

MAPEO DE TEXTURAS A OBJETOS 3D BASADO EN LA GEOMETRÍA DE LA ESCENA

Jorge Eduardo Hernández Londoño



Universidad Nacional de Colombia

Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2006

MAPEO DE TEXTURAS A OBJETOS 3D BASADO EN LA GEOMETRÍA DE LA ESCENA

Jorge Eduardo Hernández Londoño

Tesis para optar al título de
Magister en Ingeniería - Automatización Industrial

Director

Prof. Flavio Augusto Prieto Ortiz

Universidad Nacional de Colombia

Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2006

*A mis padres y a Carol
por su amor, apoyo y ayuda incondicional.*

Agradecimientos

Inicialmente agradezco, al *Programa de Becas para Estudiantes Sobresalientes de Posgrado*, porque gracias a sus incentivos económicos pude cursar y completar sin problemas mis cursos de maestría y mi tesis. Igualmente, quiero agradecer al Museo de Antioquía por el préstamo de algunas piezas precolombinas.

Agradezco inmensamente, al profesor Flavio Prieto, mi director de tesis por su orientación, sugerencias y completa colaboración.

De igual forma, agradezco al profesor Juan Bernardo Gómez y al profesor John Willian Brach por sus muchos conocimientos enseñados, su tiempo y su valiosa ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Quiero expresar mi más sentido agradecimiento a mi compañero de trabajo Ernesto Cuartas, por su tiempo en el desarrollo de algoritmos.

Finalmente, agradezco a Isabel, Alexander y a todas aquellas personas que de una u otra forma aportaron un granito de arena para que junto a mi anhelo de salir adelante, se pudieran cumplir a cabalidad todos mis objetivos.

Índice General

Portada	1
Índice General	IV
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	IX
Resumen	X
Abstract	XI
Introducción	XII
1. Fundamentos Teóricos	1
1.1. Definición	1
1.2. Trabajo Realizado	2
1.2.1. Texturas artificiales generadas por computador	2
1.2.2. Texturas reales adquiridas en la escena	3
1.3. Adquisición	5
1.3.1. Escáner de Rango	6
1.3.2. Cámara CCD	6
1.4. Implementación General	7
2. Calibración de Cámara	8

2.1.	Introducción	8
2.2.	Modelo de Cámara	8
2.2.1.	Modelo de Cámara con distorsiones	10
2.3.	Métodos de Calibración	11
2.3.1.	Método 1: Algoritmo Tsai	11
2.3.2.	Método 2: Algoritmo <i>The Gold Standard</i>	12
2.3.3.	Método 3: Calibración de Cámara basado en Elipses	15
2.4.	Implementación y Resultados	18
2.4.1.	Método 1: Algoritmo <i>Tsai</i>	18
2.4.2.	Método 2: Algoritmo <i>The Gold Standard</i>	20
2.4.3.	Método 3: Calibración de Cámara basado en Elipses	20
2.4.4.	Métricas de Desempeño	21
2.5.	Conclusiones	23
3.	Mapeo de una Textura a una Imagen de Rango	24
3.1.	Introducción	24
3.2.	Mapeo de una Textura utilizando Puntos de Control	26
3.2.1.	Asignación de Puntos de forma Manual	27
3.2.2.	Asignación de Puntos utilizando un patrón de Calibración	27
3.2.3.	Parametrización de la Superficie	30
3.2.4.	Resultados	30
3.3.	Mapeo de una Textura utilizando Registro 3D - 2D	32
3.3.1.	Descripción del Proceso	33
3.3.2.	Parametrización de la Superficie	34
3.3.3.	Resultados	35
3.4.	Mapeo de una Textura a Modelos con Superficies NURBS	39
3.5.	Discusión	42
3.6.	Conclusiones	45
4.	Reconstrucción del Modelo Texturado	46
4.1.	Introducción	46

4.2.	Mapeo de Texturas a Múltiples Vistas	47
4.2.1.	Información de Textura por cada Imagen de Rango	47
4.2.2.	Información de Textura por cada Punto de Vista del Modelo	49
4.2.3.	Implementación y Resultados	49
4.3.	Corrección de Color	54
4.3.1.	Formación del color en una imagen	54
4.3.2.	Implementación y Resultados	55
4.4.	Discusión y Conclusiones	56
5.	Evaluación de los Resultados	58
5.1.	Introducción	58
5.2.	Densidad	58
5.3.	Métodos para una Sola Vista	60
5.3.1.	Número de Texturados sobre Número de Puntos Visibles	60
5.3.2.	Comparación de Contornos con Medida de Distancia	62
5.3.3.	Comparación de Variación de la Curvatura del Modelo con los Bordes de la Textura utilizando Medida de Distancia	65
5.3.4.	Resultados	70
5.4.	Método para Múltiples Vistas	71
5.5.	Discusión y Conclusiones	72
6.	Conclusión General y Trabajo Futuro	74
	Bibliografía	76
A.	Base de Datos	A-1
B.	Calibración de Cámara	B-1
B.1.	Algoritmo Tsai	B-1
C.	Constancia de Color	C-1
C.1.	Algoritmo Gray - World	C-1

C.1.1. Efecto Gamma	C-1
C.1.2. Algoritmo	C-3
C.2. Constancia de Color por Correlación	C-4
C.2.1. Algoritmo	C-4

Índice de Figuras

1.	Asignación de Color por cada Vértice	XIII
2.	Mapeo de Texturas - Número de Triángulos 3553	XIV
1.1.	Ejemplo de Mapeo de Textura <i>Modelo</i> ¹	2
1.2.	Escena de Adquisición	5
1.3.	Método de Triangulación	6
1.4.	Plataforma Implementada	7
2.1.	Modelo de Cámara	9
2.2.	Proyección de una cónica en el espacio	17
2.3.	Patrones de Calibración	18
2.4.	Corrección de la Distorsión Radial	21
3.1.	Parametrización y Renderización	24
3.2.	Parametrización de la Superficie - Malla Triangular	25
3.3.	Visibilidad de los puntos	26
3.4.	Proceso de Mapeo de una Textura utilizando Puntos de Control	27
3.5.	Asignación de un punto sobre la imagen de rango a partir de un píxel en la pantalla	28
3.6.	Geometría de la Escena	28
3.7.	Adquisición de Patrones con los dos Sensores	29
3.8.	Cálculo de los Centros de Masa en Cada uno de los Sensores	29
3.9.	Selección de Correspondencias	30
3.10.	Métricas de Calibración y Modelo Texturado utilizando puntos correspondientes asignados de forma manual	31

3.11. Métricas de Calibración y Modelo Texturado utilizando puntos correspondientes utilizando un patrón de calibración	32
3.12. Proceso de Mapeo de una Textura utilizando Registro 3D-2D	33
3.13. Figura precolombina	35
3.14. Proceso sobre la Textura	36
3.15. Proceso sobre la proyección del Modelo	36
3.16. Diferencia absoluta de formas del Modelo proyectado (Figura 3.15(b)) y la Textura (Figura 3.14(b)) . . .	37
3.17. Extracción del Contorno	37
3.18. Transformación de Distancia (TD)	38
3.19. Desempeño del algoritmo de optimización	38
3.20. Modelo Texturado con el proceso de Registro 3D - 2D	39
3.21. Proceso del Mapeo de Texturas sobre un Parche NURBS	40
3.22. Figura precolombina	40
3.23. Particionamiento en Parches	41
3.24. Parche a Texturar	41
3.25. Parche mapeado con el método de mapeo de textura utilizando puntos de control	42
3.26. Textura de un objeto desde dos puntos de vista diferentes	43
3.27. Mínimos locales de la Función Objetivo	44
4.1. Adquisición de Múltiples Vistas	46
4.2. Proceso de Mapeo de Texturas de Múltiples Vistas utilizando Puntos de Control	47
4.3. Fotos Adquiridas con la cámara del escáner	49
4.4. Fotos Adquiridas con la cámara SONY	50
4.5. Modelo 3D de una sola Imagen de Rango	50
4.6. Modelo Texturado 3D de una sola Imagen de Rango	50
4.7. Modelo Reconstruido con las vistas 0, 1, 2 y 3	51
4.8. Visibilidad del modelo a la Vista 0 y 2	51
4.9. Mapeo de Texturas Utilizando el Criterio de T́xel Óptimo	52
4.10. Ampliación de la Figura 4.9	52
4.11. Mapeo de Texturas Utilizando el Ponderado de Téxeles	53

4.12. Secuencia de Imágenes	55
4.13. Corrección del Color utilizando Gray - World - Gama Sistemas NTSC	55
4.14. Corrección del Color utilizando Gray - World - Gama Sistemas PAL y SECAM	56
4.15. Corrección del Color utilizando Gray - World - Gama Sistemas Actuales	56
4.16. Corrección del Color utilizando Constancia del color por Correlación	56
5.1. Análisis de Densidad - Modelo y Modelo Texturado	59
5.2. Análisis del Número de Texturados sobre Número de Puntos Visibles - Modelos y Texturas	61
5.3. Análisis de Número de Puntos Texturados sobre Número de Puntos visibles	61
5.4. Análisis de la Comparación de Contornos con Medida de Distancia	63
5.5. Extracción y Segmentación de la Proyección del Modelo y la Textura	63
5.6. Extracción del Contorno de la Figura 5.5	64
5.7. Transformación de Distancia de la Figura 5.6	64
5.8. Diferencia Absoluta de las Formas (Figura 5.5)	65
5.9. Región sombrilla	66
5.10. Cálculo de la Variación de la Curvatura	66
5.11. Definición de la Métrica de la Comparación de Variación de la Curvatura con Medida de Distancia 2	67
5.12. Análisis de la Comparación de Variación de la Curvatura del Modelo con los Bordes de la Textura utilizando Medida de Distancia	68
5.13. Extracción del Contorno de la Forma del Modelo y la Textura	68
5.14. Cálculo de la Curvatura y Proyección de la imagen de Bordes sobre el Modelo	69
5.15. Comparación de Variación de la Curvatura del Modelo con los Bordes de la Textura utilizando Medida de Distancia	69
5.16. Textura Compartida por la vista 0 y Vista 2	71
5.17. Ejemplo de Téxeles de Cada una de las Vistas	72
C.1. Efecto Gamma	C-2
C.2. Algoritmo Gray - World	C-3

C.3. Tres pasos para la construcción de la matriz de correlación. **(a)** Primero se caracteriza cuales de los colores de la imagen(cromaticidades) son posibles bajo cada iluminación de referencia. **(b)** Se usa la información para construir la distribución de probabilidad de cada luz. **(c)** Finalmente, se codifica esa distribución en columnas de la matriz. C-5

C.4. **(a)** Histograma de cromaticidad en la imagen.**(b)** Correlación de este vector v con cada columna de la matrix de correlación C-7

Índice de Tablas

1.1.	Características de la cámara CCD Sony DSC - F717	6
2.1.	Resultados con el Método <i>Tsai</i>	19
2.2.	Resultados con el Método <i>Tsai+</i> Optimización	19
2.3.	Resultados con el Método <i>The Gold Standard</i>	20
2.4.	Resultados con el Método <i>The Gold Standard</i> + Corrección Distorsión Radial	21
2.5.	Resultados con el Método de <i>Calibración Basado en Elipses</i>	22
2.6.	Métricas de Desempeño	22
5.1.	Métricas de Densidad	59
5.2.	Métricas de Número de Texturados sobre Número de Puntos Visibles	62
5.3.	Métricas de Desempeño	70
5.4.	Resultados de las Métricas de Correlación de Téxeles de Múltiples Vistas	72

Resumen

En este documento, se presenta un sistema para el mapeo de texturas a modelos de objetos del mundo real. La configuración del experimento consiste en el digitalizador 3D Minolta VIVID9i para la adquisición de imágenes de rango y la cámara CCD SONY DSC 717 para adquirir las imágenes de intensidad del objeto a texturar. Aunque el VIVID puede producir las imágenes de color así como la geometría 3D, se utilizó la cámara digital para tomar imágenes de alta calidad. La resolución de las imágenes adquiridas es de 2560×1920 .

El proceso del mapeo de texturas describe tres aproximaciones para la función de parametrización de una imagen de rango o el punto de vista de un modelo completamente reconstruido. El primero es una estimación inicial de la orientación de la cámara, la cual es calculada desde la selección interactiva de las correspondencias. La siguiente, la medida digital de la cámara es referenciada sobre el sensor de rango y los parámetros de cámara son estimados desde técnicas de calibración, utilizando un patrón de calibración; antes de la adquisición de los datos. El último, los parámetros desconocidos son calculados de forma precisa, minimizando una función objetivo en un registro 3D - 2D.

Se describe una estrategia del mapeo de texturas basada en múltiples vistas dirigida a problemas de la fotografía tales como iluminación no homogénea, brillos y oclusión. Para cada triángulo en el modelo, la imagen óptima es seleccionada desde las imágenes fuente con un promedio ponderado de los productos escalares entre el vector normal de la imagen y el vector normal del triángulo. Por último, se desarrolló una metodología donde algunas métricas son definidas para medir la calidad de la reconstrucción del modelo texturado.

Abstract

In this document we present a system for texture mapping of models of real world objects. Our experimental setup consists of the no contact 3D digitizer Minolta VIVID9i for range image acquisition and the camera CCD SONY DSC 717 to acquire of intensity images of the target object. Although VIVID can produce the color images as well as the 3D geometry, we utilize digital camera to get high quality images. The resolution of acquired images is 2560×1920 .

The mapping texture process describes three approaches to parameterization function by a range image or point of view of complete reconstruction model. The first is an initial estimate of the camera orientation, which is calculated from interactive selected point correspondences. The other, the measurement digital camera is mounted on the range sensor and camera parameters are estimated from calibration techniques, utilizing pattern calibration before data acquisition. The last one, the unknown parameters are accurately calculated by minimizing an objective function in a 3D-2D projective registration approach.

We describe a texture mapping strategy based on multi-view to adequately address photography related problems such as inhomogeneous lighting, highlights and occlusion. For each triangle in the model, the optimal image is select from source images with an average weighted the scalar product between the image normal vector and triangle normal vector. Finally, we develop a methodology where some metrics are defined to measure the quality of the reconstruction texture model.

Introducción

La visión por computador y la computación gráfica son dos campos que se han venido combinando gradualmente, dando como resultado la realidad virtual (VR) [11]. Más y más usos utilizan métodos de la visión por computador para construir modelos computacionales con datos de objetos y/o escenas reales. Los datos entonces, se procesan usando algoritmos de la computación gráfica para realizar la representación y construcción de los modelos [44, 45]. Las técnicas de reconstrucción 3D están divididas típicamente en dos grupos. El primero está compuesto por técnicas activas basadas en sensores de rango que miden la distancia directamente, entre el sensor y puntos en el mundo real [3, 54]. Las técnicas en el segundo grupo son pasivas y reciben la información 3D de varias secuencias de fotografías o video digital (como visión estéreo o fotogrametría) [5, 14, 15, 28, 48]. Una evaluación comparativa de la actuación de sistemas de visión 3D, activos y pasivos, se presenta en [52]. Cada una de estas técnicas tienen ventajas y limitaciones diferentes. Los sensores de rango proporcionan de forma directa los puntos 3D de forma precisa, con poca dependencia de las condiciones de iluminación externa y sin necesidad de una textura determinada. Sin embargo, ellos tienden a ser caros, lentos al adquirir y normalmente tienen una resolución espacial limitada. Por otro lado, las imágenes de intensidad tienen alta definición, lo cual permiten resultados muy exactos con objetos bien definidos. Ellos son fáciles de adquirir y proporcionan los mapas de textura basados en las fotografías reales de color. No obstante, la falta de relación directa entre las imágenes y profundidad del objeto modelado es un problema mayor para las técnicas basadas en intensidad. Por esta razón, las imágenes adquiridas necesitan ser ricas en información de textura y el conjunto de datos resultantes tendrán una densidad variante dependiendo de las imágenes de intensidad. Desafortunadamente, estos sensores son afectados por los cambios en la iluminación.

Como se puede observar la información de la imagen de rango y la imagen de intensidad es complemen-

taria [12]. Así, nuestro objetivo en este trabajo es combinarlos para compensar las limitaciones de cada sensor con las ventajas del otro. Un primer acercamiento puede ser la asignación de color a cada uno de los puntos del modelo 3D (color vértice) [34, 48], como se muestra en la Figura 1 . De esta forma, el color de la superficie de los triángulos se asigna con la interpolación lineal del color de cada uno de sus vértices. Cuando el número de triángulos es relativamente alto, la definición en la representación de color es buena (Figura 1(a)). No obstante, al disminuir el número de triángulos esta propiedad no se conserva (Figura 1(c)).



(a) N° de Triángulos = 71084 (b) N° de Triángulos = 35541 (c) N° de Triángulos = 3553

Figura 1: Asignación de Color por cada Vértice

Un acercamiento muy eficiente para mejorar la calidad de la representación de los modelos, es la asignación de una textura sobre los modelos computacionales de los objetos (Figura 2).

El *Mapeo de Texturas* es una técnica utilizada para incrementar el realismo y el detalle de los objetos tridimensionales. Esta técnica normalmente es el último paso de la reconstrucción de modelos computacionales, después del paso de integración [9]. Además, es una fase crucial en el mejoramiento de la calidad visual de modelos 3D de los objetos. Incluso puede compensar en parte las imposiciones geométricas en las reconstrucciones de los modelos 3D como concavidades ocultas que no pueden digitalizarse.



Figura 2: Mapeo de Texturas - Número de Triángulos 3553

Apreciación Global

En este trabajo, se presenta un acercamiento a la solución del problema del mapeo de texturas a modelos computacionales de objetos 3D. En el Capítulo 1 se muestra los fundamentos teóricos, el trabajo realizado y las condiciones generales de adquisición e implementación. El Capítulo 2 introduce el modelo y los métodos de calibración de cámara, los cuales son fundamentales en el proceso del mapeo de texturas. En el Capítulo 3 se presenta el diseño y la implementación de los métodos para la parametrización de la superficie, necesarios para el mapeo de la textura. El Capítulo 4 explica las condiciones de ensamble y la asignación de texturas a un modelo completo. En el Capítulo 5 se describe la metodología de evaluación planteada para cada uno de los métodos de textura presentados. Por último, se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

Contribuciones

- Aplicación de la calibración inversa para el mapeo de textura de alta precisión utilizando un patrón de calibración (Sección 3.2.2).
- Diseño e implementación de un método de mapeo de texturas, cuando la imagen de rango y de color son obtenidas desde diferentes sensores, sin alguna información que los relacione (Sección 3.3).

- Generación de una textura para un modelo completo por medio de un ponderado de téxeles basado en normales (Sección 4.2).
- Corrección de la iluminación por constancia color por correlación, para minimizar los problemas de brillos en los modelos completos (Sección 4.3).
- Diseño e implementación de una metodología de evaluación basada en criterios de un sólo punto de vista (Sección 5.3) y en múltiples vistas (Sección5.4).

Fundamentos Teóricos

1.1. Definición

El Mapeo de texturas consiste en rastrear y asignar una textura en toda la superficie del objeto de forma funcional [24,25]. Este mapeo se realiza a partir de las coordenadas x_0, y_0, z_0 del modelo computacional, donde se busca su correspondencia en la textura a rastrear, a este proceso se le denomina parametrización o registro de imágenes. La parametrización utiliza las coordenadas (u, v) en el modelo computacional y (t, s) en la textura a rastrear, dirección horizontal y vertical respectivamente, como un estándar en mapeo de texturas.

El mapeo se divide en dos principales ramas según el origen de la textura: *Texturas artificiales generadas por computador* y *Texturas reales adquiridas en la escena*.

- **Texturas artificiales generadas por computador (Figura 1.1(b)):** La ventaja de este acercamiento es que el proceso de generación de la textura está controlado con un alto nivel de exactitud y algunos problemas se pueden evitar o solucionar por lo menos durante el proceso de generación de la textura (tal como *aliasing* al mapear la textura sobre la superficie) [13, 18].
- **Texturas reales adquiridas en la escena (Figura 1.1(c)):** La ventaja de este acercamiento es que el nivel de realismo de las texturas es muy alto, puesto que se utilizan las texturas reales de los objetos [53, 62]. Sin embargo, el mapeo de las texturas encontradas en las imágenes no es fácil de realizarse, especialmente cuando la adquisición de las imágenes de color y la construcción del modelo geométrico no se unen firmemente [11, 65].

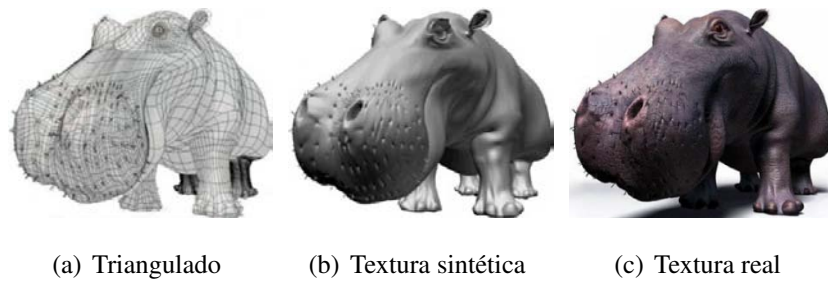


Figura 1.1: Ejemplo de Mapeo de Textura *Modelo*¹

1.2. Trabajo Realizado

Una variedad de técnicas son usadas para capturar modelos de objetos y escenas reales [3, 14, 62, 65], incluyendo CATs [5] y estructuras aplicadas al movimiento desde secuencias de video [38]. Este trabajo está dirigido a la adquisición de imágenes de rango (cada valor de píxel representa la profundidad) e imágenes de intensidad (cada valor de píxel representa el color o intensidad de la luz incidente). Los datos entonces, se procesan usando algoritmos de la computación gráfica para realizar la representación y construcción de los modelos [44, 45].

1.2.1. Texturas artificiales generadas por computador

La ventaja de este acercamiento es que el proceso de generación de la textura está controlado con un alto nivel de exactitud y algunos problemas se pueden evitar o solucionar por lo menos durante el proceso de generación de la textura (tal como *aliasing* al mapear la textura sobre la superficie) [18].

En [11], describen un paradigma para el mapeo de una textura en una escena compuesta sólo por polígonos. Además, determinan la selección de texturas en el caso de tener varias imágenes fuentes para el rastreo, según las direcciones de las caras visibles para la cámara y sus respectivas normales.

Por otra parte, la mayoría de las parametrizaciones para imágenes sintéticas utilizan una parametrización conformal. La parametrización de superficies conformal consiste en implementar una transformación en la cual se preserve la estructura angular, siendo intrínseco a la geometría, estable con respecto a

¹<http://www.3drender.com/jbirm/productions.html>

diferentes triangulaciones y pequeñas deformaciones [40]. Esta parametrización, puede ser usada para mapear alguna imagen planar sobre una superficie, normalmente género 0, y viceversa [56]. Mientras la parametrización a un plano es más natural para la ejecución del mapeo de texturas, este es menos natural para otras operaciones en la superficie, las cuales también requieren una parametrización. En [6] se presentan los fundamentos para la parametrización de una esfera. El primer trabajo de parametrización conformal global, ha sido presentado en [21,22], donde las bases de todas las posibles parametrizaciones son realizadas. En [40] se introducen algoritmos para la optimización de la parametrización global. El método es basado en la teoría de la superficie de Riemann y geometría diferencial.

1.2.2. Texturas reales adquiridas en la escena

La ventaja de este acercamiento es que el nivel de realismo de las texturas es muy alto, puesto que se utilizan las texturas reales de los objetos [53,62]. Sin embargo, el mapeo de las texturas encontradas en las imágenes no es fácil de realizarse, especialmente cuando la adquisición de las imágenes de color y la construcción del modelo geométrico no se unen firmemente [11,65].

Previamente se han desarrollado varias técnicas que tratan la reconstrucción del modelo 3D utilizando la textura. Sato, Wheeler y Ikeuchi en [63] reconstruyen las propiedades de reflectancia de los objetos del mundo real desde fotografías utilizando el modelo de *Torrance-Sparrow*. Ellos usan la misma cámara y la misma posición para adquirir las fotografías e imágenes de rango a partir de las cuales reconstruyen la geometría del modelo; por este motivo, un registro fotográfico no es necesario. Aunque los resultados son muy realistas, el proceso resulta trabajoso. Por ejemplo, para la adquisición de un jarrón cerámico se requirieron 120 fotografías, así como un sistema de adquisición de imagen especial con una sola fuente de luz, la cual debe ser calibrada previamente al proceso de adquisición. De igual forma, Pulli en [48] presenta un sistema de visión estéreo para la reconstrucción de la geometría y el color de una superficie desde un punto de vista determinado, adquiriendo la información de rango y la textura al mismo tiempo y de esta forma las imágenes de los dos sensores se encuentra alineadas completamente.

Muchos algoritmos intentan encontrar la transformación de la cámara minimizando el error entre el contorno de imagen de la textura y el contorno del modelo 3D proyectado [26,27,39,43]. El error se computa

como la suma de distancias entre varios puntos de muestreo de un contorno más cercanos al otro [39,43]. Matsushita y Kaneko en [39] describen un algoritmo para la selección del número mínimo de posiciones de cámara que pueden cubrir la superficie entera de un objeto dado; además, presenta el primer acercamiento del registro 3D-2D utilizando la información del contorno proyectado con el contorno de la textura. Ellos ajustan sólo los parámetros extrínsecos de la cámara, empleando un método iterativo de pequeños cambios graduales en los valores iniciales. Neugebauer y Klein en [43] formalizan en una función objetivo la métrica del error para ser minimizada por el algoritmo de Levenberg-Marquardt. Lensch, Heidrich y Seidel en [26,27] utilizan medida de distancia con la extracción de la silueta resultante entre la comparación de la forma de la textura y la forma del modelo proyectado utilizando una XOR píxel a píxel. La función a minimizar emplea el método *Downhill Simplex* el cual es una optimización no lineal.

Otros acercamientos, se enfocan en el mapeo de textura a modelos de ambientes urbanos [8,17,36,49,54,55,61]. El problema del registro de imágenes de textura, consiste en encontrar los segmentos de líneas 3D en el modelo, proyectándolos e igualándolos con los segmentos de línea en las imágenes, las cuales son propias de la geometría en la representación de la ciudad. La función para encontrar los parámetros de la cámara se basan en la distancia entre los segmentos líneas de los dos sensores.

Bendels en [19], Kurazume en [50], Sequeira en [51], Beraldin en [30] y Dias en [12] encuentran correspondencias entre la imagen de intensidad y la imagen de rango utilizando el mapa de reflectancia que provee el digitalizador 3D a la hora de la adquisición. Al establecer las parejas de correspondencias se utiliza el método de calibración de Tsai [58,59] o alguna técnica de calibración estándar.

Umeda en [35] calcula la matriz de la cámara utilizando restricciones de gradiente entre la intensidad de la imagen de rango y la imagen de color; y de esta forma se obtiene una ecuación lineal, con la cual se obtienen las estimaciones de los parámetros extrínsecos e intrínsecos.

Mapeo de Texturas desde Múltiples Vistas

La mayoría de las aplicaciones reales requieren la adquisición de múltiples vistas o poses del objeto, para obtener la información de rango y de textura completa. En este proceso, la información de textura puede estar redundante y a su vez traslapada. Por lo que se generan diferentes técnicas para seleccionar

la mejor textura a mapear sobre el objeto.

Yong y Subbarao en [53] y Bernardini en [15] sugieren que para cada triángulo de la superficie del objeto, se encuentre el mejor punto de vista desde todas las direcciones. El mejor punto es seleccionado basado en el coseno del ángulo entre la normal del vértice y las direcciones de las diferentes vistas. Si los tres vértices de la cara del triángulo mapean el mismo punto de vista, la textura del triángulo corresponde a la imagen de ese punto de vista. Si los vértices mapean diferentes puntos de vista las texturas se interpolan usando las coordenadas del baricentro del triángulo. Yemez y Schmitt en [62] proponen una estrategia para la asignación de la textura óptima para cada superficie del triángulo del modelo construido, haciendo uso de las fotografías a color disponibles del objeto. El criterio para seleccionar la imagen óptima, es la imagen que presente el eje óptico tan paralelo con la normal del triángulo.

1.3. Adquisición

La escena de adquisición está constituida por el escáner de rango, la cámara CCD y el objeto a digitalizar, como se observa en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Escena de Adquisición

1.3.1. Escáner de Rango

El escáner de rango que poseé la Universidad Nacional de Colombia, es el digitalizador 3D no invasivo VIVID 9i de Konica Minolta. El VIVID 9i es basado en la triangulación de un láser ². Una cámara CCD recibe la luz reflejada desde la superficie. Las medidas de la superficie del objeto son obtenidas mediante triangulación y convertidas a una malla de polígonos (Figura 1.3). El VIVID 9i obtiene máximo 640×480 puntos por cada rastreo, adquiriendo simultáneamente la superficie y los datos de color de los puntos.

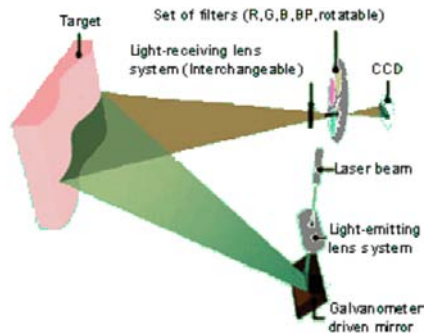


Figura 1.3: Método de Triangulación

1.3.2. Cámara CCD

En la adquisición de texturas se utilizaron dos cámaras CCD, la cámara CCD del escáner de rango y la cámara CCD Sony DSC - F717. Las características de la cámara CCD Sony DSC - F717 se observan en la Tabla 1.1.

Resolución Máxima	2560 × 1920
Número de foto detectores (sensor)	5.2 millones
Píxeles efectivos (sensor)	4.9 millones
Tamaño del sensor	2/3" (8,8 × 6,6mm)
Formatos	TIFF (Sin Compresión) y JPEG (Con Compresión)
Niveles de Calidad	Fino y Estándar

Tabla 1.1: Características de la cámara CCD Sony DSC - F717

²<http://konicaminolta.com/products/vivid/vivid9i/Features.html>

1.4. Implementación General

Los algoritmos que se presentan en cada una de los capítulos fueron desarrollados bajo el lenguaje C++. Durante el trabajo se desarrolló una plataforma para la visualización de los resultados (Figura 1.4). Esta plataforma se encuentra implementada utilizando la librería Qt, la visualización de los modelos se realizó usando la librería OpenGL. Algunas librerías adicionales necesarias para el buen funcionamiento de la plataforma son:

- MINPACK [<http://www.netlib.org/minpack>].
- TNT: Template Numerical Toolkit - Linear Algebra Module [math.nist.gov/tnt].
- levmar: Levenberg-Marquardt nonlinear least squares algorithms in C/C++ [<http://www.ics.forth.gr/lourakis/levmar>].
- ANN: Approximate Nearest Neighbors [<http://www.cs.umd.edu/mount/ANN>].

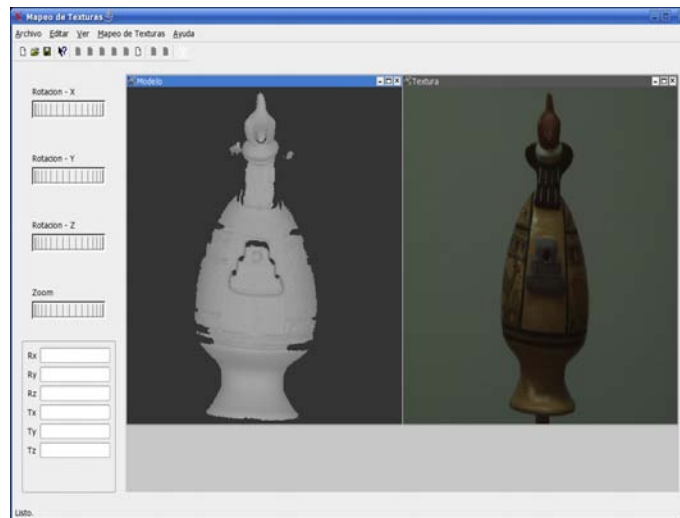


Figura 1.4: Plataforma Implementada

El sistema donde se desarrollaron los algoritmos es un computador personal con procesador Pentium M de 2 GHz, 1Gb de memoria RAM, una tarjeta aceleradora de video nVidia GForce 6800 de 256Mb.

Calibración de Cámara

2.1. Introducción

La cámara es la herramienta principal para conseguir la información 3D en la visión por computador. La visión basada en los sistemas con cámara deben determinar los parámetros de esta, mediante el proceso de calibración. La calibración de cámara es especialmente crucial para los usos que implican métricas cuantitativas a partir de una imagen tales como, medidas dimensionales, profundidad, o movimiento de las mismas. El proceso busca determinar las características geométricas y ópticas, junto con la posición y orientación en el mundo para establecer la conexión entre la posición del píxel de la imagen y un punto de la escena. En este capítulo se muestra el modelo de cámara pinhole (Sección 2.2); además, se estudian dos métodos de calibración de cámara a partir de correspondencias $R^3 \leftrightarrow R^2$ y un método que utiliza propiedades geométricas (Sección 2.3). Finalmente, presenta la implementación y los resultados (Sección 2.4).

2.2. Modelo de Cámara

Una cámara realiza una transformación R^3 hacia R^2 , donde un conjunto de puntos en el espacio (\mathbf{x}) es mapeado a un punto en un plano (\mathbf{X}). El modelo de cámara más utilizado para estimar la transformación es el modelo pinhole (Figura 2.1). Donde (x_w, y_w, z_w) es el sistema 3D coordenado del mundo, (x, y, z) es el sistema 3D coordenado de la cámara, C es el centro de proyección llamado centro de cámara o centro óptico y el plano de la imagen es el plano focal donde la componente de profundidad z es igual a la distancia focal f . Esta transformación de espacios $R^3 \leftrightarrow R^2$ está determinada por los parámetros tanto

extrínsecos como intrínsecos, de la cámara. Los parámetros extrínsecos determinan la transformación de cuerpo rígido del espacio coordenado del mundo al espacio de la cámara (Ec. 2.1).

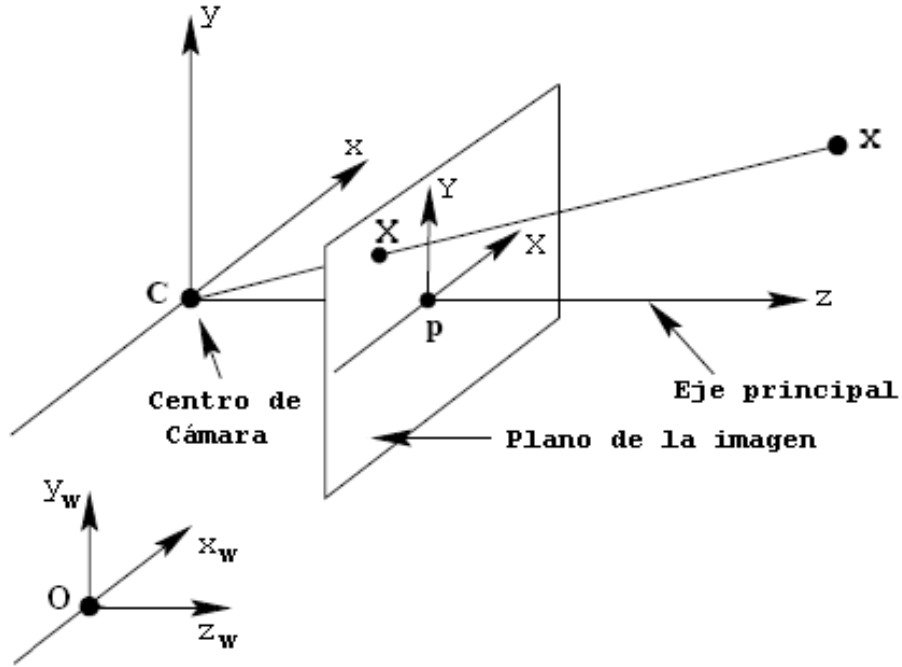


Figura 2.1: Modelo de Cámara

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + [T] \quad (2.1)$$

donde, $R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ es la matriz de rotación y $T(t_x, t_y, t_z)$ es el vector de traslación. La transformación desde el sistema 3D coordenado de la cámara (x, y, z) a la imagen (X, Y) , se rige por los parámetros intrínsecos de la cámara. Una primera aproximación se presenta con una transformación de perspectiva, establecida por la distancia focal (Ec. 2.2).

$$\begin{cases} X = \frac{fx}{z} \\ Y = \frac{fy}{z} \end{cases} \quad (2.2)$$

Sin embargo, una cámara de CCD sugiere la utilización de un modelo más completo, que reúna información de la manufactura de la cámara y del sensor CCD. De esta forma, la transformación está determinada

por la Ec. 2.3.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fm_x & 0 & m_x p_x & 0 \\ 0 & fm_y & m_y p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

donde,

- f : es la distancia focal.
- m_x, m_y : son el número de píxeles por unidad de distancia.
- p_x, p_y : las coordenadas del punto principal en la imagen.

No obstante, cada método de calibración presenta su propio acercamiento de los parámetros intrínsecos; por esta razón, serán tratados más a fondo en la Sección 2.3.

2.2.1. Modelo de Cámara con distorsiones

El modelo presentado en la sección 2.2, supone que la óptica de los lentes de la cámara es perfecta. Los defectos de los lentes son de dos tipos: cromáticos y geométricos [47]. Los defectos geométricos describen la divergencia entre las posiciones observadas e ideales de la imagen de un punto del espacio y están representadas por la Ec. 2.4.

$$\begin{aligned} X^d &= X + \delta_X(X, Y) \\ Y^d &= Y + \delta_Y(X, Y) \end{aligned} \quad (2.4)$$

donde,

- X^d, Y^d : son las coordenadas correspondientes actuales, con distorsión.
- X, Y : son las coordenadas ideales.
- $\delta(X, Y)$: es la función de distorsión.

Tres tipos de distorsiones geométricas son las consideradas por J. Weng, P. Cohen, y M. Herniou en [32]. Estas distorsiones son representadas por series numéricas, las cuales deben ser acotadas para su posible implementación y estabilidad numérica. La primera distorsión que se presenta es el descentrado de los lentes con relación al eje principal, descrita por la Ec 2.5. Esta distorsión se presenta por la incorrecta posición de los lentes en el ensamblado de la cámara.

$$\begin{cases} \delta_{Xd} = p_1 (3X^2 + Y^2) + 2p_2XY + O [(X, Y)^4] \\ \delta_{Yd} = 2p_1XY + p_2 (X^2 + 3Y^2) + O [(X, Y)^4] \end{cases} \quad (2.5)$$

La distorsión provocada por pequeños errores entre el paralelismo de los lentes causada en la manufacturación de la cámara se debe tener en cuenta. Este tipo de distorsión se puede modelar adecuadamente por la adición de un prisma fino al sistema óptico, causando cantidades adicionales de distorsiones radiales y tangenciales descritas por la Ec 2.6.

$$\begin{cases} \delta_{Xp} = s_1 (X^2 + Y^2) + O [(X, Y)^4] \\ \delta_{Yp} = s_2 (X^2 + Y^2) + O [(X, Y)^4] \end{cases} \quad (2.6)$$

La distorsión radial Ec. 2.7 causada por la propiedades ópticas de los lentes. Este tipo de distorsión generalmente es la más importante a comparación de las distorsiones anteriores.

$$\begin{cases} \delta_{Xr} = k_1X (X^2 + Y^2) + O [(X, Y)^5] \\ \delta_{Yr} = k_2Y (X^2 + Y^2) + O [(X, Y)^5] \end{cases} \quad (2.7)$$

2.3. Métodos de Calibración

Existen diferentes métodos para realizar el cálculo de los parámetros de la cámara. Las técnicas más comunes usan un conjunto de puntos correspondientes entre la imagen y el mundo real, mientras otras utilizan las propiedades geométricas de los elementos proyectados en la imagen.

2.3.1. Método 1: Algoritmo Tsai

El método es presentado por Tsai en [58, 59], su mayor ventaja es que tiene en cuenta la información de la distorsión radial. Sin embargo, la principal desventaja de este método es que utiliza unos datos propios

de manufactura de la cámara que normalmente no viene especificados por el fabricante. Estos datos los utiliza para hallar la distancia focal f , y el factor de incertidumbre de escala s_x .

El acercamiento de los parámetros intrínsecos de la cámara y la transformación desde el sistema 3D coordenado de la cámara (x, y, z) a la imagen (X, Y) está descrita por la transformación de perspectiva (Ec. 2.2), seguida de la distorsión radial (Ec. 2.4, Ec. 2.7). Finalmente, tiene en cuenta los parámetros de fabricación de la cámara, como lo muestra la Ec. 2.8.

$$\begin{cases} X^f = s_x \frac{N_{fx}}{d_x N_{cx}} X^d + C_x \\ Y^f = \frac{1}{d_y} Y^d + C_y \end{cases} \quad (2.8)$$

donde,

- (C_x, C_y) : son el número de filas y columnas del centro de la imagen.
- (d_x, d_y) : es la distancia de centro a centro entre elementos adyacentes del sensor en la dirección X y Y respectivamente.
- N_{cx} : es el número de elementos del sensor en la dirección X .
- N_{fx} : es el número de píxeles de la imagen en la dirección X .
- s_x : es el factor de incertidumbre en la escala de la imagen.

El cálculo de los parámetros se desarrolla en el Algoritmo 4,5 presentes en el Anexo B. Este método puede ser complementado con un algoritmo de optimización como Levenberg-Marquardt.

2.3.2. Método 2: Algoritmo *The Gold Standard*

Este algoritmo es una mejora del algoritmo DLT (Transformación Lineal Directa) desarrollado por Abdel-Aziz y Karara [1]. Este método supone que la óptica de la cámara es perfecta y no tiene en cuenta ningún tipo de la distorsión.

Para estimar el modelo de la cámara, sólo basta con calcular la matrix P que mapea el espacio 3D x a la imagen 2D X (Ec.2.9).

$$X = Px \quad (2.9)$$

La matriz P para una cámara finita está representada por:

$$P = K \left[R \mid T \right] = K \left[R \mid -R\tilde{C} \right] = \left[M \mid -M\tilde{C} \right] \quad (2.10)$$

donde, K es la matriz de calibración de la cámara, la cual define los parámetros internos de la misma (Ec. 2.11).

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & X_0 \\ 0 & \alpha_y & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

donde,

- α_x y α_y : es el factor de escala en la dirección de la coordenada X y Y respectivamente.
- s : es el skew, inclinación del sensor (normalmente 0).
- $(X_0, Y_0)^T$: son las coordenadas del punto principal.

Las matrices K y R son halladas a través de la descomposición matricial RQ de la matriz M . La descomposición RQ, encuentra dos matrices, tal que R sea una matriz triangular superior y Q sea un matriz normalizada. Además, es posible inferir el centro de cámara $C = [C_x, C_y, C_z, C_t]'$, el cual está dado por:

$$\begin{aligned} C_x &= \det([p_2, p_3, p_4]) & C_y &= -\det([p_1, p_3, p_4]) \\ C_z &= \det([p_1, p_2, p_4]) & C_t &= -\det([p_1, p_2, p_3]) \end{aligned}$$

\tilde{C} es obtenido a partir de C homogéneo como $\tilde{C} = [x/t, y/t, z/t]$.

El cálculo de la matriz P (Algoritmo 1) se realiza seleccionando el mayor número de puntos correspondientes (mínimo 6), entre la imagen planar y el espacio tridimensional. Por este motivo y facilidad de cálculo se utilizó un patrón de calibración para establecer dichas correspondencias.

Algoritmo 1 Algoritmo *The Gold Standard* [23]

Entrada: $n > 6$ de correspondencia entre $X_i \leftrightarrow x_i$

Salida: Matriz P .

- 1: **NORMALIZACIÓN:** Hallar las matrices de normalización T y Q de cada uno de los n puntos X y x , respectivamente. Normalizar las coordenadas en cada uno de los espacios de forma independiente y hallar \bar{X} y \bar{x} .
- 2: **DLT:** Para cada correspondencia $\bar{X}_i \leftrightarrow \bar{x}_i$ construir la matriz \bar{A}_i . Construir la matriz \bar{A} de $(2n \times 12)$ a partir de las n matrices \bar{A}_i . Obtener la descomposición en valores singulares de \bar{A} . El vector singular asociado al menor valor singular, será la solución \bar{p} . La matriz \bar{P} se determina a partir de \bar{p} por filas.

$$A_i = \begin{bmatrix} 0^T & -x_i^T & y_i X_i^T \\ x_i^T & 0^T & -x_i X_i^T \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} P^1 \\ P^2 \\ P^3 \end{pmatrix}$$

- 3: **MINIMIZACIÓN DEL ERROR GEOMÉTRICO:** Usando la estimación lineal como punto inicial, se minimiza el error geométrico: $\sum_i d(\bar{X}_i, \bar{P}\bar{x}_i)^2$, sobre \bar{P} , se utiliza un algoritmo iterativo.
 - 4: **DESNORMALIZACIÓN:** $P = T^{-1}\bar{P}Q$
-

Matrices de Normalización

Para este caso en particular, cabe aclarar que la normalización para las coordenadas espaciales debe ser tal, que la mayor distancia en el espacio (x) sea $\sqrt{3}$ y en el plano (X) $\sqrt{2}$. Esta normalización es realizada para evitar el problema computacional de las matrices dispersas (Algoritmo 2).

Corrección de la Distorsión Radial

Aunque este método no tiene en cuenta la distorsión radial de los lentes, como el método de Tsai (Sección 2.3.1), en este trabajo se presenta una etapa adicional para la corrección de dicha distorsión al inicio del algoritmo ya presentado. La corrección se realiza sobre cada uno de los puntos de la imagen, con un valor de κ determinado, utilizando el Algoritmo 6 presente en el Anexo B. Además, es necesario conocer el tamaño del sensor y la resolución de la imagen a corregir, para realizar la transformación de coordenadas de la imagen al sensor y viceversa.

Algoritmo 2 Cálculo de las matrices normalización (T y Q).

Entrada: Nube de puntos x o X

Salida: Matrices de Normalización T y Q .

- 1: Sea en x o X se calcula la media de cada una de la componentes.
- 2: Hallar la máxima distancia euclídea entre la media y toda la nube de puntos.
- 3: Se calcula la matriz de normalización:

$$T = \frac{1}{d_{\text{máx}}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -X_{\text{mean}} \\ 0 & 1 & -Z_{\text{mean}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q = \frac{1}{d_{\text{máx}}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{\text{mean}} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{\text{mean}} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{\text{mean}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3.3. Método 3: Calibración de Cámara basado en Elipses

El método de calibración utiliza las propiedades geométricas de las cónicas, que presenta una cónica o una cuádrica en el espacio proyectada sobre la imagen; donde la cónica a estudiar será una elipse. Un primer acercamiento lo realiza Tarel en [57] y Daucher en [42]. Una de las ventajas de este método es que los contornos de las elipses pueden encontrarse con mayor precisión a comparación de los puntos correspondientes.

El acercamiento de los parámetros intrínsecos de la cámara y la transformación desde el sistema 3D coordenado de la cámara (x, y, z) a la imagen (X, Y) está descrita por la Ec. 2.3 y Ec. 2.1.

Caracterización de la Elipse

La forma normal de una elipse está descrita por la Ec. 2.12; a pesar de ello, esta representación es muy ideal para el caso de estudio, por esta razón se utiliza la representación general o ecuación implícita de la cónicas(Ec. 2.13).

$$\frac{(X)^2}{a_x^2} + \frac{(Y)^2}{a_y^2} = 1 \tag{2.12}$$

$$AX^2 + 2BXY + CY^2 + 2DX + 2EY + F = 0 \tag{2.13}$$

De igual forma, la ecuación implícita (Ec. 2.13) se puede representar de forma matricial (Ec. 2.14), con el fin de que quede representada en coordenada homogéneas.

$$\begin{bmatrix} X & Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = [X]^T [C] [X] = 0 \quad (2.14)$$

Sobre cada elipse se determina el borde, utilizando alguna técnica de contorno. Para cada píxel que pertenece al borde, se normaliza con una matriz T ($\hat{X} = TX$) y se genera el vector \hat{A}_i (Ec. 2.15). Por último, se soluciona la matriz \hat{A} creada de vectores \hat{A}_i utilizando SVD.

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_i^2 & \hat{X}_i \hat{Y}_i & \hat{Y}_i^2 & \hat{X}_i & \hat{Y}_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A} \\ \hat{B} \\ \hat{C} \\ \hat{D} \\ \hat{E} \\ \hat{F} \end{bmatrix} = A_i [X] = 0 \quad (2.15)$$

Al utilizar la solución por descomposición de valores singulares (SVD), se asegura la mejor elipse que minimiza el error cuadrático medio. A continuación, se desnormaliza la solución, utilizando Ec. 2.16.

$$\begin{bmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{bmatrix} = [T]^T \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} & \hat{D} \\ \hat{B} & \hat{C} & \hat{E} \\ \hat{D} & \hat{E} & \hat{F} \end{bmatrix} [T] \quad (2.16)$$

La proyección de la cónica C de la imagen en el espacio a partir de una matriz de cámara P , da como resultado una cónica en un plano infinito, comúnmente llamada cónica absoluta o cuádrica cónica Q_{co} (Figura 2.2).

El cálculo de los parámetros de cámara se determina utilizando el Algoritmo 3 utilizando la caracterización de cada elipse.

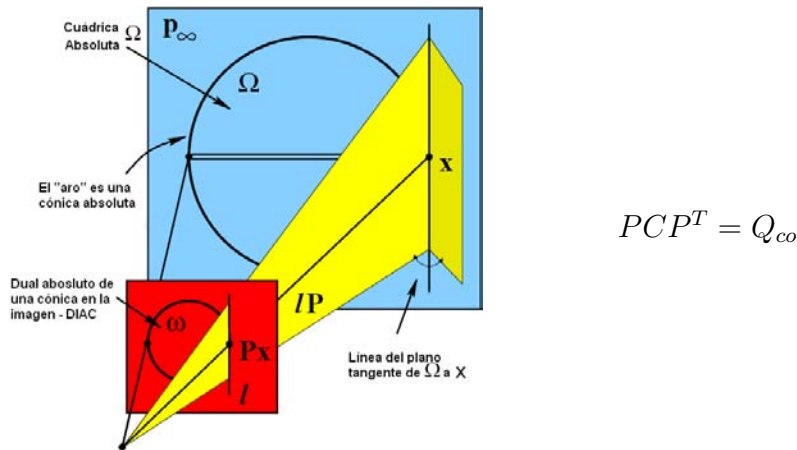


Figura 2.2: Proyección de una cónica en el espacio

Algoritmo 3 Algoritmo de calibración basado en Elipses

Entrada: Imagen Segmentada

Desde $i = 1$ hasta $N_{Elipses}$ **Hacer**

1: Cálculo de la cónica en el espacio Q_{abs}

$$Q_i = [R] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_i \\ 0 & 1 & 0 & -y_i \\ 0 & 0 & 0 & -z_i \\ -x_i & -y_i & -z_i & x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - r^2 \end{bmatrix} [R^T]$$

donde, R es una matriz de rotación del patrón de calibración

2: Caracterización de las elipses i .

$$C_i = \begin{bmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{bmatrix}$$

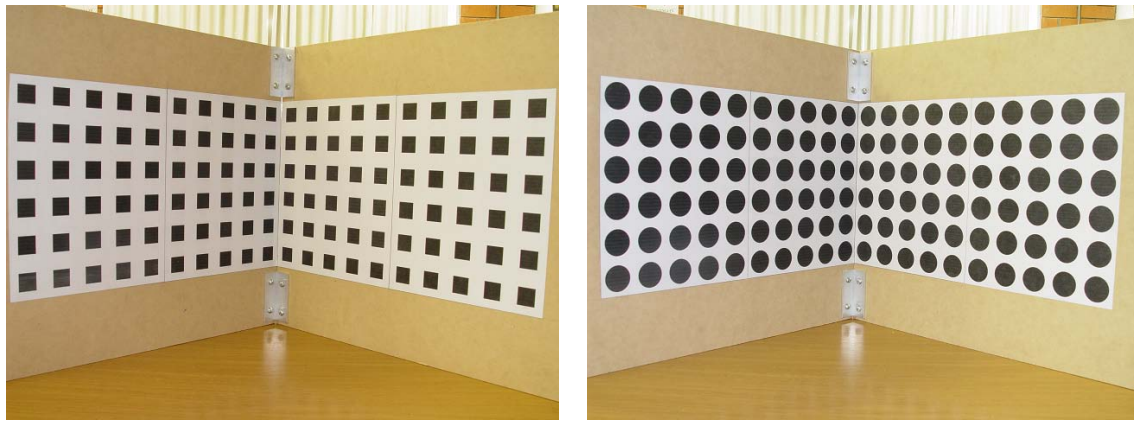
3: Calcule P tal que;

$$\text{mín} \{PC_iP^T - Q_i\}$$

Fin Desde

2.4. Implementación y Resultados

El patrón de calibración (Figura 2.3) consiste en dos láminas unidas formando un ángulo de 90° entre ellas. El fondo de la lámina es de color blanco para lograr un alto contraste entre las figuras y el fondo. El Patrón N°1 (Figura 2.3(a)) contiene una serie de cuadrados negros de $2 \times 2 \text{ cm}$ y separados entre ellos 2 cm y el Patrón N°2 (Figura 2.3(b)) contiene una serie de círculos negros de diámetro 3 cm y separados 4 cm entre centro y centro. El Patrón N°1 se utilizó para el método *Tsai* y *The Gold Standard*, mientras el Patrón N°2 se utilizó para el método *basado en elipses*.



(a) Patrón con Cuadrados

(b) Patrón con Círculos

Figura 2.3: Patrones de Calibración

La cámara a calibrar es la cámara CCD Sony DSC - F717 cuyas características se observan en la Tabla 1.1. Las imágenes fueron adquiridas con la mayor resolución disponible, en formato TIFF y un nivel de calidad Fino, con el fin de evitar alguna pérdida de información en la etapa de adquisición.

2.4.1. Método 1: Algoritmo *Tsai*

Utilizando las características de la cámara descritas por el fabricante en la Tabla 1.1 y las condiciones de adquisición, se analizó el algoritmo de *Tsai*; se utilizaron un total de 480 correspondencias entre el mundo y la imagen. Dando como resultado la Tabla 2.1.

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA		
PARÁMETROS EXTRÍNSECOS		
Matriz de Rotación (R)	\angle Rotación ($R_{x,y,z}$ [°])	Traslación (T [mm])
$\begin{bmatrix} 0,999571 & 0,029217 & 0,002231 \\ 0,028906 & -0,995665 & 0,088401 \\ 0,004804 & -0,088299 & -0,996082 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 174,934196 \\ -0,275234 \\ 1,656420 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -7,935002 \\ 78,58245 \\ 915,6349 \end{bmatrix}$
PARÁMETROS INTRÍNSECOS		
$f = 9,918876[mm]$		$C_x = 1280[px]$
$\kappa_1 = 1,968921e - 03[1/mm_2]$		$C_y = 960[px]$
$s_x = 0,994869$		

Tabla 2.1: Resultados con el Método Tsai

El método de Tsai puede ser mejorado utilizando una rutina de optimización. Para este algoritmo se utilizó la librería **MINPACK**, la cual presenta una optimización por Levenberg-Marquardt. Los resultados de este método optimizado se observan en la Tabla 2.2.

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA		
PARÁMETROS EXTRÍNSECOS		
Matriz de Rotación (R)	\angle Rotación ($R_{x,y,z}$ [°])	Traslación (T [mm])
$\begin{bmatrix} 0,999558 & 0,028042 & -0,009846 \\ 0,028799 & -0,995730 & 0,087705 \\ -0,007345 & -0,087950 & -0,996098 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -174,954206 \\ 0,420814 \\ 1,650313 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,276470 \\ 79,575691 \\ 928,092130 \end{bmatrix}$
PARÁMETROS INTRÍNSECOS		
$f = 10,057403[mm]$		$C_x = 1240,939773[px]$
$\kappa_1 = 1,688628e - 03[1/mm^2]$		$C_y = 956,550074[px]$
$s_x = 0,995972$		

Tabla 2.2: Resultados con el Método Tsai+ Optimización

2.4.2. Método 2: Algoritmo *The Gold Standard*

Como el método presenta en gran parte operaciones matriciales, se utilizó la librería de matrices **TNT** *Template Numerical Toolkit*, la cual cuenta con operaciones y descomposiciones matriciales necesarias en el algoritmo. Se utilizaron un total de 480 correspondencias entre el mundo y la imagen para el análisis de este método. Dando como resultado de calibración la Tabla 2.3.

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA		
PARÁMETROS EXTRÍNSICOS		
Matriz de Rotación (R)	\angle Rotación ($R_{x,y,z} [^\circ]$)	Traslación ($T [mm]$)
$\begin{bmatrix} -0,999552 & 0,028673 & 0,008546 \\ -0,029285 & -0,996101 & 0,083212 \\ 0,0061267 & -0,083425 & -0,996495 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 168,4200 \\ 0,0177967 \\ -0,372249 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2,890970 \\ 83,33699 \\ 1015,156 \end{bmatrix}$
PARÁMETROS INTRÍNSECOS		
$\alpha_x = 3216,894804 \quad x_0 = 1245,27061 [pix]$		
$\alpha_y = 3221,684971 \quad y_0 = 945,00309 [pix]$		
$s_x = 0,998513$		

Tabla 2.3: Resultados con el Método *The Gold Standard*

Corrección de la distorsión radial

Utilizando el valor de κ calculado por el método de *Tsai* con Optimización, se realizó la corrección radial de la Imagen del Patrón N°1 (Figura 2.3), dando como resultado la Figura 2.4. A partir de la Imagen corregida, se utilizó el método simple, dando como resultado de calibración la Tabla 2.4.

2.4.3. Método 3: Calibración de Cámara basado en Elipses

Para el análisis de este método se utilizaron una total de 120 elipses. Para estimar las cónicas en el espacio se usó una matriz de rotación sobre el eje y a través del plano xz , con un ángulo de rotación de 45° , sentido horario. Finalmente, la calibración de la cámara utilizando este método se muestra en la Tabla 2.5.

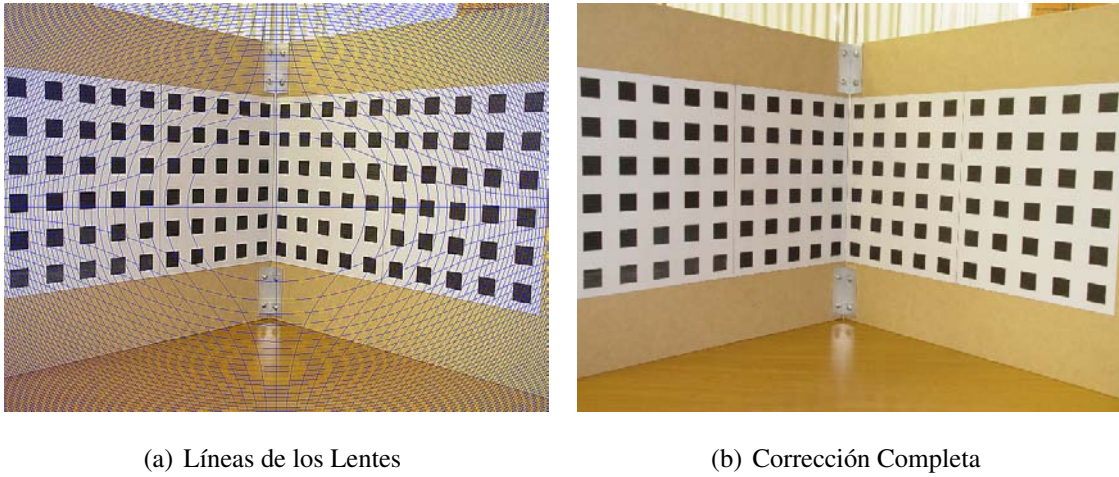


Figura 2.4: Corrección de la Distorsión Radial

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA		
PARÁMETROS EXTRÍNSICOS		
Matriz de Rotación (R)	\angle Rotación ($R_{x,y,z} [^\circ]$)	Traslación ($T [mm]$)
$\begin{bmatrix} -0,999564 & 0,028848 & 0,006229 \\ -0,029304 & -0,995189 & 0,093487 \\ -0,003502 & -0,09362 & -0,995601 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 167,3324 \\ 0,0191509 \\ -0,788066 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,173044 \\ 73,85577 \\ 948,5940 \end{bmatrix}$
PARÁMETROS INTRÍNSECOS		
$\alpha_x = 2983,766180 \quad x_0 = 1254,0939 [pix]$		
$\alpha_y = 2995,915592 \quad y_0 = 974,7558 [pix]$		
$s_x = 0,995944$		

Tabla 2.4: Resultados con el Método *The Gold Standard* + Corrección Distorsión Radial

2.4.4. Métricas de Desempeño

Las métricas utilizadas son los momentos estadísticos de orden 1 y 2 de la distancia euclídea de los puntos reales y los puntos proyectados con la matriz de cámara calculada 2.17.

$$\sum_i d(\bar{X}_i, \bar{P}\bar{x}_i)^2 \tag{2.17}$$

Los resultados obtenidos con cada uno de los métodos se presentan en la Tabla 2.6. Para ésta cámara los

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA					
PARÁMETROS EXTRÍNSICOS					
Matriz de Rotación (R)			\angle Rotación ($R_{x,y,z}$ [°])	Traslación (T [mm])	
$\begin{bmatrix} -0,998657 & -0,029359 & 0,086116 \\ 0,029976 & -0,995186 & 0,083409 \\ -0,0061267 & -0,083628 & -0,995601 \end{bmatrix}$			$\begin{bmatrix} 167,3348 \\ 0,017780 \\ -0,372249 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1,287604 \\ 109,2021 \\ 951,1916 \end{bmatrix}$	
PARÁMETROS INTRÍNSECOS					
$\alpha_x = 3219,718561 \quad C_x = 1246,319086[\text{pix}]$					
$\alpha_y = 3008,178938 \quad C_y = 945,458778[\text{pix}]$					
$s_x = 1,0703214$					

Tabla 2.5: Resultados con el Método de *Calibración Basado en Elipses*

mejores resultados se presentaron con el método de calibración *The Gold Standard* con corrección radial seguido del método de Tsai con optimización.

MÉTRICA	MÉTODOS DE CALIBRACIÓN DE CÁMARA			
	<i>The Gold Standard (TGS)</i>	<i>TGS + Corr. Rad.</i>	<i>Tsai</i>	<i>Tsai + Opt.</i>
$\mu_{Error-Imagen}[\text{pix}]$	2.153421	1.785467	2.096615	1.807072
$\sigma_{Error-Imagen}[\text{pix}]$	1.371710	1.049990	1.448014	1.025394
$MAX_{Error-Imagen}[\text{pix}]$	7.832521	6.336411	9.402936	6.644138

Tabla 2.6: Métricas de Desempeño

El mejor resultado se presenta con el método *The Gold Standard* utilizando corrección radial de lo lentes, con una distancia de error promedio de 1,785467.

En la Tabla 2.6, no se hace la comparación del método basado en elipses, por que la medida a minimizar en este método fue la proyección de la cónica en el espacio y no la distancia en píxeles utilizados por los otros métodos. Sin embargo, las medidas del error relativo obtenidas son: $\mu = 0,0043198$, $\sigma = 0,0062997$, $MAX = 0,047329$.

2.5. Conclusiones

Los algoritmos de calibración de cámaras analizados son estables y tienen resultado aceptable, al analizar las diferencias al momento de reprojectar la ubicación de los puntos en la imagen. Los parámetros resultantes de la calibración: extrínsecos e intrínsecos resultan un poco variados según el procedimiento y las condiciones de distorsión que se utilizaron para obtenerlos. En conclusión, los resultados que usan la distorsión del lente son los que presentan los mejores resultados en las métricas de evaluación.

Mapeo de una Textura a una Imagen de Rango

3.1. Introducción

En este capítulo se describe la fusión de la información de rango con la imagen de la cámara. Estos dos sensores entregan información de cualidades de diferente naturaleza. Mientras que el sensor de rango provee la distancia entre el punto sentido y su centro de proyección, la imagen capturada por la cámara muestra la iluminación emitida desde los puntos en la escena [60]. Esta fusión de información entre estos dos sensores requiere el conocimiento de los parámetros de la cámara (Capítulo 2).

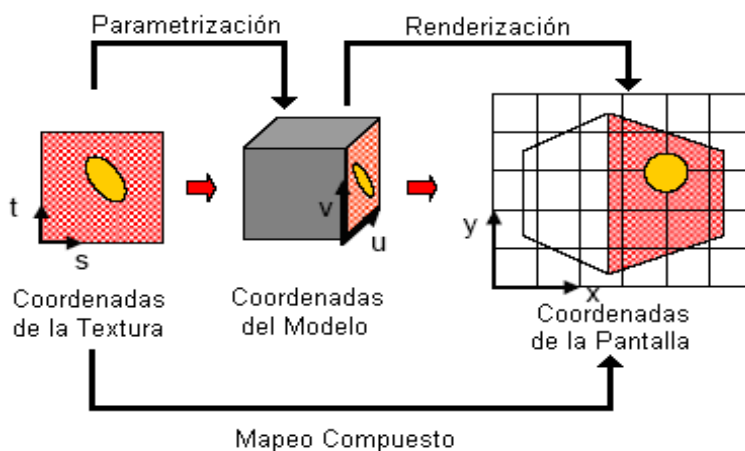


Figura 3.1: Parametrización y Renderización

A partir de una nube de puntos en el espacio, obtenida en un proceso de adquisición de imágenes de rango [3, 14, 62], se genera un modelo computacional utilizando la representación en polígonos [37, 44] o una superficie paramétrica (NURBS, B-Splines, etc) [10, 45, 46]. Desde las coordenadas de los vértices

del modelo computacional se busca su correspondencia en la textura a rastrear; a este proceso se le denomina **parametrización de superficie** (Figura 3.1). La parametrización utiliza las coordenadas (u, v) en el modelo computacional y (t, s) en la textura a rastrear, dirección horizontal y vertical respectivamente, como un estándar en mapeo de texturas [7].

Cuando se realiza el mapeo de texturas sobre un modelo representado por polígonos, exactamente triángulos, las coordenadas de cada vértice identifican un elemento de una textura en la imagen, llamado *téxel*. El *téxel* representa un patrón determinado en una región de una textura. De esa forma la textura no se rastrea vértice a vértice (color a color), sino triángulo a triángulo (*téxel* a *téxel*). El proceso descrito para un modelo representado por triángulos se observa en la Figura 3.2.

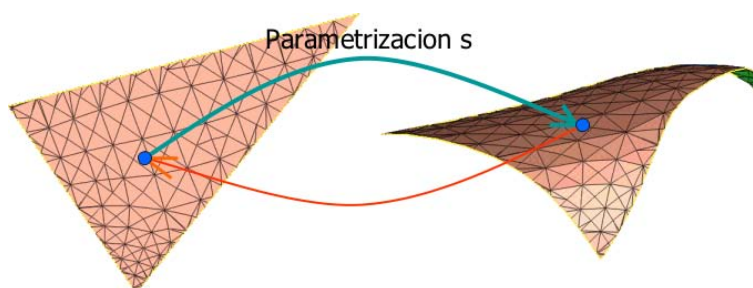


Figura 3.2: Parametrización de la Superficie - Malla Triangular

Pueden considerarse las coordenadas de la textura asignando a una malla 3D una parametrización de la superficie de la malla, donde cada vértice 3D se asigna a un valor 2D del parámetro, y cada punto en la superficie de la malla es parametrizado por la combinación convexa apropiada del valor del parámetro del vértice del triángulo de la superficie en que reside [29]. Debe tenerse cuidado que la parametrización sea legal, es decir, que no hallan dos puntos en la superficie de la malla que sean mapeados al mismo punto en el dominio 2D del parámetro. Para este criterio, se establecerá el concepto de visibilidad.

Un punto en el espacio es visible si el producto punto entre vector normal del punto y el vector de la cámara es igual o menor a cero, como lo muestra la Figura 3.3 para los puntos azules y rojos. Sin embargo, esta condición es una condición necesaria pero no suficiente (punto amarillo). Por esta razón se utiliza el algoritmo Z-buffer [33]. El algoritmo Z-buffer de una nube de puntos, guarda la información

de profundidad (distancia desde el plano de la imagen) del punto de la superficie más cercano sobre la proyección del punto en la imagen [62].

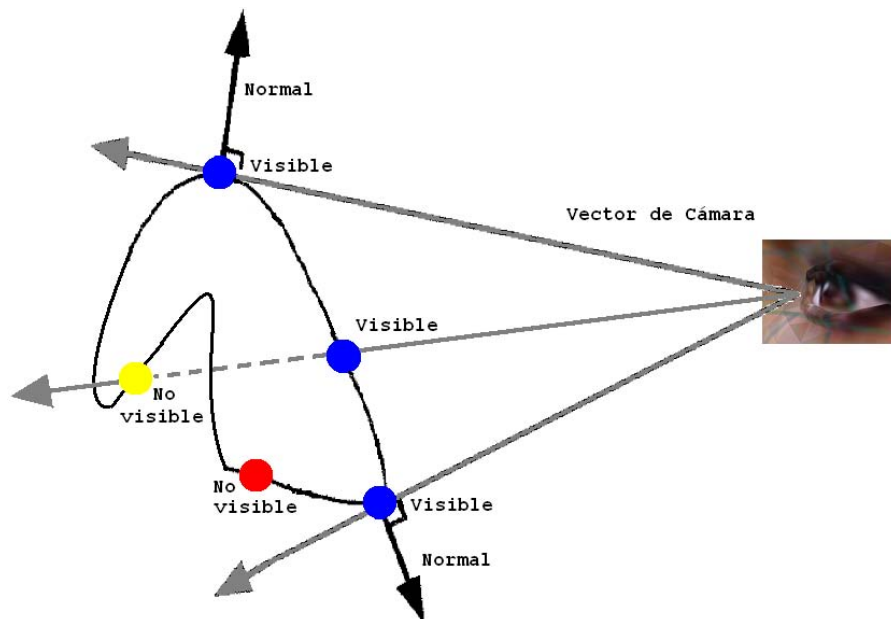


Figura 3.3: Visibilidad de los puntos

Aunque el algoritmo Z-buffer presenta una solución al problema del traslape cuando la imagen a proyectar es de dimensiones pequeñas y el número de puntos es alto, no es suficiente en nuestro caso de trabajo, porque la mayoría de imágenes de textura adquiridas son de alta resolución. Por esta razón, se expandió el concepto de profundidad de puntos a profundidad de la superficie (triángulos) y el Z-buffer almacena la distancia de la cámara al baricentro del triángulo sobre toda el área de proyección del mismo.

3.2. Mapeo de una Textura utilizando Puntos de Control

Este método busca asignar las posibles correspondencias entre la información de rango y la imagen a rastrear. A partir de las correspondencias, se determina la relación $R^3 \leftrightarrow R^2$ en un proceso de calibración. Este proceso se ilustra en la Figura 3.4.

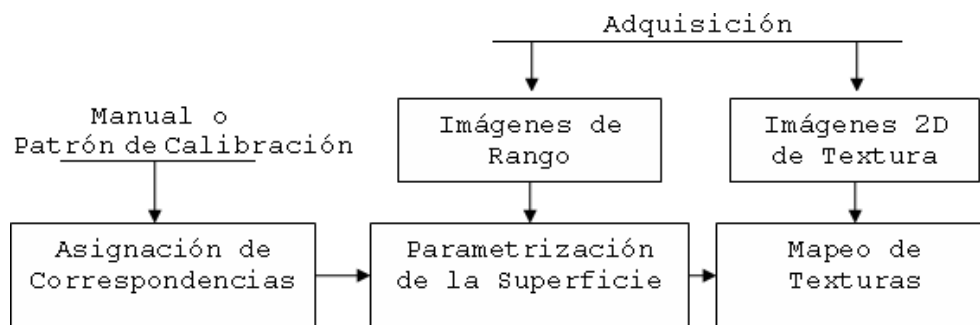


Figura 3.4: Proceso de Mapeo de una Textura utilizando Puntos de Control

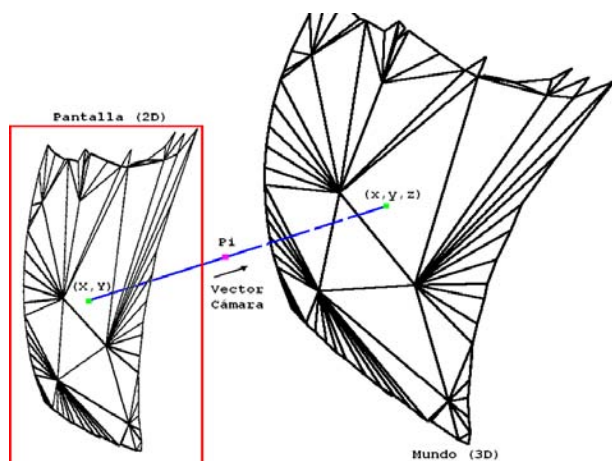
3.2.1. Asignación de Puntos de forma Manual

Un primer acercamiento se realiza estableciendo las correspondencias de forma manual, donde las correspondencias de la imagen se asignan de forma directa sobre ella, mientras las correspondencias del modelo se realizan sobre la proyección en la pantalla. Sin embargo, existen infinitos puntos en el espacio que se proyectan en un mismo píxel en la pantalla; por esta razón, se estableció un método con el cual se asignan los puntos sobre la imagen de rango.

Inicialmente, se deben establecer las condiciones y características de proyección del visor de modelos utilizado. El visor funciona como una cámara pinhole (Sección 2.2), la cual presenta una matriz de transformación de cuerpo rígido y una relación de proyección sobre la imagen. Con esta información se determina un punto en el espacio (P_i) y el vector de cámara con los cuales se determina la línea paramétrica de los puntos que se proyectan en el mismo píxel. Con la ecuación de la línea paramétrica, se intercepta cada uno de los triángulos visibles del modelo. Finalmente, el punto perteneciente a un triángulo es el punto 3D proyectado en la pantalla. La Figura 3.5 ilustra el proceso donde se determina un punto sobre la imagen de rango a partir de un píxel en la pantalla.

3.2.2. Asignación de Puntos utilizando un patrón de Calibración

En la Sección 3.2.1 se trata el problema de la correspondencia de puntos de forma manual, lo cual está ligado a los criterios subjetivos de cada usuario. Este problema puede ser solucionado utilizando un patrón de calibración para determinar la *geometría de la escena*. Cuando se habla de la geometría de la



Línea paramétrica

$$L(u) = P_i + u * (V_{camara})$$

Punto de corte de una línea paramétrica y un plano

$$P = P_i + \frac{(N_{plano} \cdot (P_{plano} - P_i))}{(N_{plano} \cdot V_{camara})} * V_{camara}$$

Figura 3.5: Asignación de un punto sobre la imagen de rango a partir de un píxel en la pantalla

escena, se busca la posición espacial relativa de cada uno de los elementos que la componen, relacionados sobre el mismo eje coordenado. Para nuestro caso, los elementos que componen la escena son (Figura 3.6): escáner de rango, cámara CCD y objeto a modelar.

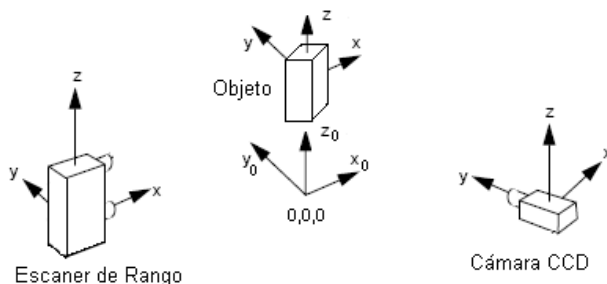
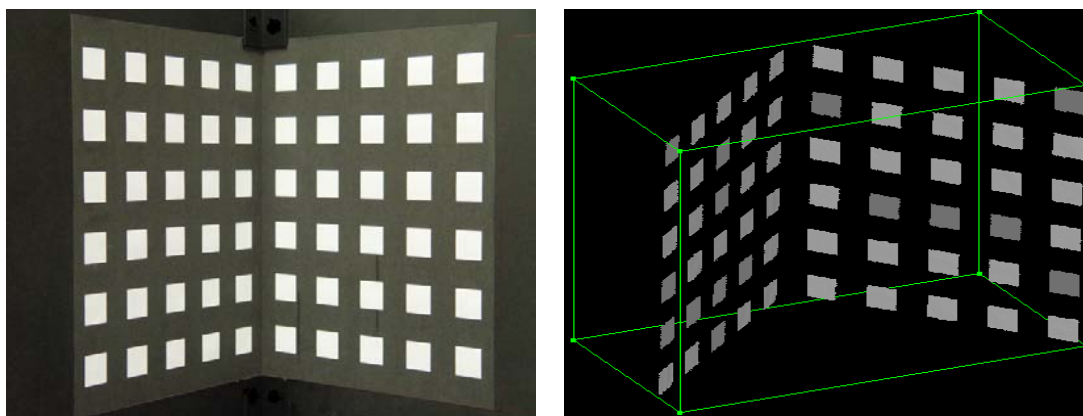


Figura 3.6: Geometría de la Escena

En el Capítulo 2 se presentaron dos tipos patrones de calibración (Figura 2.3), los cuales consisten en dos láminas unidas, formando un ángulo de 90° entre ellas y fondo de color blanco para lograr un alto contraste con las formas. Sin embargo, esta distribución de color no es útil para determinar la información tridimensional ofrecida por el patrón a partir del escáner de rango; por esta razón, se rediseño el patrón con dos láminas de color negro mate y cuadrados blancos (Figura 3.7). La razón del color negro como fondo del patrón se debe a que el escáner puede ser configurado para no detectar la información 3D de objetos muy oscuros, disminuyendo la intensidad del laser de barrido. De esta forma se procede a la adquisición del patrón con la cámara CCD (Figura 3.7(a)) y el escáner de rango (Figura 3.7(b)).

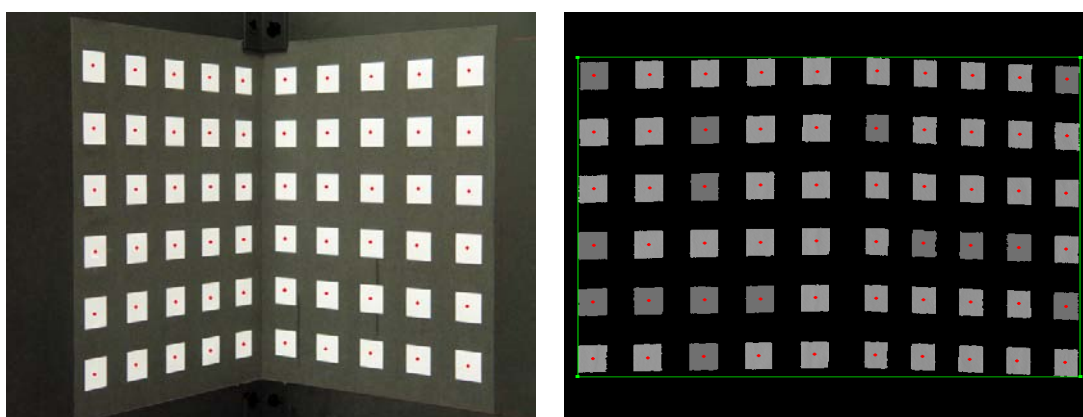


(a) Cámara CCD

(b) Escáner de Rango

Figura 3.7: Adquisición de Patrones con los dos Sensores

Con los dos tipos de imágenes adquiridas se procede a calcular de forma automática las parejas de puntos, utilizando los centros de masa de cada cuadrado (Figura 3.8). Para el cálculo del centro de masa se segmentan los píxeles utilizando una corrección proyectiva o los puntos sobre cada cuadrado para los dos tipos de sensores respectivamente. Por último, se promedia en cada una de las componentes de las imágenes. Las correspondencias son calibradas con respecto al origen del escáner de rango.



(a) Cámara CCD

(b) Escáner de Rango

Figura 3.8: Cálculo de los Centros de Masa en Cada uno de los Sensores

3.2.3. Parametrización de la Superficie

Después de establecer los puntos correspondientes entre las dos imágenes (rango y color), se utilizan los algoritmos de calibración por correspondencia Tsai (Sección 2.3.1) o *The Gold Standard* (Sección 2.3.2). De esta forma, la función de parametrización está descrita por la Ec. 3.1 para cada punto (x, y, z) 3D visible por la cámara y donde $p_{i,j}$ son los elementos de la matriz de cámara ($P_{3 \times 4}$).

$$f(x, y, z) = \begin{cases} u = \frac{p_{00}x + p_{01}y + p_{02}z + p_{03}}{p_{20}x + p_{21}y + p_{22}z + p_{23}} \\ v = \frac{p_{10}x + p_{11}y + p_{12}z + p_{13}}{p_{20}x + p_{21}y + p_{22}z + p_{23}} \end{cases} \quad (3.1)$$

3.2.4. Resultados

Las imágenes 2D fueron adquiridas por la cámara CCD Sony DSC - F717 (resolución de 2560×1920) y la cámara CCD del escáner de rango (resolución de 640×480). Las imágenes 3D fueron adquiridas por el digitalizador 3D VIVID 9i - Minolta Konica.

Para las pruebas de asignación manual de puntos se utilizaron 10 correspondencias. En la Figura 3.9 se observan las imágenes de los diferentes sensores y las correspondencias escogidas de forma manual.

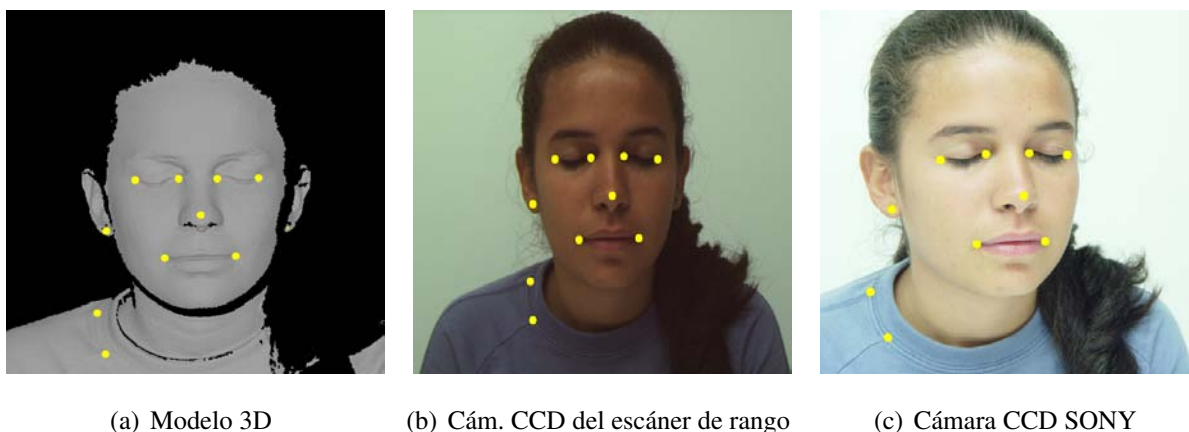


Figura 3.9: Selección de Correspondencias

En la Figura 3.10 se muestran las métricas de desempeño después del proceso de calibración utilizando puntos de control asignados de forma manual; estas métricas son calculadas a partir de las imágenes nor-

malizadas. De igual forma, se muestran los resultados del rastreo de textura. Cada Figura (Figura 3.10(a) y Figura 3.10(b)) muestran unos recuadros donde la textura no se encuentra asignada correctamente.

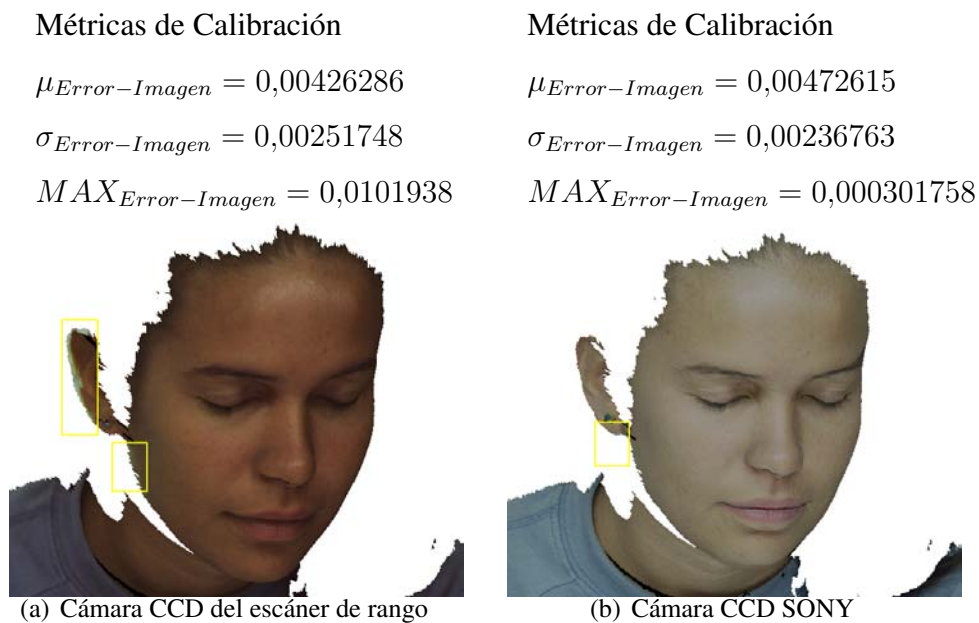


Figura 3.10: Métricas de Calibración y Modelo Texturado utilizando puntos correspondientes asignados de forma manual

Para las pruebas utilizando el patrón de calibración se detectaron 60 correspondencias (una por cada cuadrado del patrón). Los resultados se muestran en la Figura 3.11 donde las métricas obtenidas son menores en un orden de magnitud aproximadamente con respecto al método de asignación de correspondencias de forma manual.

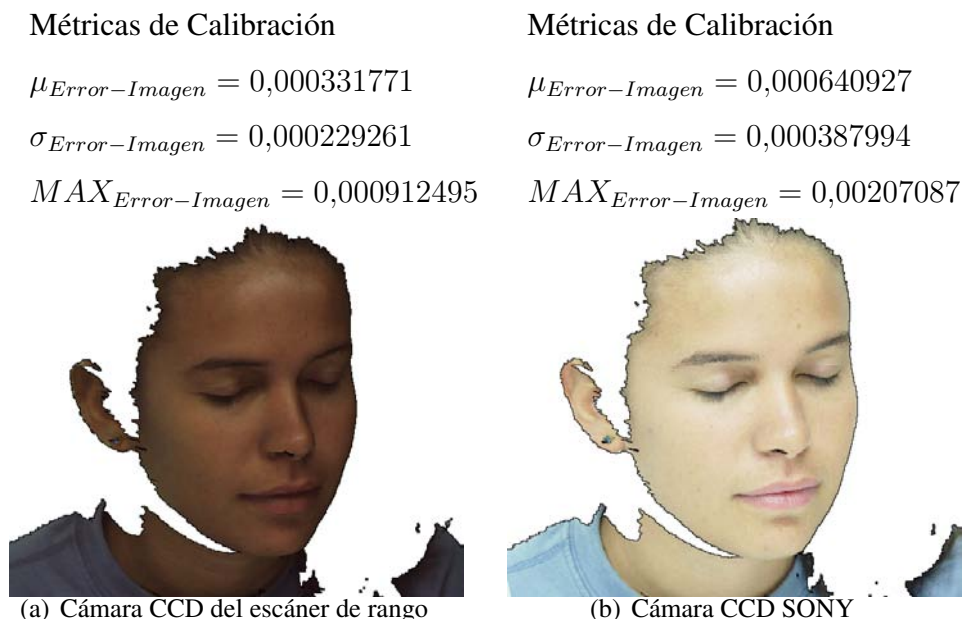


Figura 3.11: Métricas de Calibración y Modelo Texturado utilizando puntos correspondientes utilizando un patrón de calibración

3.3. Mapeo de una Textura utilizando Registro 3D - 2D

Normalmente la imagen de rango y de color son obtenidas desde diferentes puntos de vista, de forma completamente independiente [50]. Así, para mapear esas imágenes de color hacia el modelo geométrico, es necesario determinar las relaciones relativas entre estos dos puntos de vista. Este problema, ha sido tratado como una clase especial de registro [2] llamado **registro 3D-2D**. Básicamente, el registro 3D-2D trata de encontrar la transformación proyectiva (transformación de cuerpo rígido y proyección, perspectiva) en la cual una imagen 2D mapea a un modelo computacional de un objeto 3D de forma paramétrica [31]. Los diferentes acercamientos presentados en la literatura [8, 12, 26, 27, 35, 36, 39, 43, 50, 54, 55, 64] muestran que la característica más relevante para ser utilizada es el contorno de la imagen comparada con el contorno del modelo proyectado. De esta forma y utilizando el modelo de cámara descrito en la Sección 2.2, se observa que son 11 parámetros (5 intrínsecos, 6 extrínsecos) para ser calculados en cada imagen a rastrear. Este problema puede ser formulado utilizando una función objetivo apropiada, la cual expresa la calidad de un conjunto de parámetros de cámara determinado ($\varepsilon(f, m_x, m_y, p_x, p_y, \theta_x, \theta_y, \theta_z, t_x, t_y, t_z)$). Dicha función objetivo puede ser minimizada utilizando algún

método de optimización. El proceso diseñado para realizar el registro 3D-2D se ilustra en la Figura 3.12.

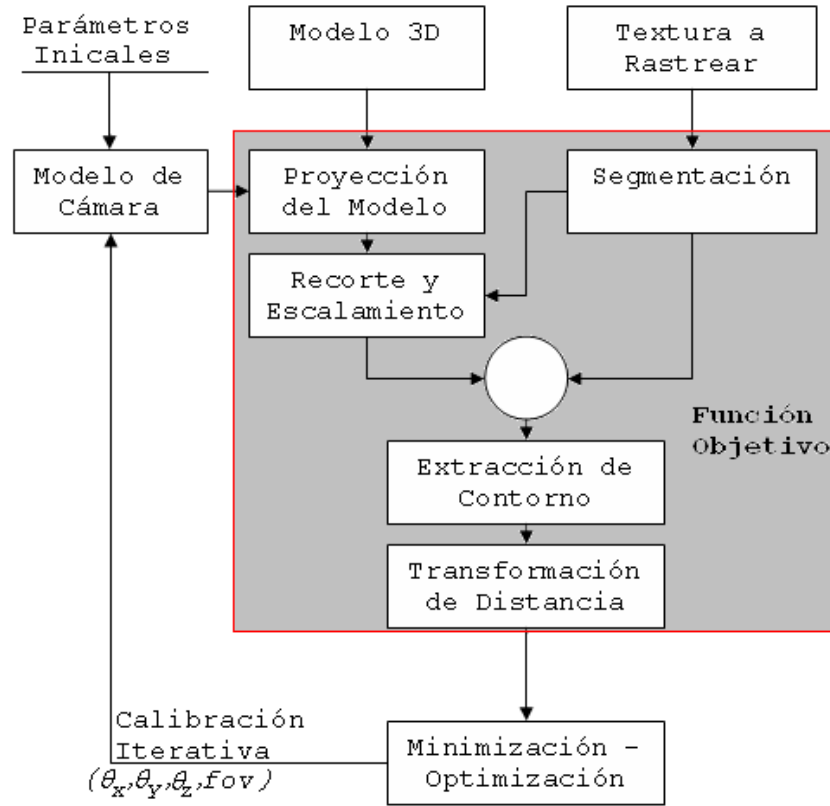


Figura 3.12: Proceso de Mapeo de una Textura utilizando Registro 3D-2D

3.3.1. Descripción del Proceso

El proceso comienza con la segmentación de la textura a rastrear, calculando la caja que envuelve el modelo. Por otro lado, el modelo 3D es proyectado utilizando un modelo de cámara inicial, preferiblemente con los valores del visor utilizado. La imagen proyectada se recorta y se escala a las dimensiones de la caja de segmentación de la textura. Este proceso se diseñó para disminuir el número de parámetros a optimizar en la función objetivo inicial, es decir, los parámetros intrínsecos como m_x, m_y, p_x, p_y y los parámetros extrínsecos t_x, t_y, t_z pueden ser omitidos al ajustar las dimensiones de la imagen de la proyección y a las dimensiones de la textura; y de esta forma la función objetivo es simplificada a solo 4 parámetros en la Ec. 3.2. Esta modificación reduce el costo computacional a la hora de la optimización.

$$\varepsilon (f, \theta_x, \theta_y, \theta_z) \quad (3.2)$$

Sin embargo, las unidades de la distancia focal (f) están dadas en metros y las unidades de los ángulos están dadas en grados o radianes. Por este motivo, otro cambio que se le realiza a la función objetivo es expresar la distancia focal f en términos del ángulo del campo de vista f_{ov} (*Filed of View*) utilizando la Ec. 3.3. De esta forma, el dominio de la función presenta las misma unidades.

$$f_{ov} = 2 \times atan \left(\frac{l_{m\acute{a}x}}{f} \right) \quad (3.3)$$

donde, l_{max} es la máxima arista de la caja que contiene el modelo.

Después de igualar las dimensiones de las imágenes, se procede a la extracción de los contornos; para esta etapa se puede utilizar cualquier filtro pasa alto (Prewitt, Sobel) o alguna técnica de contornos activos, dependiendo del contraste entre el objeto y el fondo. El paso a seguir, es la transformación del contorno utilizando una transformación de distancia. La transformación de distancia juega un papel importante en la comparación de contornos binarios [4]. La transformación utilizada fue presentada por Felzenszwalb en [16], la cual requiere un costo computacional muy bajo a comparación de la transformación euclídea convencional. Posteriormente, se realiza la diferencia absoluta entre las imágenes transformadas, la cual es la salida de la función objetivo. La optimización de la función objetivo fue realizada con el algoritmo de Levenberg-Marquardt. Como el algoritmo necesita el Jacobiano de la función, este fue calculado utilizando diferencias finitas con cada una de las entradas.

3.3.2. Parametrización de la Superficie

Al obtener los valores de $f_{ov}, \theta_x, \theta_y, \theta_z$, se procede a la parametrización de la superficie. Se calcula la máxima arista (l_{max}) de la caja que contiene el modelo. Con este valor se determina la distancia focal utilizando la Ec. 3.4 con el campo de vista en radianes.

$$f = \frac{l_{m\acute{a}x}}{\tan \left(\frac{f_{ov}[rad]}{2} \right)} \quad (3.4)$$

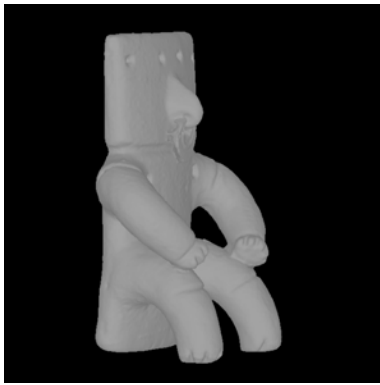
Ahora, con los valores de $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ se halla la matriz de rotación R . Se calcula la visibilidad de ca-

da punto (x, y, z) rotado a la distancia focal f . Durante el cálculo de la visibilidad, se determinan los límites máximos ($máx_X, máx_Y$) y mínimos ($mín_X, mín_Y$) de la imagen de puntos proyectada. La parametrización de la superficie normalizada se encuentra descrita por la Ec. 3.5.

$$f(x, y, z) = \begin{cases} u = \frac{\frac{-fx}{z} - mín_X}{máx_X - mín_X} \\ v = \frac{\frac{-fy}{z} - mín_Y}{máx_Y - mín_Y} \end{cases} \quad (3.5)$$

3.3.3. Resultados

El objeto a mapear es una figura precolombina (Figura 3.13). Esta figura fue digitalizada y reconstruida (registro e integración) con la información de 14 imágenes de rango (Figura 3.13(a)) utilizando el paquete PET (Polygon Editing Tool) y Geomagic Studio. La información de textura fue adquirida con la cámara CCD Sony DSC - F717 con su máxima resolución de (2560×1920) sobre un fondo completamente blanco (Figura 3.13(b)). Los valores iniciales para este ejemplo son: $fov = 10^\circ, \theta_x = 0^\circ, \theta_y = 0^\circ, \theta_z = 0^\circ$.



(a) Modelo 3D



(b) Textura a Mapear

Figura 3.13: Figura precolombina

Siguiendo cada paso del proceso, con la imagen inicial de la textura (Figura 3.13(b)) hallamos la caja (Figura 3.14(a)) y segmentamos la imagen de la textura (Figura 3.14(b)). El tamaño de la caja es de (1157×1510) .



(a) Textura Recortada



(b) Textura Segmentada

Figura 3.14: Proceso sobre la Textura

Luego, la proyección es recortada en sus límites dando una caja de dimensiones 322×571 (Figura 3.15(a)). Después, es escalada a las dimensiones de la textura (1157×1510).



(a) Mod. Recortado



(b) Modelo Escalado

Figura 3.15: Proceso sobre la proyección del Modelo

Como puede observarse, en la posición inicial del modelo, la proyección no concuerda con el punto de vista de la textura. Esto se puede comprobar al hacer la diferencia absoluta de las figuras segmentadas (formas). La Figura resultante se observa en la Figura 3.16.



Figura 3.16: Diferencia absoluta de formas del Modelo proyectado (Figura 3.15(b)) y la Textura (Figura 3.14(b))

Ahora, se extraen los contornos con un filtro Sobel de cada una de las formas (Figura 3.15(b)) y Figura 3.14(b)) dando como resultado la Figura 3.17(a) y la Figura 3.17(b) respectivamente.

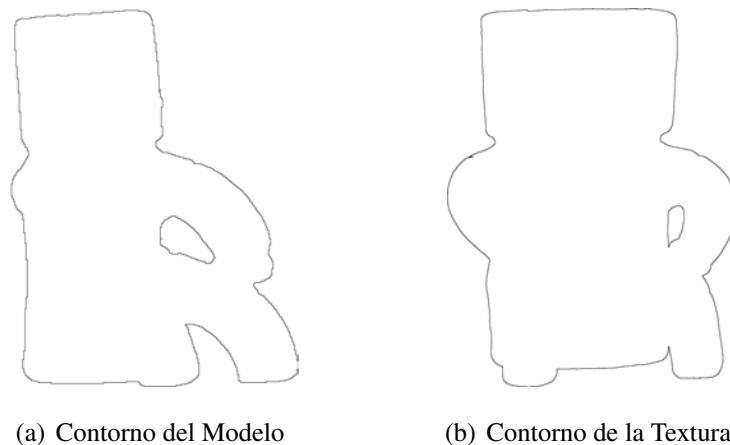


Figura 3.17: Extracción del Contorno

Luego se calcula la transformación de distancia dando como resultado la Figura 3.18(a) y la Figura 3.18(b).

La diferencia promedio de las transformaciones de distancia, para este punto de vista inicial del modelo es igual a $55,5838/255$. Desde este momento, el proceso es iterativo al utilizar el algoritmo de optimización Levenberg-Marquardt para minimizar la diferencia en cada uno de los píxeles de las transformaciones de distancia.

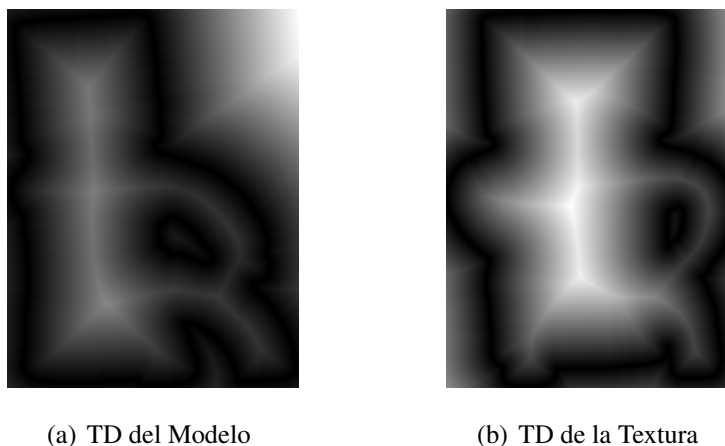


Figura 3.18: Transformación de Distancia (TD)

El desempeño del algoritmo se observa en la Figura 3.19. El algoritmo se detiene después de 71 iteraciones por no poder disminuir más la diferencia promedio igual a $3.5782/255$; dando como resultado: $fov = 10^\circ, \theta_x = 7,20323^\circ, \theta_y = -42,54915^\circ, \theta_z = -5,90889^\circ$.

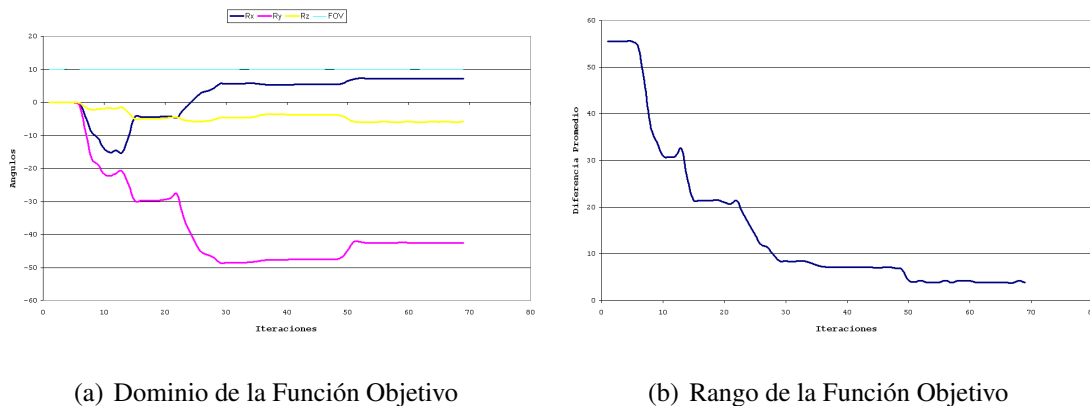


Figura 3.19: Desempeño del algoritmo de optimización

El mapeo de la textura sobre el modelo se observa en la Figura 3.20.



Figura 3.20: Modelo Texturado con el proceso de Registro 3D - 2D

3.4. Mapeo de una Textura a Modelos con Superficies NURBS

En las secciones anteriores, se realizó el mapeo de la textura a modelos formados con triángulos. En esta sección se tratará un caso especial de estudio y una pequeña aproximación al mapeo de texturas a modelos formados a partir de superficies NURBS. La ecuación general para las superficies paramétricas NURBS está dada por la Ec. 3.6

$$S(\hat{u}, \hat{v}) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\hat{u}) N_{j,q}(\hat{v}) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\hat{u}) N_{j,q}(\hat{v}) w_{i,j}} \quad (3.6)$$

La representación de modelos utilizando superficies NURBS se realiza a partir de parches NURBS [41], de esta forma el mapeo de texturas se realiza sobre cada parche de forma independiente. El acercamiento propuesto al mapeo se observa en la Figura 3.21.

El método propuesto consiste en rastrear la textura sobre la representación discreta de la superficie del parche y tratarlo con los métodos expuestos en las Secciones 3.2 y 3.3. Con la representación discreta, se calcula la matriz de cámara y por consiguiente su función de parametrización (Ec. 3.1). Pero, la función de parametrización de la textura conserva la expresión de la curva descrita en la Ec. 3.6 y finalmente se encuentra en función de los parámetros de la superficie (\hat{u}, \hat{v}) .

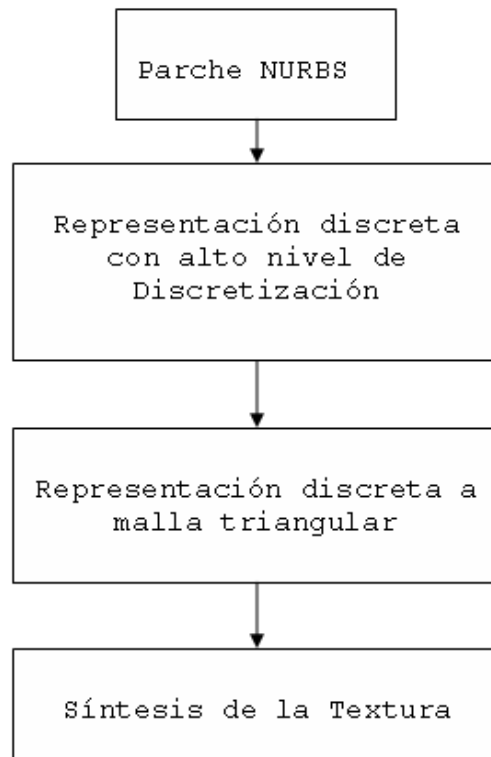


Figura 3.21: Proceso del Mapeo de Texturas sobre un Parche NURBS

Resultados

El objeto a mapear es una imagen de rango de la figura precolombina de la Figura 3.22.



(a) Modelo 3D



(b) Textura a Mapear

Figura 3.22: Figura precolombina

La imagen es parametrizada con superficies NURBS utilizando el particionamiento cuadrilateral de la Figura 3.23.

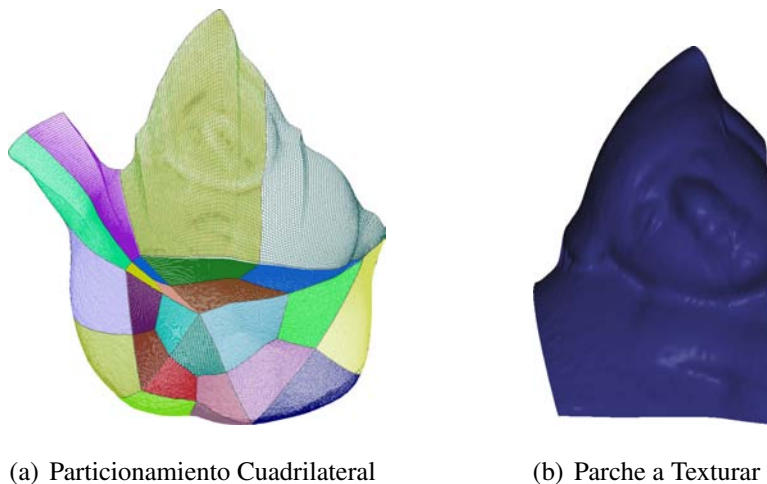


Figura 3.23: Particionamiento en Parches

Este parche es generado con 61 puntos de control y visualizado con una representación discreta, con una resolución del doble de puntos de control (Figura 3.24).

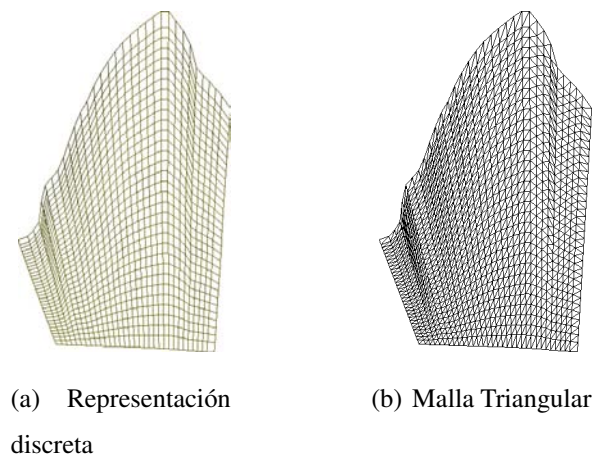


Figura 3.24: Parche a Texturar

A partir de esta representación, se procede al mapeo de la textura y se calcula la función de parametrización. Después del calculo, se puede variar el nivel de la discretización sin volver a calcular la función de parametrización.



Figura 3.25: Parche mapeado con el método de mapeo de textura utilizando puntos de control

3.5. Discusión

Las imágenes de intensidad adquiridas con la cámara del escáner cubren completamente la imagen de rango correspondiente, esto se debe a que el sensor de rango es el mismo CCD de la cámara y están completamente alineados, a diferencia de las imágenes de intensidad adquiridas con la cámara SONY (Figura 1.2).

El método de mapeo de texturas por asignación de puntos de control de forma manual, se presenta como un método versátil por su flexibilidad a la hora de su utilización. Una de sus características principales se basa en el número de correspondencias seleccionadas, al seleccionar solamente el mínimo de pares de correspondencias (6), la calidad de mapeo no se puede asegurar; no obstante al seleccionar una mayor cantidad de correspondencias la aproximación de la textura es mucho mejor; pero sin llegar a decir que entre mayor sea el número de pares correspondientes mejor será la aproximación de la textura sobre el modelo; teniendo en cuenta, que dichas correspondencias deben abarcar la mayor parte de la textura y el modelo, es decir, estar distribuidas de forma uniforme. No obstante, está sujeta al buen criterio del usuario. Este método puede ser usado para rastrear una textura a una sola imagen de rango o a un modelo completamente reconstruido para una posición o punto de vista específico.

El método de mapeo de texturas por asignación de puntos de control utilizando el patrón de calibración es un método totalmente automático después del proceso de la adquisición. Es de aclarar que después de

tomar la imagen con cada uno de los sensores y calibrar la cámara CCD con respecto a las coordenadas del escáner de rango, ninguno de los dos elementos de adquisición pueden ser movidos durante todo el proceso de toma de imágenes. Una recomendación a la hora de la adquisición, es que el patrón de calibración ocupe la mayor parte de cada uno de los sensores, esto con el fin de que la mayoría de las correspondencias estén bien distribuidas sobre cada una de las imágenes. Este método sólo es aplicado a una sola imagen de rango, donde cada imagen de rango tendrá su propia textura para rastrear.

El método de mapeo de texturas utilizando registro 3D - 2D es un método semi-automático para mapear objetos cuyos contornos son bien definidos. Se define como método semi-automático por la selección manual de los parámetros iniciales antes de comenzar el proceso iterativo. Por esta razón, existen dos condiciones fundamentales a la hora de aplicar el método. La primera condición es que las texturas a rastrear deben contener el objeto en su totalidad y la segunda condición es que el modelo debe estar completamente reconstruido (registrado e integrado en una sola malla). Esto con el fin de hacer la comparación entre los mapas de distancias, producto de la proyección y la textura correspondiente.

Una de sus restricciones, es que no puede ser usado sobre objetos en los que al observar diferentes puntos de vistas, no se presenten grandes cambios, como sólidos de revolución (esferas, cilindros). En la Figura 3.26 se observan las texturas de un objeto desde dos puntos de vista diferentes. Aplicar estas texturas sobre la superficie del modelo, la cámara de cada textura es la misma, lo cual no es verdad.



Figura 3.26: Textura de un objeto desde dos puntos de vista diferentes

La selección de los valores iniciales $fov, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ juega un papel crucial; donde, la suma de las diferencias iniciales y finales de los ángulos $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ no deben superar los 90° . De no ser así las posibilidades de convergencia del algoritmo son casi nulas. Esto se debe a que ningún algoritmo de optimización incrementaría el error para poder llegar a un mínimo aceptable. Sobre el parámetro fov de la función objetivo el algoritmo de optimización no tiene mucho efecto por su alta no linealidad. Por este motivo, este valor se selecciona de forma manual en la parte inicial con múltiples pruebas. La función objetivo presenta muchos mínimos locales; esto se puede comprobar iniciando el algoritmo desde diferentes condiciones iniciales, los cuales presentan un punto final diferente(Figura 3.27).

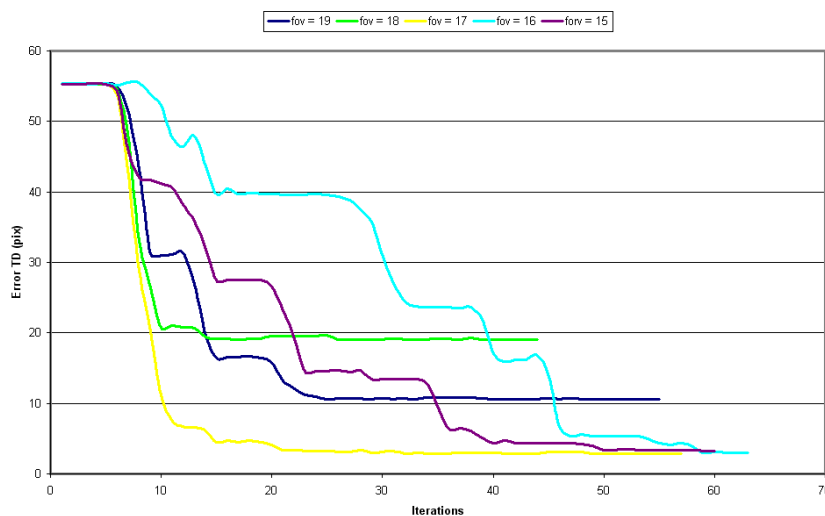


Figura 3.27: Mínimos locales de la Función Objetivo

En la Figura 3.27 se muestra el desempeño del método utilizando diferentes parámetros iniciales, exactamente variando de a un grado el valor del fov que es el parámetro más no lineal. De esta forma se comprueba la presencia de mínimos locales en la función objetivo.

El método de mapeo de texturas sobre superficies NURBS es un caso particular de mapeo, el cual es tratado de igual forma de los métodos anteriores. Esto se debe a que el mapeo se realiza sobre la representación discreta de la superficie. Para obtener la mejor representación de la textura sobre la superficie, se sugiere que el cálculo de la función de parametrización se realice utilizando un alto nivel de discretización.

3.6. Conclusiones

Cualitativamente los resultados presentados por los tres métodos desarrollados de mapeo de textura son aceptables al comparar la superficie del modelo con la textura, especialmente en los lugares donde se presentan la mayor variación de la superficie. Por ejemplo, para el caso del rostro los puntos característicos y para el caso de la figura precolombina los huecos, los cuales coinciden en su totalidad. Las métricas de calibración del método de mapeo de texturas utilizando el patrón de calibración, son menores en un orden de magnitud que el método de asignación de puntos de control de forma manual, de esta forma se puede asegurar que este método es más preciso, dejando a la vista las posibles imprecisiones de un usuario. En conclusión, el método de mapeo de texturas utilizando registro 3D-2D, muestra una reducción del error inicial hasta en un 85 % para el ejemplo presentado. La optimización de la función objetivo es estable desde las condiciones iniciales presentadas en la discusión. Sin embargo, por las propiedades no lineales de la función objetivo, la presencia de mínimos locales afecta el óptimo funcionamiento del algoritmo.

Reconstrucción del Modelo Texturado

4.1. Introducción

La mayoría de objetos a digitalizar necesitan la adquisición de múltiples vistas para su completa reconstrucción (Figura 4.1). En este proceso, la información de textura puede estar redundante y a su vez traslapada, de igual forma como lo está la información de rango; por esta razón en este Capítulo se presenta una técnica para el mapeo de texturas a múltiples vistas (Sección 4.2). Por otro lado, en la adquisición de la textura, la presencia de brillos en las imágenes y la falta de constancia de color de las diferentes vistas representa un problema en la visualización del modelo final texturado, distorsionándolo y haciéndolo ver poco realista. Del mismo modo, se implementó un algoritmo para la corrección de las diferentes vistas de textura (Sección 4.3).

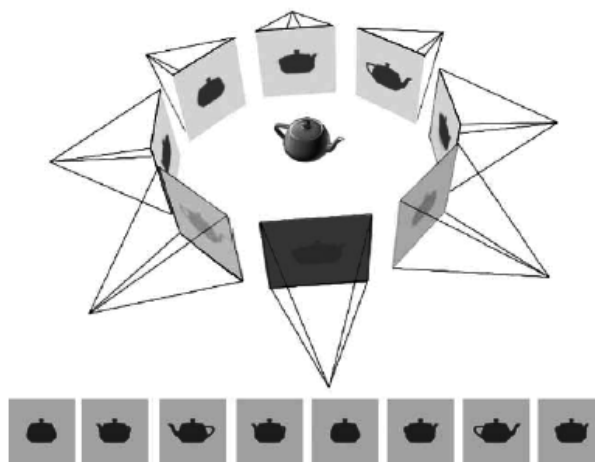


Figura 4.1: Adquisición de Múltiples Vistas

4.2. Mapeo de Texturas a Múltiples Vistas

Antes de hablar del mapeo de texturas a múltiples vistas, se debe preguntar en que estado de reconstrucción se encuentra el modelo con respecto a la textura; es decir, si se tiene información de textura por cada imagen de rango adquirida o si se tiene información de textura por cada punto de vista del modelo completamente reconstruido.

4.2.1. Información de Textura por cada Imagen de Rango

La información de textura por cada imagen de rango es producto del mapeo de una textura utilizando puntos de control (Sección 3.2), especialmente en la asignación de dichos puntos utilizando un patrón de calibración (Sección 3.2.2). El proceso de múltiples vistas se describe en la Figura 4.2.

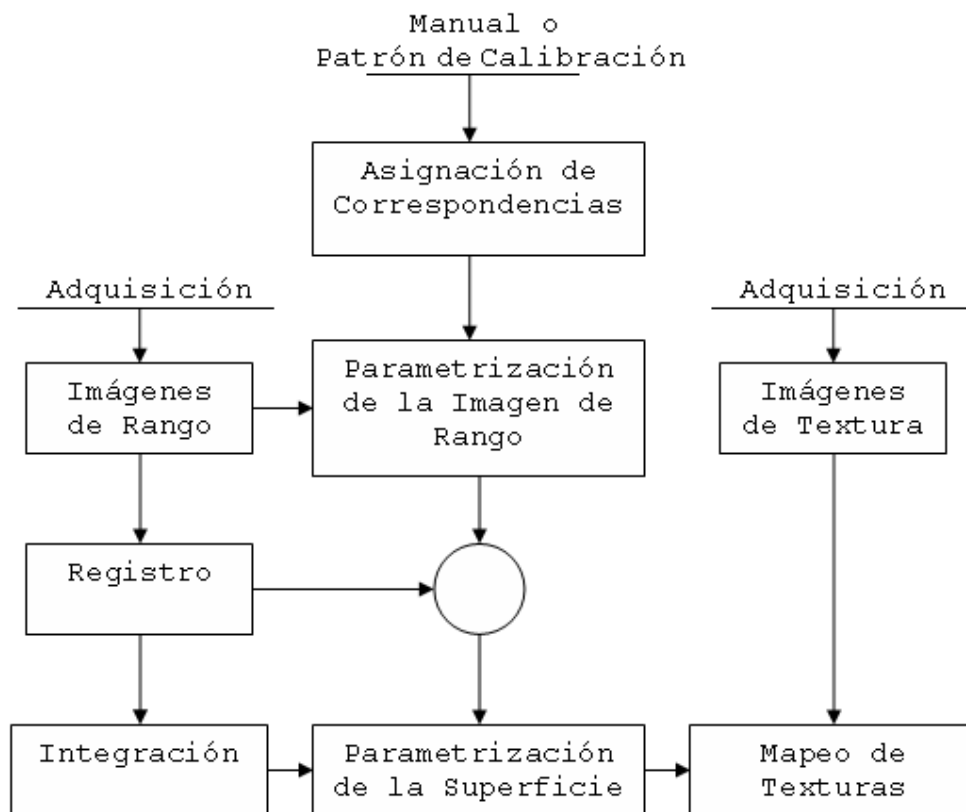


Figura 4.2: Proceso de Mapeo de Texturas de Múltiples Vistas utilizando Puntos de Control

Inicialmente, se determina la matriz de cámara P sobre cada imagen de rango con su correspondiente textura. El paso de registro consiste en hallar la matriz de transformación T (rotación y traslación) de cada una de las imágenes de rango sobre un mismo eje coordenado determinado. Después de registrar todas las imágenes de rango se fusionan todos los puntos en un sola malla (Integración). Posteriormente, se determina la parametrización de toda la superficie sobre el modelo completamente reconstruido.

Parametrización de toda la superficie

Para este paso, se debe determinar la visibilidad de toda la malla para cada una de las cámaras. Esta parametrización está descrita a partir de la matriz de la k -ésima cámara P_k y la matriz de transformación de la i -ésima imagen de rango T_i , sobre cada triángulo de la malla que es visible por la k -ésima cámara. Si cada vértice del triángulo está definido por el punto x, y, z la parametrización está dada por las Ec. 4.1 y Ec. 4.2.

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = (T_i)^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \begin{cases} u = \frac{p_{k00}\hat{x} + p_{k01}\hat{y} + p_{k02}\hat{z} + p_{k03}}{p_{k20}\hat{x} + p_{k21}\hat{y} + p_{k22}\hat{z} + p_{k23}} \\ v = \frac{p_{k10}\hat{x} + p_{k11}\hat{y} + p_{k12}\hat{z} + p_{k13}}{p_{k20}\hat{x} + p_{k21}\hat{y} + p_{k22}\hat{z} + p_{k23}} \end{cases} \quad (4.2)$$

No obstante, hasta este punto, sólo se han determinado las coordenadas paramétricas u, v de los puntos sobre todas las texturas visibles, sin determinar aún el t́xel a asignar en los triángulos. Esto sucede porque hay triángulos que son visibles por dos o más cámaras a la vez. Existen diferentes criterios para determinar el t́xel en la textura. El criterio más simple es seleccionar la cámara cuya normal apunte lo más cercana a la dirección del triángulo (criterio del t́xel óptimo); sin embargo, este criterio genera discontinuidades en el modelo final. El criterio seleccionado se basa en hacer un ponderado de los t́xeles visibles por los triángulos. Este ponderado se realiza colocándole pesos a cada t́xel según la dirección a la cámara, como lo muestra la Ec. 4.3.

$$Texel_{Final} = \frac{w_1 Texel_1 + w_2 Texel_2 + \dots + w_{kv} Texel_{kv}}{w_1 + w_2 + \dots + w_{kv}} \quad (4.3)$$

donde, w_i es el valor absoluto del producto punto entre la normal del triángulo y el vector de la cámara y kv es el número de cámaras visibles por el triángulo.

4.2.2. Información de Textura por cada Punto de Vista del Modelo

La información de textura por cada punto de vista del modelo es el resultado del mapeo de una textura utilizando Registro 3D - 2D (Sección 3.3). El estudio de este caso es mucho más simple que el caso anterior; donde ya existe una matriz de cámara diferente para cada punto de vista de la textura a rastrear y por esta razón la transformación del registro T_i ya está implícita sobre las rotaciones y traslaciones de la matriz de cámara. Por tanto la función de parametrización sólo es función de la matriz P y está descrita por la Ec. 3.1. Esta función es la misma para todas las posiciones del modelo. Además, se debe establecer la visibilidad y calcular el mejor téxel en cada triángulo utilizando el método ya mencionado.

4.2.3. Implementación y Resultados

El objeto a mapear es una figura precolombina, donde se van a tener en cuenta 4 imágenes de textura. Las imágenes de textura fueron adquiridas con la cámara del escáner de rango (Figura 4.3) y la cámara CCD Sony DSC - F717 a su máxima resolución (Figura 4.4).



Figura 4.3: Fotos Adquiridas con la cámara del escáner

Inicialmente, se asignó la textura a cada una de las vistas con un mismo patrón de calibración utilizando el método descrito en la Sección 3.2. Los modelos de las imágenes de rango a texturar se observan en la Figura 4.5 y los modelos texturados utilizando las imágenes adquiridas con la cámara SONY se observan en la Figura 4.6.



Figura 4.4: Fotos Adquiridas con la cámara SONY

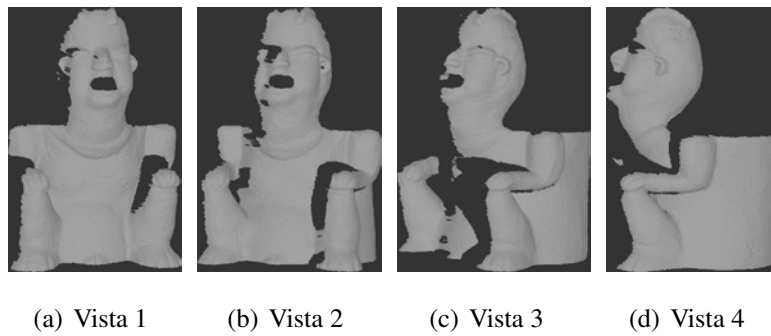


Figura 4.5: Modelo 3D de una sola Imagen de Rango



Figura 4.6: Modelo Texturado 3D de una sola Imagen de Rango

Después del cálculo de la matriz de cámara y la asignación de la textura a cada imagen de rango, se registra cada una de las vistas. Para este caso las Vistas 1, 2 y 3 se referenciaron a la Vista 0. El modelo reconstruido se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7: Modelo Reconstruido con las vistas 0, 1, 2 y 3

El paso a seguir, es hallar la visibilidad de las 4 cámaras sobre el modelo. Para efectos de visualización la Figura 4.8 muestra la visibilidad de la malla a la Vista 0 y a la Vista 2. Como se observa en la Figura 4.8 hay puntos de la malla (*) que son visibles a las dos cámaras.

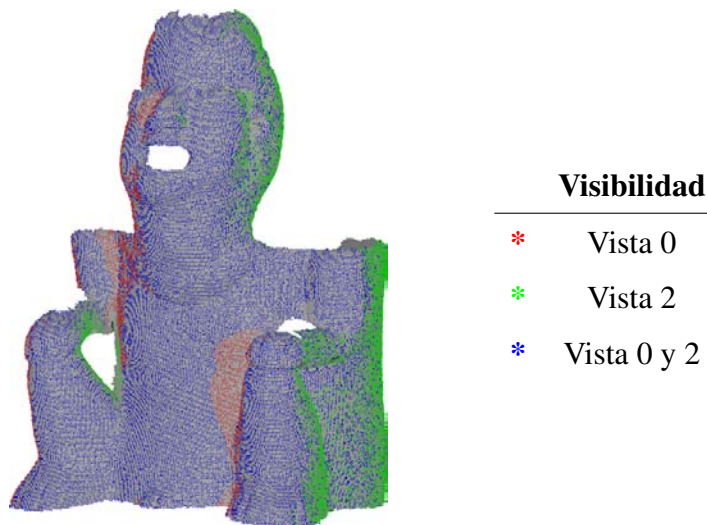
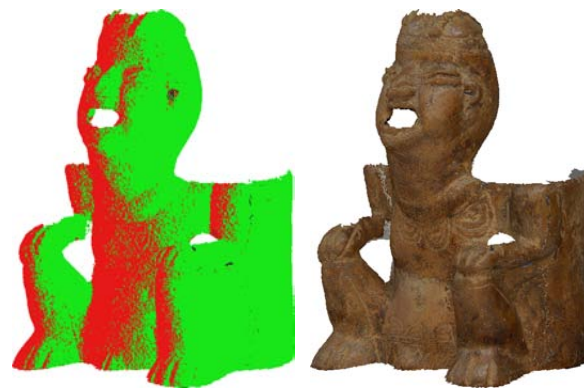


Figura 4.8: Visibilidad del modelo a la Vista 0 y 2

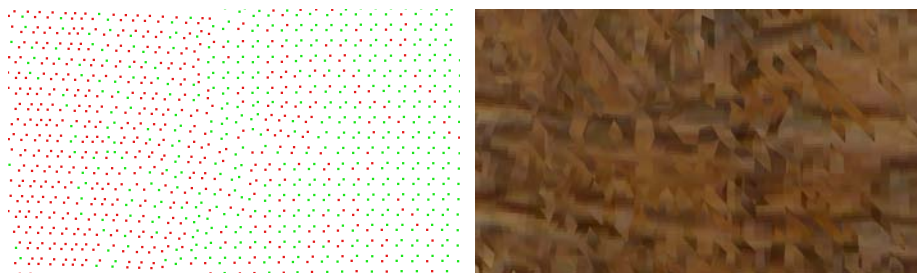
Con el cálculo de la visibilidad se determina el téxel de mapeo a cada triángulo. Inicialmente, se realizó la asignación de la textura utilizando el criterio del téxel óptimo, el cual selecciona la textura más visible por cada triángulo. El criterio de selección utilizando las vistas 0 y 2 se observa en la Figura 4.9(a) y el modelo texturado se observa en la Figura 4.9(b). El criterio de visibilidad determinó que los puntos rojos (*) pertenecen a la Vista 0 y que los puntos verdes (*) pertenecen a la Vista 2.



(a) Mejor Punto de Vista (b) Modelo Texturado

Figura 4.9: Mapeo de Texturas Utilizando el Criterio de Téxel Óptimo

Al hacer un acercamiento (Figura 4.10) en los lugares donde se mezclan las visibilidades, se observan triángulos adyacentes con diferentes tonalidades, los cuales son discontinuidades en la representación del modelo (Figura 4.10(b)).



(a) Mejor Punto de Vista (b) Modelo Texturado

Figura 4.10: Ampliación de la Figura 4.9

En este punto se observa la necesidad de la utilización de un ponderado de los téxeles que son visibles por cada uno de los triángulos del modelo. Utilizando la información de visibilidad de cada una de las cámaras (Figura 4.8) y calculando la Ec. 4.3, se obtiene el modelo texturado final (Figura 4.11(a)). En la Figura 4.11(b) se muestra la ampliación de la misma zona de la Figura 4.10(b), donde se observa que las discontinuidades disminuyen. De todas formas, se presentan algunas inconsistencias por problemas de iluminación en la adquisición de las texturas. Por tanto, hacer la corrección del color (Sección 4.3) antes del proceso de la asignación de la textura se convierte en un paso necesario.



Figura 4.11: Mapeo de Texturas Utilizando el Ponderado de Téxeles

Como en este proceso se generan nuevas texturas, ellas deben ser divididas para poder visualizarlas en la plataforma diseñada. Analizando detenidamente, si cada textura de una vista tiene una dimensión de 2560×1920 , se puede llegar a tener una textura final de dimensiones de $2560k \times 1920$, donde k es el número de cámaras utilizadas. Esto se debe a que la tarjeta de video utilizada soporta modelos con texturas de dimensiones máximas de 4096×4096 . Por esta causa, se utilizó las sentencias para la generación de texturas en OpenGL, y de esta forma poder visualizarlas todas completamente.

4.3. Corrección de Color

La imagen adquirida por una cámara depende principalmente de tres factores:

- El contenido físico de la escena (Reflectancia).
- La iluminación incidente.
- Las características del dispositivo de adquisición.

Estos dos últimos factores afectan el color del objeto. Por este motivo, se debe implementar un algoritmo de estandarización del color que minimice estos efectos. Para nuestra aplicación el efecto a combatir principalmente es la luz incidente, porque todas las secuencias de imágenes fueron adquiridas con el mismo sensor. Algunas características que deben cumplir los algoritmos:

- Robusto respecto a la reflexión.
- Invariante respecto a la cromaticidad de la imagen ignorando el brillo.
- No afecte la información física de la escena.

Teniendo en cuenta estas características se analizaron los algoritmos: Gray - World Gamma (Sección C.1) y Constancia del color por Correlación o Método Bayesiano (Sección C.2).

4.3.1. Formación del color en una imagen

Para poder enfrentar el problema de la identificación de la iluminación se deben tener en cuenta los factores de cambios en la intensidad de la imagen y el color debido a la forma de los objetos [20]. En un escenario idealizado, la formación de la imagen puede ser descrita por

$$p_k^x = \int_{\omega} E(\lambda) S^k(\lambda) R^k(\lambda) d\lambda \quad (4.4)$$

donde, $E(\lambda)$ es la distribución espectral de potencia de la iluminación incidente, la cual define cuánta potencia es emitida por la iluminación en cada longitud de onda; $S^k(\lambda)$ representa la reflectancia de la superficie en el píxel x de la escena, esta define que fracción de la luz incidente es reflejada en cada longitud de onda; $R^k(\lambda)$ es la respuesta espectral relativa del dispositivo de adquisición en el k -ésimo

sensor, el cual especifica que proporción de luz incidente en el sensor es absorbida en cada longitud de onda. Estos tres términos son multiplicados e integrados sobre todo el intervalo ω (el rango de longitudes de onda en el cual opera el sensor)

4.3.2. Implementación y Resultados

Las imágenes de prueba son las secuencias de imágenes utilizadas para la reconstrucción del modelo precolombino de la Sección anterior (Figura 4.12).



Figura 4.12: Secuencia de Imágenes

Como se puede observar en la secuencia, las discontinuidades entre las imágenes son evidentes. Inicialmente, se hicieron pruebas con el algoritmo Gray - World con el efecto gamma de cada uno de los sistemas, dando como resultado la Figura 4.13, la Figura 4.14 y la Figura 4.15



Figura 4.13: Corrección del Color utilizando Gray - World - Gama Sistemas NTSC

Por último, se realizó el entrenamiento del algoritmo por correlación de color y aplicándolo en la secuencia de imágenes se obtiene la Figura 4.16.

Al observar las diferentes figuras correspondientes a la corrección del color, los mejores resultados se obtuvieron con el algoritmo de corrección de color por constancia del color por correlación.



Figura 4.14: Corrección del Color utilizando Gray - World - Gama Sistemas PAL y SECAM



Figura 4.15: Corrección del Color utilizando Gray - World - Gama Sistemas Actuales



Figura 4.16: Corrección del Color utilizando Constancia del color por Correlación

Ahora, después de la etapa de corrección de la iluminación se procede a realizar las etapas de asignación de texturas para múltiples vistas descritas en la Sección 4.2.

4.4. Discusión y Conclusiones

La calidad de la reconstrucción de las imágenes de rango juega un papel muy importante en esta etapa de la representación final de un modelo texturado. Si las imágenes de rango se encuentran mal ensambladas en la etapa de registro o la malla final presenta triángulos orientados en una dirección errónea, entre otros problemas; la calidad de la reconstrucción del modelo texturado no se puede garantizar. Además, como en la mayoría de los procesos de visión artificial, la iluminación incidente en la escena durante la etapa de adquisición afecta considerablemente la uniformidad del objeto completamente texturado. Aunque se

implementaron algoritmos para la corrección de dicha iluminación, la comparación de los mismos sólo se hace de forma cualitativa, mostrando el algoritmo por constancia de color por correlación como el más indicado para solucionar este problema.

En el análisis de la reconstrucción del modelo texturado, el concepto de visibilidad fue extendido a múltiples vistas, para determinar las diferentes asignaciones de téxeles sobre los triángulos de la malla. Por este motivo, se realizó la asignación del mejor texel utilizando el ponderado de los productos punto de las normales, mejorando considerablemente la calidad en la representación y disminuyendo las discontinuidades resultantes de las iluminaciones en los diferentes téxeles.

Evaluación de los Resultados

5.1. Introducción

Uno de los grandes problemas presentes en el mapeo de texturas, es determinar la calidad de forma cuantitativa del resultado del rastreo de la textura sobre el modelo. En este Capítulo se presenta la metodología de evaluación utilizada para caracterizar los resultados de los diferentes modelos texturados generados en este trabajo.

5.2. Densidad

La densidad está definida por el número de píxeles de una imagen que se encuentran sobre el área de un triángulo en el espacio (Ec. 5.1). Esta métrica determina el nivel de detalle que aporta la textura sobre el modelo. Cuando el valor de la densidad se encuentra entre 1 y 3, los efectos del mapeo de textura son muy parecidos a la asignación de color por cada vértice del modelo. Cuando el valor de la densidad es menor a 1, la textura no aporta nada al modelo y de esta forma carece de sentido haber aplicado el método de mapeo de texturas. Por último, entre mayor sea el valor de la densidad mucho más alta es la información (nivel de detalle) que aporta la textura al modelo.

$$Densidad = \frac{Area_{Texel}[pix]}{Area_{Triangulo}} \quad (5.1)$$

Resultado

El objeto rastreado con la textura es una figura precolombina (Figura 5.1). Del mismo modo que en los capítulos anteriores la textura es adquirida con la cámara CCD del escáner de rango y con la cámara CCD SONY. Para este caso, el método utilizado para mapear la textura fue el método de mapeo de texturas utilizando puntos de control a partir de un patrón de calibración. Los resultados del mapeo utilizando los dos tipos de cámara se observan en las Figuras 5.1(b) y 5.1(c), respectivamente.

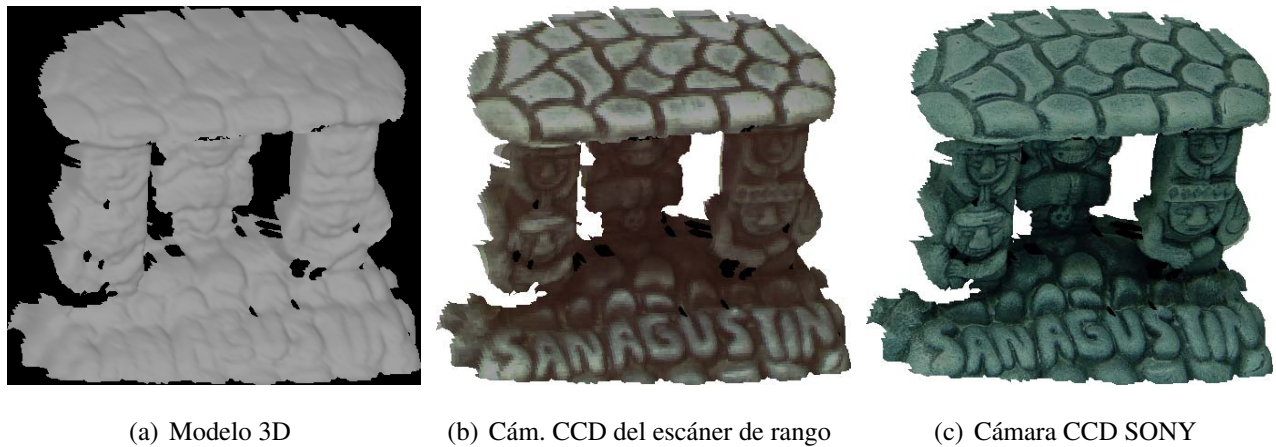


Figura 5.1: Análisis de Densidad - Modelo y Modelo Texturado

Las métricas de densidad (Tabla 5.1) muestran el nivel de detalle, 30 veces mayor utilizando la textura de la cámara SONY con su máxima resolución, comparada con la textura obtenida con la cámara del escáner. Esto se puede observar en la Figura 5.1(c) contra la Figura 5.1(b).

MÉTRICA	CÁMARA CCD	
	<i>Esc. de Rango</i>	<i>Sony</i>
$\mu_{densidad}[pix]$	1.03093	36.9913
$\sigma_{densidad}[pix]$	0.311469	11.8776
$MAX_{densidad}[pix]$	1.53302	56.9233

Tabla 5.1: Métricas de Densidad

5.3. Métodos para una Sola Vista

Para analizar el mapeo sobre un posición de proyección determinada se establecieron tres métodos cuya base fundamental es proyectar el modelo utilizando la parametrización de la superficie de un punto de vista o de una imagen de rango determinada. A partir de esta proyección, se compara con la textura preferiblemente segmentada.

5.3.1. Número de Texturados sobre Número de Puntos Visibles

Esta métrica cuantifica el número de puntos proyectados sobre la imagen de intensidad, utilizando la matriz de cámara ya definida para un determinado punto de vista; y compara cuantos de estos puntos pertenecen a la textura. Este número de puntos proyectados es igual al número de puntos visibles desde un punto de vista determinado. Esta métrica está descrita por la Ec. 5.2 y toma valores entre 0 % y 100 %, donde, 0 % significa que la textura no corresponde para nada al punto de vista del modelo o no hay textura y 100 % significa que la textura cubre completamente a la superficie del punto de vista del modelo.

$$N_{t.en.v}[\%] = \frac{N_t \in N_v}{N_v} \times 100\% \quad (5.2)$$

Resultado

Esta métrica se analizó utilizando el modelo de la pieza precolombina de la Figura 5.2. Se mapeo la textura por el método del mapeo de texturas utilizando puntos de control a partir de asignación manual de puntos. La textura que corresponde a la cámara CCD del escáner de rango se observa en la Figura 5.2(b) y la textura que corresponde a la cámara SONY se observa en la Figura 5.2(c). Con diferentes asignaciones de puntos se observan los resultados en las Figura 5.3; la Figura 5.3(a) y la Figura 5.3(b) son el resultado del mapeo de textura utilizando una selección muy detallada de los puntos con cada una de la texturas de las diferentes cámaras. La Figura 5.3(c) y la Figura 5.3(d) utilizaron las matrices de cámara de la prueba anterior, pero aplicando las texturas equivocadas, es decir, la textura de cámara del escáner se aplicó con la matriz de cámara de la cámara SONY y viceversa.

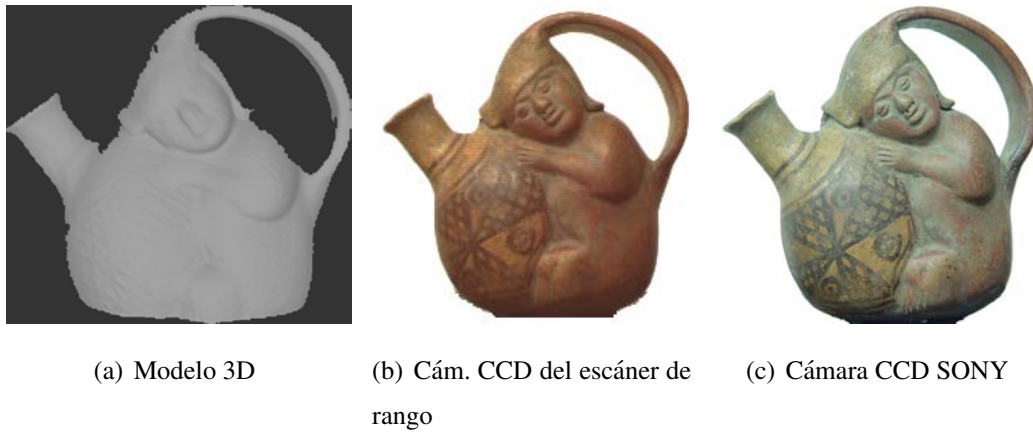


Figura 5.2: Análisis del Número de Texturados sobre Número de Puntos Visibles - Modelos y Texturas



Figura 5.3: Análisis de Número de Puntos Texturados sobre Número de Puntos visibles

A cada uno de los modelos texturados se les aplicó el criterio de número de puntos texturados sobre número puntos visibles. Los resultados se observan en la Tabla 5.2.

MÉTRICA	MODELO TEXTURADO			
	Figura 5.3(a)	Figura 5.3(b)	Figura 5.3(c)	Figura 5.3(d)
Número de Puntos Texturados	19617	19371	18651	8336
Número de Puntos Visibles	19622	19596	19622	19596
N° de Puntos Visibles y Texturados	19616	19346	18651	8327
$N_{t.en.v} [\%]$	99.969	98.724	95.051	42.493

Tabla 5.2: Métricas de Número de Texturados sobre Número de Puntos Visibles

Los modelos texturados en los que la textura se asignó correctamente, son los modelos que presentan los valores más altos en esta métrica. Para el modelo de la Figura 5.3(c), el valor de la métrica disminuye pero no considerablemente. Por último, el valor de la métrica de la última prueba, se disminuye hasta en un 50 %, lo cual determina que la textura se encuentra mal rastreada.

En conclusión, esta métrica es una condición necesaria, más no suficiente para garantizar que la textura está bien mapeada sobre ese punto de vista del modelo.

5.3.2. Comparación de Contornos con Medida de Distancia

Esta métrica es la parte fundamental de la función objetivo presentada en el Sección 3.3 para el método de mapeo de texturas utilizando el registro 3D - 2D. Puede ser aplicada cuando el contorno del objeto a texturar está bien definido y la información de la textura contiene el objeto completamente. Para efectos de visualización también se puede analizar la diferencia entre la textura segmentada y la forma del modelo proyectado, comúnmente llamada diferencia absoluta de las formas.

Resultado

Se analizó la métrica utilizando el modelo resultante del mapeo de texturas utilizando registro 3D - 2D (Figura 5.4). El punto de vista donde la textura se rastrea de la mejor forma según el algoritmo, se observa en la Figura 5.4(a).

Con el punto de vista del modelo y la textura se procede a realizar el proceso de la función objetivo descrito en la Figura. 3.12; es decir, se extrae la forma de cada una de las imágenes (Figura 5.5), con las



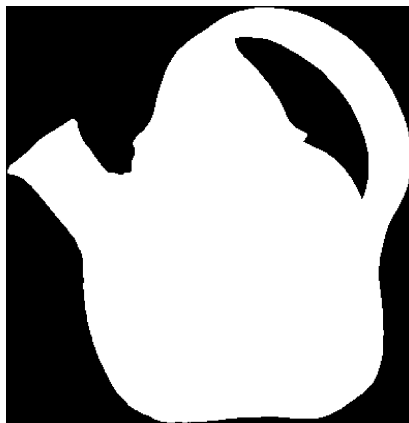
(a) Modelo 3D



(b) Textura

Figura 5.4: Análisis de la Comparación de Contornos con Medida de Distancia

que se extrae el contorno (Figura 5.6); por último, se calcula la transformación de distancia (Figura 5.7).



(a) Modelo



(b) Textura

Figura 5.5: Extracción y Segmentación de la Proyección del Modelo y la Textura

Desde este punto se pueden determinar dos métricas. La primera es la diferencia absoluta de las formas, la cual compara directamente la proyección con la segmentación de la textura, mostrando la diferencia entre ellas. Para este ejemplo, el resultado de esta métrica es igual a 1,501 % y se muestra en la Figura 5.8.

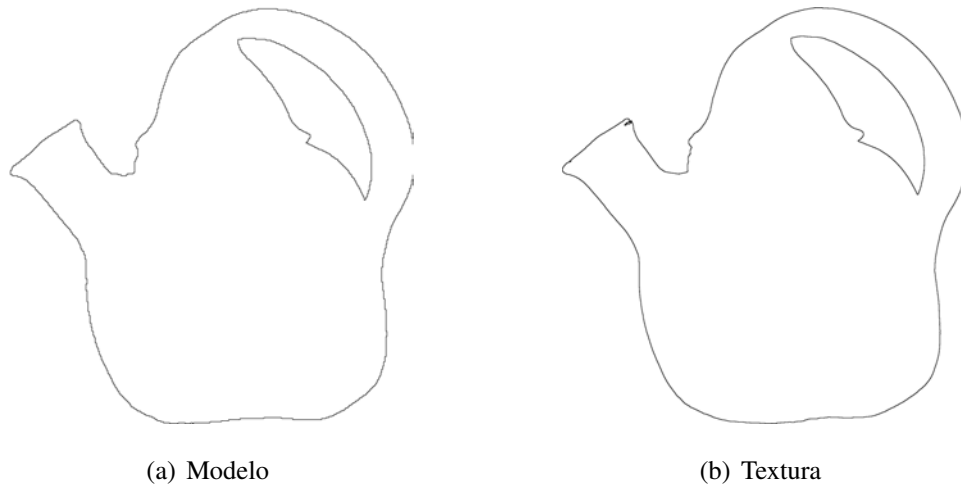


Figura 5.6: Extracción del Contorno de la Figura 5.5

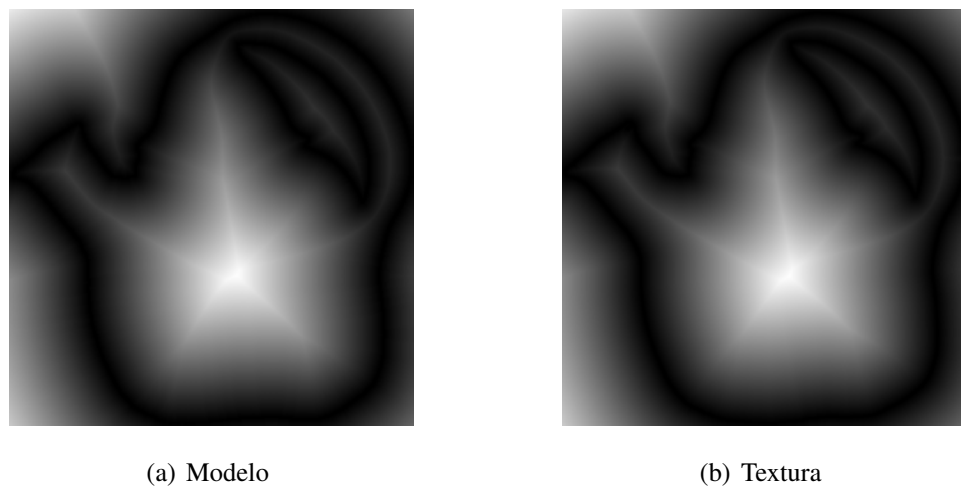


Figura 5.7: Transformación de Distancia de la Figura 5.6

La segunda métrica que se puede analizar es la diferencia absoluta de las transformaciones de distancia, cuyo resultado no se muestra gráficamente por ser una figura muy oscura. Sin embargo, la diferencia promedio es igual a 2,0367 píxeles o un 0,7987% sobre 255 que es la máxima distancia posible.

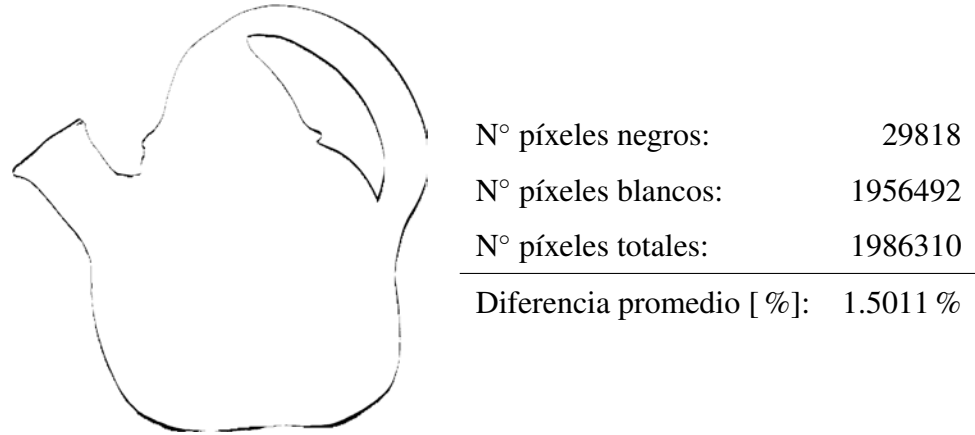


Figura 5.8: Diferencia Absoluta de las Formas (Figura 5.5)

5.3.3. Comparación de Variación de la Curvatura del Modelo con los Bordes de la Textura utilizando Medida de Distancia

Como la métrica anterior sólo es aplicada a modelos de objetos que tienen contornos bien definidos, se diseñó otra métrica para modelos que fueran ricos en la variación de la curvatura. Normalmente, esta variación se presenta en la textura como variación en la iluminación y por consiguiente cambios de color, los cuales pueden ser hallados utilizando un filtro pasa altos.

Estimación de la Variación de la Curvatura

Para estimar el valor aproximado de la variación de la curvatura de un punto del modelo, se considera la región de interés como la vecindad del punto o región *sombrilla* compuesta por el punto y los triángulos que los tienen como vértice (Figura 5.9).

Un primer acercamiento de la variación de la curvatura es el promedio de la magnitud de las diferencias entre el vector normal del punto (\vec{N}_p) con los vectores normales de los triángulos vecinos (\vec{N}_{t_i}); como se expresa en la Ec. 5.3 (Figura 5.9(a)).

$$\Delta C = \frac{\left\| \sum_{i=0}^{nvecinos} (\vec{N}_p - \vec{N}_{t_i}) \right\|}{nvecinos} \quad (5.3)$$

No obstante, esta aproximación es muy sensible a pequeñas variaciones en el modelo y por consiguiente

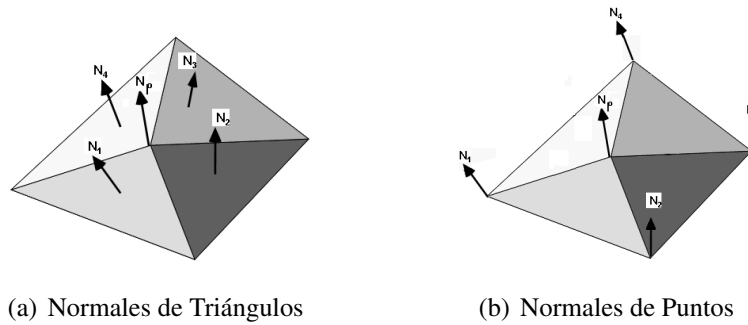


Figura 5.9: Región sombrilla

al posible ruido que tiene el modelo en el proceso de adquisición. Por este motivo, la variación de la curvatura se estimó utilizando el promedio de la magnitud de las diferencias entre el vector normal del punto (\vec{N}_p) con los vectores normales de los puntos vecinos (\vec{N}_{p_i}); como se expresa en la Ec. 5.4 (Figura 5.9(b)).

$$\Delta C = \frac{\left\| \sum_{i=0}^{nvecinos} (\vec{N}_p - \vec{N}_{p_i}) \right\|}{nvecinos} \quad (5.4)$$

En la Figura 5.10 se muestran los resultados del cálculo de la variación de la curvatura utilizando las normales de los triángulos (Figura 5.10(b)) y las normales de los puntos (Figura 5.10(c)); donde se observa el mayor realce de los puntos de mayor variación con el criterio de las normales de los puntos.

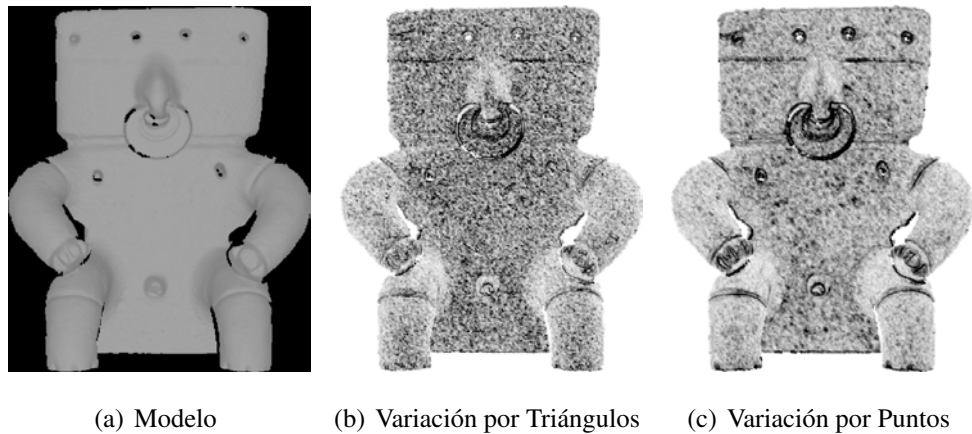


Figura 5.10: Cálculo de la Variación de la Curvatura

Después de múltiples pruebas se consideró que un punto presenta una *alta curvatura* cuando su valor es mayor a la media más tres veces la variación estándar de todos los valores de la curvatura del modelo.

Definición de la Métrica

Luego de estimar la curvatura de todos los puntos del modelo y de filtrar la textura con un filtro pasa altos, se procede a calcular la métrica propuesta. Inicialmente, se busca relacionar cada punto que cumpla con la condición de alta curvatura, con el resultado del filtro pasa altos de la textura. Esta relación se determina con el pixel del filtrado con la mínima distancia al punto evaluado (Figura 5.11).

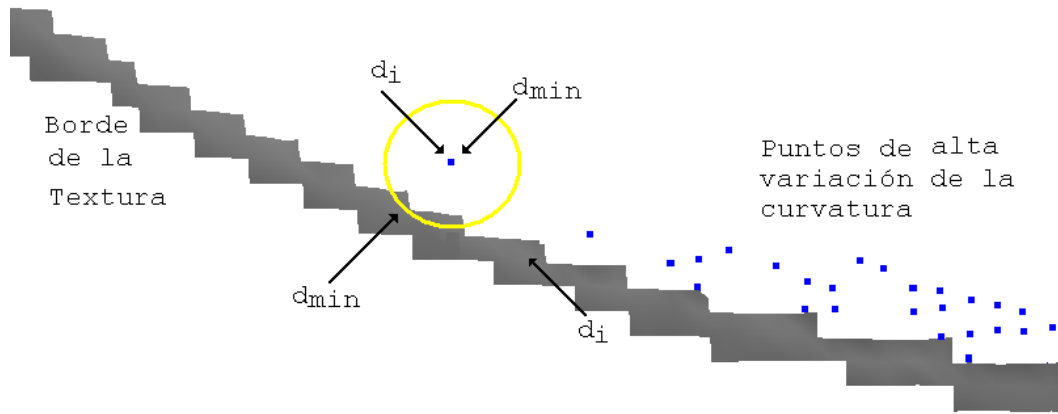


Figura 5.11: Definición de la Métrica de la Comparación de Variación de la Curvatura con Medida de Distancia 2

Este proceso de cálculo de la mínima distancia se realiza para cada uno de los puntos del modelo que cumplan con el criterio de alta curvatura. De esta forma, la métrica está descrita como el promedio de todas las mínimas distancias, como lo expresa la Ec. 5.5.

$$V_{CvsT_B} = \frac{\sum_{i=0}^{n_{paltacurvatura}} d_{i_{min}}}{n_{paltacurvatura}} \quad (5.5)$$

No obstante, no todos los puntos que presentan una alta curvatura son puntos que se correlacionan con la textura. A partir de este concepto y múltiples ensayos, se determinó un muestreo del 50% con las mínimas distancias.

Resultado

El modelo rastreado con la textura es el modelo del rostro de la Figura 5.12. Para este resultado la textura a evaluar es la imagen adquirida con la cámara CCD del escáner de rango (Figura 5.12(b)). El método utilizado para rastrear la textura es el método de mapeo de texturas utilizando puntos de control a partir de un patrón de calibración (Figura 5.12(c)).

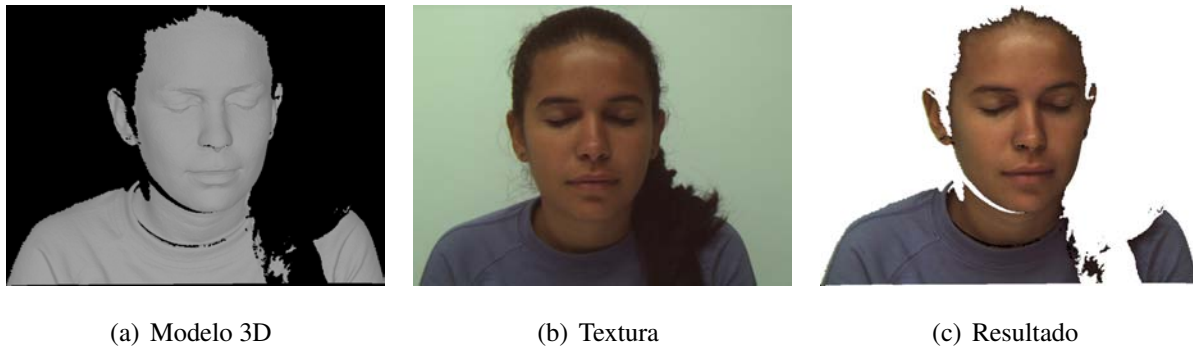


Figura 5.12: Análisis de la Comparación de Variación de la Curvatura del Modelo con los Bordes de la Textura utilizando Medida de Distancia

Inicialmente se extrae el contorno de la forma del modelo y de la textura (Figura 5.13). De esta forma, se corrobora que sobre este modelo no se puede aplicar la métrica de comparación del contorno debido a que el cabello no tiene información de rango.

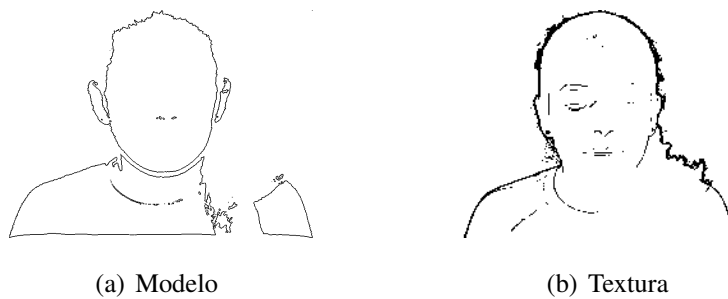


Figura 5.13: Extracción del Contorno de la Forma del Modelo y la Textura

Después de verificar los contornos, se procede con la extracción de los puntos que presentan los valores de la curvatura más alta (Figura 5.14(a)) y al mismo tiempo a proyectar la imagen resultante del filtro pasa altos (Bordes) de la textura sobre el modelo (Figura 5.14(b)).



(a) Puntos de Alta Curvatura



(b) Filtrado sobre el Modelo

Figura 5.14: Cálculo de la Curvatura y Proyección de la imagen de Bordes sobre el Modelo

Luego se procede a comparar la información de la Figura 5.14(a) y la Figura 5.14(b) utilizando la métrica de la distancia mínima. El resultado de esta comparación se observa en la Figura 5.15, donde la distancia mínima promedio del 50 % de los puntos que presentan alta curvatura con el borde de la textura es igual a 0,75099 píxeles o un $2,9450 \times 10^{-3}$ sobre 255 que es la máxima distancia posible.



Nº puntos de la curvatura evaluados:	2255
Distancia promedio ($V_C vs T_B$)[pix]:	0,75099
Distancia promedio ($V_C vs T_B$)[%]:	$2,9450 \times 10^{-3}$

Figura 5.15: Comparación de Variación de la Curvatura del Modelo con los Bordes de la Textura utilizando Medida de Distancia

5.3.4. Resultados

El objetivo fundamental de la definición de las métricas es poder comparar los métodos propuestos y las cámaras de la textura utilizadas de forma cuantitativa. Por este motivo, se utilizó un modelo al cual se le pudiera aplicar todos los métodos del mapeo de texturas propuestos para una sola textura (Capítulo 3) y de igual forma cuantificar el resultado con las métricas hasta ahora vistas. El modelo seleccionado es el modelo de la Figura 5.4. Para este análisis se utilizaron de las texturas de la cámara CCD del escáner y de la cámara SONY.

MÉTRICA	CÁMARA CCD	MÉTODO DE MAPEO		
		<i>Asig. Patrón</i>	<i>Asig. Manual</i>	<i>Registro 3D-2D</i>
Densidad [pix]	SONY	55.2314		
Densidad [pix]	Escáner	2.99574		
Error de Calibración	SONY	$0,64092 \times 10^{-3}$	$2,9235 \times 10^{-3}$	No Aplica
Error de Calibración	Escáner	$0,3317 \times 10^{-3}$	$2,0977 \times 10^{-3}$	No Aplica
$N_{t.en.v}$ [%]	SONY	90.6579	88.4967	90.94258
$N_{t.en.v}$ [%]	Escáner	96.94675	93.05025	94.5564
Contorno DT [%]	SONY	0.8249	1.3826	0.9028
Contorno DT [%]	Escáner	$3,2109 \times 10^{-3}$	$6,4544 \times 10^{-3}$	$3,6042 \times 10^{-3}$
Dif . Formas [pix]	SONY	3.5617	6.8088	3.8328
Dif . Formas DT [pix]	Escáner	1.4841	3.2464	1.78554
Curvatura DT [pix]	SONY	0.610251	1.92355	0.831914
Curvatura DT [pix]	Escáner	0.563124	1.02724	0.631518

Tabla 5.3: Métricas de Desempeño

El Tabla 5.3 se observan los valores de todas las métricas propuestas. Los mejores resultados se obtuvieron con el mapeo de texturas usando la textura de la cámara del escáner de rango y utilizando el método de mapeo de texturas utilizando puntos de control a partir de la utilización de un patrón de calibración, seguido por el método de registro 3D-2D con la misma textura. Aunque, los mejores valores de las métricas se presentaron con la textura de la cámara CCD del escáner, la diferencia con los resultados

obtenidos con la textura de la cámara SONY no es muy significativa. La métrica que mayor diferencia presenta es la medida de la densidad de píxeles sobre cada triángulo.

5.4. Método para Múltiples Vistas

Luego de asignar la textura a cada una de las vistas (Capítulo 3), se fusionan en una sola malla utilizando la metodología para múltiples vistas. Antes de la fusión general de cada una de las vistas sobre la malla general, se observa que hay triángulos de la malla que pertenecen a dos o más téxeles en las imágenes de la textura. En esta sección se propone una métrica, la cual se basa en la correlación de cada uno de los téxeles de los diferentes puntos de vista sobre cada triángulo.

Resultado

Nuestro caso de prueba será el modelo reconstruido en el Capítulo 4. En la Figura 5.16 se observa la textura sobre los triángulos de la malla que se comparten de la Vista 0 y la Vista 2.



Figura 5.16: Textura Compartida por la vista 0 y Vista 2

Se seleccionan los téxeles que se comparten por las dos vistas (Figura 5.17) y se calcula la correlación.



Figura 5.17: Ejemplo de Téxeles de Cada una de las Vistas

Este proceso se realiza sobre todos los triángulos y se determina una correlación promedio para toda la representación. El valor de la correlación toma valores entre 0 y 1, donde 1 representa la máxima correlación. Para el ejemplo de estudio (Figura 4.11(a)), los resultados de la correlación se observan en la Tabla 5.4; donde se analizan los casos de la reconstrucción del modelo utilizando las texturas de los dos tipos de cámara y con la textura sin y con corrección de color utilizando el método de constancia de color por correlación.

CASO DE ANÁLISIS	CORRELACIÓN
Cámara CCD del Escáner sin Corrección de Ilum.	0.945302
Cámara CCD del Escáner con Corrección de Ilum.	0.964916
Cámara CCD SONY sin Corrección de Ilum.	0.884496
Cámara CCD SONY con Corrección de Ilum.	0.910357

Tabla 5.4: Resultados de las Métricas de Correlación de Téxeles de Múltiples Vistas

Las métricas de múltiples vistas más altas se presentaron en los casos de reconstrucción utilizando la cámara CCD del escáner de rango. Además, la Tabla 5.4 muestra un valor más alto de la métrica en los casos donde se realizó la corrección de la iluminación, sin importar el tipo de cámara utilizada.

5.5. Discusión y Conclusiones

Las métricas están definidas en las diferentes etapas de reconstrucción, desde la simple imagen de rango hasta el modelo reconstruido a partir de múltiples vistas. La definición de las métricas de evaluación representan una parte muy importante y fundamental en este trabajo. Hasta el momento sólo se presentaban

comparaciones cualitativas entre los elementos utilizados en la adquisición. Desde este punto, se puede asegurar que los resultados obtenidos con la textura de la cámara del escáner de rango son mucho más precisos que los obtenidos con la cámara SONY. A pesar de ello, la gran diferencia en la métrica de densidad entre las imágenes de las dos cámaras utilizadas, muestra el alto nivel de detalle en la textura del objeto reconstruido que se obtiene utilizando la cámara SONY (30 veces aprox.). Igualmente, el método más preciso es el método de texturas utilizando puntos de control a partir de un patrón de calibración seguido del método de registro 3D-2D.

Es de aclarar que la métrica de múltiples vistas está sujeta a la reconstrucción del modelo completo, directamente al proceso de registro. Si el algoritmo de registro utilizado presenta un gran error en la aproximación, no se puede esperar un buen resultado en la métrica de múltiples vistas. Además, presenta una dependencia adicional en las condiciones de iluminación de las diferentes texturas, la cual es minimizada al aplicar la corrección de color descrita en la Sección 4.3.

Conclusión General y Trabajo Futuro

Este trabajo establece una metodología general para el mapeo de texturas de modelos de objetos del mundo real utilizando múltiples vistas. Las imágenes de textura pueden ser tomadas utilizando un patrón de calibración y de esta forma obtener resultados de alta precisión y calidad en la asignación de la textura sobre el modelo 3D. Igualmente, pueden ser tomadas desde posiciones arbitrarias utilizando el método semi-automático de registro 3D - 2D a un punto de vista o el método manual de asignación de puntos de control, para el mapeo de texturas obteniendo resultados muy aceptables.

Las diferencias en el brillo debido a la iluminación y a las propiedades de reflectancia de los objetos, presentes en la adquisición de las múltiples vistas del modelo, fueron reducidas utilizando un algoritmo de corrección de iluminación por constancia de color por correlación. De igual forma, la utilización de un ponderado con el uso de pesos de los posibles texeles, producen una reconstrucción visualmente suave, entre la asignación de las texturas en regiones adyacentes de la superficie del modelo.

Los mejores resultados y la mejores métricas se obtuvieron utilizando la textura proveniente de la cámara CCD del escáner de rango, esto se debe a que el sensor de adquisición de la información de rango y textura es el mismo. A pesar de ello, el mapeo de texturas utilizando las imágenes de la cámara SONY no son muy inferiores, teniendo en cuenta que ofrece mucha más información de textura, a comparación de la textura de la cámara CCD del escáner de rango, según el criterio de densidad.

Como trabajo futuro se propone redefinir la función objetivo necesaria para el registro 3D - 2D de modelos que no presenten contornos bien definidos, como los modelos de rostros. Así mismo, se propone

trabajar en el campo de la multi-resolución de superficies, utilizando criterios de textura sobre la misma. Otro aspecto para el trabajo futuro es la aplicación de los algoritmos en proyectos de conservación del patrimonio cultural y en aplicaciones médicas de cirugía estética; donde, la textura es necesaria además de la información tridimensional.

Bibliografía

- [1] ABDEL-AZIZ, Y. I., AND KARARA, H. M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proc. Symp. Close - Range Photogrammetry, Univ.of Illinois at Urbana-Champaign* (1971), 1 – 18.
- [2] BESL, P. J., AND MCKAY, N. D. A method for registration of 3d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14, 2 (1992), 239256.
- [3] BLAIS, F. Rewiew of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imanging* 13, 1 (Janury 2004), 231–240.
- [4] BORGEFORS, G. Hierarchical chamfer matching: A parametric edge matching algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10, 6 (November 1988), 849–865.
- [5] C. ROCCHINI, P. CIGNONI, C. M., AND R.SCOPIGNO. Multiple textures stitching and blending on 3d objects. *Proceedings 10th Eurographics Workshop Rendering* (June 1999).
- [6] CAIG GOTSMAN, X. G., AND SHEFFER, A. Fundamentals of spherical parameterization for 3d meshes. *ACM Transaction on Graphics* 22 (2003), 358–363.
- [7] CATMULL, E. E. *A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces*. PhD thesis, Dept. of Computer Science, University of Utah, December 1974.
- [8] CHISTIAN FRUEH, R. S., AND ZAKHOR, A. Automated texture mapping of 3d city models with oblique aerial imagery. *IEEE Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'04)* (2004).

- [9] CURLESS, B. *New Methods for Surface Reconstruction from Range Images*. PhD thesis, Stanford University, 1997.
- [10] DE BOOR., C. On calculating with b-splines. *J. Approx. Theory VI* (1972), 50–62.
- [11] DENIS LAURENDEAU, N. B., AND HOUDE, R. The mapping of texture on vr polygonal models. *Second International Conference on 3-D Imaging and Modelling (3DIM '99)* (October 1999), 332,.
- [12] DIAS, P., SEQUEIRA, V., VAZ, F., AND GONÇALVES, J. G. M. Registration and fusion of intensity and range data for 3d modelling of real world scenes. In *3DIM* (2003), pp. 418–426.
- [13] ELIOT A. FEIBUSH, MARC LEVOY, R. L. C. Synthetic texturing using digital filters. *Computer Graphics 14*, 3 (July 1980), 294–301.
- [14] ESTEBAN, C. H., AND SCHMITT, F. Silhouette and stereo fusion for 3d object modeling. *Signal and Image Processing Department - Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, France* (May 2003).
- [15] FAUSTO BERNARDINI, I. M. M., AND RUSHMEIER, H. High-quality texture reconstruction from multiple scans. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 7*, 4 (October-December 2001), 318–332.
- [16] FELZENSZWALB, P. F., AND HUTTENLOCHER, D. P. Distance transforms of sampled functions. Tech. rep., The University of Chicago, Cornell University, 2004.
- [17] FRÜH, C., AND ZAKHOR, A. 3d model generation for cities using aerial photographs and ground level laser scans. *Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision And Pattern Recognition (CVPR '01)*, (December 2001).
- [18] GABRIELE GORLA, V. I., AND SAPIRO, G. Texture synthesis for 3d shape representation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 9*, 4 (October-December 2003), 512–524.
- [19] GERHARD HEINRICH BENDELS, PATRICK DEGENER, R. W. M. K., AND KLEIN, R. Image - based reistration of 3d-range data using feacture surface elements. *The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage* (2004).

- [20] GRAHAM D. FINLAYSON, S. D. H., AND HUBEL, P. M. Color by correlation: A simple, unifying framework for color constancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 23, 11 (November 2001), 1209–1221.
- [21] GU, X., AND YAU, S.-T. Computing conformal structures of surfaces. *Communications in Information and Systems* 2, 2 (2002), 121–146.
- [22] GU, X., AND YAU, S.-T. Global conformal surface parameterization. *Eurographics Symposium on Geometry Processing* (2003), 127–137.
- [23] HARTLEY, R., AND ZISSERMAN, A. *Multiple View Geometry in computer vision*. CAMBRIDGE, 2003.
- [24] HECKBERT, P. S. Survey of texture mapping. *IEEE Computer Graphics and Applications* 6, 6 (November 1986), 56–67.
- [25] HECKBERT, P. S. Fundamentals of texture mapping and image warping. Master’s thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, June 1989.
- [26] HENDRIK P. A. LENSCH, W. H., AND SEIDEL, H.-P. Automated texture registration and stitching for real world models. *Proceedings 8th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (2000), 317–326.
- [27] HENDRIK P. A. LENSCH, W. H., AND SEIDEL, H.-P. A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching. *Graphical Models - IDEAL*, 63 (2001), 245–262.
- [28] HERNÁNDEZ, C., AND SCHMITT, E. F. Using silhouette coherence for 3d image-based object modeling under circular motion. Tech. rep., Département Traitement du Signal et des Images CNRS UMR 5141 Groupe Traitement et Interprétation des Images, 2003.
- [29] ILYA ECKSTEIN, V. S., AND GOTSMAN, C. Texture mapping with hard constraints. *Computer Science Department, Technion Israel Institute of Technology* 20, 3 (2001).
- [30] J-A BERARDIN, M. PICARD, S. E.-H. G. G. C. L. V. V., AND BANDIERA, A. Exploring a byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3d model: Combining range data and

- photogrammetry. *Proceedings of the International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording - Complementing or Replacing Photogrammetry* (Septembre 2002).
- [31] J. FELDMAR, N. A., AND BETTING, F. 3d-2d projective registration of free-form curves and surfaces. *Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision (ICCV '95)* (1995), 549–556.
- [32] J. WENG, P. C., AND HERNIOU, M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on PAMI* 14, 10 (October 1992), 965–980.
- [33] J.D. FOLEY, A VAN DOM, S. F., AND HUGHES, J. *Computer Graphics, Pirnciples ans Practice*, 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [34] JOHNSON, A., AND KANG, S. B. Registration and integration of textured 3d data. Tech. rep., Digital Equipment Corporation Cambridge Research Lab, October 1996.
- [35] KAZUNORI UMEDA, G. G., AND RIOUX, M. Registration of range and color images using gradient constraints and range intensity images. *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04)* 3 (August 2004), 23–26.
- [36] LEE S.C., J. S. K., AND R., N. Automatic pose estimation of complex 3d building models. *Workshop on Application of Computer Vision* (2002).
- [37] LORENSEN, W. E., AND CLINE, H. E. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '87)* 21, 4 (1987), 163–169.
- [38] M. POLLEYFEYS, R. KOCH, M. V., AND GOOL, L. V. Hand-held acquisition of 3d models with video camera. *Proceedings Second Int'l Conf. 3-D Digital Imaging and Modelling* (October 1999), 14–23.
- [39] MATSUSHITA, K., AND KANEKO, T. Efficient and handy texture mapping on 3d surfaces. *Proceedings Euographics '99* 18 (1999).
- [40] MIAO JIM, YALIN WANG, X. G., AND YAU, S.-T. Optimal global conformal surface parameterization for visualization. *Communications in Information and Systems* 4, 2 (2005), 117–134.



- [41] MORALES, E. C. Reconstrucción de superficies de forma libre mediante funciones nurbs. Tech. rep., Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2006.
- [42] N. DAUCHER, M. D., AND LAPRESTE, J. Camera calibration from spheres images. *In Proc. Third European Conference on Computer Vision* (1994), 449–454.
- [43] NEUGEBAUER, P. J., AND KLEIN, K. Texturing 3d models of real world objects from multiple unregistered photographic views. *Proceedings Euographics '99 18* (1999).
- [44] NIELSON, G. M. On marching cubes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 9, 3 (July-September 2003), 283–297.
- [45] PARK, I., YUN, I., AND LEE., S. Constructing nurbs surface model from scattered and unorganized range data. *Proc. 2nd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modelling . Ottawa, Canada* (October 1999).
- [46] PIEGL, LES. TILLER, W. *The NURBS Book*. Springer, 1997.
- [47] PUECH, P. Cours d'optique. Tech. rep., Université Paul Sabatier - Laboratoire de Physique des Solides de Toulouse, 2002.
- [48] PULLI, K. *Surface Reconstruction and Display from Range and Color Data*. PhD thesis, University of Washington, 1997.
- [49] R.G. LAYCOCK, A. M. D. Automatic techniques for texture mapping in virtual urban environments. *Proceedings of the Computer Graphics International (CGI'04)* (June 2004), 586–589.
- [50] RYO KURAZUME, M. D. W., AND IKEUCHI, K. Mapping textures on 3d geometric model using reflectance image. *IEICE Trans. on Information and Systems J85-DII*, 6 (June 2002), 1038–1046.
- [51] SEQUEIRA, V., AND JOAO G.M. GONCALVES. 3d reality modelling: Photo-realistic 3d models of real world scenes. *Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT'02)* (2002), 776.
- [52] S.F. EL-HAKIM, J.A. BERARDIN, F. B. A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-d vision systems. *SPIE Proc. 2646, St Petersburg Conf. on Digital Photogrammetry* (June 1995), 14–25.




- [53] SOON YONG PARK, M. S. Automatic 3d model reconstruction based on novel pose estimation and integration techniques. *Image and Vision Computing - ELSEVIER*, 22 (Janury 2004), 623–635.
- [54] STAMOS, I., AND ALLEN, P. K. 3d model construction using range and image data. *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00) I* (June 2000), 531–536.
- [55] STAMOS, I., AND ALLEN, P. K. Geometry and texture recovery of scenes of large scale. *Computer Vision and Image Understanding (CVIU) 8*, 22 (November 2002), 94–118.
- [56] STEVEN HAKER, SIGURD ANGENENT, A. T. R. K. G. S., AND HALLE, M. Conformal surface parameterization for texture mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 6, 2 (April-June 2000), 181–188.
- [57] TAREL, J.-P. Calibration de caméra fondée sur les ellipses. Rapport de recherche, Unité de recherche INRIA Rocquencourt, 1994.
- [58] TSAI, R. Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL* (1986), 364–374.
- [59] TSAI, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation RA-3*, 4 (August 1987), 323–344.
- [60] UNTEN, H., AND IKEUCHI, K. Virtual reality model of koumokuten generated from measurement. *Proceedings Of The Tenth International Conference On Virtual Systems And Multimedia (VSMM'04)* (November 2004), 209–216.
- [61] WILLIAMS, N., LOW, K.-L., HANTAK, C., POLLEFEYS, M., AND LASTRA, A. Automatic image alignment for 3d environment modeling. In *SIBGRAPI '04: Proceedings of the Computer Graphics and Image Processing, XVII Brazilian Symposium on (SIBGRAPI'04)* (Washington, DC, USA, 2004), IEEE Computer Society, pp. 388–395.
- [62] Y. YEMEZ, F. S. 3d reconstruction of real objects with high resolution shape and texture. *Image and Vision Computing - ELSEVIER* (June 2004), 1–17.

- [63] YOICHI SATO, M. D. W., AND IKEUCHI, K. Object shape and reflectance modeling from observation. *Proceedings Computer Graphics (SIGGRAPH'97)* (August 1997), 379–388.
- [64] YUUYA IWAKIRI, Y. O., AND KANEKO, T. Texture mapping on free-form surfaces immune to camera positioning errors. *Systems and Computers in Japan* 33 (2002).
- [65] ZHENG, J. J., AND ZHANG, J. J. Texture mapping on irregular topology surface. *IEEE Proceedings of the Sixth International Conference on Information Visualization (IV02)* (2002).


Apéndice A

Base de Datos

	<p>Descripción General: Modelo precolombino del Museo Universidad de Antioquía, adquirido mediante escáner de rango cada 30° desde 0° a 330°, equivalente a 12 tomas, 1 toma vista superior y otra vista inferior.</p> <p>Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 14* <i>Número de puntos:</i> 225964* <i>Número de triángulos:</i> 444350* Tomas texturadas* <i>Fotos:</i> Tomadas con el escáner de rango con resolución 640x480 y cámara Sony 2560x1920
	<p>Descripción General: Modelo precolombino del Museo Universidad de Antioquia, adquirido mediante escáner de rango cada 30° (excepto 60°) desde 0° a 330°, equivalente a 11 tomas, 1 toma vista superior y otra vista inferior.</p> <p>Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 13* <i>Número de puntos:</i> 253317* <i>Número de triángulos:</i>* Tomas texturadas* <i>Fotos:</i> Tomadas con el escáner de rango con resolución 640x480 y cámara Sony 2560x1920

	<p>Descripción General: Modelo precolombino del Museo Universidad de Antioquia, adquirido mediante escáner de rango cada 30° desde 0° a 330°, equivalente a 11 tomas, 1 toma vista superior y otra vista inferior, 2 toma laterales derecha, 2 lateral izquierda. Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 18* <i>Número de puntos:</i> 261448* <i>Número de triángulos:</i> 514444* Tomas texturadas* <i>Fotos:</i> Tomadas con el escáner de rango con resolución 640x480 y cámara Sony 2560x1920
	<p>Descripción General: Escultura de Colección de San Agustín, adquirido mediante escáner de rango 1 sola toma. Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 1* <i>Número de puntos:</i>* <i>Número de triángulos:</i>* Tomas texturadas* <i>Fotos:</i> Tomadas con el escáner de rango con resolución 640x480 y cámara Sony 2560x1920
	<p>Descripción General: Oso polar, cerámica, tomas adquiridas con escáner de rango cada 40° desde 0° a 320° equivalente a 9 tomas. Vista superior, inferior, lateral derecha y lateral izquierda. Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 13* <i>Número de puntos:</i> 209127* <i>Número de triángulos:</i> 189052* Tomas texturadas* <i>Fotos:</i> Tomadas con el escáner de rango con resolución 640x480 y cámara Sony 2560x1920

	<p>Descripción General: Gallina en cerámica, tomas adquiridas con escáner de rango cada 40° desde 0° a 320° equivalente a 9 tomas. Vista superior, inferior, lateral derecha y lateral izquierda. Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 13* <i>Número de puntos:</i> 159149* <i>Número de triángulos:</i> 317505* Tomas texturadas* <i>Fotos:</i> Tomadas con el escáner de rango con resolución 640x480 y cámara Sony 2560x1920
	<p>Descripción General:Rostro, única toma. Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 1* <i>Número de puntos:</i> 113328* <i>Número de triángulos:</i> 222463* Tomas texturadas* <i>Fotos:</i> Tomadas con el escáner de rango con resolución 640x480 y cámara Sony 2560x1920
	<p>Descripción General:Rostro, única toma. Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 1* <i>Número de puntos:</i> 20241* <i>Número de triángulos:</i> 37472* Toma texturada* <i>Fotos:</i> Tomada con el escáner de rango con resolución 640x480

	<p>Descripción General:Rostro, única toma. Características</p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Número de tomas:</i> 1* <i>Número de puntos:</i> 12117* <i>Número de triángulos:</i> 21386* Toma texturada* <i>Fotos:</i> Tomada con el escáner de rango con resolución 640x480
---	---

Calibración de Cámara

B.1. Algoritmo Tsai

Algoritmo 4 Algoritmo Tsai - Puntos no Coplanares

Entrada: n Puntos, $(x_i, y_i, z_i) \leftrightarrow (X_i^f, Y_i^f)$

Salida: $\left[T_y^{-1}s_x r_1 \quad T_y^{-1}s_x r_2 \quad T_y^{-1}s_x r_3 \quad T_y^{-1}s_x T_x \quad T_y^{-1}r_4 \quad T_y^{-1}r_5 \quad T_y^{-1}r_6 \right]^T$

1: $(X_i^f, Y_i^f) \rightarrow (X_i^d, Y_i^d)$

. Para los n puntos calcular las coordenadas de la imagen. Suponga $s_x = 1$.

$$\begin{cases} X_i^d = \frac{d_x N_{cx}}{s_x N_{fx}} (X_i^f - C_x) \\ Y_i^d = d_y (Y_i^f - C_y) \end{cases}$$

2: Para cada correspondencia construir la matriz A_i . Construir la matriz A a partir de las n matrices A_i .

$$A_i = \begin{bmatrix} Y_i^d x_{wi} & Y_i^d y_{wi} & Y_i^d z_{wi} & Y_i^d & -X_i^d x_{wi} & -X_i^d y_{wi} & -X_i^d z_{wi} \end{bmatrix}$$

Resolver le sistema

$$A_i \left[T_y^{-1}s_x r_1 \quad T_y^{-1}s_x r_2 \quad T_y^{-1}s_x r_3 \quad T_y^{-1}s_x T_x \quad T_y^{-1}r_4 \quad T_y^{-1}r_5 \quad T_y^{-1}r_6 \right]^T = X_i^d$$

3: Calcular el vector de traslación, la matriz de rotación, el factor de incertidumbre y el factor focal.(Algoritmo 5)

El Algoritmo 4 presenta una solución de una sistema de ecuaciones el cual es necesario para el cálculo de todos de los parámetros internos y externos de la cámara presentes en el Algoritmo 5).

Algoritmo 5 Cálculo de Parámetros

Entrada: $\left[T_y^{-1}s_xr_1 \quad T_y^{-1}s_xr_2 \quad T_y^{-1}s_xr_3 \quad T_y^{-1}s_xT_x \quad T_y^{-1}r_4 \quad T_y^{-1}r_5 \quad T_y^{-1}r_6 \right]^T$

Salida: T_x, T_y, T_z, R, s_x, f .

1: Suponga

$$a_1 = T_y^{-1}s_xr_1 \quad a_2 = T_y^{-1}s_xr_2 \quad a_3 = T_y^{-1}s_xr_3 \quad a_4 = T_y^{-1}s_xT_x$$

$$a_5 = T_y^{-1}s_xr_4 \quad a_6 = T_y^{-1}s_xr_5 \quad a_7 = T_y^{-1}s_xr_6$$

2: Cálculo de T_y

Norma de T_y

Signo de T_y

$$|T_y| = (a_5^2 + a_6^2 + a_7^2)^{-\frac{1}{2}}$$

* Seleccione un punto de la imagen cuyas coordenadas (X_i, Y_i) estén lejos de del centro óptico.

* Suponga el signo de T_y positivo.

$$* \begin{cases} X_c = r_1x_i + r_2y_i + T_x \\ Y_c = r_5x_i + r_5y_i + T_y \end{cases}$$

* **Si** (X_i, Y_i) tienen el mismo signo de (X_c, Y_c)

Entonces T_y es positivo, **De lo contrario** es negativo

3: Cálculo del factor de incertidumbre

$$s_x = (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{-\frac{1}{2}} |T_y|$$

4: Cálculo de la matriz de rotación.

$$R = \begin{bmatrix} \frac{a_1T_y}{s_x} & \frac{a_2T_y}{s_x} & \frac{a_3T_y}{s_x} \\ a_5T_y & a_6T_y & a_7T_y \\ \frac{a_2T_y}{s_x}a_7T_y - \frac{a_3T_y}{s_x}a_6T_y & \frac{a_3T_y}{s_x}a_5T_y - \frac{a_1T_y}{s_x}a_7T_y & \frac{a_1T_y}{s_x}a_6T_y - \frac{a_2T_y}{s_x}a_5T_y \end{bmatrix}$$

5: Cálculo de T_x

$$T_x = a_4T_y$$

6: Cálculo de T_z y la distancia focal f . Para cada n puntos resolver el sistema

$$\begin{bmatrix} r_4x_i + r_5y_i + T_y & -d_yY_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = (r_5X_i + r_8 + Y_i) d_yY_i$$

Algoritmo 6 Algoritmo de *Corrección Radial*

Entrada: Nube de puntos X_d, Y_d y Coeficiente de Distorsión κ

Salida: Nube de puntos X_u, Y_u .

Variable X_u, Y_u {*n puntos corregidos*}

Desde $i = 1$ hasta n **Hacer**

Pasar a Coordenadas del Sensor $(X_d, Y_d) \rightarrow (X_d^*, Y_d^*)$

Si $(X_d^* = 0$ y $Y_d^* = 0)$ o $\kappa = 0$ **Entonces**

$$X_u^* = X_d^*, Y_u^* = Y_d^*$$

De lo contrario

$$R_u = \sqrt{X_d^{*2} + Y_d^{*2}}, c = 1/\kappa, d = -c * R_u, Q = c/3, R = -d/2, D = Q^3 + R^2$$

Si $D \geq 0$ **Entonces**

{*Solo tiene una Raíz*}

$$\text{Hacer } D = \text{sqrt}(D), S = \sqrt[3]{R + D}, T = \sqrt[3]{R - D}, R_d = S + T$$

Si $R_d < 0$ **Entonces**

Este punto esta fuera del sensor

Fin Si

De lo contrario

{*Selección de la Raíz positiva más pequeña*}

$$\text{Hacer } D = \text{sqrt}(-D), S = \sqrt[6]{R^2 + D^2}, T = \text{atan}(D/R)/3, R_d = -S * \cos(T) + \sqrt[3]{3} * s + \text{sen}(T)$$

Fin Si

Fin Si

Pasar a Coordenadas de la Imagen $(X_u^*, Y_d^*) \rightarrow (X_u, Y_u)$

Fin Desde

Constancia de Color

C.1. Algoritmo Gray - World

Es el algoritmo más viejo y simple, el cual tiene en cuenta el efecto Gamma de la imagen causado por los estándares usados por los dispositivos o por la luz incidente a la escena, produciendo una no linealidad en la imagen, por lo cuál se debe buscar una manera adecuada y eficiente para corregirlo.

C.1.1. Efecto Gamma

La mayoría de los dispositivos producen una intensidad que es proporcional a la amplitud de la señal de potencia recibida, como resultado de esto, los rangos de alta intensidad son expandidos y los rangos de baja intensidad son comprimidos, este efecto se denomina efecto Gamma. Este efecto tiene como ventaja la filtración de Ruido y como desventaja produce una respuesta no lineal. Para minimizar el ruido en áreas oscuras de la imagen, los sistemas de video actuales limitan la ganancia cerca al negro y el resto de la curva se mantiene lineal y tangencialmente continua. Para corregir el efecto gamma se debe tener en cuenta el sistema con el cual se está tomando la imagen. La Figura muestra el efecto Gamma y su corrección.

Corrección Gamma para sistemas NTSC (National Television System Committee): Los primeros sistemas que usaron el efecto Gamma fueron los sistemas NTSC, los cuales asumen una transformación simple, con un gamma de 2, 2 (Ec. C.1) y con valores normalizados entre 0 y 1:

$$R' = R^{2,2} \quad G' = G^{2,2} \quad B' = B^{2,2} \quad (C.1)$$

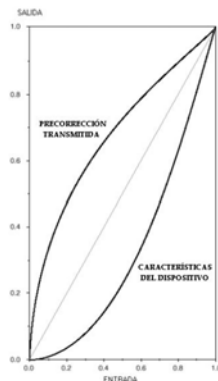


Figura C.1: Efecto Gamma

Para compensar la no linealidad del sistema NTSC, se corrige el efecto gamma por medio de una transformación inversa (Ec. C.2):

$$R = R'^{\frac{1}{2,2}} \quad G = G'^{\frac{1}{2,2}} \quad B = B'^{\frac{1}{2,2}} \quad (\text{C.2})$$

Corrección Gamma para PAL (Phase Alternating Line) y SECAM (Sequential Couleur Avec Memoire or Sequential Color with Memory): Estos sistemas asumen una transformación similar. Poseen un Gamma de 2,8 (Ec. C.3) con valores normalizados entre 0 y 1:

$$R' = R^{2,8} \quad G' = G^{2,8} \quad B' = B^{2,8} \quad (\text{C.3})$$

Se compensa la no linealidad del sistema por su transformación inversa (Ec. C.4):

$$R = R'^{\frac{1}{2,8}} \quad G = G'^{\frac{1}{2,8}} \quad B = B'^{\frac{1}{2,8}} \quad (\text{C.4})$$

Corrección Gamma para sistemas actuales: El NTSC corregido y los sistemas HDTV asumen la siguiente transformación, con un gamma de 1/4,5 (Ec. C.5 y (Ec. C.6)). Los valores RGB tienen que estar normalizados entre 0 y 1:

Para $(R, G, B) < 0,0812$

$$R' = \frac{R}{4,5} \quad G' = \frac{G}{4,5} \quad B' = \frac{B}{4,5} \quad (\text{C.5})$$

Para $(R, G, B) \geq 0,0812$

$$R' = \frac{R+0,099^{0,45}}{4,5} \quad G' = \frac{G+0,099^{0,45}}{4,5} \quad B' = \frac{B+0,099^{0,45}}{4,5} \quad (C.6)$$

Para corregir la no linealidad debido a este dispositivo:

Para $(R', G', B') < 0,0812$

$$R = 4,5R' \quad G = 4,5G' \quad B = 4,5B' \quad (C.7)$$

Para $(R', G', B') \geq 0,0812$

$$R = 1,099R'^{0,45} \quad G = 1,099G'^{0,45} \quad B = 1,099B'^{0,45} \quad (C.8)$$

C.1.2. Algoritmo

Consiste en calcular un parámetro estadístico de la escena y usar este parámetro para estimar la iluminación, la cuál se asume uniforme en la región de interés. Un candidato para esta estadística es el primer momento, llamado **media**. En términos físicos, la suposición es que el promedio de la reflectancia de la escena es relativamente estable, y por lo tanto se aproxima a una reflectancia conocida, la cual es referida al nivel de gris. Un parámetro importante de este algoritmo es como se escoge este nivel. Aunque ésta es una aproximación muy simple, hay un número de posibles variaciones. Una aproximación eficiente para encontrar el nivel de gris es asumir que posee un espectro de reflectancia uniforme, a este modelo se le denomina modelo diagonal, por lo que el algoritmo debe poder normalizar la imagen de acuerdo con la relación entre la respuesta RGB y el nivel de gris hallado. Otra aproximación no tan común para encontrar el nivel de gris es a través de los espectros promedios de las componentes RGB, en vez de asumir la reflectancia uniforme. El proceso se puede observar en la Figura C.2.

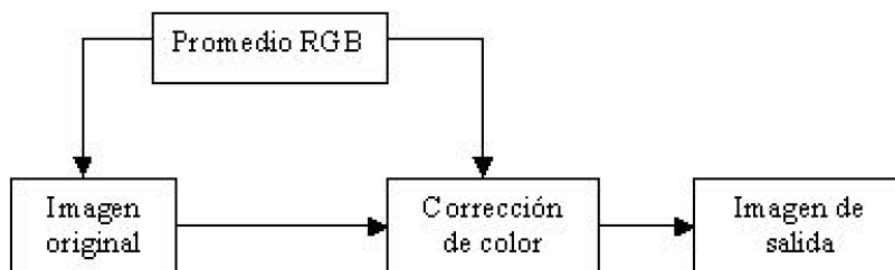


Figura C.2: Algoritmo Gray - World

C.2. Constancia de Color por Correlación

Este algoritmo trata el problema de la iluminación bajo un análisis de los colores en una imagen y se requiere conocer cómo se vería cierto color bajo diferentes luces. La iluminación que está más relacionada con la imagen es la iluminación más probable. Si los colores en una imagen parecen más amarillos de lo que deberían, entonces se podría asumir que este efecto está correlacionado con una iluminación amarilla.

Para realizar una simplificación del problema de modo que se reduzca el tiempo de cálculo, se utilizan las coordenadas de cromaticidad 2D calculadas directamente de las respuestas originales de los sensores R, G y B. Hay muchas maneras de descartar la información de intensidad, una manera adecuada es dividir dos de las respuestas de los sensores entre el tercero, como se muestra Ec. C.9.

$$X = \frac{R}{B} \quad Y = \frac{G}{B} \quad (\text{C.9})$$

Este algoritmo se divide en tres pasos principales:

1. Se codifica la información sobre la interacción entre los colores de la imagen y la iluminación.
2. Se correlaciona esta información con la información presente en una imagen particular. Los colores en una imagen son usados para calcular una medida de la probabilidad de que cada una de las iluminaciones posibles sea la iluminación de la escena.
3. Esas probabilidades son usadas para recobrar una estimación de la iluminación de la escena.

C.2.1. Algoritmo

La base de este algoritmo es recobrar una estimación de la iluminación de una imagen adquirida bajo una iluminación desconocida, ya que, de esta estimación es sencillo transformar los colores de la imagen a descriptores independientes de la iluminación. Para poder identificar la iluminación se hacen ciertas suposiciones. Primero, se asume que un dispositivo dado producirá una respuesta dentro de una región finita del espacio RGB. Por ejemplo, para un dispositivo normal de 24 bits, las coordenadas de cromaticidad podrán estar en rango de 0 a 255 en pasos de $1/255$. Segundo, se asume que este espacio

podrá ser particionado en regiones uniformes de $N \times N$, donde N debe ser tan grande para lograr un buen desempeño. Se define N_{il} como el número de imágenes con diferentes iluminaciones. Dividir el espacio de cromaticidad de esta manera implica que hay como máximo N^2 diferentes iluminaciones y N^2 diferentes superficies. De hecho, el rango de las iluminaciones posibles que son encontradas en una imagen real es mucho menor que este valor. Por notación se define $N_{il} \times 2$, la matriz C_{il} , cuya i -ésima columna es la cromaticidad de la i -ésima iluminación, la notación C_{im} representa la matriz de $N_{pix} \times 2$ de las cromaticidades de la imagen.

Primero, se construye una matriz de correlación para relacionar los posibles colores de la imagen con cada una de las N_{il} posibles iluminaciones en la escena. Para cada iluminación, se caracteriza el rango de posibles colores en la imagen (cromaticidades) que pueden ser observados bajo esa luz (Figura C.3(a)). Esta información se usa para construir una distribución de probabilidad (Figura C.3(b)) para cada iluminación formando la matriz de correlación M (cada columna de la matriz corresponde a una de las celdas discretas de $N \times N$ del espacio de cromaticidad particionado).

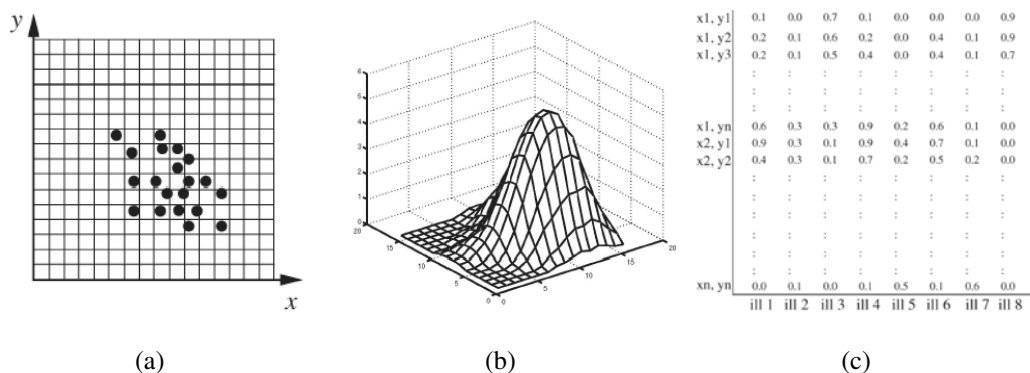


Figura C.3: Tres pasos para la construcción de la matriz de correlación. (a) Primero se caracteriza cuales de los colores de la imagen(cromaticidades) son posibles bajo cada iluminación de referencia. (b) Se usa la información para construir la distribución de probabilidad de cada luz. (c) Finalmente, se codifica esa distribución en columnas de la matriz.

Dada una matriz de correlación y una imagen cuya iluminación se desee estimar, se llevan a cabo dos pasos: Primero, se determina cuáles colores están presentes en la imagen, esta información es codificada en un vector \underline{v} de unos y ceros correspondientes a si una cromaticidad está presente o no en la imagen

(Figura C.4(a)). Segundo, es recobrar una estimación de la iluminación basada en la información de correlación entre el vector y la matriz (Figura C.4(b)).

Para el cálculo de vector \underline{v} se definen dos operaciones: La operación $chist()$ retorna un vector h (Ec. C.10)

$$\begin{aligned}
 h(x_i * y_i) &= \frac{count_i}{N_{pix}} \\
 count_i &= \sum_{j=1}^{N_{pix}} c_j \\
 c_j &= \begin{cases} 1 & C_{im}(j) = (x_i, y_i) \\ 0 & \sim \end{cases}
 \end{aligned} \tag{C.10}$$

La Ec. C.10 representa que el i -ésimo elemento de h mantiene el número de veces que una cromaticidad (x_i, y_i) ocurre en la imagen. Por ejemplo, si una cromaticidad (x_i, y_i) ocurre 10 veces en la imagen, entonces $h(x_i * y_i) = 10/N_{pix}$. La segunda operación $thresh(h)$, asegura que cada cromaticidad es contada sólo una vez (Ec. C.11).

$$thresh(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & \sim \end{cases} \tag{C.11}$$

Con esas definiciones, el vector \underline{v} puede ser expresado en la Ec C.12.

$$\underline{v} = thresh(chist(C_{im})) \tag{C.12}$$

Finalmente, se determina una medida de la correlación entre los datos de la imagen y cada una de las posibles iluminaciones. Cada columna de la matriz de correlación M corresponde a una iluminación posible, para que los elementos del vector retorne el producto $\underline{v}^t M$ que representa una medida de la correlación entre la imagen a estandarizar y las iluminaciones del conjunto de entrenamiento. Dado por el producto $\underline{v}^t M$, sea una medida de cómo la imagen está correlacionada con cada una de las posibles iluminaciones. Para obtener una medida de correlación para una iluminación, se suman los elementos de las columnas cuya posición coincida con $\setminus 1$ en el vector \underline{v} . El resultado es un vector \underline{l} , cuyos elementos expresan el grado de correlación de cada iluminación, entre más grande sea un elemento de este vector, más grande será la correlación entre los datos de la imagen y la iluminación correspondiente. Para la

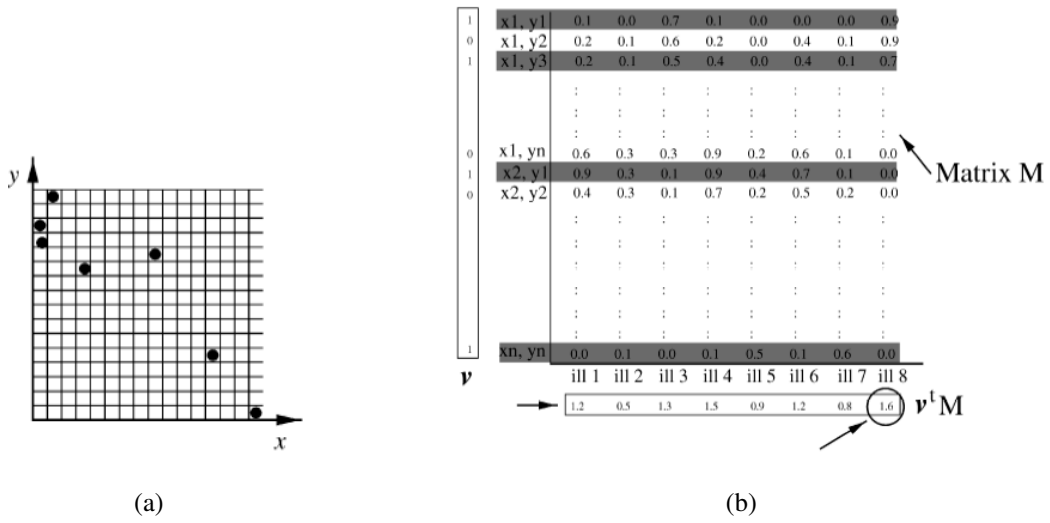


Figura C.4: (a) Histograma de cromaticidad en la imagen.(b) Correlación de este vector v con cada columna de la matrix de correlación

etapa final, se determina el mayor del vector \underline{l} .