICH. 2011 53 p. http://campar.in.tum.de/twiki/pub/Chair/TeachingSs11Kinect/2011-DSensors_LabCourse_Kinect.pdf
- [26] FERNÁNDEZ, P. 6DOF Localización y mapeado simultaneo (SLAM) en tiempo real mediante cámara estéreo movida con la mano. Alcalá, 2008, 115 p. Trabajo de maestría (Sistemas electrónicos avanzados). Universidad de Alcalá.
- [27] FERNÁNDEZ, Rubén. RODRIGUEZ, Antonio. Adquisición y Visualización de Video 3D. Cataluña, 2010, 143 p. Trabajo de grado (Ingeniería técnica de telecomunicaciones). Universidad Politécnica de Cataluña.
- [28] PARIS, Sylvain. KORNPBST, Pierre. TUMBLIN, Jack. DURAND Frédo. Bilateral Filtering: Theory and Applications. En: Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. Vol 4, No 1, 2009, pp. 1-73.
- [29] EGGERT, David. FITZGIBBON, Andrew. FISHER, Robert. Simultaneous Registration of Multiple Range Views for Use in Reverse Engineering of CAD Model. En: Computer Vision and Image Understanding, Vol 69, No 3, 1998, pp. 253-272.
- [30] CHEN, Yang. MEDIONI, Gerard. Object Modelling by Registration of Multiple Range Images. En: Imaging And Vision. Vol 10, No 10, 1992, pp. 145-155.
- [31] MCKAY, Neil. BESL, Paul J. A method for registration of 3D Shapes. En: IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol 14, No 2, 1992, pp. 239-256.
- [32] SILVA. O.R.P, BELLON, K., Multiview range image registration using the surface interpenetration measure. En: Computer Vision and Image Understanding. Vol 25, 2007, pp. 114-125.

- [33] SHAOYI, Du. NANNING, Zheng, SHIHUI, Ying, JIANYI, Liu. Affine iterative closest point algorithm for point set registration. En: Pattern recognition letters. Vol. 31, No 9, 2010, pp. 791-799.
- [34] YANIV, Ziv. Rigid Registration: The Iterative Closest Point Algorithm. 2006. School of Engineering and Computer Science. The Hebrew University, Jerusalem, Israel.
- [35] RUSINKIEWICZ, Szymon. LEVOY, Marc. Efficient Variants of the ICP Algorithm. En: International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. (2011:Quebec).
- [36] CHANG, Willian. Surface Reconstruction from Points. En: UCSD CSE Technical Report CS2008-0922. San Diego. 2007. University of California. Department of Computer Science and Engineering.
- [37] FUHRMANN, Simon. Volume Data Generation From Triangle Meshes Using the Signed Distance Function. 2007, 52 p. Trabajo de grado (Ingeniero sistemas). Darmstad University of Technology. Department of Computer Science.
- [38] CURLESS, Brian. LEVOY, Marc. A Volumetric Method for Building Complex Models From Range Images. En: SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. (1996: New Orleans).
- [39] CURLESS, Brian. New Methods for Surface Reconstruction From Range Images. Silicon Valley, 1997, 189 p. Trabajo doctoral (Filosofo). Universidad de Standford. Departamento de Ingenieria Elcetrica.
- [40] SHARMAN, James. The Marching Cubes Algorithm . 2012 1 p.
<http://www.exaflop.org/docs/marchcubes/>
- [41] PARKS, Donovan. GRAVEL, Jean. Harris/Plessey Operator, 2008, 1p.
<http://kiwi.cs.dal.ca/~dparks/CornerDetection/harris.htm>
- [42] VIAGEL, Miker. Analysis of Kinect for mobile robots. 2011. En: Individual course report. Technical University of Denmark. Department of Electrical Engineering.
- [43] MARIUS, Muja. FLANN - Fast Library for Approximate Nearest Neighbors.
<http://www.cs.ubc.ca/~mariusm/index.php/FLANN/FLANN>















- [44] RUSINKIEWICZ, Szymon.LEVOY, Marc. Efficient Variants of the ICP Algorithm. En: International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. (2011:Quebec).
- [45] SHARMAN, James. The Marching Cubes Algorithm. 2012, 1p.
<http://www.exaflop.org/docs/marchcubes/>
- [46] WIKIPEDIA. PLY (File format). 2011, 1p <http://en.wikipedia.org/wiki/PLY>

ANEXO 1

INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN Y MEDICIÓN.











En la tabla A1 se muestra una lista de ítems que se encuentran disponibles en la interfaz de medición y visualización, con las cuales el usuario puede interactuar. Estos comandos están enfocados para que el usuario pueda importar las mallas de reconstrucción, abrir proyectos de trabajo y crear nuevos proyectos de trabajo. También se ha dispuesto modos de visualización de las mallas según sea requerida por usuario. Todos los comandos se encuentran listados en la tabla A1, allí se muestra el icono asociado al comando al igual que su funcionalidad en la interfaz.

Tabla A1. Lista de comandos y su funcionalidad

ITEM	COMANDO	FUNCIONALIDAD
	Nuevo Plantilla de trabajo	Permite crear una nueva plantilla de visualización
	Abrir una Plantilla existente	Permite abrir un proyecto existente de trabajo.
	Importar una maya	Permite cargar una maya a la vez
	Actualizar la vista de la escena virtual.	Permite actualizar la vista de la escena
	Guarda cambios realizados en las mayas	Permite guarda cambios en las mayas si se han realizado de la maya actual.
	Toma una imagen de la vista actual	Captura una imagen en formato .png de lo que se esta mostrando actualmente en la escena virtual.
	Despliega información de mayas cargadas	Despliega información básica de vértices y triángulos de las mayas.
	Se limpia la vista de la cámara	Limpia lo que actualmente se esta viendo, es decir, deja la escena libre de mayas.
	Visualización solo de puntos	Permite solo visualización de puntos
	Visualización de todos los triángulos	Permite solo visualización de triángulos y color en las líneas
	Visualización de triángulos 2	Permite la visualización solo de los triángulos sin color.
	Visualización color + maya.	Permite la visualización de triángulos con su información de color.
	Visualización superficie+ color	Permite visualizar solo la superficie con color, es decir no se visualiza los triángulos.
	Aplica luz a la escena	Permite aplicar iluminación

Existen otros comandos con los que usuario puede interactuar para causar efectos en las mallas que se encuentren cargadas en la interfaz. En la tabla A2 se encuentra los ítems presente en la interfaz donde también se muestra la lista de los comandos y su funcionalidad.

Tabla A2. Lista de comandos y su funcionalidad

ITEM	COMANDO	FUNCIONALIDAD
	Manipulador	Permite al usuario rotar y trasladar la maya de trabajo.
	Medición Rápida	Permite realizar una medida rápida entre dos puntos, mostrando la distancia entre ellos.
	Manipulador de maya	Permite realizar cambios en la maya en cuanto a color.
	Medición de parámetros morfológicos.	Permite realizar las mediciones sobre la superficie de la maya.
	Selección rectangular de puntos	Selecciona puntos de una maya usando un rectángulo.
	Seleccionar triángulos	Selecciona un triangulo en especifico de la maya.
	Selección rectangular de triángulos	Selecciona triángulos de una maya usando una forma rectangular.
	Borra triángulos modo 1	Borra triángulos seleccionados, pero conserva información de los puntos asociados.
	Borra triángulos modo 2	Borra triángulos seleccionados, al igual que los vértices asociados a estos.
	Borra triángulos modo3	Borra triángulos seleccionados, y los triángulos que comparten puntos también son borrados al igual que sus vértices.

Para la medición de parámetros morfológicos en el rostro se desarrolló el comando de medición de parámetros morfológicos listado en la tabla A2. La medición se hace por medio de puntos seleccionados en la superficie del rostro usando el mouse, dando simplemente click derecho sobre la superficie para ubicar un punto.

Al usar el comando de medición de parámetros morfológico se despliega una ventana como la que se muestra en la figura A1.

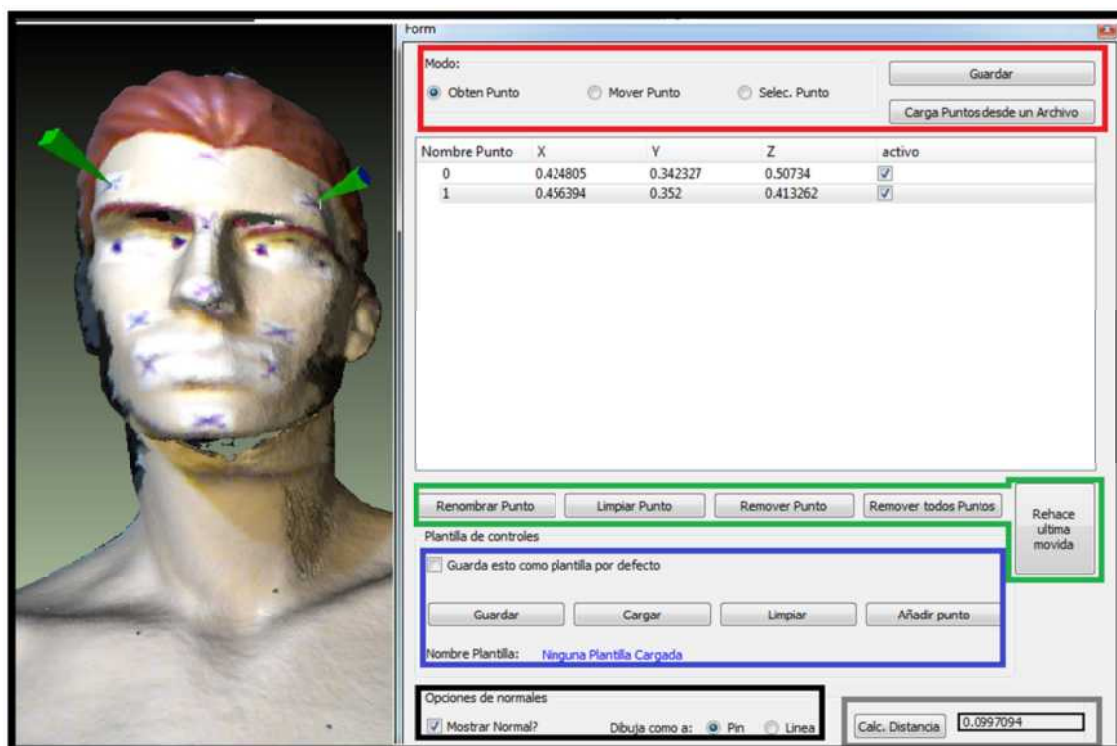


Figura A1. Ventana emergente para el comando de medición.

El usuario puede seleccionar los puntos sobre la superficie del rostro haciendo simplemente click derecho sobre la superficie de la malla. Los puntos seleccionados pueden ser visualizados como una línea o como un pin piramidal, región rectangular negra, lo cual ayuda de forma visual saber la posición del punto que se está seleccionando; además la posición de dichos puntos aparecerá listada en la zona blanca, donde se indica el valor de su dimensión, al igual que su nombre bajo una numeración.

En la sección rectangular roja de la figura A1 se puede escoger mover un punto sobre la superficie, así como también seleccionar un punto en específico. Los puntos que son seleccionados pueden ser guardados usando el botón "**Guardar**", y también pueden ser cargados nuevamente con el botón "**Cargar Puntos desde un archivo.**", los puntos son almacenados en un archivo de texto bajo un nombre especificado por el usuario.

En la sección rectangular verde se tienen botones que permiten renombrar un punto, limpiarlo o removerlo, al igual que remover todos los puntos que se encuentran listados, es decir, que han sido seleccionados sobre la superficie de reconstrucción. También el usuario

puede rehacer la última operación realizada en selección de puntos para realizar alguna corrección en cuanto al punto que se seleccionó.

El usuario puede elegir en crear una plantilla por defecto con los puntos que están en la lista, la cual puede ser guardada para luego cargarla en futuras mediciones. También puede añadir nuevos puntos a una plantilla inicial, estos comandos están en la región rectangular azul.

Para las mediciones entre puntos, se ha dispuesto de un botón “**Calc. Distancia**” el cual se visualiza en la región rectangular gris, el cual calcula la distancia entre los puntos que aparecen en la lista.