

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Sistema de entrenamiento para poda de uvas
viníferas basado en imágenes digitales y
reconstrucción 3D por estereovisión

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Daniel G. Sbárbaro H.

Sistema de entrenamiento para poda de uvas viníferas basado en imágenes digitales y reconstrucción 3D por estereovisión

Christopher José San Juan Silva

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Septiembre 2015

Resumen

El presente trabajo de Memoria de Título propone una herramienta para la capacitación de personal encargado en la tarea de poda en la agricultura, en particular, enfocado hacia la actividad vitivinícola basado en un sistema interactivo compuesto de imágenes digitales de la vid y reconstrucción de la distribución espacial de sus ramas mediante visión estéreo. Dicho sistema tiene como fin el poder evaluar de manera formal las decisiones de los operarios antes de salir a terreno a realizar su trabajo.

Se utilizaron imágenes de la parra obtenidas por un par de cámaras digitales. El procesamiento de las imágenes y desarrollo de la aplicación se hizo en el software MATLAB versión R2014a. El set-up experimental montado en el Laboratorio de Control del DIE-UDEC constó de parras dispuestas con un telón de fondo blanco y un trípode para el montaje de las cámaras.

En lo referente a la reconstrucción tridimensional se hizo la calibración del sistema de cámaras estéreo obteniendo sus parámetros internos y la relación geométrica de ambas haciendo pruebas de triangulación y medición de objetos para verificar sus resultados [2]. Posteriormente se rectificaron imágenes de la vid como paso previo a la búsqueda de correspondencias. Estas correspondencias se determinaron utilizando el método basado en el área de Block Matching [3] y finalmente obteniendo una reconstrucción 3D de la vid a partir de mapas de disparidad de las imágenes.

El método de evaluación propuesto analiza los puntos de corte ingresados por el experto y los operarios en las imágenes en 2D en base a la distancia geodésica [18] dentro de la parra. Se realizó una función que determina una calificación tanto cuantitativa como cualitativa de las decisiones de los operarios.

Finalmente la reconstrucción 3D y el método de evaluación se combinan en una interfaz gráfica permitiendo a los operarios ingresar puntos de corte sobre las imágenes, visualizando la reconstrucción 3D de la parra y siendo evaluados de acuerdo a la opinión del experto. Las pruebas demostraron que la reconstrucción tridimensional permite visualizar la distribución espacial de la parra ayudando a la toma de decisiones y el método de evaluación logra calificar de manera formal el criterio adoptado por los operarios en determinar puntos de corte para la poda.



A Dios, mis padres, hermanos y Ruth.

Agradecimientos

Mirar hacia atrás y recordar lo vivido durante estos años de universidad me hace notar que son muchas las personas que pusieron de su parte para que pueda lograr este anhelado sueño y que cuesta poder resumir sin dejar escapar a nadie.

En primer lugar debo agradecer a Dios por bendecirme con la familia que tengo y por brindarme la oportunidad de estudiar en la UdeC.

A mis padres José Miguel y Ruth Eliana. Quienes con amor, esfuerzo y dedicación han dado todo para que sea un profesional. Siempre he sentido su apoyo incluso en los momentos más difíciles como estudiante. A Mis hermanos Miguel Ángel y María Graciela. Por su preocupación y afecto.

En este largo camino una persona fundamental ha sido Ruth Belmar. Mi polola desde que cursaba 4° Medio. Su amor, comprensión y apoyo han hecho que estos años como estudiante hayan sido maravillosos. También a sus padres Alejandro y María Inés por el cariño y hacerme parte de su familia.

A la profesora Marcia Contreras del Centro de Estudios Athens de Concepción. Por creer en mí y becarme en su preuniversitario.

No puedo dejar de mencionar a quienes fueron mis compañeros de ruta. A Claudio Molina, Marcelo Vergara y Luis Campos. Con quienes además de compartir horas de estudio, forjamos una gran amistad. Siempre tendieron una mano y su ayuda a esta Memoria de Título fue importante. A Karina Guevara y sus padres, por aguantarnos en su casa innumerables veces para los trabajos y certámenes. A Francisco Guerrero, René Guevara, Alberto Villagra y Dianela Gómez, que también formaron parte de largas jornadas de estudio. A los Pesadillas: Jorge Fuentes, Renzo Rivera, Agustín Alarcón, Iván Faúndez y Rodrigo Arrau. Los últimos compañeros en este pasar por la universidad con los que trabajamos en los Proyectos y Memoria en el laboratorio. A todos ustedes, por su significativo aporte y hacer que el día a día universitario fuera agradable en su compañía.

A los compañeros con los que jugué el Campeonato DIE confiándome la responsabilidad bajo los tres palos: 'Los Suplentes', 'Los Crudos', 'Pesadillas FC', 'Electrónica FC' y 'Coitocircuito FC'. Por los momentos gratos que pasé juntos a ustedes dentro de la cancha. Al Equipo Interfacultades del DIE del que soy parte estos últimos 3 años. Por el apoyo y respaldo permanente.

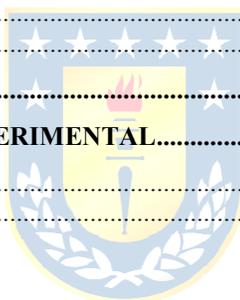
A todos con los que compartí en clases, a los profesores, los funcionarios y todos de quien recibí un amable saludo.

GRACIAS.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XI
ABREVIACIONES.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS	1
1.2.1 Calibración de cámaras	1
1.2.2 Visión Estéreo.....	2
1.2.3 Podado de la parra.....	3
1.2.4 Discusión	4
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	4
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	5
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	5
CAPÍTULO 2. TEORÍA.....	6
2.1. INTRODUCCIÓN	6
2.2. IMÁGENES DIGITALES	6
2.3. CALIBRACIÓN	7
2.3.1 Modelo Pin-Hole	7
2.3.2 Parámetros Intrínsecos.....	8
2.3.3 Distorsiones	9
2.3.4 Parámetros Extrínsecos.....	11
2.3.5 Método de Calibración.....	12
2.3.6 Calibración Estereoscópica.....	13
2.4. VISIÓN ESTÉREO	13
2.4.1 Geometría Epipolar.....	16
2.4.2 Rectificación	17
2.5. CORRESPONDENCIA	17
2.5.1 Algoritmo Block Matching.....	18
CAPÍTULO 3. CALIBRACIÓN.....	21
3.1. INTRODUCCIÓN	21
3.2. CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS	21
3.2.1 Adquisición de imágenes	22
3.2.2 Extracción de esquinas	22
3.2.3 Proceso de calibración de cada cámara	24
3.2.4 Calibración par estéreo.....	26
3.3. PRUEBA DE CALIBRACIÓN	28
3.3.1 Triangulación	28
3.3.2 Medición de los objetos	30
CAPÍTULO 4. RECONSTRUCCIÓN 3D	31
4.1. INTRODUCCIÓN	31
4.2. ADQUISICIÓN Y RECTIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES.....	31
4.3. MAPA DE DISPARIDAD	32
4.4. OBTENCIÓN DE PUNTOS 3D DEL MAPA DE DISPARIDAD	35

CAPÍTULO 5. MÉTODO DE EVALUACIÓN.....	38
5.1. INTRODUCCIÓN	38
5.2. PUNTOS DE LAS IMÁGENES.....	38
5.3. DISTANCIAS Y CÁLCULO DE APROXIMACIÓN.....	39
5.3.1 <i>Distancia Euclidiana</i>	39
5.3.2 <i>Distancia Geodésica</i>	40
5.4. TRATAMIENTO DE IMÁGENES	41
5.4.1 <i>Segmentación</i>	41
5.4.2 <i>Binarización</i>	44
5.5. CRITERIO DE EVALUACIÓN.....	45
5.5.1 <i>Criterio Individual</i>	45
5.5.2 <i>Criterio Global</i>	46
CAPÍTULO 6. DESARROLLO DE INTERFAZ GRÁFICA	48
6.1. INTRODUCCIÓN	48
6.2. INICIO DEL PROGRAMA	48
6.3. CREAR CUENTAS E INICIO DE SESIÓN.....	49
6.4. INGRESO DE DATOS (PUNTOS DE CORTE) Y VISUALIZACIÓN 3D	50
6.5. EVALUACIÓN	52
6.6. EFECTIVIDAD DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN	55
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	58
7.1. SUMARIO	58
7.2. CONCLUSIONES.....	58
7.3. TRABAJO FUTURO.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXO A. CÁMARAS Y SET-UP EXPERIMENTAL.....	64
A.1. CÁMARAS DIGITALES	64
A.2. SET-UP EXPERIMENTAL.....	65



Lista de Tablas

TABLA 3.1 Parámetros intrínsecos cámara izquierda.....	24
TABLA 3.2 Parámetros intrínsecos cámara derecha	25
TABLA 3.3 Parámetros intrínsecos sistema estéreo.....	26
TABLA 3.4 Parámetros extrínsecos par estéreo	26
TABLA 3.5 Resultados prueba de triangulación.....	29
TABLA 3.6 Resultados prueba de medición de objetos	30
TABLA 5.1 Rango de notas y calificación.....	46
TABLA 5.2 Resumen criterio global de evaluación.....	47



Lista de Figuras

Fig. 2.1 a) Imagenes R, G y B. b) Imagen digital completa	6
Fig. 2.2 Imagen en escala de gris.....	7
Fig. 2.3 Modelo de la cámara de pinhole	8
Fig. 2.4 Distorsión radial	10
Fig. 2.5 Distorsión tangencial	11
Fig. 2.6 Ejemplo de distorsión. a) Imagen sin distorsión, b) Distorsión radial, c) Distorsión tangencial	11
Fig. 2.7 a) Sistema de visión estereoscópica biológica. b) Superposición de imágenes	14
Fig. 2.8 Sistema de visión estéreo	14
Fig. 2.9 Geometría del sistema de visión estéreo	15
Fig. 2.10 Relación entre disparidad y distancia.....	16
Fig. 2.11 a) Cámaras no alineadas. b) Geometría epipolar.....	16
Fig. 2.12 a) Objetivo de la rectificación	17
Fig. 2.13 Búsqueda de correspondencias.....	20
Fig. 3.1 Ejemplo par de imágenes estéreo con las dos cámaras Kodak. a) izquierda. b) derecha.....	21
Fig. 3.2 Patrón de calibración	21
Fig. 3.3 Imágenes para detección de esquinas: a) Cámara izquierda. b) Cámara derecha	22
Fig. 3.4 Extracción de esquinas: a) Predictor de esquinas. b) Extracción de esquinas	23
Fig. 3.5 Corrección en la extracción de esquinas. a) Predictor de esquinas. b) Extracción de esquinas.....	23
Fig. 3.6 Parámetros extrínsecos cámara izquierda.....	24
Fig. 3.7 Parámetros extrínsecos cámara derecha.....	25
Fig. 3.8 Parámetros extrínsecos par estéreo.....	26
Fig. 3.9 Comparación de la traslación horizontal de las cámaras con la obtenida en la calibración. a) Medición, b) Proyección centro óptico cámara izquierda, c) Proyección centro óptico cámara derecha	27
Fig. 3.10 Escena dispuesta para triangulación y medición de objetos	28
Fig. 3.11 Capturas de la escena de prueba y puntos seleccionados. a) Imagen Izquierda, b) Imagen derecha.....	29
Fig. 4.1 a) Captura cámara izquierda. b) Captura cámara derecha	31
Fig. 4.2 a) Imágenes rectificadas completas. b) Imágenes rectificadas válida.....	32
Fig. 4.3 Mapa de disparidad.....	32
Fig. 4.4 Histograma del mapa de disparidad.....	33
Fig. 4.5 a) Mapa de disparidad ecualizado entre 0.47 y 0.71 del original	34
Fig. 4.6 a) Mapa de disparidad filtrado	34
Fig. 4.7 Vista plano XY. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado.....	35
Fig. 4.8. Vista plano XZ. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado	36
Fig. 4.9. Vista plano YZ. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado	36
Fig. 4.10 Vista plano oblicuo. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado.....	37
Fig. 5.1 Ejemplo: indicar punto de corte	38
Fig. 5.2 Puntos de corte: Operario (cyan), Experto (magenta).....	39
Fig. 5.3 Distancia geodésica	40
Fig. 5.4 Obtención de distancias geodésicas.....	41
Fig. 5.5 a) Imagen RGB b) Imagen en escala de gris.....	42
Fig. 5.6 Histograma de la imagen.....	42
Fig. 5.7 Imagen segmentada con umbral de intensidad 150	43
Fig. 5.8 a) Proceso de segmentación 3x4 regiones b) Segmentación terminada.....	44
Fig. 5.9 a) Proceso de segmentación 6x4 regiones b) Segmentación terminada.....	44
Fig. 5.10 Binarización de la parra.....	45

Fig. 5.11 Definición de tolerancias.....	45
Fig. 6.1 Inicio del programa.....	48
Fig. 6.2 Creación de cuenta EXPERTO.....	49
Fig. 6.3 Creación de cuenta OPERARIO.....	49
Fig. 6.4 Ventana de trabajo. Usuario OPERARIO antes de ingresar puntos.....	51
Fig. 6.5 Ventana de trabajo. Usuario OPERARIO, después de ingresar puntos.....	51
Fig. 6.6 a) Imagen para el ingreso de puntos. b) Representación 3D.....	52
Fig. 6.7 a) Ventana de trabajo usuario experto.....	52
Fig. 6.8 Ventana de evaluación antes de cargar datos.....	53
Fig. 6.9 Ventana de evaluación después de cargar datos.....	54
Fig. 6.10 Ventana del operario con el resultado de su evaluación.....	54
Fig. 6.11 Caso #1. Ejemplo de obtención de calificación 'EXCELENTE'.....	55
Fig. 6.12 Caso #2. Ejemplo de obtención de calificación 'BUENO'.....	56
Fig. 6.13 Caso #3. Ejemplo de obtención de calificación 'REGULAR'.....	56
Fig. 6.14 Caso #4. Ejemplo de obtención de calificación 'MALO'.....	57
Fig. A.1 Cámara digital Kodak EasyShare C813.....	64
Fig. A.2 Cámara digital Kodak EasyShare C713.....	64
Fig. A.3 Sistema de captura estéreo. Cámaras pegadas.....	65
Fig. A.4 Parra dispuesta con telón de fondo blanco.....	65
Fig. A.5 Set-up experimental.....	66



Nomenclatura

Matrices

K	: Matriz de calibración.
P	: Matriz de proyección.
R	: Matriz de rotación 3D.
R_{α}	: Matriz de rotación con respecto al eje x.
R_{β}	: Matriz de rotación con respecto al eje y.
R_{θ}	: Matriz de rotación con respecto al eje z.
W	: Matriz de parámetros extrínsecos.

Vectores

C	: Centro óptico de la lente.
C₀, C₁	: Centros óptico de las lentes de las cámaras 1 y 2 respectivamente.
t	: Vector de traslación.
\vec{T}	: Vector de posición de un cámara con respecto a la otra en un par estéreo.
P, M	: punto real en el espacio tridimensional.
m(x,y)	: proyección de un punto real M en una imagen 2D.
m₁, m₂	: Proyección de un punto real en los planos imagen de las cámaras 1 y 2 respectivamente
(x_{dist}, y_{dist})	: posición de un pixel distorsionado.
(\tilde{x}, \tilde{y})	: posición corregida de un pixel.

Escalares

α	: Angulo de rotación eje x.
β	: Angulo de rotación eje y.
θ	: Angulo de rotación eje z.
a	: límite de distancia individual para evaluar un punto como excelente.
A	: límite de distancia global para evaluar un punto como excelente.
b	: límite de distancia individual para evaluar un punto como bueno.
B	: límite de distancia global para evaluar un punto como bueno.
c	: límite de distancia individual para evaluar un punto como regular.
C	: límite de distancia global para evaluar un punto como regular.
c_x, c_y	: Desplazamiento del centro de coordenadas del plano imagen.
c_{x0}, c_{x1}	: Desplazamiento horizontal del centro de coordenadas del plano imagen. en sistema estéreo.
c_{y0}, c_{y1}	: Desplazamiento vertical del centro de coordenadas del plano imagen. en sistema estéreo.
d	: Disparidad.
D_{i,j}	: Distancia entre un punto <i>i</i> del experto y un punto <i>j</i> del operario.
d_i	: constante de la recta que define un tramo de la función de evaluación global.
D_i	: Distancia mínima entre un punto <i>i</i> del experto y los puntos del operario.
D_T	: Sumatoria de las distancias individuales D_i .

f	: Distancia focal de la lente entre el centro óptico y el plano imagen en milímetros.
f_x, f_y	: Distancias focales en pixeles.
I_c	: Centro de la ventana de normalización en el prefiltrado Block Matching.
I_{cap}	: Límite numérico, normalización.
\bar{I}	: Media de las intensidades dentro de la ventana.
i_0, i_1	: coordenada horizontal imagen izquierda y derecha respectivamente.
k_i	: Coeficientes de distorsión.
$L(\tilde{r})$: Factor de distorsión.
m	: Cantidad de filas en una matriz de una imagen.
m_i	: Pendiente de la recta que define un tramo de la función de evaluación global.
n	: Cantidad de columnas en una matriz de una imagen.
q_0, q_1	: Proyección de un punto P del espacio en la cámara izquierda y derecha respectivamente.
\tilde{r}	: Distancia desde el centro de la imagen
s	: Factor de perpendicularidad.
S_x, S_y	: Numero de pixeles por unidad del sensor.



Abreviaciones

Mayúsculas

2D	: Espacio físico bidimensional.
3D	: Espacio físico tridimensional.
DIE	: Departamento de Ingeniería Eléctrica.
CCT	: Camera Calibration Toolbox.
SCCT	: Stereo Camera Calibration Toolbox.
CCD	: Charge-Coupled Device (Dispositivo de cargas(eléctricas) interconectadas).
RGB	: Un esquema de representación de imágenes digitales.
SAD	: Suma de Diferencias Absolutas.



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En la industria vitivinícola, como también en otros tipos de cultivos una tarea fundamental es la poda. Por medio de esta práctica se puede incidir directamente en el rendimiento que la planta tendrá la temporada siguiente. El análisis de imágenes en visión por computador puede ser una herramienta de ayuda para obtener una poda más precisa y/o automatizar el proceso.

La poda no es un proceso sencillo, requiere conocimiento de la planta y de las condiciones propias del clima y la geografía del lugar para elegir la estrategia de podado adecuada para cada tipo de cepa. Existen dos clases de podas dependiendo de la estación a realizarse: la poda en seco (invierno) y la poda en verde (primavera). El estudio de este trabajo se limita únicamente a la poda de invierno.

En nuestra región y resto del país la tarea de poda se realiza de forma manual, esto es, con personal que mediante la utilización de herramientas realizan la poda tras una capacitación. Esta capacitación no es formal y no certifica las competencias de los operarios.

El presente trabajo se basa en el análisis de imágenes de la parra por visión estéreo para obtener una reconstrucción 3D de la misma y desarrollar una interfaz gráfica que permita tanto al experto como a los operarios ingresar los puntos de corte de la parra y así obtener un índice de que tan acertado es la decisión del operario.

1.2. Trabajos Previos

La bibliografía se basa en dos temas principalmente: La calibración de las cámaras y la visión estéreo. En menor medida se estudiará la poda de la parra tomando en cuenta que es el entorno donde se desea aplicar el sistema a desarrollar.

1.2.1 Calibración de cámaras

- ♣ José G. Hoyos G., Jaiber E. Cardona A., Luis M. Capacho V., Luis F. Orozco, “Técnicas de Calibración de Cámaras para visión estéreo y reconstrucción”. *XV Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial*, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2010 [1].

Presenta una revisión de dos métodos de calibración de cámaras, siendo el método de Zhengyo Zang representativo de una técnica coplanar y el método de Heikkilä de una no-coplanar. Realiza una calibración con ambos métodos a modo de comparar sus resultados en la medición de objetos. Utiliza el toolbox de calibración MATLAB desarrollado por Bouget [10].

- ♣ Wang Qi, Fu Li, Liu Zhenzhong, “Review on Camera Calibration”. *Chinese Control and Decision Conference*, pp. 3354-3358, Xuzhou, China, May 2010 [8].

En este trabajo se realiza un avistamiento general sobre la calibración de cámaras digitales, donde a la vez se define que estas técnicas o métodos de calibración están divididas en tres categorías distintas: técnicas de calibración clásicas, de auto calibración y de calibración basada en visión activa. Las aplicaciones en las que se centra principalmente esta publicación van dirigidas hacia los sistemas de visión por computador o visión artificial, la robótica, sistemas de vigilancia, así como también en el área de biomédica.

1.2.2 Visión Estéreo

- ♣ M. Montalvo, “Técnicas de visión estereoscópica para determinar la estructura tridimensional de la escena”, Proyecto Fin de Master en Ingeniería Informática para la industria, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 2010 [11].

Este trabajo realiza un estudio acerca de la efectividad de una serie de métodos de correspondencia estereoscópica. La importancia de este trabajo es que centra su estudio en la viabilidad de los métodos para su implementación en sistemas estereoscópicos que se desea operar en exteriores y en diversas condiciones realizando pruebas experimentales.

- ♣ V. Schweppe, “Estudio de métodos de visión estereométrica”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, 2008 [12].

En este trabajo se analizan varios métodos de visión estereométrica compuesto por dos cámaras con disparidad horizontal, partiendo con sus fundamentos teóricos acerca de la geometría de la visión estereo, determina los parámetros involucrados y sus relaciones. Estudia los métodos basados en la correspondencia, modelos de energía y métodos para mejorar la confiabilidad de las estimaciones. Realiza un estudio comparativo de los algoritmos revisados usando imágenes creadas por ordenador e imágenes reales.

- ♣ K. Vilá, “Reconstrucción 3D de modelos utilizando técnicas de visión artificial”, Proyecto fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, 2009 [14].

Este trabajo realiza un algoritmo que a partir de imágenes crea un modelo tridimensional, hace un estudio de diferentes técnicas entre ellas la visión estéreo. Realiza una reconstrucción tridimensional usando técnicas basadas en las características detectando de puntos de interés como bordes y esquinas, además de aplicar segmentación de imágenes.

- ♣ J. Tarlea, “Sistema de posicionamiento de objetos mediante visión estéreo embarcable en vehículos inteligentes”, Proyecto Fin de Carrera, Ingeniero de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, 2009 [15].

Este trabajo realiza un diseño e implementa un sistema de visión estéreo que estima las distancias en las que se encuentran los objetos. Efectúa la calibración de un par estéreo, corrige imágenes, genera mapas de disparidad y las distancias de los objetos. Hace un estudio acabado de la teoría explicando los fundamentos teóricos de la visión estéreo y métodos de correspondencia.

1.2.3 Podado de la parra

- ♣ Michael W. Kilby. “Evaluation of various pruning methods for maximum production of wine grape cultivars in southern Arizona” Extension Horticulturist, College of Agriculture, University of Arizona, Wine Grape Research Report, 1999 [4].

En este trabajo se realiza una evaluación de la parra a partir de distintos métodos de poda. Analiza características como peso de poda, rendimiento, peso del racimo y características de calidad consistente en análisis de pH. Demuestra la importancia del tipo de poda realizada ya que a esta etapa en el proceso de producción incide directamente en el desempeño de la planta.

- ♣ Guillermo Pérez Recio. “Operaciones manuales en viñedo” Colección Prácticas Agropecuarias, Dirección General de Industrialización y Modernización Agraria, Junta de Castilla y León, 2009 [6].

Esta publicación resulta ser muy importante ya que su información es de mucha utilidad para conocer acerca del proceso de poda de la parra. Es un manual para operadores que indica conceptos necesarios para la tarea de poda. Explica la anatomía de la parra y su formación, pero el aspecto más relevante y que es explicado en profundidad es referente a la poda tanto en seco (poda de invierno)

como en verde (primavera).

1.2.4 Discusión

La revisión realizada muestra que la visión artificial es una herramienta que brinda enormes utilidades en distintas aplicaciones en que se desea obtener información de la escena. Dentro de esto la visión estéreo es un método cada vez mas usado para obtener información tridimensional a partir de imágenes en dos dimensiones.

Con la intención de aplicar la visión artificial en nuevas áreas del desarrollo productivo, este trabajo se basa en la utilización de imágenes y reconstrucción espacial de la parra para ayudar en la tarea de capacitación de personal dedicado a la tarea de poda en la industria vinífera a través de un sistema que pueda determinar de manera formal el grado de aptitudes del personal.

1.3. Hipótesis de Trabajo

Imágenes digitales de la vid y reconstrucción tridimensional por visión estéreo puede ser una herramienta útil para mejorar la capacitación de personal en la tarea de poda en los viñedos.



1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de entrenamiento interactivo 3D para ser utilizado en la capacitación de operarios para la poda de la parra.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Calibración de un par estéreo de cámaras.
- Reconstrucción 3D de la estructura espacial de la parra por estereovisión.
- Desarrollo de interfaz gráfica interactiva para capacitación.
- Definir un índice de acierto.

1.5. Alcances y Limitaciones

El desarrollo de este trabajo se realizará en el Laboratorio de Control del DIE UDEC. Se utilizarán imágenes de parras reales para el procesamiento. La programación y desarrollo de interfaz gráfica se realizarán en MATLAB. La adquisición de imágenes se realizará con un par de cámaras digitales KODAK EasyShare modelos C713 y C813.

1.6. Temario y Metodología

En el presente informe se muestra el trabajo realizado. En el transcurso de este primer capítulo se hace una introducción explicando la motivación del trabajo, seguido de revisión bibliográfica, definición de la hipótesis, determinación de objetivos más los alcances.

El Capítulo 2 contiene la base teórica que da sustento a la memoria. Se muestra un análisis de la geometría de las cámaras, la calibración de éstas y la visión estéreo como método de reconstrucción de la escena tridimensional—rectificando las imágenes y búsqueda de correspondencias por el algoritmo Block Matching.

Los siguientes capítulos contienen el desarrollo propiamente tal: la calibración (Capítulo 3), la reconstrucción 3D por visión estéreo (Capítulo 4), desarrollo de un método de evaluación (Capítulo 5) y desarrollo de interfaz gráfica interactiva (Capítulo 6).

El último capítulo (Capítulo 7) contiene las conclusiones de lo realizado y además se visualiza el trabajo a futuro.

Capítulo 2. Teoría

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los aspectos teóricos involucrados en la visión por computador que nos permiten recuperar la información de profundidad de los objetos perdida en la captura de imágenes digitales. Se hace un estudio de la geometría de las cámaras y el calibrado de éstas para relacionarla con las coordenadas del mundo tanto individualmente como en un sistema estéreo. Posteriormente se presenta la visión estéreo como método de reconstrucción tridimensional explicando el rectificado de imágenes para la búsqueda de correspondencias en ambas capturas de la escena.

2.2. Imágenes digitales

En la actualidad la tecnología por la cual se desarrolla la visión por computador son las imágenes digitales. Estas imágenes permiten observar el entorno y utilizar esta información en un ordenador para muchas aplicaciones ya mencionadas.

En la digitalización de una imagen se aplica una técnica que se lleva a cabo mediante un dispositivo llamado CCD (*Charge-Coupled Device*) que consiste en un determinado número de condensadores acoplados en forma de matriz que captan la luz a determinadas frecuencias de rojo, verde y azul lo cual permite obtener una imagen bajo el esquema RGB.

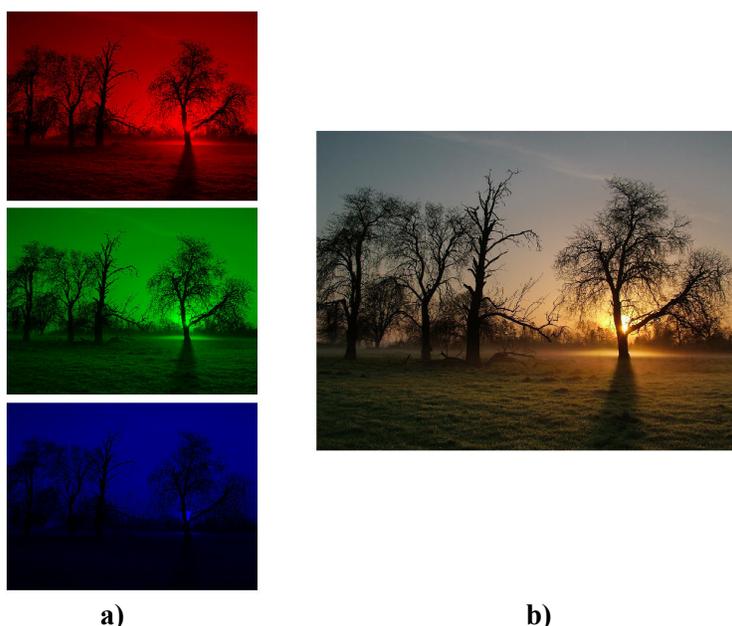


Fig. 2.1 a) Imágenes R, G y B. b) Imagen digital completa.

El esquema RGB representa en tres matrices de $m \times n$ las intensidades de cada uno de los tres colores primarios que forman la imagen. Usualmente la información de intensidad se codifica con un byte teniendo intensidades en el rango de 0 a 255.



Fig. 2.2 Imagen en escala de gris.

Para muchas de las aplicaciones es conveniente trabajar con imágenes en escala de grises como en este caso que se realiza al inicio de la calibración de las cámaras y en las imágenes de las parras en el desarrollo de este trabajo.

2.3. Calibración

La calibración de una cámara es el proceso de determinar las características internas, geométricas y ópticas de la cámara (parámetros intrínsecos) y la posición 3D del marco de la cámara respecto a un cierto sistema de coordenadas (parámetros extrínsecos). Estos datos no los entrega el fabricante, es por esto que los métodos más usados se basan en analizar un patrón conocido. Los principales objetivos de la calibración son por una parte corregir las distorsiones en la generación de la imagen para conseguir que ésta sea fiel a la perspectiva del mundo real y por otra poder establecer la geometría epipolar que permita rectificar las imágenes, lo cual simplifica la búsqueda de correspondencias de puntos de ambas imágenes en la reconstrucción 3D.

2.3.1 Modelo Pin-Hole

Existen varios modelos que explican la forma en que un objeto del espacio tridimensional real se proyecta sobre un plano convirtiéndolo en una imagen 2D. El más utilizado y sencillo es el modelo pin-hole.

Este modelo se puede interpretar como una caja que permite que los rayos luz penetren en su interior mediante un pequeño agujero en uno de los lados de la caja e incidir sobre una superficie fotosensible en el lado opuesto teniendo como consecuencia una imagen invertida.

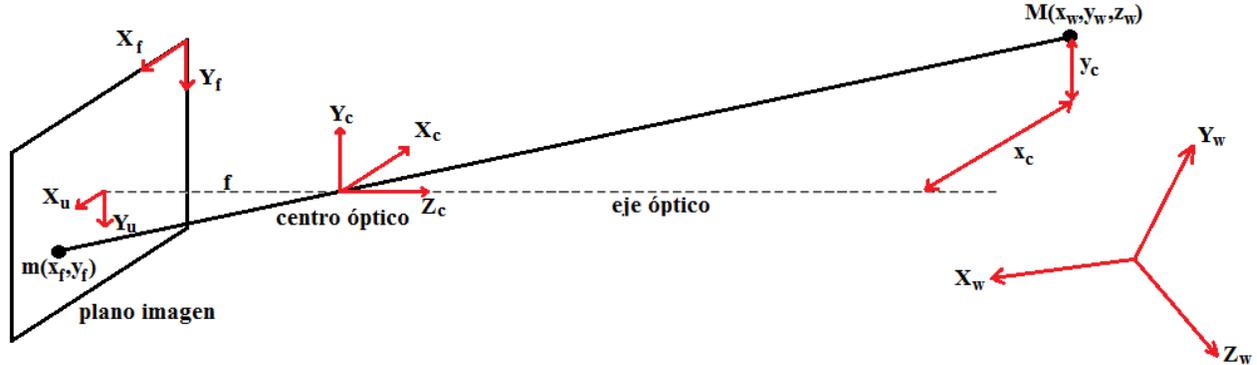


Fig. 2.3 Modelo de la cámara de pinhole.

La Figura 2.3 muestra una representación geométrica equivalente del modelo de la cámara. El centro óptico C es el punto de la lente en que los rayos de luz que pasan por él no sufren desviación. El eje óptico es la línea imaginaria que parte desde C y corta perpendicularmente al plano imagen. La distancia focal f es la distancia existente entre el plano imagen y el centro óptico. El punto principal p , es la intersección del plano imagen con el eje óptico, normalmente no se encuentra alineado con el sensor de la cámara.

Si se definen $\mathbf{M}=(X,Y,Z)^T$ y $\mathbf{m}=(x,y)^T$, ambas respecto a coordenadas de la cámara, la relación entre ambas se puede obtener mediante:

$$\frac{x}{f} = \frac{X}{Z}, \quad \frac{y}{f} = \frac{Y}{Z} \quad \Rightarrow \quad x = f \frac{X}{Z}, \quad y = f \frac{Y}{Z} \quad (2.1)$$

De acuerdo a este modelo y considerando el centro óptico como origen del sistema de coordenadas, todo punto \mathbf{M} del mundo real, se transformará en un punto \mathbf{m} de una imagen según la relación:

$$m \cong PM \quad (2.2)$$

donde P es la matriz de proyección.

2.3.2 Parámetros Intrínsecos

La matriz de proyección P transforma las coordenadas de un punto tridimensional del mundo real a píxeles de una imagen. Se construye a partir de una matriz K y un vector de valores nulos:

$$P = [K|0] \quad (2.3)$$

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

donde,

K : matriz de calibración.

c_x, c_y : desplazamiento del centro de coordenadas del plano imagen.

s : factor que determina el grado de perpendicularidad de las paredes de los pixeles del sensor.

f_x, f_y : distancias focales en pixeles.

Las distancias focales son proporcionales a la longitud focal f :

$$f_x = f \cdot S_x, \quad f_y = f \cdot S_y \quad (2.5)$$

donde:

f : longitud focal física de la lente en mm.

S_x, S_y : número de pixeles por unidad del sensor a lo largo del eje x e y respectivamente.

2.3.3 Distorsiones

Básicamente existen dos efectos que distorsionan la imagen, conocidos como radial y tangencial.

A. *Distorsión Radial*

Los lentes permiten que la luz entre más fácilmente y tenga mejor enfoque, pero también producen deformaciones. Esta distorsión se debe a que los rayos que inciden lejos del centro óptico se curven más que los que inciden en el centro de la lente.

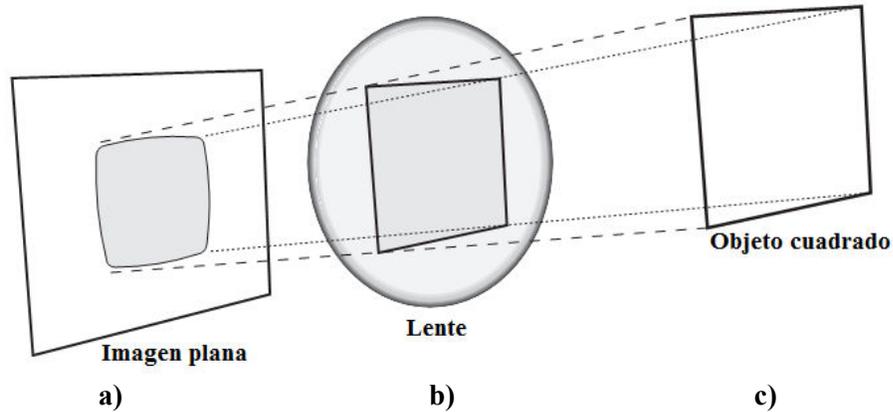


Fig. 2.4 Distorsión radial [7].

La distorsión radial se puede modelar mediante una serie de Taylor en torno a $r=0$, teniéndose las coordenadas de una imagen con distorsión:

$$x_{dist} = L(\tilde{r}) \cdot \tilde{x} \quad y_{dist} = L(\tilde{r}) \cdot \tilde{y} \quad (2.6)$$

donde,

(x_{dist}, y_{dist}) : posición de un píxel en la imagen seleccionada.

(\tilde{x}, \tilde{y}) : posición de un píxel en la imagen corregida.

\tilde{r} : distancia desde el centro. $\tilde{r} = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}$.

$L(\tilde{r})$: factor de distorsión igual a

$$L(\tilde{r}) = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \quad (2.7)$$

donde,

$$r^2 = \sqrt{(x_{dist} - x_c)^2 + (y_{dist} - y_c)^2}.$$

k_i : coeficientes de distorsión.

Por tanto, las coordenadas de los píxeles de la imagen corregida se determinan de la siguiente manera:

$$\tilde{x} = x_c + L(r)(x_{dist} - x_c) \quad , \quad \tilde{y} = y_c + L(r)(y_{dist} - y_c) \quad (2.8)$$

B. Distorsión Tangencial

La distorsión tangencial se debe a problemas propios de la cámara y no a causa de la lente. Puede ocurrir durante el proceso de fabricación en que el sensor no queda adecuadamente pegado en donde se apoya produciendo que la lente no quede paralela al plano en el que se forma la imagen.

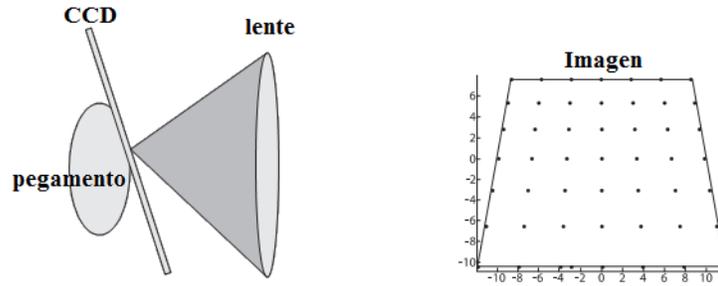


Fig. 2.5 Distorsión tangencial [7].

Esta distorsión se expresa como:

$$\tilde{x} = x_{dist} + \left[2p_1 y_{dist} + p_2 (r^2 + 2x_{dist}^2) \right] \quad , \quad \tilde{y} = y_{dist} + \left[2p_2 x_{dist} + p_1 (r^2 + 2y_{dist}^2) \right] \quad (2.9)$$

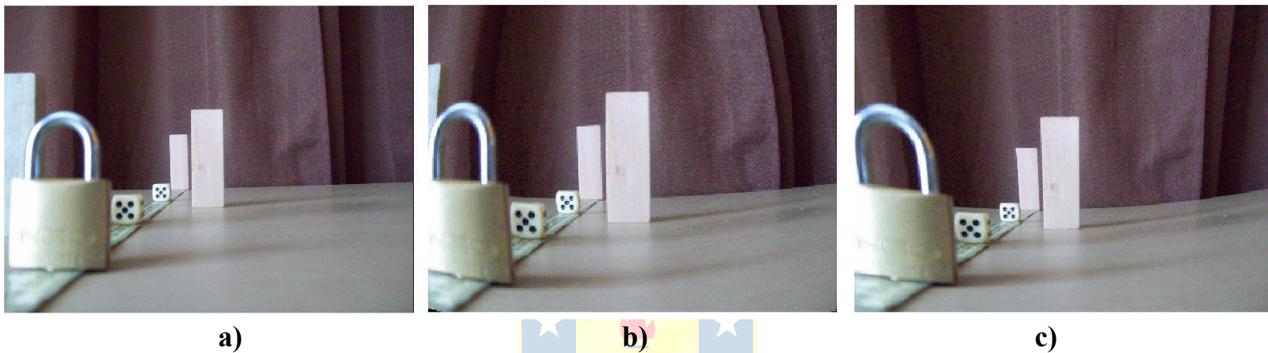


Fig. 2.6 Ejemplo de distorsión. a) Imagen sin distorsión, b) Distorsión radial, c) Distorsión tangencial.

2.3.4 Parámetros Extrínsecos

Para el cálculo de los parámetros intrínsecos se considera el centro óptico como origen del sistema de coordenadas. Para modelar el sistema independiente de la posición de la cámara es necesario modificar la ecuación (2.2):

$$m \cong PWM \quad (2.10)$$

$$W = [R \quad t] \quad (2.11)$$

W es la matriz de parámetros extrínsecos de la cámara. R es la matriz de rotación que alinea en la misma dirección y sentido los ejes x, y, z de los dos sistemas de coordenadas. El vector de traslación t traslada el origen de sistema de coordenadas del objeto en el espacio al sistema de coordenadas de la cámara.

$$t = [t_x, t_y, t_z] \quad (2.12)$$

La rotación de los ejes s debe a tres matrices de rotación. Los ejes x, y, z están especificados por ángulos α, β, θ respectivamente:

$$\begin{aligned}
R_\alpha &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \\
R_\beta &= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \\
R_\theta &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Al multiplicar las 3 matrices para manejar sólo una, obtenemos:

$$\begin{aligned}
R &= R_\alpha R_\beta R_\theta \\
&= \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cos(\theta) & -\cos(\beta)\sin(\theta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\theta) + \cos(\alpha)\sin(\theta) & -\sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\theta) + \cos(\alpha)\cos(\theta) & \sin(\alpha)\cos(\beta) \\ \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\theta) - \sin(\alpha)\sin(\theta) & -\cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\theta) - \sin(\alpha)\cos(\theta) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

La matriz de rotación \mathbf{R} la podemos simplificar con los siguientes coeficientes:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Por lo tanto la matriz \mathbf{W} será:

$$W = [R \quad t] = \left[\begin{array}{ccc|c} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{array} \right] \tag{2.16}$$

2.3.5 Método de Calibración

Existen varios métodos que permiten obtener los parámetros de una cámara según una matriz de transformación que puede adoptar varias formas dependiendo de la naturaleza de la técnica de calibración.

En este trabajo se ha estudiado el método de calibración de Zhengyou Zang [9], puesto que en este trabajo se utilizará la herramienta de calibración desarrollada por Bouget [10], la cual utiliza este método.

Procedimiento

- Utilizar un patrón de calibración consistente en una especie de tablero de ajedrez montado sobre una superficie plana.
- Realizar varias capturas variando la posición y orientación del patrón de forma que el patrón recorra la mayor parte del encuadre.
- Detección automática de esquinas a partir de la imágenes.
- Cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos.
- Cálculo de distorsiones.

2.3.6 Calibración Estereoscópica

La calibración de una cámara vista anteriormente permite obtener los parámetros internos y externos de la cámara. Pero para manejar coordenadas de un punto en el espacio se necesita al menos de dos imágenes de la misma escena capturada desde posiciones diferentes. Por lo tanto se debe contar con dos cámaras separadas estratégicamente y teniendo especial cuidado que la relación de rotación y traslación de una con respecto a la otra sea lo menos variante posible. Se debe realizar en cada una de las cámaras la calibración por separado.

Teniendo lo anteriormente señalado realizado existirán dos puntos de vista de la misma escena (patrón). En esto lo importante es conocer la transformación rígida que relaciona la posición entre estas. Esta relación se expresa conociendo el vector de posición \vec{T} que va desde el sistema coordenado de una cámara a la otra, y además de los ángulos α , β y θ que orientan una cámara respecto a la otra.

2.4. Visión Estéreo

La visión estereoscópica constituye un procedimiento para la obtención de la forma de los objetos en la escena. En este caso la forma se determina a través de la distancia de los objetos en relación con un sistema de referencia por lo que se trata de un método para la obtención de tridimensionalidad.

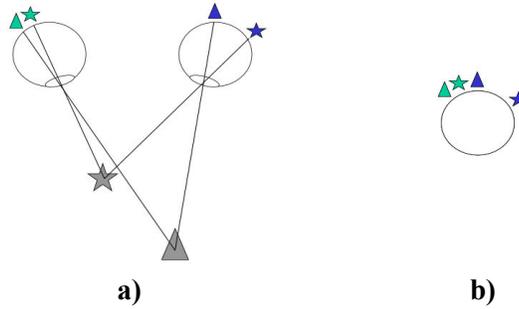


Fig. 2.7 a) Sistema de visión estereoscópica biológica. b) Superposición de imágenes [5].

La visión estereoscópica toma como referencia el modelo biológico donde el deslizamiento de los ojos permite estimar la profundidad de los objetos o tercera dimensión mediante un simple proceso de triangulación a partir de las dos imágenes. Al solapar las dos imágenes se tendrá que los objetos a menor distancia se encuentran más separados, y que para los objetos más distantes su separación es menor.

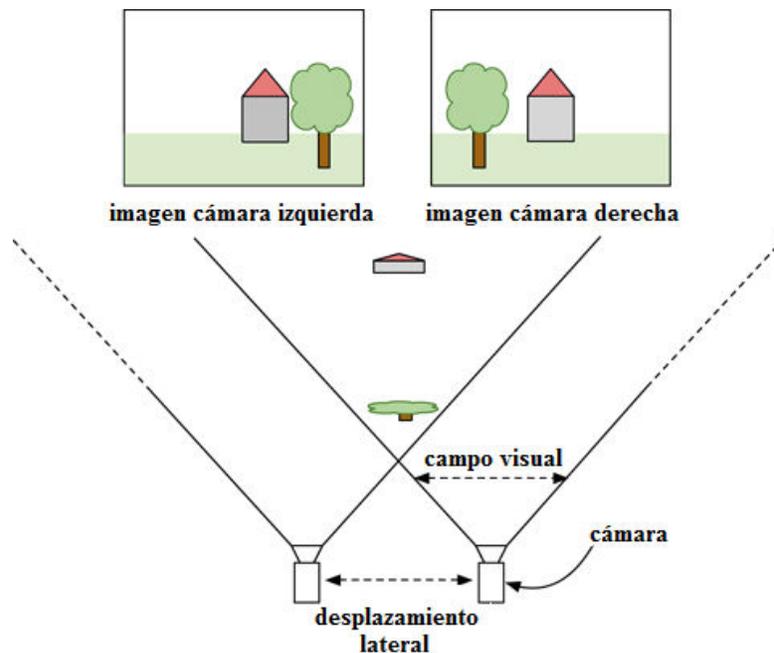


Fig. 2.8 Sistema de visión estéreo.

En la visión estereoscópica artificial por lo general se posicionan dos cámaras desplazadas horizontalmente la una de la otra, de modo que las imágenes capturadas estén ligeramente desplazadas entre sí.

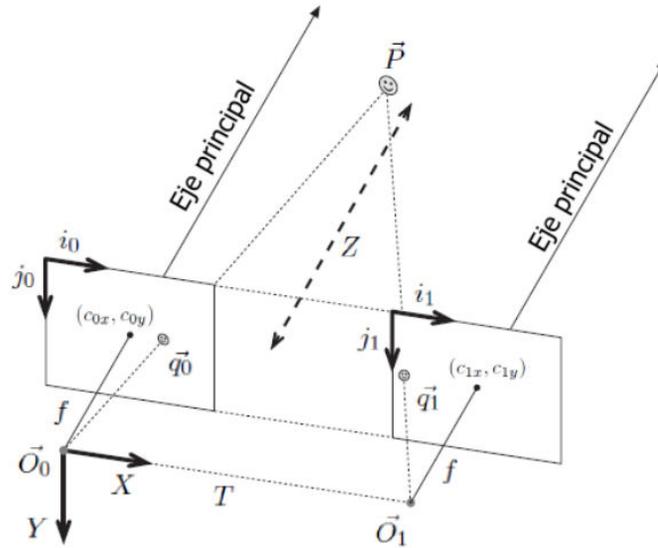


Fig. 2.9 Geometría del sistema de visión estéreo [7].

Suponiendo que las cámaras están perfectamente alineadas en paralelo y con el mismo plano de imagen. Un punto \vec{P} del espacio es proyectado como $\vec{q}_0 = (i_0, j_0)$ y $\vec{q}_1 = (i_1, j_1)$ en cada imagen.

$$\frac{f}{Z} = \frac{(i_0 - c_{x0})}{X} = \frac{(i_1 - c_{x1})}{X - T} = \frac{(c_{y0} - j_0)}{Y} = \frac{(c_{y1} - j_1)}{Y} \quad (2.16)$$

$$X = \frac{(i_0 - c_{0x})T}{d - (c_{0x} - c_{1x})} \quad (2.17)$$

$$Y = \frac{-(j_0 - c_{0y})T}{d - (c_{0x} - c_{1x})} \quad (2.18)$$

$$Z = \frac{fT}{d - (c_{0x} - c_{1x})} \quad (2.19)$$

$$d = i_0 - i_1 \quad (2.20)$$

Conociendo el valor de la distancia focal de cada cámara tras la calibración es posible calcular la posición del punto en el espacio por triangulación como muestran las ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.19).

Se introduce el concepto de *disparidad* mostrado en la ecuación (2.20). Al estar las dos cámaras sobre un mismo plano de imagen un punto se encontrará en la misma posición vertical de

ambas imágenes sólo que en distinta posición horizontal. Identificando el punto en ambas imágenes y con los parámetros de las cámaras se puede determinar la posición en el espacio de dicho punto.

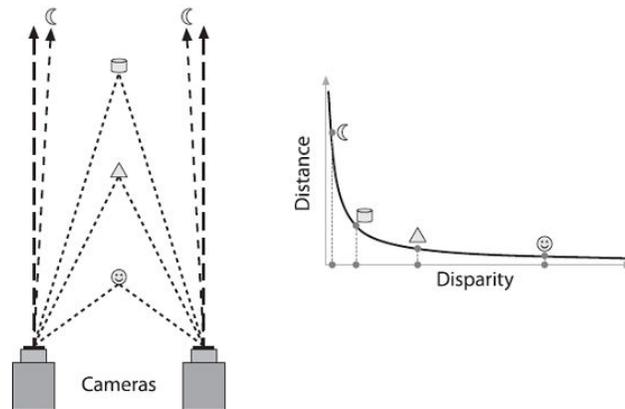


Fig. 2.10 Relación entre disparidad y distancia [7].

La Figura 2.10 muestra la relación inversa entre disparidad y distancia como se deduce de la ecuación (2.19).

2.4.1 Geometría Epipolar

Un sistema estéreo con las dos cámaras alineadas paralelamente es en la práctica imposible por lo cual la teoría vista anteriormente no aplicaría en un sistema real. Tomando como referencia la cámara izquierda se debe considerar que la cámara derecha está desplazada en un vector \vec{T} y rotada en ángulos α, β, θ que definen una matriz de rotación \vec{R} .

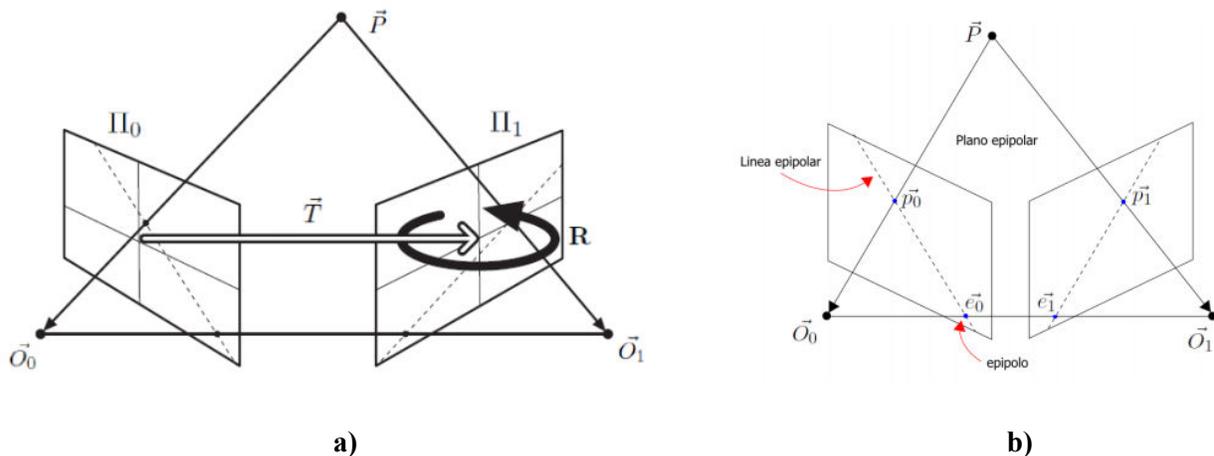


Fig. 2.11 a) Cámaras no alineadas. b) Geometría epipolar [17].

La geometría epipolar representa geometría del sistema estéreo y proporciona las herramientas para relacionar dos cámaras entre sí y el mundo real. Un punto \vec{P} en el espacio es representando como dos puntos proyectados \vec{p}_0 y \vec{p}_1 . \vec{O}_0 y \vec{O}_1 son los centros ópticos de cada cámara. Con un punto \vec{p}_0 de la imagen izquierda no es posible determinar el punto real \vec{P} , pero al menos se puede saber que está en una recta que va desde \vec{O}_1 hasta \vec{p}_1 , esa recta se llama *recta epipolar*. Dicha recta determina una *restricción epipolar* que consiste en que un punto correspondiente en la otra imagen debe estar contenida en esa recta.

2.4.2 Rectificación

La rectificación estéreo es el proceso que permite transformar las imágenes para que posean el mismo plano imagen como si hubiesen sido tomadas desde cámaras perfectamente paralelas. Esto permite que los ejes ópticos sean paralelos y así como también las rectas epipolares serán horizontales y paralelas permitiendo que la búsqueda de correspondencias se haga sólo en la misma línea horizontal de la otra imagen.

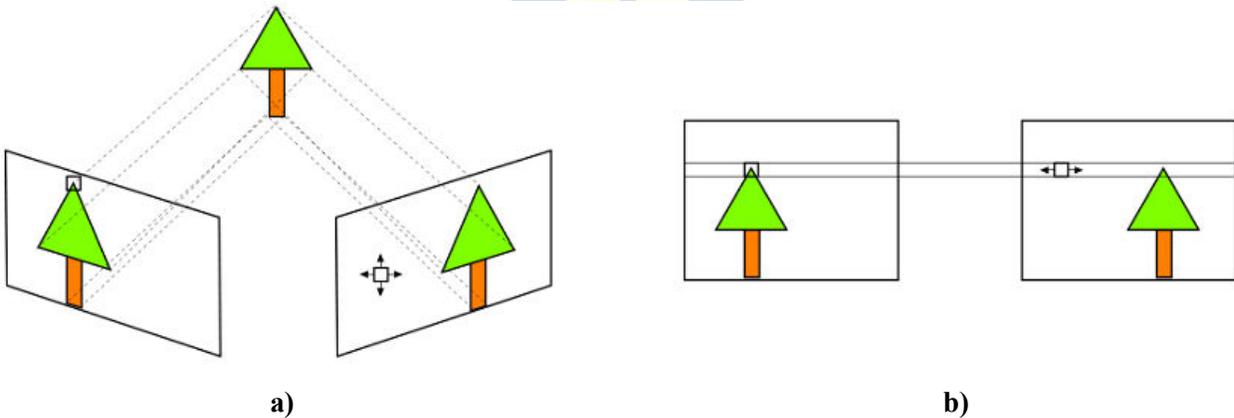


Fig. 2.12 a) Objetivo de la rectificación [24].

2.5. Correspondencia

En un sistema estéreo para poder recuperar la información de profundidad de un punto del mundo es necesario poder determinar su ubicación en ambas imágenes. La rectificación facilita esta tarea al restringir que esta búsqueda se haga de forma horizontal transformándolo en un problema unidimensional. Esta tarea se llama *registro de imágenes*.

Principalmente el registro de imágenes se realiza por dos caminos. Uno es un análisis discreto realizando una búsqueda sólo en puntos que cumplen una determinada condición y que sean fáciles de detectar en ambas imágenes, esta tarea es conocida como *extracción de características*, como por ejemplo bordes o esquinas. El otro camino es realizar una búsqueda analizando intensidades de colores en toda la imagen, esta búsqueda densa de correspondencias se conocen como *técnicas basadas en el área*. Ambas técnicas tienen ventajas y desventajas. Dependiendo de las condiciones del área de trabajo y sus restricciones resulta más conveniente una en vez de la otra.

Realizar la búsqueda en técnicas basadas en el área tiene la ventaja que logra correspondencias en toda la imagen pero presenta una alta sensibilidad a distorsiones generadas por el punto de vista y a cambios de intensidad absoluta (contraste e iluminación). Además tiene una alta dependencia de la restricción epipolar.

La búsqueda por características es más robusta ante oclusiones, posee mayor estabilidad antes cambios de contraste en el ambiente, mayor rapidez que los métodos basados en el área debido a que la búsqueda se realiza sólo en ciertos puntos de la imagen, pero cuentan con la desventaja de tener la necesidad de interpolar dichos puntos.

Considerando ventajas y desventajas de ambas técnicas se decide abarcar el tema de la correspondencia a través de técnicas basadas en el área.

2.5.1 Algoritmo Block Matching

Uno de los algoritmos de búsqueda más utilizados es el desarrollado por Konolige [3]. Se caracteriza por la búsqueda de bloques correspondientes (Block Matching), usando ventanas que computan la semejanza por medio de Suma de Diferencias Absolutas (SAD) entre píxeles de las imágenes izquierda y derecha dentro de un rango definido de disparidades. Ambas imágenes deben estar previamente rectificadas y sin distorsión.

Se le considera un método efectivo y rápido en encontrar correspondencias en zonas de la imagen que presentan alta textura. Por ejemplo en una escena con mucha textura como un bosque se obtendrá que en muy pocos píxeles no se encuentren correspondencia. En cambio en una escena como podría ser una habitación es muy probable encontrar pocas correspondencias. El algoritmo se divide en cuatro etapas, las cuales se mencionan a continuación.

A. *Pre-filtrado*

Aplica sobre las imágenes estéreo un operador local que transforma cada pixel normalizándolo basado en la intensidad promedio de los pixeles adyacentes. Con esto se disminuye las diferencias de iluminación entre ellas realzando las texturas. Se realiza por medio de una ventana variable desde 5x5 a 21x21 pixeles que recorre la imagen en su totalidad posicionando el centro en cada pixel reemplazando su valor por

$$\min[\max(I_c - \bar{I}, -I_{cap}), I_{cap}] \quad (2.21)$$

donde:

I_c : centro de la ventana de normalización, pixel en que se realiza la normalización.

I_{cap} : límite numérico, por defecto su valor es 30. Determina en parte la intensidad del efecto de normalización.

\bar{I} : media de las intensidades de los pixeles dentro de la ventana.

B. *Semejanza por Suma de Diferencias Absolutas (SAD)*

Esta técnica permite obtener un índice de semejanza entre una ventana centrada en un pixel de una de las imágenes y ventanas que recorren una fila de la otra imagen con centro en la misma fila de la primera imagen. El valor absoluto obtenido en cada comparación asigna un valor de costo para cada pixel del centro de la ventana en la otra imagen se usará para determinar la correspondencia. En la ecuación 2.22 muestra la Suma de diferencias absolutas.

$$\sum_{(x,y)} |I_L(x, y) - I_R(x + d, y)| \quad (2.22)$$

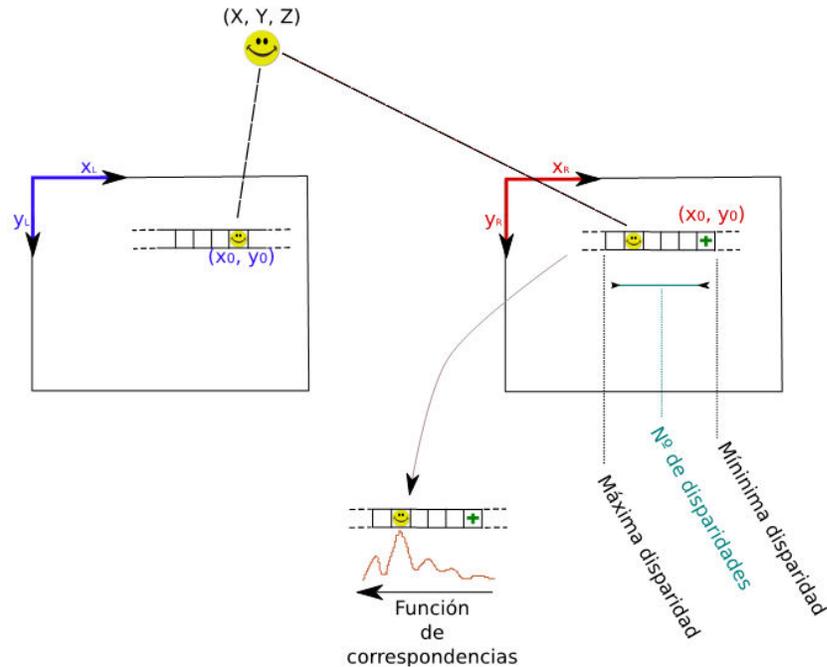


Fig. 2.13 Búsqueda de correspondencias [15].

La búsqueda de correspondencias se realiza como se muestra en la Figura 2.12. El algoritmo va verificando los costos de los píxeles de la imagen derecha en la misma fila en la que está posicionado el píxel del cual se quiere hallar su correspondencia. Parte de un valor mínimo de disparidad y lo recorre hasta llegar al máximo. Con los valores absolutos de los puntos verificados se determina el mejor candidato a ser correspondiente al píxel de origen en la imagen izquierda.

C. Post-filtrado

Una vez determinadas las correspondencias el algoritmo realiza un procesado con el fin de mejorar los resultados. Emplea un operador de interés para eliminar zonas con poca textura y realiza un chequeo de consistencia izquierda/derecha para eliminar errores causados en zonas ocluidas. Finalmente el algoritmo realiza un refinamiento de los valores de disparidad usando interpolación a nivel de subpíxel para mejorar la resolución al determinar los valores de profundidad.

Capítulo 3. Calibración

3.1. Introducción

Este capítulo trata de la primera etapa que consiste en la calibración de las cámaras. Estas corresponden a dos cámaras digitales Kodak modelo C713 y C813 para la captura izquierda y derecha respectivamente. Ambas fijadas con un fuerte pegamento con el fin de que la relación de rotación y traslación de éstas no sufra variaciones significativas durante el tiempo de desarrollo del trabajo.

Se usó el Calibration Camera Toolbox (CCT) de MATLAB para realizar la calibración.



Fig. 3.1 Ejemplo par de imágenes estéreo con las dos cámaras Kodak. a) izquierda. b) derecha.

3.2. Calibración de las cámaras

Se creó una plantilla con el patrón de calibración. En este caso se hizo uno de 14x14 cuadrados con un largo de arista de 24mm.

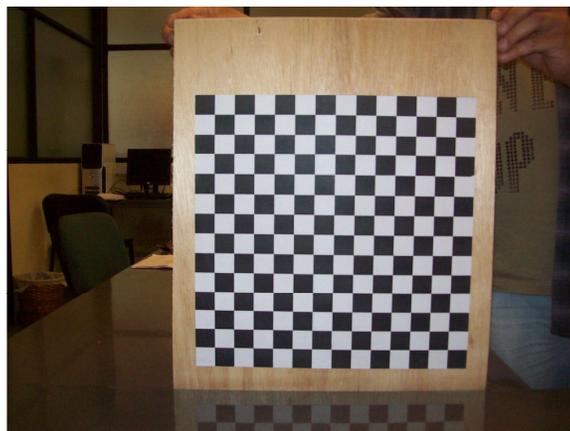


Fig. 3.2 Patrón de calibración.

3.2.1 Adquisición de imágenes

Se toma un conjunto de imágenes de la misma escena con ambas cámaras prácticamente de forma simultánea. Se guardan en escala de gris por el toolbox y se utilizan para la extracción de las esquinas. Se tomaron 10 imágenes con cada cámara en esta etapa.

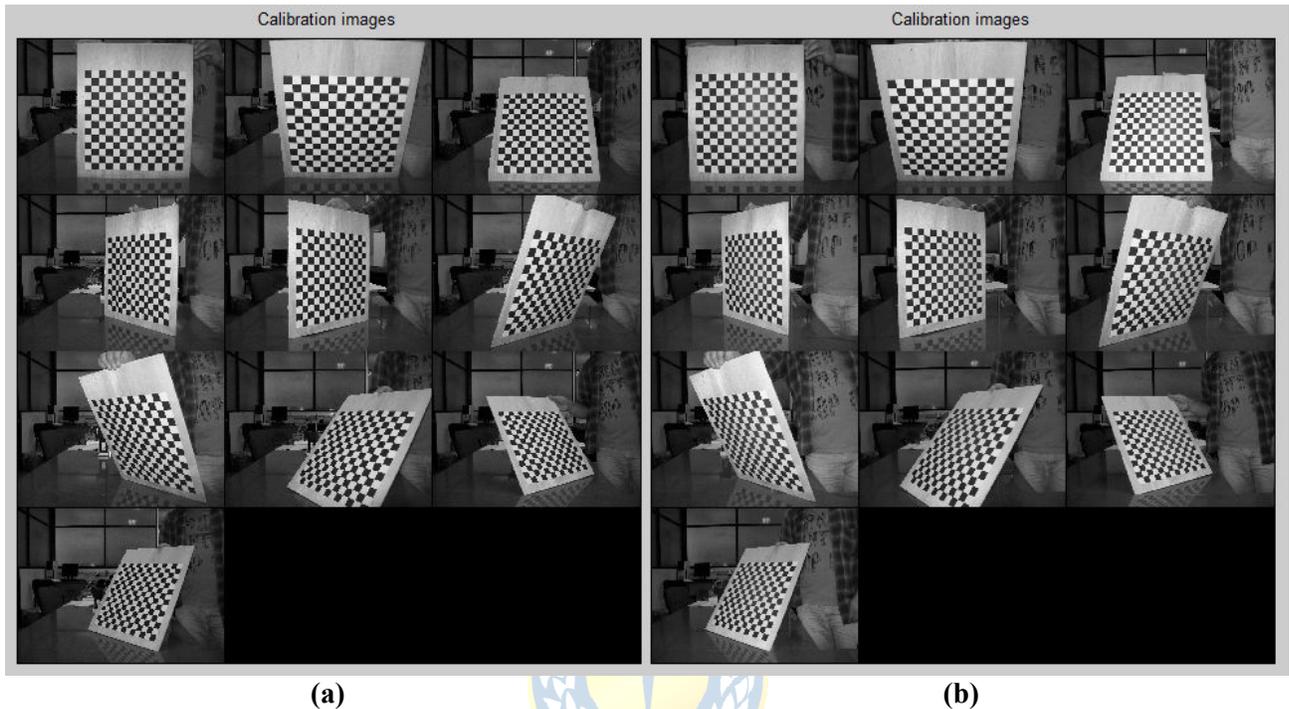


Fig. 3.3 Imágenes para detección de esquinas: a) Cámara izquierda. b) Cámara derecha.

3.2.2 Extracción de esquinas

El primer paso de la calibración de la cámara es la extracción de las esquinas del patrón de calibración en cada una del set de imágenes con distinta orientación de su plano. Utilizando el CCT de MATLAB se extraen las esquinas de la cámara introduciendo el número de cuadros por fila y por columna. Para determinar de mejor manera las esquinas exteriores del patrón se utilizan las 12 filas y columnas centrales.

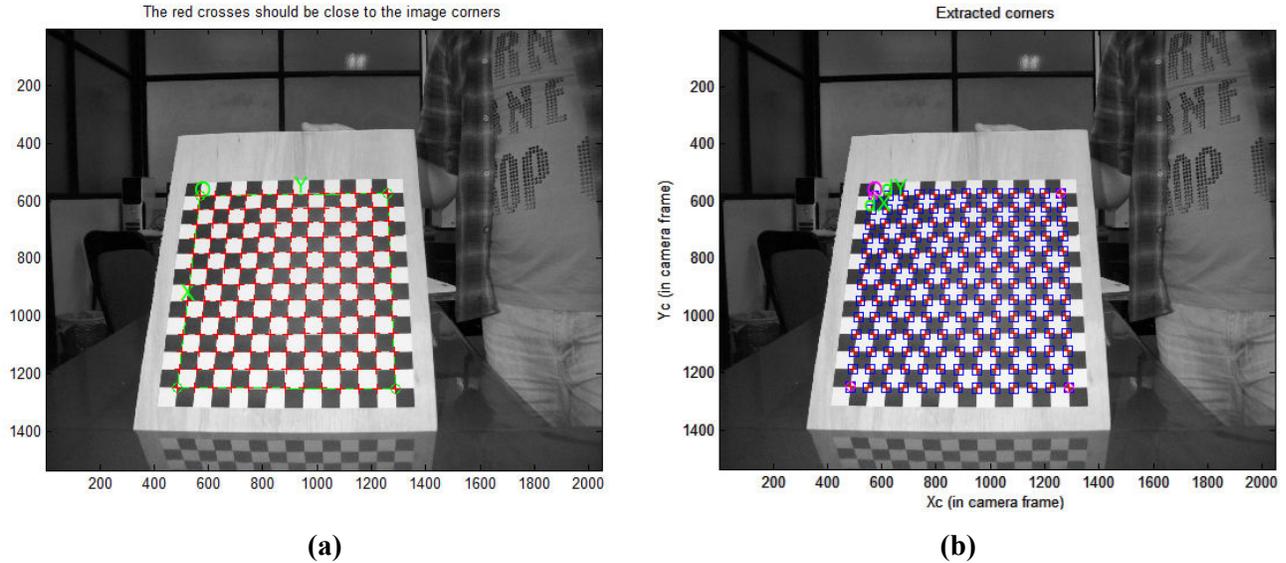


Fig. 3.4 Extracción de esquinas: a) Predictor de esquinas. b) Extracción de esquinas.

A cada una de las imágenes se le aplica extraer las esquinas. Para esto se indican los vértices sobre la imagen y en la ventana de comandos de MATLAB se indica la dimensión de la arista de los cuadros en mm. En la Figura 3.5 se muestra las esquinas predichas y obtenidas por el programa en una de las imágenes. Se puede ver que se aproximan bastante bien a las esquinas reales. Por lo tanto no es necesario ayudar al software para detectar las esquinas mediante la introducción de una suposición para el coeficiente de distorsión radial.

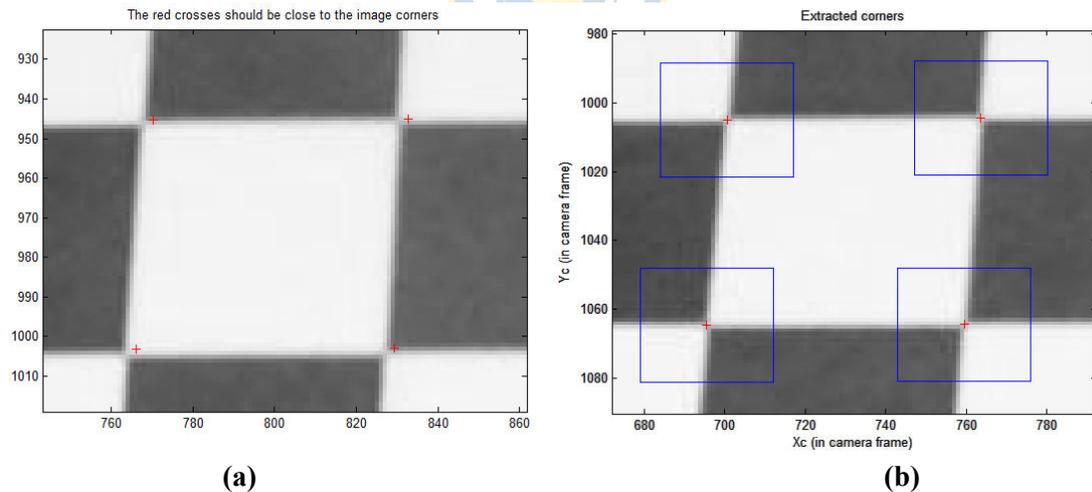


Fig. 3.5 Corrección en la extracción de esquinas. a) Predictor de esquinas. b) Extracción de esquinas.

3.2.3 Proceso de calibración de cada cámara

Finalizada la extracción de esquinas, se comienza con la calibración de cada cámara utilizando los datos extraídos del proceso anterior. La Tabla 3.1 y Figura 3.6 muestran los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara izquierda.

TABLA 3.1 Parámetros intrínsecos cámara izquierda.

Parámetro	Valor
$fc(1)$	2147.74156 ± 3.70510 [píxeles]
$fc(2)$	2164.07129 ± 3.51695 [píxeles]
$cc(1)$	1017.11542 ± 5.50524 [mm]
$cc(2)$	723.805033 ± 4.29945 [mm]
$alpha_c$	0.0 ± 0.0
$kc(1)$	-0.19536 ± 0.00675
$kc(2)$	0.16750 ± 0.01840
$kc(3)$	-0.00071 ± 0.00041
$kc(4)$	-0.00102 ± 0.00063
$kc(5)$	0.0 ± 0.0

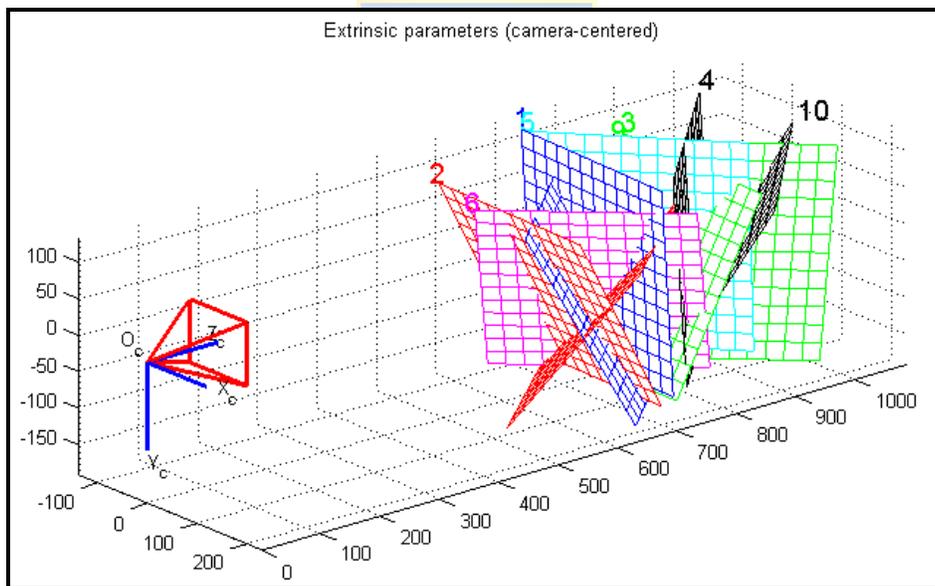


Fig. 3.6 Parámetros extrínsecos cámara izquierda.

Del mismo modo y repitiendo todo el proceso anterior se pueden obtener los parámetros intrínsecos de la cámara derecha.

TABLA 3.2 Parámetros intrínsecos cámara derecha.

Parámetro	Valor
$fc(1)$	2165.36046 ± 3.57139 [píxeles]
$fc(2)$	2184.13114 ± 3.43108 [píxeles]
$cc(1)$	1053.69384 ± 5.23175 [mm]
$cc(2)$	734.53778 ± 4.17586 [mm]
α_c	0.0 ± 0.0
$kc(1)$	-0.18308 ± 0.00631
$kc(2)$	0.12980 ± 0.01665
$kc(3)$	-0.00349 ± 0.00040
$kc(4)$	-0.00069 ± 0.00063
$kc(5)$	0.0 ± 0.0

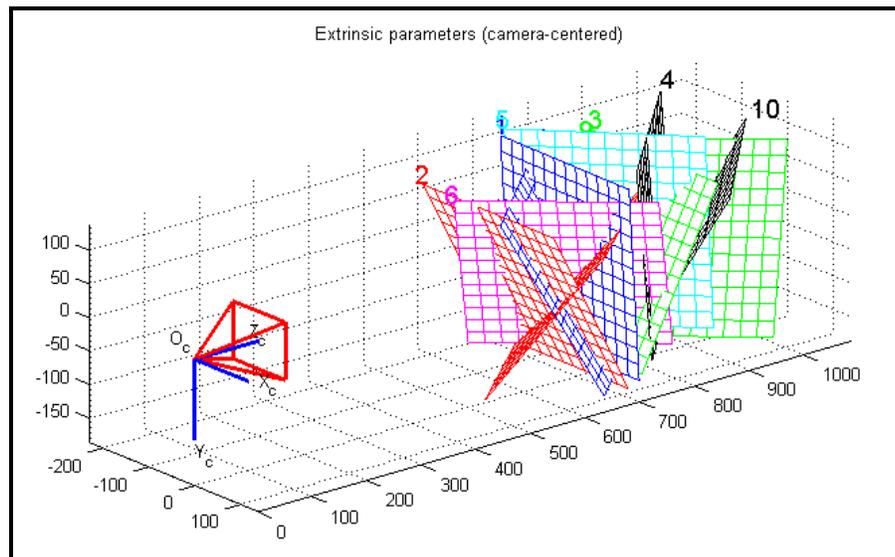


Fig. 3.7 Parámetros extrínsecos cámara derecha.

3.2.4 Calibración par estéreo

Realizada la calibración para cada cámara se procede a realizar la calibración del par estéreo. Para esto se utiliza el Stereo Camera Calibration Toolbox (SCCT). Se cargan los archivos de calibración individuales de las cámaras y al realizar la calibración estéreo se realiza una corrección de los parámetros.

TABLA 3.3 Parámetros intrínsecos sistema estéreo.

Parámetro	Valor cámara izquierda	Valor cámara derecha
$fc(1)$	2154.2501 ± 12.045037 [pixeles]	2162.81866 ± 12.04421 [pixeles]
$fc(2)$	2172.83977 ± 12.164458 [pixeles]	2182.43138 ± 12.24239 [pixeles]
$cc(1)$	1011.77925 ± 22.5351 [mm]	1042.30946 ± 21.67331 [mm]
$cc(2)$	769.98913 ± 16.82319 [mm]	756.53372 ± 16.63601 [mm]
α_c	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
$kc(1)$	-0.20005 ± 0.02797	-0.18305 ± 0.0272
$kc(2)$	0.16710 ± 0.07608	0.12793 ± 0.07626
$kc(3)$	-0.00077 ± 0.00153	-0.00301 ± 0.00157
$kc(4)$	-0.0007 ± 0.00257	-0.00161 ± 0.00254
$kc(5)$	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0

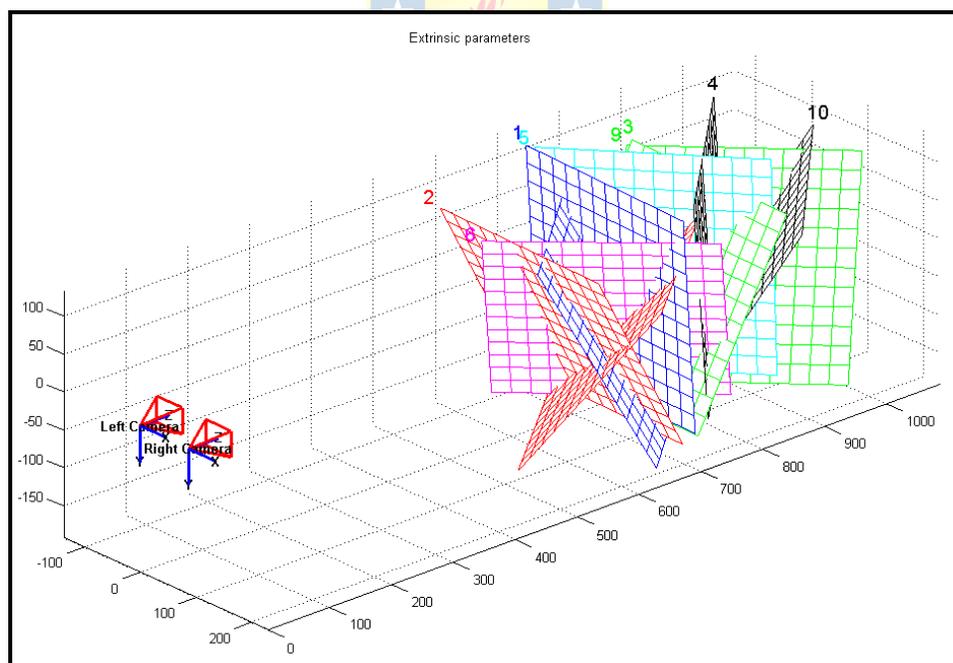


Fig. 3.8 Parámetros extrínsecos par estéreo.

TABLA 3.4 Parámetros extrínsecos par estéreo.

Parámetro	x	y	z
Om	-0.00436 [rad]	-0.00224 [rad]	0.00233 [rad]
T	-91.96293 [mm]	0.52970 [mm]	-1.37376 [mm]

A partir de las Tablas 3.3 y 3.4 se obtiene que la disparidad horizontal es de alrededor de 91,9[mm]. Prácticamente no hay desplazamiento en los otros ejes y la rotación pequeña.



Fig. 3.9 Comparación de la traslación horizontal de las cámaras con la obtenida en la calibración. a) Medición, b) Proyección centro óptico cámara izquierda, c) Proyección centro óptico cámara derecha.

Con la calibración terminada y obteniendo los parámetros internos y externos del sistema de visión estéreo podemos pasar al siguiente paso en la tarea de reconstrucción tridimensional de la escena. Pero antes de continuar hacia la siguiente etapa, primero debemos verificar que los parámetros obtenidos sean razonables.

A simple vista el único parámetro que podemos verificar es la separación que existe entre los centros ópticos de las cámaras. En la figura 3.9 se muestra la medición de la separación de los ejes ópticos mediante la utilización de una huincha métrica. La imagen a) de la figura no muestra fielmente la medición debido a la perspectiva y cercanía de la cámara con la que fue capturada. En las imágenes b) y c) se posicionó la cámara sobre los lentes de ambas cámaras. La calibración dio como resultado una separación de 91.96293 ± 0.59162 [mm] y la inspección visual arrojó una separación de 91 ± 1 [mm]. Por lo anterior se obtiene una diferencia entre la calibración y la medición con la huincha métrica en la separación de ambas cámaras de aprox. un 1%.

3.3. Prueba de Calibración

Con el fin de realizar una verificación de la calibración de manera formal, se realizará una prueba de triangulación y medición de puntos físicos en imágenes.



Fig. 3.10 Escena dispuesta para triangulación y medición de objetos.

3.3.1 Triangulación

Utilizaremos la escena estratégicamente dispuesta en la Figura 3.11 con las dos cámaras en las que a través de las imágenes capturadas podamos identificar puntos claramente en ambas. Se

dispone de objetos a determinadas distancias y se seleccionarán puntos de cada objeto, primero en la imagen izquierda y luego en la derecha.

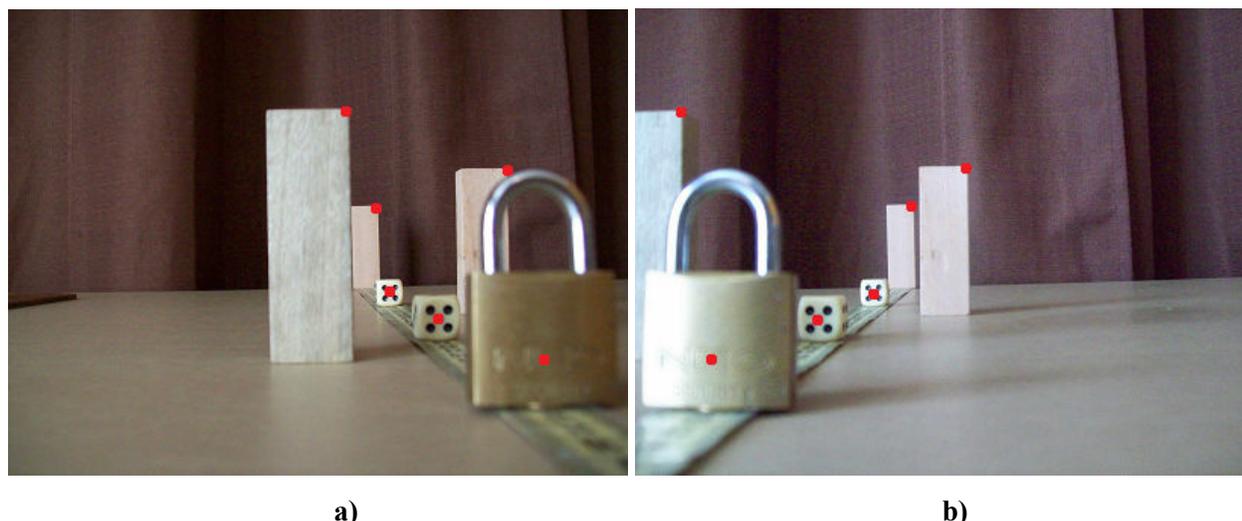


Fig. 3.11 Capturas de la escena de prueba y puntos seleccionados. a) Imagen Izquierda, b) Imagen derecha.

En la escena de la Fig. 3.12 muestra los elementos de la prueba, dos dados y tres columnas de madera. Se denominarán en orden a su cercanía con el sistema de cámaras.

TABLA 3.5 Resultados prueba de triangulación.

Objeto	Vector Cámara Izq. [cm]	Vector Cámara Der.[cm]	Distancia eje z [cm]	Error
Candado	(4.563,2.229,12.180)	(-4.666,2.346,12.043)	12	+0.9%
Columna 1	(1.016,-3.926,19.253)	(-8.214,-3.786,19.135)	19	+1.02%
Dado 1	(4.525,2.705,23.080)	(-4.730,2.870,22.941)	23	+0.04%
Columna 2	(7.651,-3.774,33.112)	(-1.611,-3.558,33.008)	33	+0.18%
Dado 2	(4.617,3.037,39.011)	(-4.674,3.272,38.870)	39	-0.15%
Columna 3	(5.719,-3.242,58.985)	(-3.602,-2.917,58.874)	59	-0.12%

De la Tabla 3.5 se puede inferir que el error en la profundidad de los objetos apenas llega a sobrepasar el 1%. No se puede dejar de mencionar que las mediciones están sujetos a la imprecisión en seleccionar el mismo punto en ambas imágenes. Esta sensibilidad aumenta a medida que los objetos se encuentran más alejados.

3.3.2 Medición de los objetos

Además de las pruebas de triangulación se ha realizado pruebas de medición de distancias entre dos puntos físicos de la imagen. Usaremos las mismas capturas (Figura 3.12) para evaluar el tamaño de los objetos.

TABLA 3.6 Resultados prueba de medición de objetos.

Objeto	Altura Calculada [cm]	Ancho Calculado [cm]	Alto/Ancho medido [cm]	Error %
Candado	4.7958	2.8264	4.75/2.9	+0.96/-2.53
Columna #1	7.4316	No calculado	7.45/2.45	-0.25/-----
Dado #1	1.5287	1.5313	1.55/1.55	-1.37/-1.2
Columna #2	7.4098	2.4384	7.45/2.45	-0.54/-0.47
Dado #2	1.5454	1.5193	1.55/1.55	-0.3/-2
Columna #3	7.5478	2.4133	7.5/2.4	+0.63/+0.55

Los resultados de medición que expone la Tabla 3.5 muestran errores que no sobrepasan el 3%. En el caso de la Columna #1 el ancho no se puede calcular debido a oclusión.



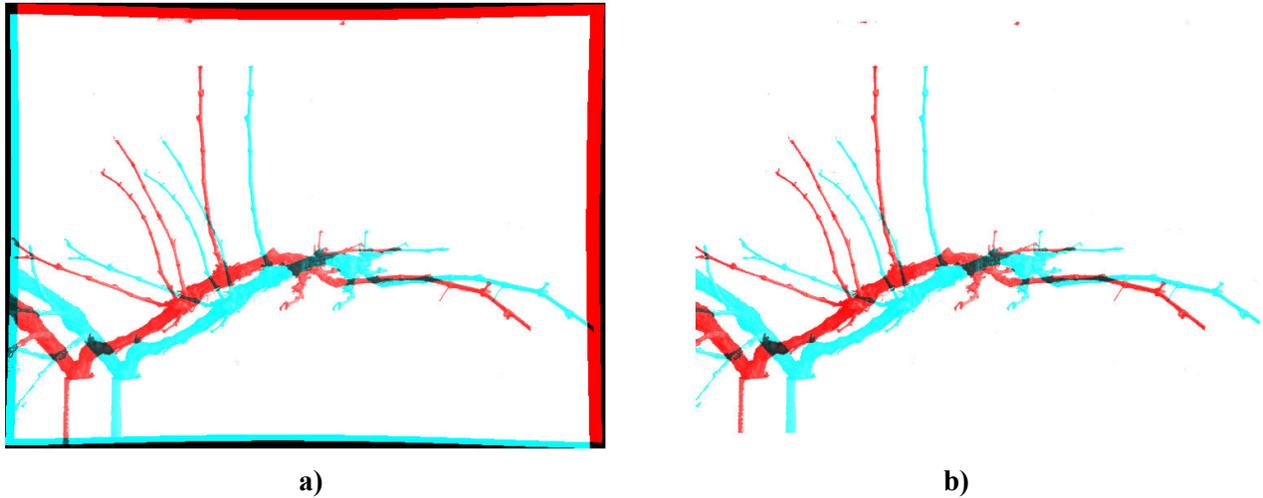


Fig. 4.2 a) Imágenes rectificadas completas. b) Imágenes rectificadas válida.

4.3. Mapa de Disparidad

A partir de dos imágenes rectificadas es posible hacer una búsqueda de puntos correspondientes en una misma fila de la matriz imagen puesto que sus líneas epipolares son horizontales y paralelas. Es de vital importancia en esta etapa que la rectificación se haya realizado bajo la base de una buena calibración, ya que la generación del mapa de disparidad es muy sensible a errores de calibración y alta dependencia de la restricción epipolar.

El método usado para calcular el mapa de disparidad es el Block Matching que realiza comparación de las intensidades de bloques por *Suma de Diferencias Absolutas* (SAD) por cada bloque de pixeles en la imagen previa normalización de las imágenes.

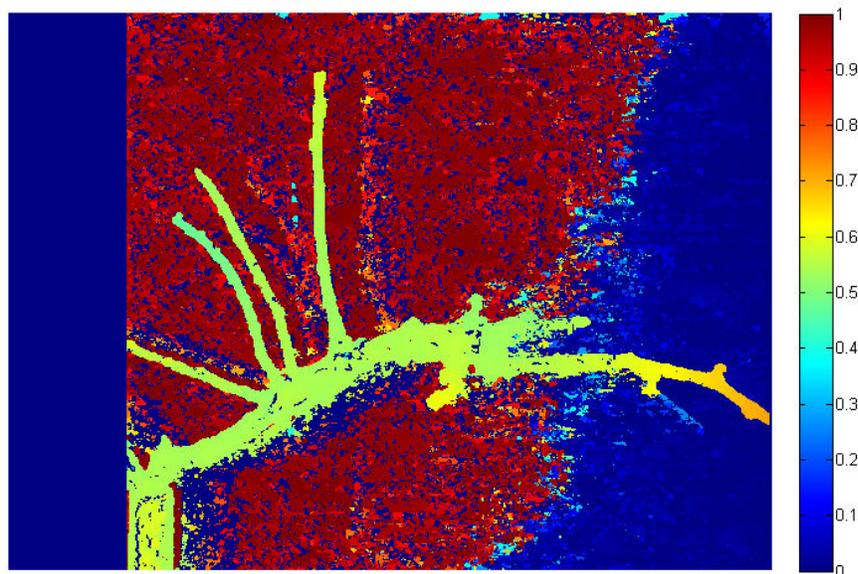


Fig. 4.3 Mapa de disparidad.

En el mapa de disparidad de la Figura 4.3 la distribución de colores nos dice que mientras más cálido es el color más cerca se encuentra de la cámara en un rango $[0,1]$. En dicha imagen se aprecia que se logra distinguir bastante bien la parra del resto de la escena. Los valores de disparidad del fondo son falsas correspondencias. Pese a tener una importante cantidad de falsas correspondencias, éstas se encuentran fuera de la parra y su disparidad difiere en gran medida con respecto a los pixeles válidos de la parra.

Para obtener un mapa de disparidad con menos falsas correspondencias, se debe analizar el histograma de la imagen. A simple vista, el análisis del histograma mostrará claramente el rango de disparidad en el cual se encuentra la parra pues en términos generales existe mucha diferencia entre las disparidades de la parra y el fondo (falsas).

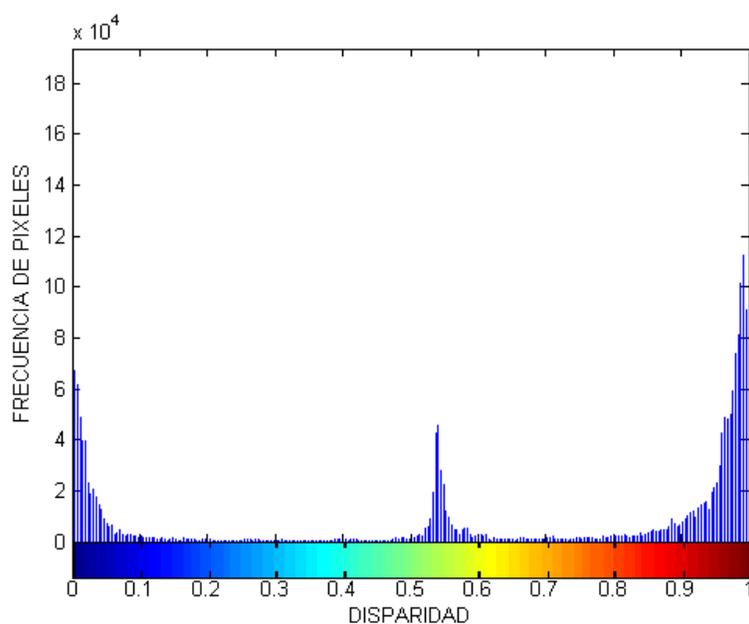


Fig. 4.4 Histograma del mapa de disparidad.

El histograma de la Figura 4.4 confirma que las falsas correspondencias se encuentran en su mayoría bastante aisladas de la parra. Por tanto se ecualiza el mapa para eliminar de él gran parte de las falsas correspondencias. Analizando se infiere que las intensidades correspondientes a la parra se encuentran entre los 0.5 y 0.6, aproximadamente. Más precisamente se obtiene que la parra se encuentra entre 0.47 y 0.71 del mapa.

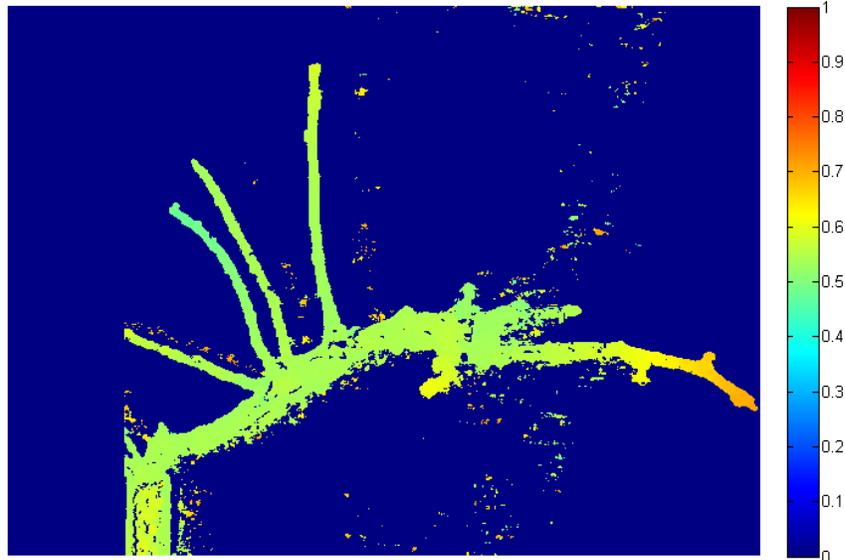


Fig. 4.5 a) Mapa de disparidad ecualizado entre 0.47 y 0.71 del original.

Con la ecualización la visualización del mapa de disparidad ha mejorado (Figura 4.5). Sin embargo, existen muchos puntos de falsos positivos dentro del rango de disparidad en el que se encuentra la parra. Por esto, es necesario aplicar un filtro de mediana [25] para poder eliminar la mayor cantidad de falsos positivos sin tener que deformar mucho la imagen.

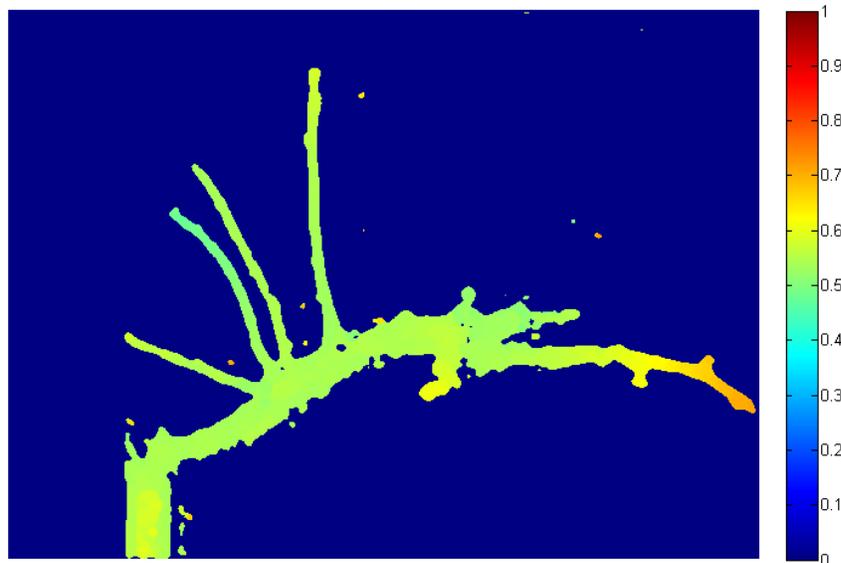


Fig. 4.6 a) Mapa de disparidad filtrado.

En la Figura 4.6 se aplicó un filtro de mediana de 19x19 que eliminó bastantes falsos positivos. Este filtro fue el que mejor equilibrio dio entre eliminación de falsas correspondencias sin perder datos de la parra. Con un inconveniente que la aplicación de estos filtros deforman el mapa, por tanto en el siguiente paso de reconstrucción 3D al comparar la reconstrucción original con la

filtrada varían. En este trabajo en particular las deformaciones producidas por el filtrado no son importantes puesto que interesa ver la distribución espacial de la parra.

4.4. Obtención de puntos 3D del Mapa de Disparidad

Esta es la última etapa en el desarrollo de una reconstrucción 3D de la parra que consiste en representar la información entregada por el mapa de disparidad en una nube de puntos tridimensionales que juntas determinen una superficie. Acá se utilizan, además de esta información, los parámetros del sistema estéreo para posicionar cada punto de acuerdo a un sistema de coordenadas reales y que tienen como referencia el sistema de cámaras. Estos puntos 3D en coordenadas métricas reales del mundo son obtenidos usando el mapa de disparidad original. Como se mencionó en la sección anterior, el filtrado aplicado deforma levemente la imagen y no se tienen puntos reales. En el proceso de filtrado se perdió la representación de los puntos en coordenadas métricas reales.

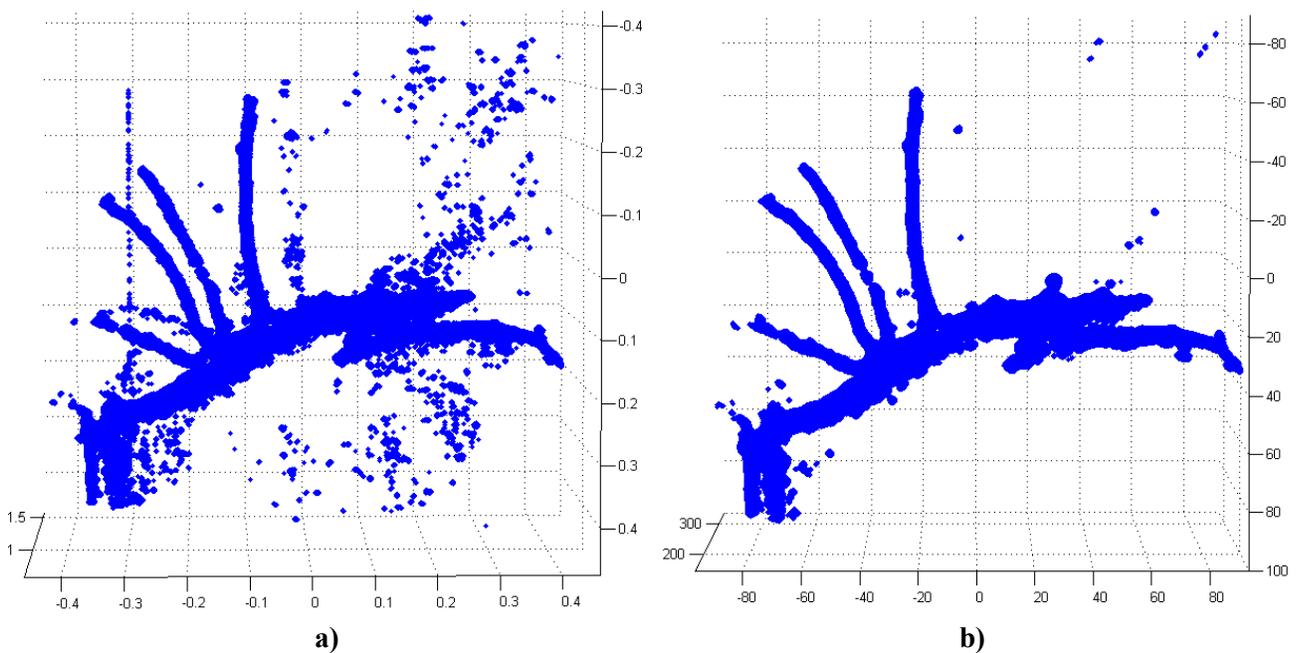


Fig. 4.7 Vista plano XY. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado.

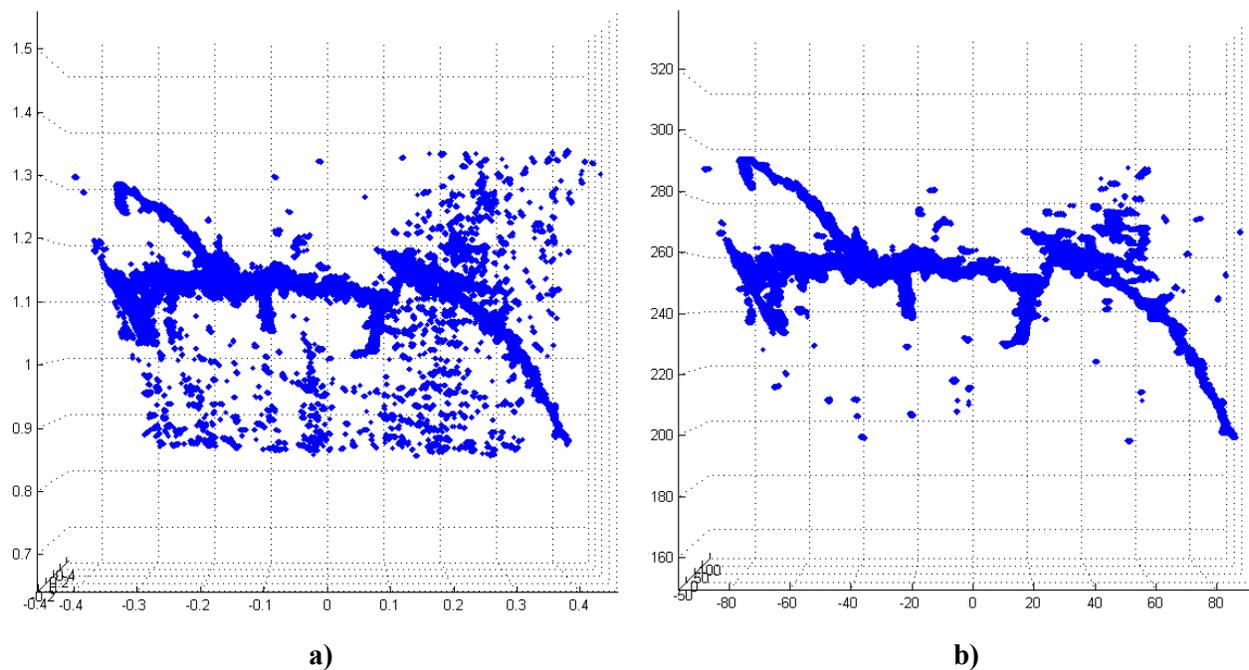


Fig. 4.8. Vista plano XZ. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado.

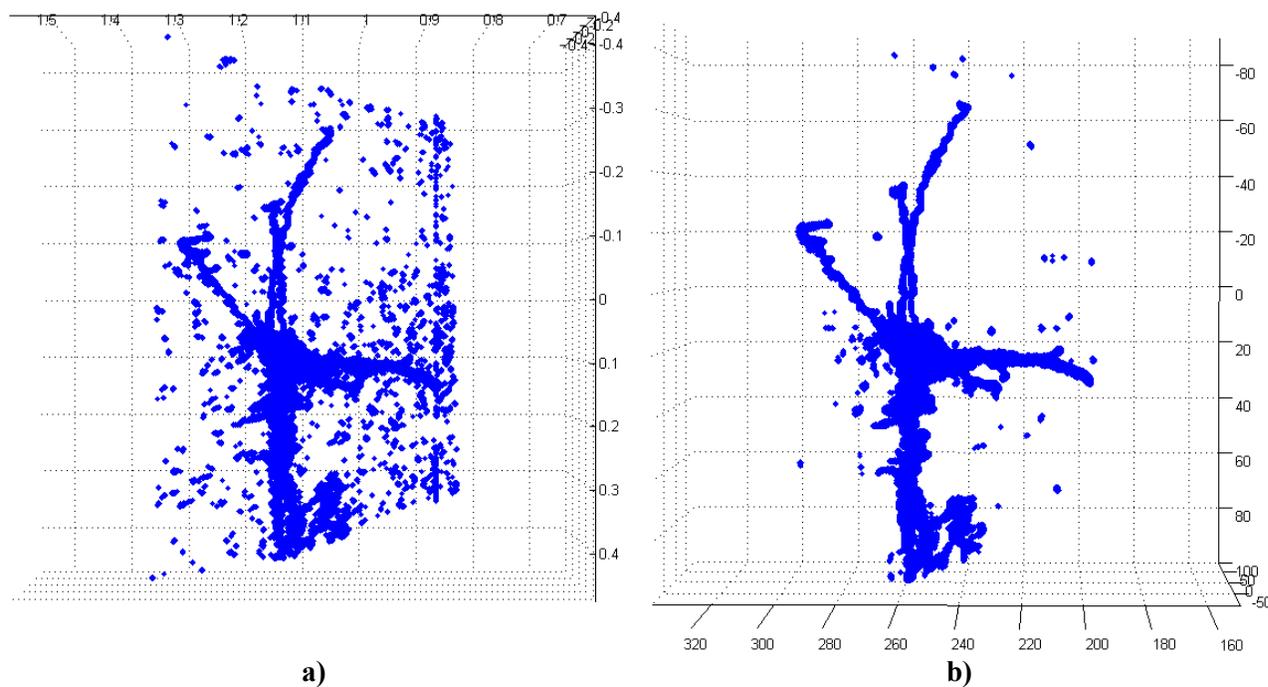


Fig. 4.9. Vista plano YZ. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado.

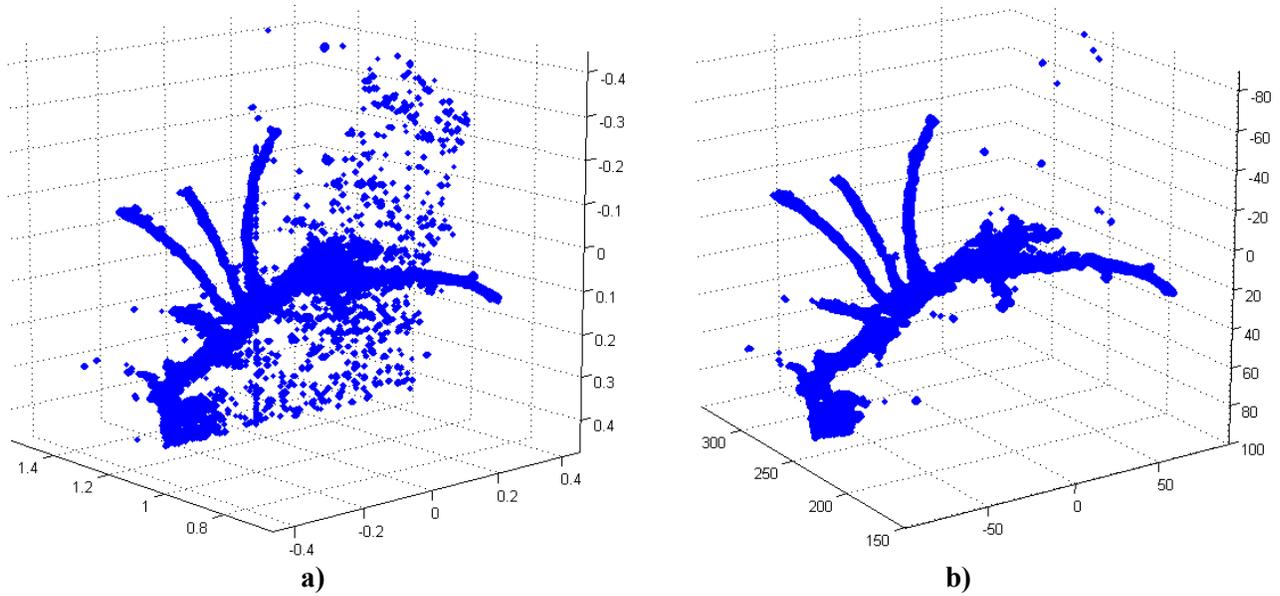


Fig. 4.10 Vista plano oblicuo. a) Reconstrucción de mapa original. b) Reconstrucción mapa filtrado.

Las Figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 muestran la reconstrucción de los puntos tridimensionales según el mapa de disparidad utilizado. Como se mencionó anteriormente la reconstrucción del mapa de disparidad original cuenta con la ventaja que los puntos tienen coordenadas del mundo reales con respecto a la cámara y la reconstrucción de los puntos del mapa de disparidad filtrado tiene muy poca presencia de falsos positivos, lo que la hace mas fiable para visualizar la distribución espacial de la parra.

Capítulo 5. Método de evaluación

5.1. Introducción

En este capítulo se abordará el método utilizado para poder obtener un índice que permita indicar el grado de acierto de los operarios en la toma de decisiones para seleccionar en qué ubicación de las ramas se deben realizar los cortes durante el proceso de poda.

Los operarios deberán indicar sobre las imágenes puntos de corte que serán comparados con los del experto en base a la distancia entre ellos. A continuación se explica el método de evaluación propuesto.

5.2. Puntos de las imágenes

Se dispone de un set de imágenes, en este caso las imágenes son de 2048 x 1536 píxeles en escala de gris para tener una sola matriz de la misma. En cada una de ellas se determina para cada punto a almacenar la ubicación de la fila y la columna de la matriz imagen.

Tanto el experto como el operario indican los puntos de corte que creen ser adecuados. Para esto es necesario poder visualizar la imagen y sobre ella indicar dichos puntos.

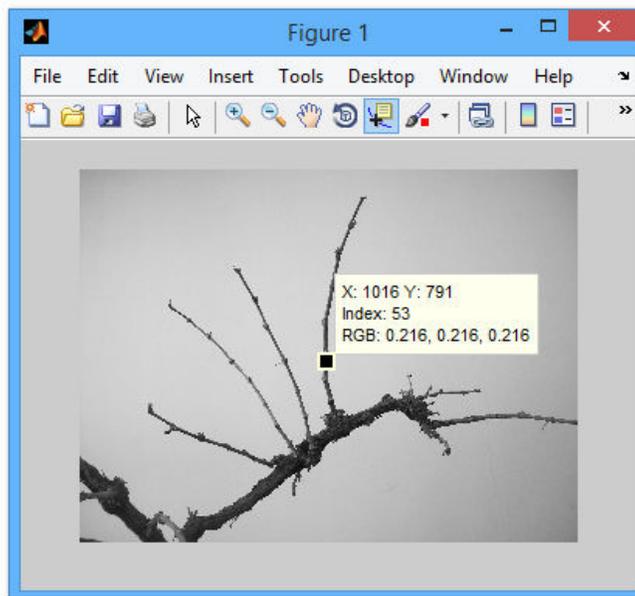


Fig. 5.1 Ejemplo: indicar punto de corte.

5.3. Distancias y cálculo de aproximación

Para la misma imagen se determina la distancia entre un punto determinado por un operario respecto del punto determinado por el experto correspondiente a la misma rama.

Los puntos en cada imagen se determinan en secuencia. Por lo que el punto asignado a una rama por parte del operario puede estar ubicado en un lugar distinto de la secuencia elegida por el experto. Por tanto, para un punto elegido por el experto se determina la distancia de ese punto con cada punto de la secuencia elegida por el operario. A este conjunto de distancias se busca el mínimo y así se tendrá la distancia entre puntos representativos de la misma rama. La ecuación (5.1) muestra la distancia para el primer punto de la secuencia del experto.

$$D_i = \min[D_{i,j}] [\text{píxeles}] \quad (5.1)$$

donde:

D_i : distancia entre los puntos operario y experto de la rama i .

i : número de rama de la secuencia del experto.

j : número de rama de la secuencia del operario.

5.3.1 Distancia Euclidiana

El método más sencillo de determinar la distancia entre puntos es utilizar la distancia euclidiana.

$$D = \sqrt{(x_{\text{exp}} - x_{\text{op}})^2 + (y_{\text{exp}} - y_{\text{op}})^2} \quad (5.2)$$



a)

b)

Fig. 5.2 Puntos de corte: Operario (cyan), Experto (magenta).

Sin embargo, determinar la distancia euclidiana no es del todo adecuado. Esto se puede apreciar en el ejemplo de la Figura 5.2. Comparando las imágenes vemos que en a) los puntos indicados por el operario se encuentran mas cercanos que en b) respecto de los indicados por el experto. La obtención de la distancia mínima en a) para cada rama corresponde a un punto del experto con un punto del operario de la misma. En cambio, en b) se da que la distancia mínima en un caso ocurre con puntos experto y operario correspondiente a ramas diferentes. Por lo tanto determinar la distancia euclidiana es poco fiable, pudiendo ser útil solo en casos muy particulares cuando los puntos del operario sean relativamente cercanos a los del experto.

5.3.2 Distancia Geodésica

La distancia geodésica $d_X(x,y)$ entre dos puntos x e y pertenecientes al conjunto X , es el mínimo de todos los caminos desde x hasta y formados por puntos intermedios pertenecientes al conjunto X . Si el conjunto no está conectado y no existe camino de esos dos puntos dentro del conjunto X , se determina que la distancia geodésica que los separa es infinita.

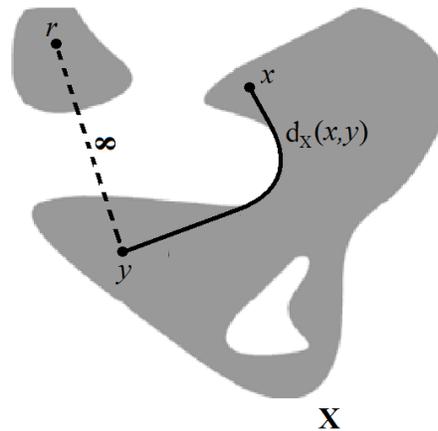


Fig. 5.3 Distancia geodésica.

La distancia geodésica es una función que satisface los tres axiomas de cualquier métrica:

$$d_X(x,y) = d_X(y,x) \quad (\text{Simetría}) \quad (5.3)$$

$$d_X(x,y) = 0 \Leftrightarrow x = y \quad (\text{Separación}) \quad (5.4)$$

$$d_X(x,z) \leq d_X(x,y) + d_X(y,z) \quad (\text{Desigualdad Triangular}) \quad (5.5)$$

La distancia geodésica es siempre mayor o igual a la distancia euclidiana.

Si se utiliza la distancia geodésica la determinación de distancias se realizará recorriendo la parra por lo cual será más efectivo.



Fig. 5.4 Obtención de distancias geodésicas.

La Figura 5.4 muestra para el caso b) del ejemplo de la Figura 5.2 en azul el recorrido desde un punto del experto a través de la parra para determinar distancias con cada uno de los puntos ingresados por el operario. Obteniéndose distancias mínimas entre puntos correspondientes a la misma rama de la parra.

5.4. Tratamiento de imágenes

Para realizar la búsqueda de distancias geodésicas es necesario transformar las imágenes para determinar dentro de cada una el conjunto de píxeles correspondientes a la parra. Primero se realizará la segmentación con el propósito de eliminar el fondo de la imagen. Finalmente las imágenes se binarizarán para obtener una matriz lógica dejando con valor 1 los píxeles correspondientes de la parra y valor 0 para el fondo.

5.4.1 Segmentación

La adquisición de las imágenes se realizaron en el laboratorio colocando un telón blanco de fondo para contrastar la parra con respecto al fondo.

Las imágenes originales son transformadas a escala de gris. Teniendo sólo una matriz de la imagen cuyos valores estén en el rango (0, 255) como se explicó en la sección 2.2.



a) b)
Fig. 5.5 a) Imagen RGB b) Imagen en escala de gris.

La segmentación es el proceso de dividir la imagen en sus partes constituyentes hasta un nivel de subdivisión en el que se aíslan las regiones u objetos de interés. En este caso particular es de interés sólo la parra.

Identificado el objeto y sabiendo que los elementos de la matriz imagen van desde 0 a 255, es conveniente realizar un histograma de la imagen para que la elección de la intensidad de corte sea más efectiva.

La segmentación se hará por umbralización, esto es, determinar un valor umbral con el que intensidades superiores o inferiores son eliminados de la imagen. En este caso se desea eliminar intensidades superiores a los de los píxeles de la parra para sacar el fondo de la imagen.

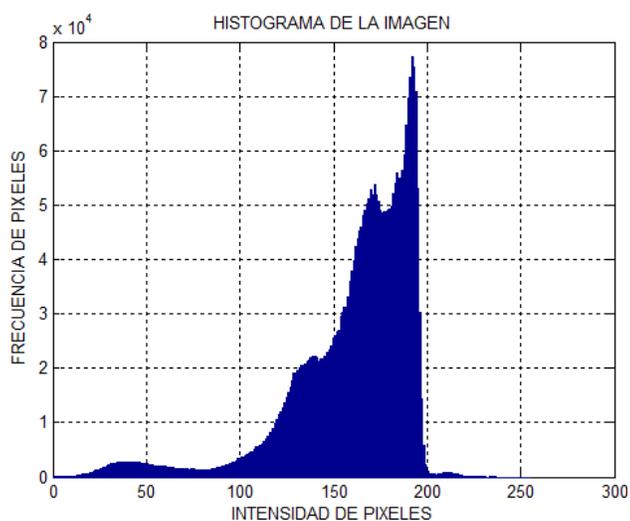


Fig. 5.6 Histograma de la imagen.

Del histograma (Figura 5.6) se puede interpretar que hay intensidades compartidas entre el fondo y la parra. La Figura 5.7 refleja lo mencionado. Se determinó un valor de umbral en 150, convirtiendo las intensidades de los pixeles mayores al umbral en 255 (blanco) y manteniendo las intensidades de los pixeles menores. Se aprecia que para este valor de umbral existe parte del fondo que no ha sido eliminado y además en el centro de la imagen parte de la parra ha desaparecido. Por lo tanto, si se aumenta el umbral se recuperarán pixeles de la parra y también mas fondo, por el contrario, si este umbral disminuye se eliminará mas fondo y mas pixeles de la parra. Esto es debido a que la iluminación de la habitación proviene de la derecha de la imagen.

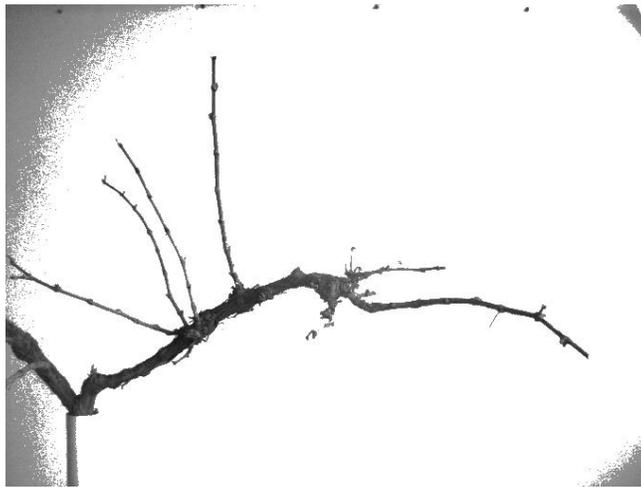
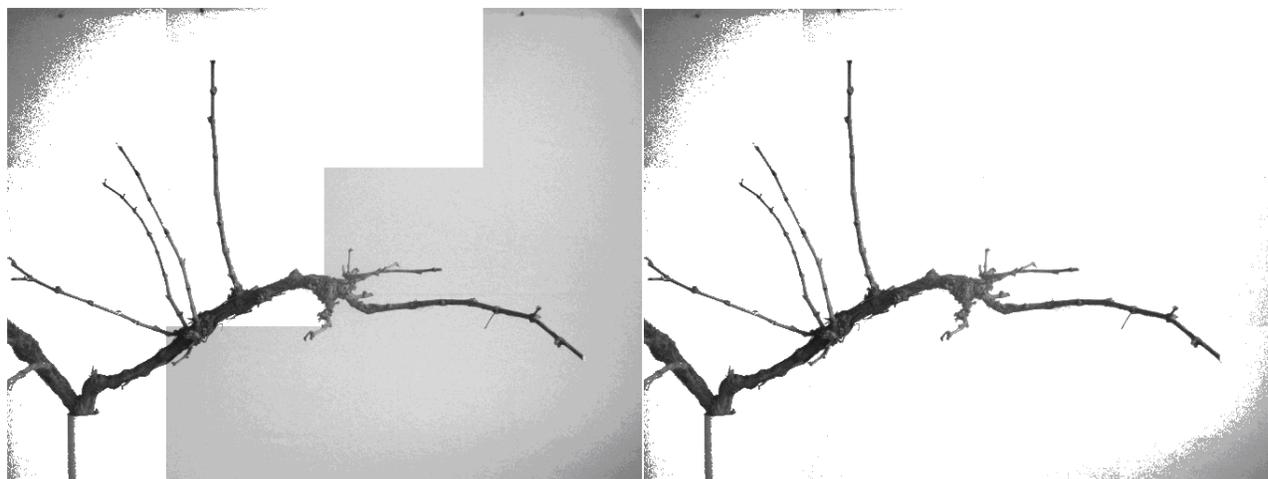


Fig. 5.7 Imagen segmentada con umbral de intensidad 150.

Como solución a este problema se ha decidido crear una segmentación por regiones. Esto es, asignar un valor de umbral diferente en distintos lugares de la imagen. Se hicieron dos pruebas. La primera asignando 3(filas) x 4(columnas) regiones cuadradas de 512 pixeles. La segunda asignando 6(filas) x 8(columnas) regiones cuadradas de 256 pixeles de ancho. Se analiza región por región el valor umbral adecuado para eliminar el fondo sin perder los pixeles de las ramas analizando cada uno de los histogramas regionales.



a) b)
Fig. 5.8 a) Proceso de segmentación 3x4 regiones b) Segmentación terminada.



a) b)
Fig. 5.9 a) Proceso de segmentación 6x4 regiones b) Segmentación terminada.

La segmentación por 3x4 regiones mejoró bastante con respecto a la segmentación con umbral único. Pero la segmentación de 6x8 regiones mejoró aún mas, aunque quedan zonas del fondo que no se eliminaron, éstas no se encuentran cerca de las ramas quedando bastante aisladas.

5.4.2 Binarización

Con la imagen segmentada de la parra sólo basta obtener una imagen binaria la cual será una matriz lógica en que se calcularán distancias geodésicas, es decir, recorriendo los pixeles que representan la estructura de la parra en dicha matriz.

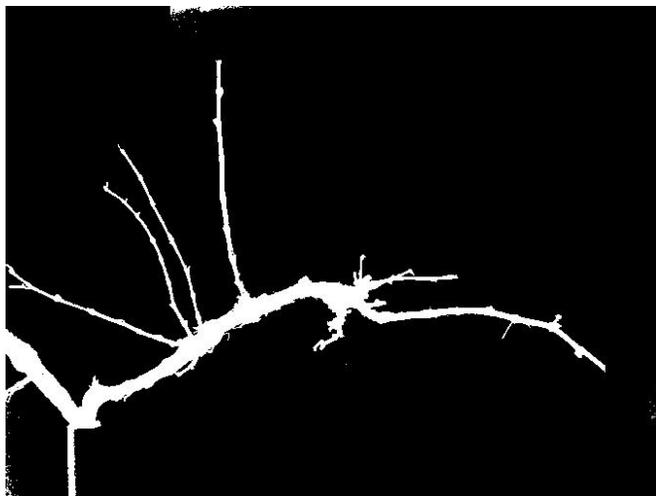


Fig. 5.10 Binarización de la parra.

5.5. Criterio de evaluación

Es intuitivo pensar que mientras más cercano se encuentre un punto del operario con respecto al del experto, reflejará que las decisiones tomadas para la poda serán las adecuadas. Para cuantificar el grado de acierto es que se deben definir bajo qué tolerancias las distancias obtenidas reflejan buenos o malos resultados.

5.5.1 Criterio Individual

Para cada rama se definieron las tolerancias para decidir si un punto de corte por parte del operario es *"EXCELENTE"*, *"BUENO"*, *"REGULAR"* o *"MALO"*. Estas tolerancias varían según la rama y según la imagen. Para una rama mas cerca a la cámara las tolerancias serán mayores que para ramas más alejadas.

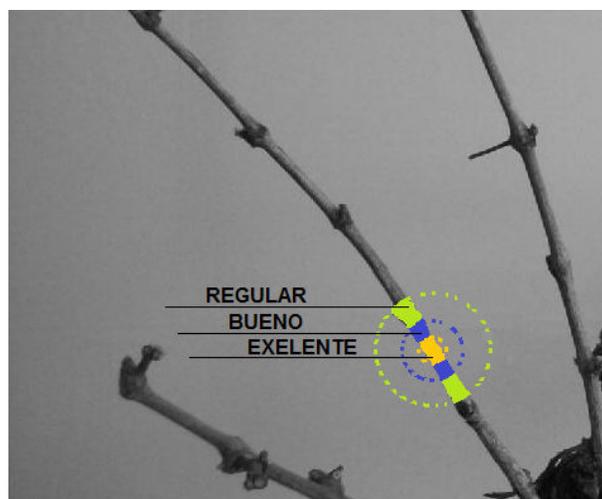


Fig. 5.11 Definición de tolerancias.

En la Figura 5.11 se muestra como se definen las tolerancias y qué interpretación se hace de la distancia obtenida. "EXCELENTE" corresponde al círculo central, "BUENO" es el primer anillo exterior y "REGULAR" es el segundo y más alejado que el anterior. Fuera de este último se interpreta como "MALO". Recordar que las distancias geodésicas corresponden a búsquedas dentro del conjunto de pixeles que pertenecen a la parra, por lo que la proyección de las tolerancias fuera de ella no es efectiva y sólo ilustrativa.

$$CALIFICACIÓN_i = \begin{cases} EXCELENTE & D_i \leq a \\ BUENO & a < D_i \leq b \\ REGULAR & b < D_i \leq c \\ MALO & c < D_i \end{cases} \quad (5.6)$$

En (5.6) se muestra la función de evaluación individual, donde a, b, c son los límites para distancia *Excelente*, *Bueno* y *Regular* respectivamente para cada rama.

5.5.2 Criterio Global

A partir de la evaluación individual en que se determinaron 4 estados cualitativos para calificar la aproximación de un punto, los límites de estos estados permitirán representar de forma cuantitativa el grado de acierto de los operarios.

TABLA 5.1 Rango de notas y calificación.

Nota	Calificación
6.0 a 7.0	EXCELENTE
5.0 a 5.9	BUENO
4.0 a 4.9	REGULAR
1.0 a 3.9	MALO

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \quad (5.7)$$

donde:

a_i : límite individual para la calificación "EXCELENTE" de una rama i .

n : número total de ramas de todas las imágenes.

A : límite global para calificación "EXCELENTE".

$$B = \sum_{i=1}^n b_i \quad (5.8)$$

$$C = \sum_{i=1}^n c_i \quad (5.9)$$

La ecuación (5.7) muestra el criterio para determinar el límite de la calificación "EXCELENTE". De la misma forma se determinan los límites globales de "BUENO" (5.8) y "REGULAR" (5.9).

La distancia total D_T corresponde a la suma de todas las distancias D_i como se expresa en (5.10).

$$D_T = \sum_{i=1}^n D_i \quad (5.10)$$

Por lo que la función global para determinar un índice (Nota) para calificar queda de la siguiente forma:

$$NOTA = \begin{cases} 7.0 & D_T \leq A/2 \\ m_1 D_T + d_1 & A/2 < D_T \leq A \\ m_2 D_T + d_2 & A < D_T \leq B \\ m_3 D_T + d_3 & B < D_T \leq C \\ m_4 D_T + d_4 & C < D_T \leq 3C/2 \\ 1.0 & D_T > 3C/2 \end{cases} \quad (5.11)$$

TABLA 5.2 Resumen criterio global de evaluación.

Nota	Calificación	Función	Condición
7.0	EXCELENTE	7.0	$D_T \leq A/2$
6.0 a 6.9	EXCELENTE	$m_1 D_T + d_1$	$A/2 < D_T \leq A$
5.0 a 5.9	BUENO	$m_2 D_T + d_2$	$A < D_T \leq B$
4.0 a 4.9	REGULAR	$m_3 D_T + d_3$	$B < D_T \leq C$
1.0 a 3.9	MALO	$m_4 D_T + d_4$	$C < D_T \leq 3C/2$
1.0	MALO	1.0	$D_T > 3C/2$

En (5.11) se muestra la función que determina la nota con que el operario será evaluado. En cada tramo se determina la pendiente m_i a partir de las distancias y notas límite. Con las pendientes obtenidas se determina la constante d_i para cada uno de los tramos. Para distancias menores a $A/2$ se considera una nota igual a 7.0 y para distancias mayores a $3C/2$ se considera una nota igual a 1.0.

Capítulo 6. Desarrollo de Interfaz Gráfica

6.1. Introducción

En este capítulo se presenta la interfaz gráfica que permite comparar los puntos de corte de las ramas de la parra ingresados por un experto y los operarios. La comparación de estos puntos permite obtener de manera cuantitativa el grado de acierto de las decisiones de los operarios. Para apoyar la toma de decisiones, se entrega una reconstrucción tridimensional de la parra que permite recuperar la percepción de profundidad de la escena perdida en la captura de una imagen en dos dimensiones.

6.2. Inicio del Programa

La ventana principal desplegada corresponde a la interfaz de acceso al programa. Se puede ingresar como usuario *EXPERTO* o como usuario *OPERARIO*. Ambas permiten ingresar puntos de corte sobre las imágenes disponibles, pero sólo el experto tendrá acceso a los datos almacenados por los operarios para la evaluación.



Fig. 6.1 Inicio del programa.

6.3. Crear cuentas e inicio de sesión

Cada usuario necesita crear su cuenta para poder utilizar el programa. Al crear su cuenta se crea un archivo de datos en el que guardarán los datos esenciales e información relevante.

El usuario *EXPERTO* necesita una cuenta de *ADMINISTRADOR* provista previamente para poder crear su cuenta. Creada su cuenta esta le permite al usuario ingresar puntos de corte en cada una de las imágenes disponibles y tener acceso a los archivos de datos de los usuarios para la evaluación (ver Figura 6.2).

El usuario *OPERARIO* al ingresar al programa puede crear su cuenta libremente (ver Figura 6.3). Creada su cuenta, al iniciar sesión tendrá acceso a las imágenes y reconstrucción 3D para ingresar los puntos de corte a su criterio y podrá ver los resultados de su evaluación.

The figure shows two overlapping windows from the ADMIN_EXPERTO application. The background window, titled 'ADMIN_EXPERTO', contains two login sections. The top section is for 'ADMINISTRADOR' with fields for 'NOMBRE DE USUARIO' (containing 'XXXXX') and 'CONTRASEÑA' (containing '*****'), and an 'ENTRAR' button. The bottom section is for 'EVALUADOR' with empty fields for 'NOMBRE DE USUARIO' and 'CONTRASEÑA', and an 'ENTRAR' button. The foreground window, titled 'CREAR_CUENTA', contains instructions: 'En "nombre de usuario" y "contraseña": Puede usar sólo letras y números. Tanto mayúsculas como minúsculas en ambos campos.' Below this are input fields for 'NOMBRE', 'APELLIDOS', 'EDAD', 'NOMBRE DE USUARIO', 'CONTRASEÑA', and 'REPITA CONTRASEÑA', followed by a 'REGISTRARSE' button.

Fig. 6.2 Creación de cuenta EXPERTO.

The figure shows two overlapping windows from the INICIO_OPERARIO application. The background window, titled 'INICIO_OPERARIO', contains a login section for 'OPERARIO' with empty fields for 'NOMBRE DE USUARIO' and 'CONTRASEÑA', and buttons for 'CREAR CUENTA' and 'ENTRAR'. The foreground window, titled 'NUEVO_USUARIO', contains the same instructions as the CREAR_CUENTA window: 'En "nombre de usuario" y "contraseña": Puede usar sólo letras y números. Tanto mayúsculas como minúsculas en ambos campos.' Below this are input fields for 'NOMBRE', 'APELLIDOS', 'EDAD', 'NOMBRE DE USUARIO', 'CONTRASEÑA', and 'REPITA CONTRASEÑA', followed by a 'REGISTRARSE' button.

Fig. 6.3 Creación de cuenta OPERARIO.

6.4. Ingreso de datos (puntos de corte) y visualización 3D

Tanto el experto como los operarios pueden ingresar los punto de corte que estimen. Para la ayuda en la toma de las decisiones se dispone de una reconstrucción tridimensional de cada parra la cual se recomienda visualizar antes de ingresar los puntos en las imágenes.

Ingresados los puntos en las imágenes se puede verificar en las imágenes los puntos seleccionados. Si desea el usuario cambiar uno o varios puntos ingresados, podrá ingresar nuevamente el conjunto de punto de cada imagen, sobrescribiendo los guardados anteriormente.

La Figura 6.4 muestra la ventana de trabajo del operario antes de ingresar los puntos de corte. Se aprecia la visualización de la imagen #1 pues esta se seleccionó y en ella vemos que no aparece ningún punto ingresado. La Figura 6.5 muestra la ventana de trabajo después de ingresar los puntos y seleccionada la imagen#1 para visualización de puntos. En la Figura 6.6 se muestran las ventanas desplegadas para ingresar los puntos de corte y la visualización de un gráfico 3D de la imagen #1 con una representación de la disposición espacial de las ramas la cual en dicha ventana puede rotarse en todos sentidos. En la ventana de trabajo del operario se puede ver en un recuadro *"no ha sido evaluado"*, esto indica que no se han ingresado puntos o si bien, de haberlo hecho, aún el experto no ha realizado la evaluación.

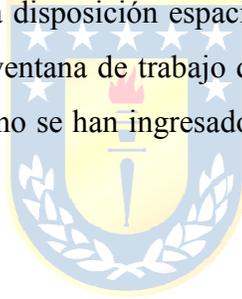
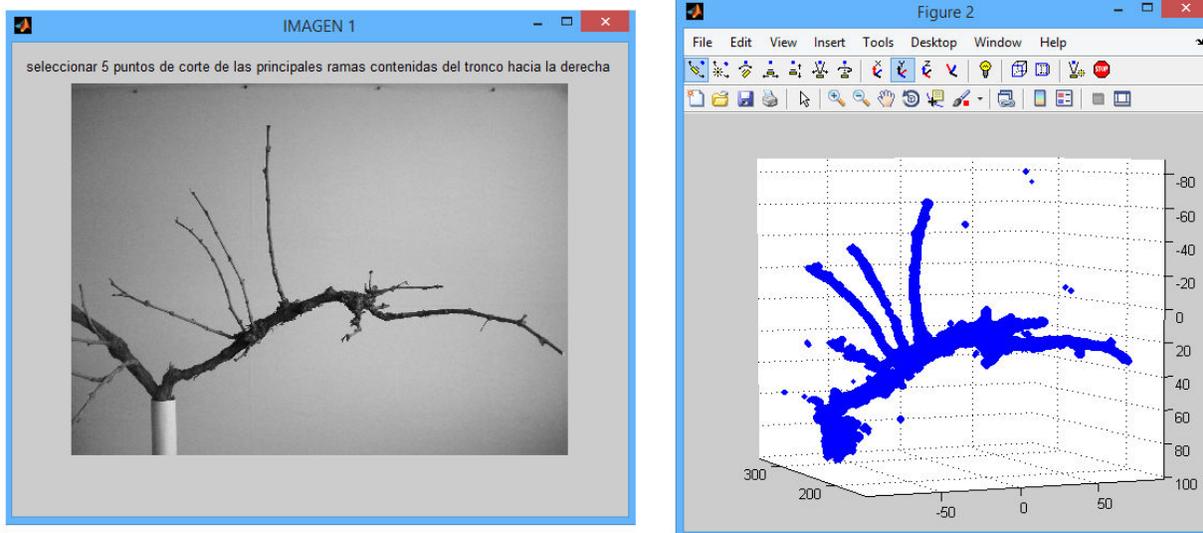




Fig. 6.4 Ventana de trabajo. Usuario OPERARIO antes de ingresar puntos.



Fig. 6.5 Ventana de trabajo. Usuario OPERARIO, después de ingresar puntos.



a) b)
Fig. 6.6 a) Imagen para el ingreso de puntos. b) Representación 3D.

6.5. Evaluación



Fig. 6.7 a) Ventana de trabajo usuario experto.

Al ver la Figura 6.7 es fácil notar que las características y aspecto de la ventana de trabajo del usuario experto son similares a las del usuario operario, sólo que cambia el apartado de 'Resultado de su evaluación' por un botón 'Evaluar'. Una vez que el experto haya ingresado los puntos de corte correspondiente en cada una de las imágenes el experto puede proceder a comenzar la evaluación a través del botón "Evaluar operarios" el cual despliega la siguiente ventana:



Fig. 6.8 Ventana de evaluación antes de cargar datos.

En la ventana de la Figura 6.8 el experto podrá elegir los archivos de datos de los usuarios que desea evaluar. Realizada la carga de cada archivo de datos, la ventana mostrará los resultados de la comparación de cada uno de los puntos de cada rama, exponiendo de forma cualitativa el grado de acierto individual de cada punto de corte más la calificación final, todo esto en base al método de evaluación propuesto en el Capítulo 5. Además se presentan las imágenes indicando los puntos de corte del operario junto con los del experto. Cuando los puntos del operario son muy buena aproximación a los del experto, puede que no se visualice los puntos del experto debido a la magnificación de los puntos del operario que eclipsan a los del experto. Dichos resultados se muestran en la Figura 6.9.



Fig. 6.9 Ventana de evaluación después de cargar datos.

Finalmente y realizada la evaluación, el operario al iniciar sesión verá en su cuenta el resultado de su evaluación como muestra la Figura 6.10.



Fig. 6.10 Ventana del operario con el resultado de su evaluación.

6.6. Efectividad del método de evaluación

Para verificar el método de evaluación utilizado, se utilizará la cuenta del operario creada para mostrar el uso de la interfaz en la sección anterior más tres supuestos operarios. Se usaron conjuntos de puntos intencionalmente elegidos para tener calificaciones desde malas hasta excelentes. De esta forma se podrá ver la efectividad del método propuesto contrastando los casos expuestos.

The screenshot shows a software window titled "EVALUAR". At the top left is a "CARGAR DATOS" button. Below it are two image evaluation sections: "IMAGEN 1" and "IMAGEN 2".

IMAGEN 1 ratings:

Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4	Rama 5
EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE

IMAGEN 2 ratings:

Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4
REGULAR	BUENO	EXCELENTE	EXCELENTE

Below these is the text: "VISUALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CORTE DEL OPERARIO CONTRASTADOS CON EL EXPERTO". This is followed by two side-by-side photographs of a branch. The left photo shows the branch with several colored dots (cyan, magenta, cyan) marking specific points. The right photo shows the same branch from a different angle, also with colored dots.

At the bottom is the "CALIFICACIÓN" section:

Claudio Marcelo Vergara Molina	EXCELENTE	6.3
--------------------------------	------------------	-----

Fig. 6.11 Caso #1. Ejemplo de obtención de calificación 'EXCELENTE'.

EVALUAR

CARGAR DATOS

IMAGEN 1

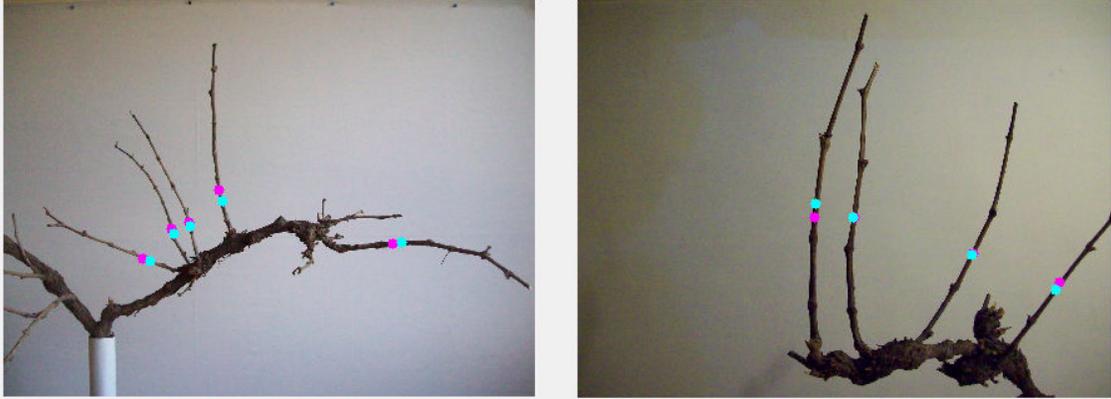
Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4	Rama 5
BUENO	BUENO	EXCELENTE	REGULAR	EXCELENTE

IMAGEN 2

Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4
REGULAR	EXCELENTE	EXCELENTE	BUENO

ATRÁS

VISUALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CORTE DEL OPERARIO CONTRASTADOS CON EL EXPERTO



CALIFICACIÓN

Claudio Molina	BUENO	5.8
----------------	-------	-----

Fig. 6.12 Caso #2. Ejemplo de obtención de calificación 'BUENO'.

EVALUAR

CARGAR DATOS

IMAGEN 1

Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4	Rama 5
REGULAR	MALO	MALO	EXCELENTE	EXCELENTE

IMAGEN 2

Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4
MALO	BUENO	BUENO	EXCELENTE

ATRÁS

VISUALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CORTE DEL OPERARIO CONTRASTADOS CON EL EXPERTO



CALIFICACIÓN

Marcelo Gabriel Vergara	REGULAR	4.6
-------------------------	---------	-----

Fig. 6.13 Caso #3. Ejemplo de obtención de calificación 'REGULAR'.

EVALUAR

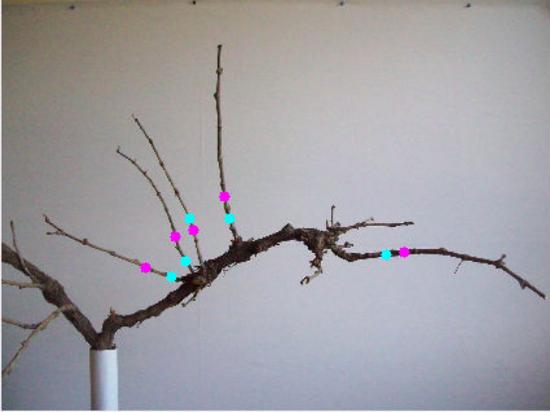
IMAGEN 1

Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4	Rama 5
MALO	MALO	REGULAR	MALO	REGULAR

IMAGEN 2

Rama 1	Rama 2	Rama 3	Rama 4
EXCELENTE	MALO	BUENO	MALO

VISUALIZACION DE LOS PUNTOS DE CORTE DEL OPERARIO CONTRASTADOS CON EL EXPERTO




CALIFICACIÓN

Diego Alonso Reyes Pérez	MALO	3.4
--------------------------	-------------	------------

Fig. 6.14 Caso #4. Ejemplo de obtención de calificación 'MALO'.

Los casos mostrados en las Figuras 6.11, 6.12, 6.13 y 6.14 arrojaron diferentes evaluaciones. El ingreso de los puntos en cada caso se realizó pensando en obtener las calificaciones obtenidas. De esta forma se puede apreciar que los resultados fueron los esperados.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1. Sumario

El trabajo realizado contempló un estudio previo de la teoría necesaria para llevar a cabo el desarrollo del proyecto en la cual está inserta esta Memoria de Título, la estereoscopia en visión por computador. Entendiendo los procedimientos en su proceso. Se realizó la calibración de las cámaras de forma individual como del par estéreo que conforma el sistema de adquisición de imágenes. El posterior procesamiento de rectificación, obtención de mapas de disparidad y reconstrucción 3D.

Se realizó un método de evaluación basado en una función que analiza las distancias geodésicas de los puntos de corte de los operarios y del experto sobre imágenes 2D. Definiendo un índice que propone una calificación formal para los operarios.

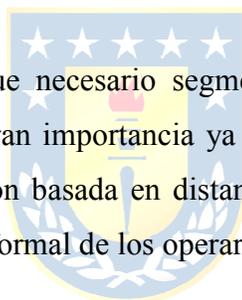
Se realizó una interfaz gráfica que permite a los usuarios realizar la tarea especificada, con entornos diferenciados para el experto que evaluará y los operarios que serán calificados. Además esta incluye la reconstrucción tridimensional de cada imagen presentada en el sistema.

7.2. Conclusiones

La visión artificial cada vez más está siendo utilizada para distintas aplicaciones. En este proyecto en particular en que se creó una herramienta para la capacitación de personal en la industria vitivinícola. Para un operario el analizar la parra a partir de una imagen en vez de estar in situ presenta un inconveniente que mediante la reconstrucción tridimensional se ve superado. De un punto de vista de la persona encargada de la capacitación de personal, en vez de hacer observaciones a estos en la marcha de la poda, esta aplicación le entrega la ventaja de poder evaluar previamente las capacidades de su personal y de manera formal, evitando el aprendizaje ensayo y error, liberando la carga de personal encargado permitiendo disminuir la visita a terreno en la capacitación y realizar la capacitación sin importar el estado del tiempo y la hora.

La calibración es esencial en el proceso de reconstrucción. Después de realizadas las primeras calibraciones e intentando obtener reconstrucciones tridimensionales los resultados no fueron buenos. Después de varias correcciones fue posible lograr reconstrucciones tridimensionales aceptables. lo que junto a las pruebas de triangulación y medición confirmaron que se había realizado una calibración satisfactoria obteniéndose en la triangulación un error cercano al 1% y en la medición de objetos el error más alto no sobrepasó el 3%.

En el análisis de correspondencias basado en el área demostró la alta sensibilidad que tiene esta técnica a los cambios de contraste e iluminación. Se realizaron algunas adquisiciones de imágenes al aire libre y se obtuvo en algunos casos notables diferencias en la generación de mapas de disparidad. En esto último se apreció una dificultad que radica en el equilibrio de condiciones para la captura de imágenes. El ideal es capturar las imágenes lo más cercano posible de las parras, que sean visibles todas las ramas en ambas cámaras y tener una buena iluminación que resalte sus atributos. Cumpliendo todas estas condiciones, las ramas en algunas de las imágenes se ven muy delgadas y al generar los mapas de disparidad hubo que aumentar la dimensión de la ventana que recorre la matriz de imagen para obtener buenas correspondencias generando en la reconstrucción 3D un grosor mayor de la ramas. Por otra parte, las cámaras utilizadas tienen poco menos de 10 años de uso, es muy probable que de haber utilizado cámaras más nuevas la calidad de las imágenes hubiese sido mejor y por ende realizado una mejor calibración y posterior reconstrucción 3D. Pese a estos inconvenientes la reconstrucción espacial resultó fiel a la verdadera disposición espacial de la parra.



En el método de evaluación fue necesario segmentar las imágenes por lo que el telón dispuesto para aislar el fondo fue de gran importancia ya que sin él la segmentación hubiese sido más compleja. La función de evaluación basada en distancias geodésicas demostró ser efectiva y permite tener con éxito una evaluación formal de los operarios.

7.3. Trabajo Futuro

Una opción en el desarrollo iniciado en este trabajo sería realizar una mejora, tanto en la interfaz como también en las capacidades de la misma, como por ejemplo: mejorar el método de evaluación, poder dotar al sistema de alguna estrategia de poda que pueda determinar de manera automática puntos de corte sin tener que estos ser ingresados por un experto para realizar la evaluación de los operarios.

Sería interesante y muy beneficioso poder replicar este tipo de herramienta a otro tipo de cultivos, principalmente en la región.

Usar otro tipo de técnicas para reconstrucción tridimensional en visión estéreo para obtener mejores estructuras 3D de la parra.

Bibliografía

- [1] José G. Hoyos G., Jaiber E. Cardona A., Luis M. Capacho V., Luis F. Orozco, “Técnicas de Calibración de Cámaras para visión estéreo y reconstrucción”. *XV Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2010.
- [2] A. Barranco, S. Martínez, J. Gómez, *Visión por computadora con MATLAB y OpenCV*. Primera Edición: Lulu, Junio 2012.
- [3] K. Konolige, "Small Vision System: Hardware and Implementation", *Proceedings of the 8th International Symposium in Robotic Research*, pages 203-212, 1997.
- [4] Michael W. Kilby. “Evaluation of various pruning methods for maximum production of wine grape cultivars in southern Arizona” Extension Horticulturist, College of Agriculture, University of Arizona, Wine Grape Research Report, 1999.
- [5] G. Pajares, J. De la Cruz, *Visión por Computador. Imágenes digitales y aplicaciones*, Segunda Edición, Ra-Ma 2007.
- [6] *Operaciones manuales en viñedo*, G. Pérez, Colección Prácticas Agropecuarias, Dirección General de Industrialización y Modernización Agraria, Junta de Castilla y León, 2009.
- [7] G. Bradski, *Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly, Sebastopol, CA, 2008.
- [8] Wang Qi¹, Fu Li^{1,2}, Liu Zhenzhong¹, “Review on Camera Calibration”, *Chinese Control and Decision Conference*, pp. 3354-3358, Xuzhou, China, May 2010.
- [9] Zhang Z., (2000), "A flexible new technique for camera calibration", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330-1334.
- [10] J. Bouget, *Camera Calibration Toolbox for MATLAB*, http://www.vision.caltech.edu/bougetj/calib_doc/
- [11] M. Montalvo Martínez. “Técnicas de visión estereoscópica para determinar la estructura tridimensional de la escena”, Magíster en Ingeniería Informática, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 2010.

- [12] V. Schweppe, "Estudio de métodos de visión estereométrica", Memoria de Título, Ing. Civil Electrónico, Depto. de Ing. Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, 2008.
- [13] J. Guerrero, "Técnicas de procesamiento de imágenes estereoscópicas", Trabajo Final, Magister en Ingeniería Informática para la Industria, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 2010.
- [14] K. Vilá, "Reconstrucción 3D de modelos utilizando técnicas de visión artificial", Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2009.
- [15] J. Tarlea. "Sistema de posicionamiento de objetos mediante visión estéreo embarcable en vehículos inteligentes", Proyecto Fin de Carrera, Ingeniero de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, 2009.
- [16] María Saiz Muñoz. "Reconstrucción tridimensional mediante visión estéreo y técnicas de optimización". Proyecto Fin de Carrera, Ingeniero Industrial, Escuela Técnica Superior, Universidad Pontificia de Comillas, Madrid, 2010.
- [17] D. Calderón, "Generación de mapas de profundidad a partir de imágenes estéreo utilizando registro no rígido", Memoria de Título, Ingeniero Civil Electricista, Departamento de Ingeniería Eléctrica, facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2012.
- [18] C. Platero, *Apuntes de Visión Artificial*, Capítulo 6, [Online], <http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Robotica/InfoRobotica.htm>.
- [19] J. Escobedo, V. Ponomaryov, E. Esacamilla, "Aplicación de un algoritmo de cálculo de disparidad para la estimación de profundidades usando cámaras estéreo", *Científica*, Vol. 14, No. 2, pp. 67-73, Apr-Jun 2010.
- [20] P. Kamencay, M. Breznan, R. Jarina, P. Lukac, M. Zachariasova, "Improved Depth map Estimation from Stereo Images based on Hybrid Method", *Radioengineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 70-78 Apr. 2012.
- [21] E. Trucco and A. Verri. *Introductory to techniques for 3-D computer vision*, Prentice Hall. 1998.

- [22] R. Hartley, A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, New York, NY, USA, second edition, 2004.
- [23] H. Hirschmuller, "Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information", *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005.
- [24] O. Pérez, "Rectificación de Imágenes", Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería Informática, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [25] J. Ascó, "Reconstrucción densa de mapas de profundidad por stereo-visión con la ayuda de un proyector", Proyecto de Título, Ingeniería Informática, Facultad de Informática de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [26] D. Mery, "Visión por Computador", Departamento de Ciencia de la Computación, Universidad Católica de Chile, 2004.
- [27] E. Laorden, "Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesamiento digital de imágenes de MATLAB", Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [28] *MATLAB, Creating Graphical User Interfaces*, The MathWorks, Inc.
- [29] *Manual de interfaz gráfica de usuario en MATLAB*, D. Barragán, 2008.
- [30] H. Lim, *A tutorial on Camera Calibration Using MATLAB Calibration Toolbox*, [Online] Available: <http://hyonlim.tistory.com/105>
- [31] R. González, "Calibración de instrumento para caracterización de la floculación del FeedWell en espesadores de relave", Memoria de Título, Ing. Civil Electrónico, Depto. de Ing. Electrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, Mar. 2013.
- [32] A. Suárez, "Análisis de métodos de procesamiento de imágenes estereoscópicas forestales", Proyecto Fin de Máster en Ingeniería Informática para la Industria, Máster en Investigación en Informática, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 2009.
- [33] *Kodak EasyShare C713/C813/CD703 zoom digital camera. User's Guide*.

- [34] J. Bustamante, R. López, "calibración de Cámara Termográfica Fluke TI-32", *Scientia et Technica* Año XIX, Vol. 19, pp. 59-66, No 1, Universidad Tecnológica de Pererira, 2014.
- [35] J. Heikkilä, "A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction", Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, FIN-90570, Finland.



Anexo A. Cámaras y Set-up experimental

A.1. Cámaras Digitales



Fig. A.1 Cámara digital Kodak EasyShare C813.



Fig. A.2 Cámara digital Kodak EasyShare C713.



Fig. A.3 Sistema de captura estéreo. Cámaras pegadas.

A.2. Set-up experimental



Fig. A.4 Parra dispuesta con telón de fondo blanco.



Fig. A.5 Set-up experimental.

