

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

TESIS DOCTORAL

**Desarrollo de Método de Calibración en
Sistemas de Visión Estereoscópica para Control
Servo-Visual**

Autor:

Luis Roberto Ramírez Hernández

Director de Tesis:

Dr. Julio Cesar Rodríguez
Quiñonez

Co-Director de Tesis:

Dr. Luis Carlos Básaca
Preciado

*Una tesis presentada en cumplimiento de los requisitos
para el grado de Doctor en Ciencias.*

en la

Facultad de Ingeniería
Campus Mexicali

9 de junio de 2021



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA**
FACULTAD DE INGENIERÍA
MEXICALI

Declaración de Autoría

Yo, Luis Roberto Ramírez Hernández, declaro que esta tesis titulada, “Desarrollo de Método de Calibración en Sistemas de Visión Estereoscópica para Control Servo-Visual” y el trabajo presentado en ella es mío. Confirmo que este trabajo enviado para evaluación es mío y se expresa en mis propias palabras. Cualquier uso que se haga dentro de las obras de otros autores en cualquier forma (por ejemplo, ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente en cualquier momento de su uso. Se incluye una lista de las referencias empleadas.

Firma:



Fecha:

9 de junio de 2021

“Un sutil pensamiento erróneo puede dar lugar a una indagación fructífera que revela verdades de gran valor.”

Isaac Asimov

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Resumen

Facultad de Ingeniería
Campus Mexicali

Doctor en Ciencias.

Desarrollo de Método de Calibración en Sistemas de Visión Estereoscópica para Control Servo-Visual

por Luis Roberto Ramírez Hernández

En este trabajo de tesis doctoral se presenta la metodología de un nuevo método de calibración para Sistemas de Visión Estereoscópica (SVE) el cuál se utiliza para mejorar la precisión en la localización de coordenadas tridimensionales que se obtienen mediante estos sistemas. En general, investigaciones referentes a métodos de calibración se basan en la obtención de parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. En esta nueva calibración, se utiliza el método de Least Square para la obtención de una ecuación polinomial que compensa los errores ocasionados por la distorsión de las lentes y la digitalización de las imágenes. El análisis se obtiene por medio de un SVE que utiliza un Compact Vision System (CVS) el cuál procesa la información de imágenes bidimensionales para la obtención de las coordenadas tridimensionales reales de una escena en particular. Estos datos son comparados con las mediciones deseadas, obteniéndose un error que es compensado por medio del método de LS. Posteriormente, se implementó el método de calibración desarrollado junto con un SVE para control servo-visual en donde se realizó el escaneo de la superficie de una pieza trapezoidal. Para el control visual se utilizó un control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) con el que se direccionaba a dos servomotores hacia diferentes regiones de la pieza trapezoidal para la realización del escaneo. En el documento se muestran las experimentaciones realizadas, así como las observaciones y resultados obtenidos en esta investigación.

Reconocimientos

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por darme la oportunidad de estudiar un posgrado y poder obtener el grado de Doctorado en Ciencias.

A la Facultad de Ingeniería de la UABC campus Mexicali, por brindarme las aulas, herramientas de investigación y catedráticos necesarios para la formación académica de mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindar el apoyo económico para financiar mi trabajo de investigación, y apoyar con becas para la realización de estudios de posgrado en México y en el extranjero.

A mi director de tesis, Dr. Julio Cesar Rodríguez Quiñonez, por permitirme participar en este proyecto y proporcionarme las herramientas necesarias, así como sus conocimientos y experiencia para el desarrollo de la investigación.

A mi subdirector de tesis, Dr. Luis Carlos Básaca Preciado, por trabajar en cooperación con el Dr. Julio Cesar Rodríguez Quiñonez y proporcionarme su tiempo y consejos para el desarrollo de la investigación.

Índice General

Declaración de Autoría	I
Resumen	III
Reconocimientos	IV
Índice General	V
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	XI
Acrónimos	XIII
Símbolos	XIV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Sistemas de Visión Estereoscópica	3
1.3. Control Visual	5
1.4. Planteamiento del Problema	6
1.5. Justificación y Uso de los Resultados	7
1.6. Objetivos de la Investigación	8
1.6.1. Objetivo General	8
1.6.2. Objetivos Específicos	8
1.7. Hipótesis y Metodología	9
2. Marco Teórico	10
2.1. Fundamentos de Óptica	10
2.1.1. Espectro Electromagnético	11
2.1.2. Ecuaciones de Maxwell	12
2.2. Óptica Geométrica	14
2.2.1. Reflexión	15

2.2.2.	Refracción	16
2.2.3.	Espejos	17
2.2.4.	Lentes	20
2.2.5.	Aberraciones	22
2.2.5.1.	Aberraciones Monocromáticas	22
2.2.5.2.	Aberraciones Cromáticas	25
2.3.	Estereoscopia	27
2.3.1.	Geometría de un Sistema Estereoscópico	28
2.3.2.	Extracción de Características en un Sistema Estereoscópico	30
2.3.3.	Correspondencia en Sistemas Estereoscópicos	32
2.3.3.1.	Técnicas Basadas en el Área	32
2.3.3.2.	Técnicas Basadas en las Características	33
2.3.3.3.	Restricciones Utilizadas en la Correspondencia Es- tereoscópica	34
2.3.3.4.	Obtención de las Coordenadas Tridimensionales	36
2.4.	Calibración de Cámaras	37
2.4.1.	Modelo de Cámara	38
2.4.2.	Tipos de Calibración de Cámaras	40
2.4.3.	Modelo de Distorsión de las Lentes	41
2.4.4.	Método Least Square	42
2.5.	Visual Servoing Control	42
2.5.1.	Dinámica del Robot	43
2.5.2.	Modelo de Visión Cámara Fija	44
2.5.3.	Controlador PID	45
2.5.4.	Servomotor	46
2.5.5.	Señal PWM	47
3.	Procedimiento de Investigación	48
3.1.	Propuesta de Método de Calibración en SVE para Control Servo- Visual	48
3.1.1.	Diagrama de Flujo de la Investigación Propuesta	49
3.2.	Desarrollo del SVE	50
3.2.1.	Diagrama del SVE	50
3.2.2.	Captura de Imágenes	51
3.2.3.	Proceso PM	52
3.2.4.	Conversión de la Posición del Pixel en Ángulos	53
3.2.5.	Triangulación	54
3.3.	Desarrollo del Método de Calibración	55
3.3.1.	Características de la Rejilla de Calibración Utilizada	55
3.3.2.	Obtención de los Ángulos Ideales	56
3.3.3.	Obtención de los Ángulos por Medio del SVE	57
3.3.4.	Obtención de la Ecuación Polinomial por LS	58
3.4.	Desarrollo del Sistema de Control Servo-Visual	60
3.4.1.	Diagrama de Flujo del Sistema de Control Servo-Visual	60

3.4.2. Localización del Centroide del Rayo de Luz	61
3.4.3. Conversión de la señal PWM a Grados	62
3.4.4. Control del Servomecanismo	63
4. Análisis de Resultados	65
4.1. Características del Equipo Experimental	66
4.2. Experimentación y Resultados de las Mediciones 3D Empleando el Método de Calibración Desarrollado en el SVE	67
4.2.1. Resultados de Mediciones a Una Altura de 22.87 Centímetros	69
4.2.2. Resultados de Mediciones a Una Altura de 21.87 Centímetros	71
4.2.3. Resultados de Mediciones a Una Altura de 20.87 Centímetros	73
4.2.4. Resultados de Mediciones a Una Altura de 19.87 Centímetros	75
4.2.5. Resultados de Mediciones a Una Altura de 18.87 Centímetros	77
4.2.6. Resultados de Mediciones a Una Altura de 17.87 Centímetros	79
4.2.7. Resultados de Mediciones a Una Altura de 16.87 Centímetros	81
4.2.8. Resultados de Mediciones a Una Altura de 15.87 Centímetros	83
4.2.9. Resultados de Mediciones a Una Altura de 14.87 Centímetros	85
4.2.10. Resultados de Mediciones a Una Altura de 13.87 Centímetros	87
4.3. Experimentación y Resultados de Escaneo de la Superficie de una Pieza Empleando el Sistema de Control Servo-Visual	89
5. Conclusiones	92
 Bibliografía	 96
 Anexo I: Artículo Publicado: Improve Three-Dimensional Point Lo- calization Accuracy in Stereo Vision Systems Using a Novel Ca- mera Calibration Method	 104
 Anexo II: Código del Método de Calibración y el SVE con Control Servo-Visual Desarrollado en LabVIEW para la Localización de Puntos 3D.	 120

Índice de Figuras

1.1. Ejemplo de la detección de un punto en la escena obtenido por el SVE.	4
1.2. Diagrama a bloques de los procesos realizados en los SVE.	5
2.1. Ejemplo de propagación de la luz dentro de los diferentes medios. a) Medio isotrópico. b) medio anisotrópico.	10
2.2. Fenómeno de reflexión de la luz.	15
2.3. Fenómeno de refracción de la luz.	16
2.4. Rayo de luz incidente en un espejo plano.	17
2.5. Incidencia de rayos de luz paralelos en un espejo cóncavo.	18
2.6. Incidencia de rayos de luz paralelos en un espejo convexo.	19
2.7. Incidencia de los rayos de luz en lentes. a) Lente divergente. b) Lente convergente.	20
2.8. Lentes convergentes. a) Lente biconvexa. b) Lente planoconvexa. c) Lente cóncavoconvexa.	21
2.9. Lentes divergentes. a) Lente bicóncava. b) Lente planocóncava. c) Lente convexocóncava.	22
2.10. Aberración esférica a) Presente en un espejo esférico. b) Presente en una lente esférica.	23
2.11. Aberración de coma.	23
2.12. Aberración de astigmatismo.	24
2.13. Aberración de curvatura de campo.	24
2.14. Tipos de distorsión presentes en imágenes. a) Imagen original. b) Distorsión de barril. c) Distorsión de cojín. d) Distorsión de mostacho.	25
2.15. Aberración cromática axial.	26
2.16. Aberración cromática lateral.	26
2.17. Ejemplo de dos imágenes tomadas con un SVE. a) Imagen Izquierda. b) Imagen derecha.	27
2.18. Geometría de un SVE de dos cámaras.	29
2.19. Valor numérico de los pixeles en una región de la imagen.	30
2.20. Ejemplo de detección de bordes. a) Imagen original. b) Detección de bordes en la imagen.	31
2.21. Restricción epipolar en un SVE. Se muestra que C_I y C_D deben corresponder a las líneas epipolares de ambas imágenes.	34
2.22. Restricción de semejanza. Existe similitud en las regiones de ambas imágenes.	35

2.23. Restricción de unicidad. Ambas imágenes se encuentran en escala de grises	35
2.24. Restricción de orden posicional. Se muestra que se debe cumplir $x_i < x_h$ y $x_j < x_k$	36
2.25. Restricción de la continuidad de la disparidad. Se muestra un mapa de disparidad continuo del par de imágenes.	36
2.26. Relación geométrica entre un punto de la escena y sus proyecciones bidimensionales en las imágenes de un SVE.	38
2.27. Relación geométrica entre un punto de coordenada global y su proyección bidimensional en el plano $X_c Y_c$ del sistema de coordenadas de la cámara.	39
2.28. Configuración de una cámara fija con respecto al sistema de coordenadas global.	44
2.29. Diagrama a bloques en lazo cerrado donde interviene un control PID.	45
2.30. Esquema y funcionamiento de un servomotor.	47
2.31. Rango de operación de un PWM. a) Señal PWM a 25 %. b) Señal PWM a 50 %. c) Señal PWM a 90 %.	47
3.1. Diagrama de flujo de la investigación propuesta.	49
3.2. Diagrama de localización de un punto 3D por medio del SVE.	50
3.3. Par de imágenes de una escena en particular capturadas con el SVE.	51
3.4. Proceso PM de una escena en particular. a) Detección correcta en ambas imágenes. b) La región no fue localizada en la imagen derecha.	52
3.5. Rejilla de Calibración Desarrollada.	55
3.6. Sistema de coordenadas de la rejilla de calibración para cada punto a localizar.	56
3.7. Ubicación de ángulos horizontales y verticales de las proyecciones bidimensionales de los puntos de la escena.	57
3.8. Diagrama de flujo del sistema de control servo-visual.	61
3.9. Localización del centroide de un rayo de luz en una imagen estéreo. a) Imágenes estéreo que contienen un rayo de luz. b) Localización del centroide del rayo de luz en donde se filtran los demás píxeles de las imágenes.	61
3.10. Respuesta en grados del servomotor con respecto a la señal PWM recibida. a) Señal PWM mínima para 0° . b) Señal PWM para 90° . c) Señal PWM máxima para 180°	63
4.1. Equipo de pruebas utilizado para la experimentación.	65
4.2. Programa realizado en LabVIEW para la experimentación.	66
4.3. Rejilla de prueba utilizada en la experimentación.	67
4.4. Operación del SVS en un punto de la rejilla de prueba.	68
4.5. Gráficas de mediciones a 22.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	70
4.6. Gráficas de mediciones a 21.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	72

4.7. Gráficas de mediciones a 20.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	74
4.8. Gráficas de mediciones a 19.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	76
4.9. Gráficas de mediciones a 18.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	78
4.10. Gráficas de mediciones a 17.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	80
4.11. Gráficas de mediciones a 16.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	82
4.12. Gráficas de mediciones a 15.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	84
4.13. Gráficas de mediciones a 14.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	86
4.14. Gráficas de mediciones a 13.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.	88
4.15. Pieza trapezoidal utilizada en la experimentación.	89
4.16. Selección de la región a escanear de la pieza trapezoidal dentro del FOV efectivo.	90
4.17. Resultados de la pieza trapezoidal en diferentes planos. a) Vista Isométrica. b) Plano YZ. c) Plano YX. d) Plano ZX.	91

Índice de Tablas

2.1. Rangos de frecuencias del espectro electromagnético.	11
4.1. Características del equipo utilizado.	66
4.2. Cantidad de puntos analizados para cada altura empleada.	68
4.3. Localización de coordenadas 3D a una altura de 22.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	69
4.4. Localización de coordenadas 3D a una altura de 22.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	69
4.5. Localización de coordenadas 3D a una altura de 21.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	71
4.6. Localización de coordenadas 3D a una altura de 21.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	71
4.7. Localización de coordenadas 3D a una altura de 20.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	73
4.8. Localización de coordenadas 3D a una altura de 20.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	73
4.9. Localización de coordenadas 3D a una altura de 19.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	75
4.10. Localización de coordenadas 3D a una altura de 19.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	75
4.11. Localización de coordenadas 3D a una altura de 18.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	77
4.12. Localización de coordenadas 3D a una altura de 18.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	77
4.13. Localización de coordenadas 3D a una altura de 17.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	79
4.14. Localización de coordenadas 3D a una altura de 17.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	79
4.15. Localización de coordenadas 3D a una altura de 16.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	81

4.16. Localización de coordenadas 3D a una altura de 16.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	81
4.17. Localización de coordenadas 3D a una altura de 15.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	83
4.18. Localización de coordenadas 3D a una altura de 15.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	83
4.19. Localización de coordenadas 3D a una altura de 14.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	85
4.20. Localización de coordenadas 3D a una altura de 14.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	85
4.21. Localización de coordenadas 3D a una altura de 13.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).	87
4.22. Localización de coordenadas 3D a una altura de 13.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).	87
5.1. Porcentajes de reducción del error absoluto de las coordenadas obtenidas empleando el método de calibración desarrollado.	94

Acrónimos

SVE	S istemas de V isión E stereoscópica
LS	L east S quare
CVS	C ompact V ision S ystem
PID	P roporcional I ntegral D erivativo
NA	N avegación A utónoma
DLTM	D irect L inear T ransformation M ethods
NLOT	N on- L inear O ptimization T echniques
CMANN	C alibration M ethods with A rtificial N eural N etwork
CMGA	C alibration M ethods with G enetic A lgorithm
FOV	F ield O f V iew
PM	P attern M atching
PWM	P ulse W idth M odulation
CCD	C harge C oupled D evice
CMOS	C omplementary M etal O xide S emiconductor
VSC	V isual S ervoing C ontrol
FPS	F rames P or S egundo

Símbolos

Símbolo	Nombre	Unidad de Medida
$\vec{E}$	Campo Eléctrico	V/m
$\vec{B}$	Campo Magnético	N/m
μ_0	Permeabilidad Magnética	$T \cdot m/A$
ϵ_0	Permitividad Eléctrica	C^2/Nm^2
ρ	Densidad de Carga	C/m
$\vec{J}$	Densidad de Corriente	A/m^2
$\vec{P}$	Polarización Eléctrica	C/m^2
$\vec{M}$	Magnetización	A/m
v	Velocidad	m/s
n	Índice de Refracción	—
θ_i	Ángulo de Incidencia	$^{\circ}grados$
θ_r	Ángulo de Reflexión	$^{\circ}grados$
f	Distancia Focal	m
R	Radio de Curvatura	m
d	Disparidad	m
b	Línea Base	m
C	Coficiente de Correlación	—
σ^2	Varianza	m^2
μ_I	Nivel Medio de Gris Imagen Izquierda	—
μ_D	Nivel Medio de Gris Imagen Derecha	—
O_c	Centro Óptico	—
(u_i, v_i)	Coordenada Bidimensional de Imagen	px

δ_x	Coeficiente de Distorsión Horizontal	—
δ_y	Coeficiente de Distorsión Vertical	—
k_1	Coeficiente de Distorsión Radial	—
k_2	Coeficiente de Distorsión Tangencial	—
$M(q)$	Matriz de Inercia del Manipulador	Kg
$C(q, \dot{q})$	Matriz de Fuerzas Centrífugas	N
$g(q)$	Vector de Pares Gravitacionales	m/s^2
q	Vector de Posiciones Articulares	m
$\dot{q}$	Vector de Velocidades Articulares	m/s
$\ddot{q}$	Vector de Aceleraciones Articulares	m/s^2
τ	Vector de Torques	Nm
K_{ph}	Ganancia Proporcional en la Dirección Horizontal	—
K_{pv}	Ganancia Proporcional en la Dirección Vertical	—
T_{ih}	Constante de Integración en la Dirección Horizontal	—
T_{iv}	Constante de Integración en la Dirección Vertical	—
T_{dh}	Constante de Tiempo Derivativa en la Dirección Horizontal	—
T_{dv}	Constante de Tiempo Derivativa en la Dirección Vertical	—
B_{ij}	Ángulo B	$^\circ\text{grados}$
C_{ij}	Ángulo C	$^\circ\text{grados}$
β_{ij}	Ángulo β	$^\circ\text{grados}$
D_h	Dimensión Horizontal de las Cámaras	px
D_v	Dimensión Vertical de las Cámaras	px
R_h	Resolución Horizontal de las Cámaras	$^\circ\text{grados}/px$
R_v	Resolución Vertical de las Cámaras	$^\circ\text{grados}/px$
α_{ij}	Ángulo Ideal en la Dirección Horizontal	$^\circ\text{grados}$
v_{ij}	Ángulo Ideal en la Dirección Vertical	$^\circ\text{grados}$
φ_{ij}	Ángulo Horizontal Medido de la Cámara Izquierda	$^\circ\text{grados}$
ϕ_{ij}	Ángulo Horizontal Medido de la Cámara Derecha	$^\circ\text{grados}$
γ_{ij}	Ángulo Medido en la Dirección Vertical de las Cámaras	$^\circ\text{grados}$
A_n	Coeficiente de Ajuste A Obtenido por LS	—
B_n	Coeficiente de Ajuste B Obtenido por LS	—

C_n	Coeficiente de Ajuste C Obtenido por LS	—
ΔB_{ij}	Ángulo de Ajuste B	$^\circ \text{grados}$
ΔC_{ij}	Ángulo de Ajuste C	$^\circ \text{grados}$
$\Delta \beta_{ij}$	Ángulo de Ajuste β	$^\circ \text{grados}$
Bc_{ij}	Ángulo Calibrado B	$^\circ \text{grados}$
Cc_{ij}	Ángulo Calibrado C	$^\circ \text{grados}$
βc_{ij}	Ángulo Calibrado β	$^\circ \text{grados}$
Ds_h	Diferencial de Distancia en la Dirección Horizontal	m
Ds_v	Diferencial de Distancia en la Dirección Vertical	m
$PWMh_d$	Señal PWM de Desplazamiento en la Dirección Horizontal	V
$PWMv_d$	Señal PWM de Desplazamiento en la Dirección Vertical	V
$PWMh_i$	Señal PWM Mínima en la Dirección Horizontal	V
$PWMh_f$	Señal PWM Máxima en la Dirección Horizontal	V
$PWMv_i$	Señal PWM Mínima en la Dirección Vertical	V
$PWMv_f$	Señal PWM Máxima en la Dirección Vertical	V
lh_i	Límite Mínimo de la Imagen en la Dirección Horizontal	m
lh_f	Límite Máximo de la Imagen en la Dirección Horizontal	m
lv_i	Límite Mínimo de la Imagen en la Dirección Vertical	m
lv_f	Límite Máximo de la Imagen en la Dirección Vertical	m
$Y(x, y)$	Luminancia de cada Pixel (x, y) en la Imagen	cd/m^2
$Cb(x, y)$	Crominancia Azul de cada Pixel (x, y) en la Imagen	cd/m^2
$Cr(x, y)$	Crominancia Roja de cada Pixel (x, y) en la Imagen	cd/m^2

Este trabajo esta dedicado con todo el amor y cariño a todas las personas que estuvieron apoyándome y las cuáles me ayudaron a cumplir con los objetivos y metas propuestas en estos estudios de posgrado. A mi madre por estar siempre conmigo apoyándome y comprendiéndome en todo momento. A mis hermanos por ayudarme a seguir adelante y dándome sus consejos cuando se me presentaban momentos difíciles. A mis amigos por estar siempre a mi lado y animándome siempre a seguir por este camino de la mejor manera. Les agradezco a ellos de todo corazón, muchas gracias.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Con el avance de la tecnología, los sistemas de visión han ido desarrollándose en diferentes áreas tales como la Navegación Autónoma (NA), reconstrucción 3D, monitoreo de salud estructural, microcirugía, seguridad, entre otras. Dentro de estos sistemas se encuentran los Sistemas de Visión Estereoscópica (SVE) los cuales se han utilizado para tareas de detección de obstáculos, navegación y reconstrucción [Benacer et al., 2015], [Yan et al., 2006], [Gai et al., 2018]. Para cada SVE es necesario el uso de un método de calibración de cámaras para obtener una mejor precisión las mediciones que se obtienen. El desarrollo de estos métodos de calibración para SVE empezaron en los años 90s, considerando las investigaciones hechas por Cerveri et. al. [Cerveri et al., 1998] los cuales reportaron un método completo de calibración de cámaras en un sistema fotogramétrico estereo a través de puntos de control de coordenadas desconocidas de donde se determinaban los parámetros de cámaras con el uso de una función de minimización. Posteriormente, los métodos de calibración para SVE fueron desarrollándose en diferentes categorías según el tipo de algoritmo utilizado [Qi et al., 2010]. Dentro de estas categorías se encuentran los Direct Linear Transformation Methods (DLTM), Non-Linear Optimization Techniques (NLOT), Two-Step Methods (TSM), Calibration Methods with Artificial Neural Network (CMANN) y Calibration Methods with Genetic Algorithm (CMGA). En DLTM se obtiene una calibración de cámaras estableciendo y resolviendo ecuaciones lineales sin utilizar cálculos iterativos. El objetivo del método es encontrar una relación lineal a lo largo de las coordenadas

tridimensionales en puntos de una escena en particular utilizando las proyecciones de puntos bidimensionales obtenidos de imágenes de la escena. Las primeras investigaciones referentes a este método son las propuestas por Hall [Hall et al., 1982], en donde se determinan la distancia focal y parámetros de traslación y orientación con la información de las imágenes y considerando el modelo de cámara pinhole. Este método incluye pocos parámetros a obtener y es relativamente fácil de desarrollar, sin embargo, la precisión de este método no es tan alta debido a que no considera un modelo para encontrar los problemas de distorsión que se presenta en imágenes y que afecta considerablemente las mediciones obtenidas por el SVE. A diferencia del DLTM, los NLOT si consideran un modelo de distorsión de las lentes que mejoran en gran medida la precisión de las mediciones. El primer desarrollo de este método fue realizado por Slama [Slama, 1980] el cuál consiste en realizar una calibración a través de iteraciones con la restricción de minimizar una función determinada. Este método es muy preciso, sin embargo, conlleva a un largo costo computacional, dependiendo de la cantidad de iteraciones que realice y la estimación de parámetros de inicio elegida. En cada iteración, son obtenidas distancias entre mediciones deseadas de puntos de imagen y los obtenidos por el SVE, las cuáles son reducidas por medio de una función de minimización. Para reducir el costo computacional que conllevan los NLOT, se desarrollaron los STM. La primera investigación sobre este método fue realizada por Tsai [Tsai, 1987], combinando los métodos DLTM y los NLOT para lograr un proceso más autónomo, preciso, eficiente y versátil. Los STM consisten de dos pasos, donde en el primer paso se utiliza la matriz de perspectiva para encontrar algunos parámetros intrínsecos de las cámaras (las coordenadas de origen del plano de imagen y el factor de escala) y la mayoría de los parámetros extrínsecos (parámetros de traslación y rotación). En el segundo paso se determina la distancia focal, los coeficientes de distorsión radial y tangencial de las lentes y los parámetros extrínsecos faltantes usando una técnica de optimización no lineal por medio de iteraciones hasta lograr los mejores valores para estos parámetros. Con respecto a los CMANN, consisten en realizar una calibración encontrando los parámetros de cámara por medio de una red neuronal. Las primeras investigaciones acerca de estos métodos fueron realizadas por Wen y Schweitzer [Wen and Schweitzer, 1991], el cuál consiste de computar neuronas conectadas por enlaces nombrados sinapsis, las cuáles envían la información de una capa de entrada a una de salida. En este modelo, las entradas del sistema son las coordenadas bidimensionales de puntos de la escena tomadas de ambas imágenes de un SVE, las cuáles se procesan a través de la red neuronal,

teniendo como resultado 3 neuronas de salidas que representan las coordenadas tridimensionales reales de cada punto en particular. La relación de cada neurona y el procesamiento final de los datos se realizan por medio de unos pesos dentro de la red neuronal los cuáles utilizan un algoritmo que va moviendo estos pesos hasta minimizar una función de error. En relación a los CMGA, los primeros reportes se realizaron en los 2000s, en investigaciones de Ji y Zhang [[Ji and Zhang, 2001](#)] los cuáles utilizaron algoritmos genéticos como un problema de optimización no lineal para encontrar los parámetros de las cámaras. CMGA calibra las cámaras minimizando el error entre las coordenadas tridimensionales de puntos de una escena obtenidas con el SVE y las coordenadas tridimensionales conocidas de estos puntos. Este algoritmo depende de la codificación de cromosomas los cuáles contienen los parámetros de cámaras a obtener, utilizando operadores de selección, de cruce y mutación para lograr minimizar el error obtenido hasta lograr el resultado óptimo de los parámetros de las cámaras. En secciones posteriores se referirá con más detalle a los SVE y los sistemas de servo-control para una mejor comprensión de la investigación realizada.

1.2. Sistemas de Visión Estereoscópica

Los SVE son sistemas que procesan la información visual de dos o más cámaras para obtener características específicas de una escena en particular. Dentro de este tipo de sistemas, el más común cuenta con 2 cámaras en las que cada una captura imágenes de diferentes perspectivas. El diseño de estos SVE consiste en mantener una línea epipolar común entre las cámaras, lo que permite que las imágenes capturadas solo tengan una disparidad horizontal entre ellas [[Hernández et al., 2011](#)]. En cada par de imágenes se detectan entre ellos puntos correspondientes, y finalmente se desarrolla un proceso de triangulación con cada par de puntos, obteniendo así las coordenadas tridimensionales de cada punto en particular de la escena [[Machikhin et al., 2019](#)]. En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo general de la detección de un punto en particular con el SVE.

La implementación de los SVE se puede dividir en 5 procesos principales (ver Figura 1.2). En la primera etapa se encuentra el método de calibración, el cuál se utiliza para encontrar características específicas de las cámaras y así mejorar los

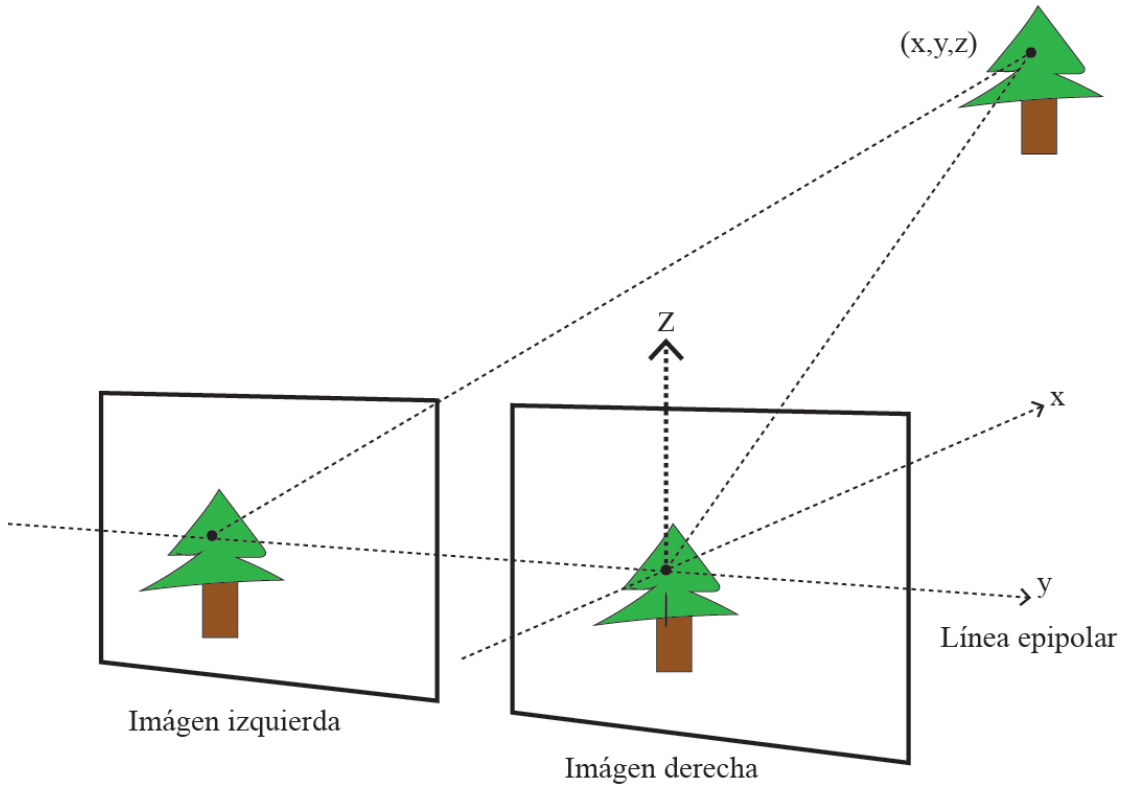


FIGURA 1.1: Ejemplo de la detección de un punto en la escena obtenido por el SVE.

resultados de las mediciones obtenidas por el SVE. Entre los parámetros a obtener se encuentran las coordenadas centrales de las imágenes, la distancia focal, los coeficientes de distorsión de las lentes, y los parámetros de traslación y rotación de las cámaras [Shan et al., 2019]. Posteriormente, se realiza una captura de imágenes de ambas cámaras en diferentes perspectivas de la escena en particular. En estas imágenes, se seleccionan puntos específicos de la escena, los cuáles deben de encontrarse en el mismo Field of View (FOV) de cada par de imágenes para poder lograr el proceso de Pattern Matching (PM). Dentro de un SVE, el PM consiste en localizar las coordenadas bidimensionales en la imagen derecha con respecto a un punto específico de la imagen izquierda. Este método correlaciona patrones de intensidad entre los píxeles de las dos imágenes, localizando la mejor región en la imagen derecha que empate con la región a localizar de la imagen izquierda [Fernandez et al., 2012]. Con la información bidimensional correspondiente de cada par de puntos localizados en ambas imágenes, se da paso a un proceso en el que se realiza una conversión de la posición de pixel de cada punto a ángulos que se pueden obtener de la propia geometría que proporciona el diseño del SVE. Por último, se realiza un proceso de triangulación con la información de estos ángulos

para obtener las coordenadas tridimensionales de los puntos a considerar de la escena en particular. Las ecuaciones que se utilizan en el proceso de triangulación son obtenidas por medio de la ley de los senos [Rodríguez-Quinonez et al., 2017]. La precisión de las mediciones obtenidas del SVE dependen tanto del método de calibración como del propio diseño del sistema. En esta investigación se desarrolla tanto un nuevo método de calibración como un diseño de SVE en el que se demuestra la mejora de la localización de puntos tridimensionales por medio de una experimentación que se mostrará en secciones posteriores.

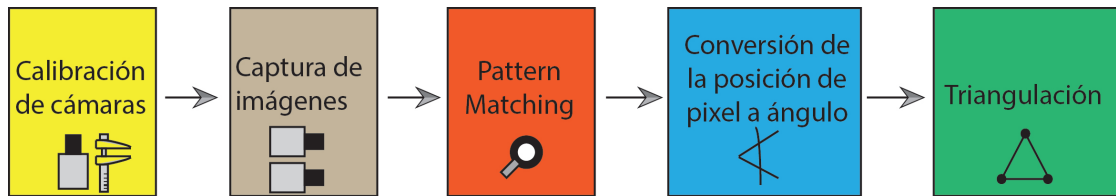


FIGURA 1.2: Diagrama a bloques de los procesos realizados en los SVE.

1.3. Control Visual

El control visual utiliza la información visual obtenida ya sea de una o varias cámaras para controlar la posición u orientación de un robot con respecto a un objeto o a un conjunto de características visuales según la tarea que este deba realizar [Corke et al., 1996]. Para lograr esto, la información de la imagen de la cámara debe interpretar el plano de coordenadas espacial en el que se va a realizar la tarea. Por lo general, se trata de representar un punto de coordenadas espaciales por medio de imágenes, empleándose un modelo de 2 cámaras que tienen sus ejes ópticos paralelos, siendo la distancia que los separa la línea base y situando sus líneas epipolares paralelas a esa línea. El proceso general de control servo-visual empieza con el SVE que obtiene las coordenadas tridimensionales específicas, en donde se desea posicionar un robot determinado. Posteriormente, la señal es enviada a los servomotores del robot el cuál lo desplazan a una posición cercana a la deseada. Después, el controlador realiza una comparación entre la posición actual del robot y la posición deseada y determina si el sistema debe seguir desplazando el robot hasta alcanzar esa posición. El controlador más comúnmente utilizado es el controlador PID, el cuál calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado considerando un control proporcional, integral y derivativo [Mosaad et al., 2019]. Para el desplazamiento de los servomotores se emplea una

señal de ancho de pulso denominada Pulse Width Modulation (PWM) que consiste en una señal cuadrada de voltaje con determinada frecuencia [Gao et al., 2020]. La combinación del SVE, la señal PWM y el controlador PID forman un sistema característico de control servo-visual el cuál es implementado en el desarrollo de esta investigación.

1.4. Planteamiento del Problema

Existen dos razones principales por la cuál se presentan mediciones imprecisas al momento de obtener coordenadas tridimensionales utilizando SVE: la pérdida de información debido a la digitalización de las imágenes y la distorsión creada por las lentes de las cámaras. En la digitalización de la imagen se emplean sensores CCD (Charge Coupled Device) y CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) los cuáles obtienen la información lumínica de cada región de la escena, convirtiéndola en señales eléctricas. Estas señales son amplificadas y convertidas en señales digitales, creando un mapa de píxeles que contiene la información digital de la escena [Zapata-Farfan et al., 2019]. La digitalización conlleva a que diferentes áreas de la imagen tengan una baja calidad en términos de brillo, nitidez y contraste, causando tanto dificultad para localizar puntos específicos en estas áreas como mediciones con baja precisión. Por otra parte, la distorsión de las lentes provoca deformaciones en las líneas rectas de las imágenes. Estas deformaciones pueden presentarse en tres formas diferentes: la distorsión de barril, de cojín y de mostacho [Wang et al., 2016]. La distorsión de barril se presenta en lentes con angulares anchos, las cuáles curvan las líneas rectas presentes en la imagen hacia dentro. De manera contraria, la distorsión de cojín se presenta en lentes con angulares cortos los cuales curvan las líneas rectas hacia fuera. En el caso de la distorsión de mostacho, se presenta en lentes con FOV variable, los cuales curvan las líneas rectas presentes en el centro de la imagen hacia dentro y las líneas rectas presentes en los extremos de la imagen hacia fuera. Cada una de estas deformaciones provocan mediciones imprecisas al localizar puntos tridimensionales en la escena. Estos errores son minimizados con la utilización de métodos de calibración, en donde son obtenidos parámetros de cámaras que se emplean para mejorar la precisión de las mediciones tridimensionales realizadas con el SVE. A diferencia de los métodos de calibración existentes, el método desarrollado en esta investigación no necesita la obtención de dichos parámetros de cámaras, ya que implementa un algoritmo que

modela el error causado por los problemas mencionados, considerando los valores obtenidos de puntos tridimensionales de una escena en particular obtenidos por el SVE y los valores deseados de esos puntos. Otro problema se presenta en el posicionamiento del mecanismo robótico, ya que si no se precisa la localización de estos puntos, este posicionamiento no será el deseado. Por último, se debe considerar un control servo-visual eficiente que posicione al mecanismo robótico en la ubicación deseada, por lo que en esta investigación se desarrolla también un control PID que cumpla con este objetivo de manera rápida y precisa.

1.5. Justificación y Uso de los Resultados

Los métodos de calibración en los SVE son esenciales para garantizar una mejor precisión en las mediciones tridimensionales que el sistema realiza de una escena en particular. En general, los métodos de calibración actuales encuentran los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras y posteriormente estos son utilizados para mejorar la precisión de las mediciones tridimensionales. Sin embargo, se ha visto que estos métodos consumen mucho costo computacional y son difíciles de implementar [Clédat et al., 2020]. El método de calibración desarrollado en esta investigación tiene como objetivo ser un método más robusto, eficiente y fácil de implementar a diferencia de los métodos de calibración actuales. En este método de calibración se utiliza el algoritmo least square (LS) para compensar los errores ocasionados por la pérdida de información debido a la digitalización de las imágenes y la distorsión de las lentes. Este método genera una ecuación polinomial que modela los errores presentes entre puntos tridimensionales adquiridos de una escena por el SVE y las mediciones ideales de estos puntos. Después de la realización del SVE implementando el método de calibración desarrollado, se creará un sistema de control servo-visual en el que se manipulará un mecanismo de 2 grados de libertad el cual será dirigido por 2 servomotores. El objetivo de la manipulación de este mecanismo será para realizar un escaneo tridimensional de una pieza en particular. En la experimentación desarrollada se realiza la localización de puntos de una rejilla de calibración en el que se comparan las mediciones obtenidas con y sin el método de calibración creado con el SVE, demostrando la mejora en la exactitud de las mediciones en las diferentes coordenadas tridimensionales al utilizar esta calibración. Además de la experimentación descrita anteriormente, se realiza un escaneo de una pieza trapezoidal implementando este SVE y un mecanismo de

control servo-visual, mostrándose en secciones posteriores los resultados obtenidos del escaneo realizado. El desarrollo de un método de calibración en sistemas de visión estereoscópica que mejore la exactitud de la información visual e implementarlo en un sistema de control servo-visual tiene aplicaciones tecnológicas tales como corrección de trayectoria de un brazo manipulador para encontrar la posición final deseada [Perez and Lopez, 2015], en vehículos autónomos para localizar obstáculos, encontrar caminos e identificar objetos de interés [Patterson et al., 2014], en manufactura para el control de calidad, identificación y localización de piezas [Kanellakis et al., 2015], entre otras.

1.6. Objetivos de la Investigación

1.6.1. Objetivo General

Crear un método de calibración robusto para sistemas de visión estereoscópica utilizando el algoritmo de least square para mejorar las mediciones tridimensionales que se realizan de una escena en particular. Posteriormente, se creará un sistema de control servo-visual utilizando el sistema de visión estereoscópica y un mecanismo de servomotores que implementará un control PID para realizar escaneos de superficies tridimensionales de manera precisa gracias al empleo del método de calibración desarrollado.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un SVE para la localización de coordenadas 3D de una escena en particular.
- Diseñar un método de calibración robusto para SVE.
- Crear una interfaz en LabVIEW para representar el SVE desarrollado.
- Diseñar algoritmos en LabVIEW para implementar el método de calibración desarrollado.
- Diseñar una rejilla para experimentar con el método de calibración desarrollado.

- Realizar experimentaciones a diferentes alturas para comprobar la efectividad del método en diferentes FOV de la escena y discutir sus resultados.
- Diseñar un brazo manipulador de 2 grados de libertad para el control servo-visual.
- Programar el dispositivo de procesamiento de imágenes CVS por medio de LabVIEW para realizar el proceso de control del sistema servo-visual implementando el método de calibración desarrollado.
- Realizar la experimentación de un escaneo tridimensional utilizando el sistema de servo-control desarrollado y discutir sus resultados.

1.7. Hipótesis y Metodología

La propuesta de investigación se centra en el desarrollo de un nuevo método de calibración para SVE y su implementación en un control servo-visual. Este método será realizado con el algoritmo LS y tiene como objetivo la mejora en la precisión de las mediciones tridimensionales de puntos de una escena en particular. El empleo del método de calibración desarrollado en el sistema de control servo-visual garantizará el mejor posicionamiento del servomecanismo a diseñar. El correcto posicionamiento del servomecanismo permitirá la realización de un escaneo de la superficie de una pieza en particular de manera precisa.

La metodología del trabajo de investigación comienza con la implementación del método de calibración desarrollado, seguido de un proceso de correspondencia, en donde se busca coincidir el grado de similitud de las coordenadas bidimensionales de puntos correspondientes del par de imágenes. Después, se realiza una conversión de la posición del pixel de cada punto en ángulos, los cuáles serán utilizados en un proceso de triangulación con la finalidad de encontrar las coordenadas tridimensionales de ese punto en particular. Finalmente, se emplea el proceso de control PID para ir desplazando el servomecanismo hacia ese punto tridimensional obtenido. El proceso se repite en los diferentes puntos que conforman la superficie a escanear de la pieza en particular.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Fundamentos de Óptica

La óptica es la ciencia que estudia los orígenes, la propagación y la detección de la luz. Se entiende por luz no sólo la radiación electromagnética visible, sino también la infrarroja y la ultravioleta. Un rayo de luz representa la dirección en la que se propaga la energía de una onda de luz. Se denomina un medio isotrópico cuando la luz viaja con la misma velocidad en cualquier dirección de propagación dentro del medio. De forma contraria, un medio es anisotrópico cuando la luz varía su velocidad de propagación dentro de él [Malacara, 2015]. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de la forma como se propaga la luz en estos medios.

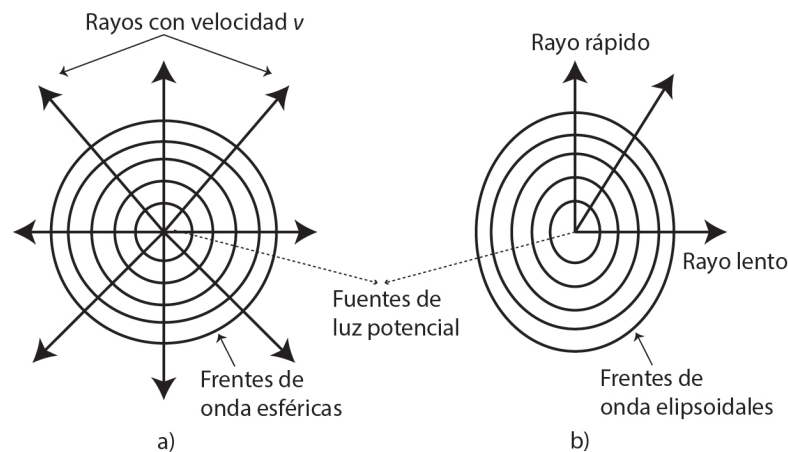


FIGURA 2.1: Ejemplo de propagación de la luz dentro de los diferentes medios.
a) Medio isotrópico. b) medio anisotrópico.

2.1.1. Espectro Electromagnético

La luz visible constituye un segmento pequeño, aunque importante, del amplio espectro de ondas electromagnéticas que abarcan el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas. La Tabla 2.1 muestra el rango de frecuencias de las diferentes regiones existentes del espectro eletromagnético.

Región espectral	Rango aproximado de frecuencias
Rayos Gamma	$> 10^{20}$ Hz
Rayos X	$10^{17} - 10^{20}$ Hz
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$ Hz
Luz visible	$(3.5 - 7.5) \cdot 10^{14}$ Hz
Infrarrojo	$10^{12} - 10^{14}$ Hz
Microondas	$10^9 - 10^{12}$ Hz
Radiofrecuencia	$< 10^9$ Hz

TABLA 2.1: Rangos de frecuencias del espectro electromagnético.

Ahora se entiende que la luz como la materia pueden tener tanto un comportamiento ondulatorio como de partícula (fotones). La propagación de la luz en el espacio libre y en otros medios se puede describir en forma clásica, mientras que la interacción luz-materia (absorción y emisión de luz) puede ser entendido sólo en la descripción de la mecánica cuántica [Laserna, 2015]. Un enfoque que evita las dificultades de una definición física es el de tratar los rayos como entidades matemáticas. A partir de definiciones y postulados se encuentra una variedad de resultados, que pueden ser más o menos útil y válido para la luz. Incluso con este enfoque, es prácticamente imposible pensar geométricamente el comportamiento de la luz, a menos que los rayos se traten como objetos de geometría, en lugar de como ópticos [Pastorino et al., 2015]. De hecho, es muy frecuente cambiar entre el pensamiento de rayos y el pensamiento de ondas sin darse cuenta, por ejemplo, al considerar la dependencia del índice de refracción sobre la longitud de onda. La definición de rayo de luz está intrínsecamente mal definido y los intentos de refinar una definición siempre fracasan. Cada definición proporciona una idea del comportamiento de la luz, pero no da una imagen completa. Parece haber un problema asociado con el principio de incertidumbre involucrado con los intentos de definición, ya que lo que realmente se quiere de un rayo es una especificación de la posición y la dirección, que es imposible en virtud de considerar a la luz como onda o como partícula. Entonces, el enfoque adoptado es tratar a los rayos de luz sin una definición específica, tomando en consideración estudios de la óptica de rayos como predicciones matemáticas de su comportamiento [Marion, 2014].

2.1.2. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell predicen la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas en el vacío que se encuentra en estrecha concordancia con la velocidad medida de la luz. Esta observación firmemente establece la luz en el ámbito de las ondas electromagnéticas [Rojas, 2015]. Una onda electromagnética proporciona información de las distribuciones de carga y corriente en la materia al relacionarla con su longitud de onda de luz. Todos los fenómenos electromagnéticos, incluida la propagación de la luz, pueden ser completamente descritos en términos de las ecuaciones de Maxwell de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

donde ∇ es el operador de divergencia de los campos eléctrico y magnético, $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son el campo eléctrico y el campo magnético, respectivamente; μ_0 y ϵ_0 representan la permeabilidad magnética y permitividad eléctrica en el vacío, respectivamente; ρ y $\vec{J}$ son las densidades de carga y corriente, respectivamente. Dentro de las ecuaciones de Maxwell podemos considerar tanto la forma microscópica como la forma macroscópica del entorno. En la forma microscópica, el campo eléctrico $\vec{E}$ y el campo magnético $\vec{B}$ muestran una variación rápida sobre distancias atómicas y subatómicas. Estas densidades de carga y corriente se pueden distinguir con facilidad a nivel atómico, sin embargo, en el contexto de la forma macroscópica, es necesario distinguir entre la carga libre y las densidades de corriente [Masip, 2015]. Los electrones libres en los conductores generan una densidad de carga libre ρ_f . Además, puede suceder que los centros de las cargas positivas y negativas en un pequeño volumen macroscópico pueden no coincidir. Si esto sucede, un momento

dipolar eléctrico puede asociarse con este volumen y el medio resultará polarizado. La polarización eléctrica $\vec{P}$ se define como:

$$\vec{P} = \frac{\text{Momento dipolo eléctrico en un volumen chico } V}{\text{Volumen } V} \quad (2.5)$$

Asímismo, la densidad de carga unida en un medio polarizado ρ_b viene dada por:

$$\rho_b = -\nabla \cdot \vec{P} \quad (2.6)$$

La densidad de carga ρ_b es distinta de cero solo si $\vec{P}$ es espacialmente cambiante. La polarización eléctrica se puede crear en un medio alineando ya sea sus moléculas polares o desplazando su carga negativa con respecto a la positiva mediante la aplicación de un campo eléctrico externo. El movimiento de las cargas libres en un conductor dan lugar a la densidad de corriente libre $\vec{J}_b$ y los cambios en los desplazamientos de las cargas ligadas desde sus posiciones de equilibrio dan lugar a la siguiente relación:

$$\vec{J}_b = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (2.7)$$

También se debe reconocer la existencia de los momentos dipolares magnéticos en materiales magnéticos. La densidad de corriente ligada se puede generalizar para incluir estas contribuciones de la siguiente forma:

$$\vec{J}_b = \frac{d\vec{P}}{dt} + \nabla \times \vec{M} \quad (2.8)$$

donde la magnetización $\vec{M}$ representa el momento magnético por unidad de volumen. Todos los campos electromagnéticos, incluidos los campos de luz, deben ser compatibles con las ecuaciones de Maxwell, pero por sí mismas estas ecuaciones no sugieren la existencia de campos de cualquier tipo en particular. Es necesario postular formas específicas de los campos y luego obtener las condiciones para su existencia. Otro punto a considerar es que estas ecuaciones describen relaciones para el espacio y el tiempo, pero no proporcionan ninguna pista sobre cómo estos campos son generados [Slavchov and Ivanov, 2014].

2.2. Óptica Geométrica

La óptica geométrica es la parte de la física que estudia los cambios de dirección que experimentan los rayos de luz en la reflexión y la refracción y se divide de un principio único, el de Fermat el cuál establece que la trayectoria real que sigue un rayo de luz entre dos puntos es aquella en la que emplea un tiempo mínimo en recorrerla [Perlick, 2000]. Matemáticamente se expresa este principio de la siguiente forma: el tiempo t que tarda la luz en recorrer una distancia s en un medio está dado por:

$$t = \frac{s}{c} \quad (2.9)$$

donde c es la velocidad de la luz en ese medio suponiendo que es constante sin importar la dirección de desplazamiento. Considerando un índice de refracción n que define la rapidez con la que un haz de luz viaja a través de un medio en particular, se tiene:

$$t = \frac{sn}{c} \quad (2.10)$$

Si ahora tomamos un medio en el que el índice de refracción depende de la posición $n = n(s)$ entonces podemos estimar que una distancia diferencial ds se recorre en un tiempo $dt = \frac{n ds}{c}$, siendo el tiempo total en recorrer el camino entre un punto A y otro B de la siguiente forma:

$$t = \frac{1}{c} \int_A^B n(s) ds. \quad (2.11)$$

Con lo cual el principio de Fermat radica en encontrar los valores extremos de la siguiente función:

$$\int_A^B n(s) ds = 0. \quad (2.12)$$

El principio de Fermat da paso a los fenómenos de reflexión y refracción los cuáles estudian de que manera se desplaza la luz según el medio que atraviesa el rayo incidente [Schroeder, 1999].

2.2.1. Reflexión

La reflexión ocurre cuando un rayo de luz incide sobre una superficie la cuál provoca un cambio de dirección al entrar en contacto con el, lo que ocasiona que este se regrese al medio donde se originó [Gil and Rodriguez, 2001]. En la Figura 2.2 se puede observar el fenómeno de la reflexión de la luz.

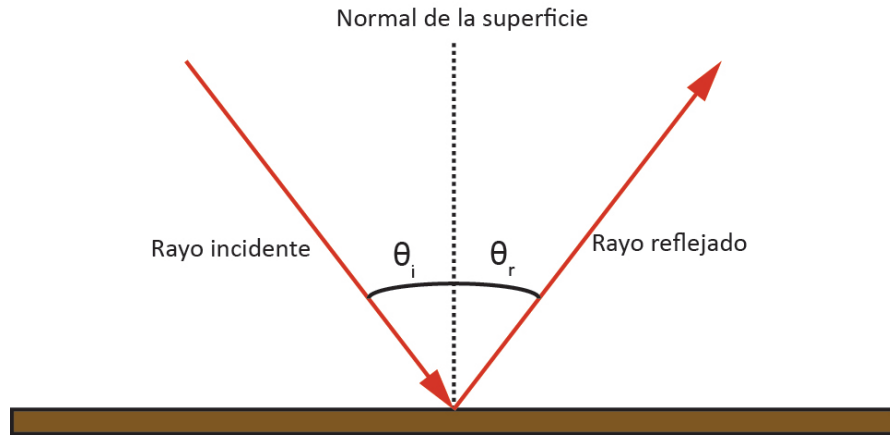


FIGURA 2.2: Fenómeno de reflexión de la luz.

La ley de reflexión de la luz dice que cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflejante plana, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. El ángulo de incidencia θ_i forma el rayo incidente con la (recta) normal al plano reflejante y el ángulo de reflexión θ_r forma el rayo reflejado con la normal al plano reflejante [García, 1997]. Entonces, se puede definir la ley de reflexión de la siguiente manera:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.13)$$

Podemos encontrar dos tipos de reflexión según el tipo de superficie que incide: la difusa y la especular. La reflexión difusa se produce cuando la luz incide en una superficie opaca y sin pulir, la cuál presenta una serie de irregularidades que hacen que la luz se refleje en distintas direcciones. Por otro lado, la reflexión especular se produce cuando la luz incide en una superficie que esta totalmente pulida como ocurre con los espejos. En este caso la reflexión se produce en una sola dirección lo que hace posible la formación de imágenes y cumple con el principio descrito de la ley de reflexión. Mientras más pulida y limpia es la superficie, mayor es la intensidad del haz reflejado.

2.2.2. Refracción

La refracción se define como un cambio de dirección y velocidad que experimenta un rayo de luz al pasar de un medio a otro con distinto índice refractivo. Este solo se presenta cuando el rayo incide sobre la superficie que divide a los dos medios y contienen índices de refracción distintos [Wilson and Buffa, 2002]. En la Figura 2.3 se puede observar el fenómeno de la refracción de la luz.

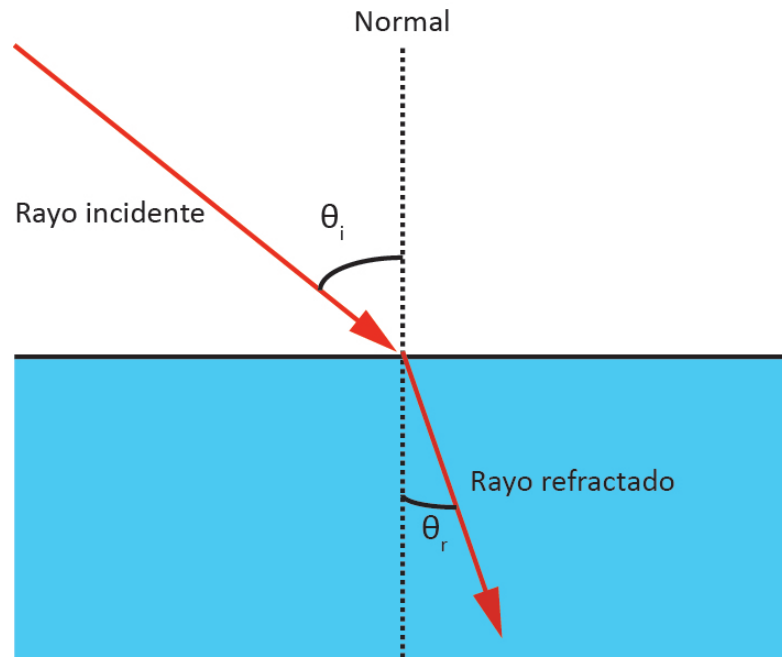


FIGURA 2.3: Fenómeno de refracción de la luz.

La Ley de Refracción de la Luz o Ley de Snell dice que cuando un rayo incide sobre una superficie refractante plana, entonces el seno del ángulo de incidencia entre el seno del ángulo de refracción es una constante [García, 1997]. Para cada medio se presenta una constante llamada índice de refracción n , tal que si n_1 es el índice de refracción del medio desde donde incide el rayo sobre la superficie con un ángulo de incidencia θ_i , n_2 es el índice de refracción del otro medio y θ_r es el ángulo de refracción. Esta relación se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.14)$$

2.2.3. Espejos

La función de los espejos es reflejar los rayos, ya que son superficies completamente pulidas lo que les permite reflejar la mayoría de los rayos incidentes que chocan en ellos. Según la geometría de su superficie, podemos distinguir los espejos planos y esféricos, en estos últimos encontramos los espejos cóncavos y convexos. En los espejos planos, se forman imágenes que se encuentran a la misma distancia y son de igual tamaño del objeto, además, las imágenes que se forma no presentan ninguna distorsión. Para formar la imagen de un objeto, se traza la trayectoria de dos rayos por cada punto del objeto empleando la ley de reflexión. Al realizar una prolongación, se tendrá la imagen de un punto del objeto. Estas prolongaciones de los rayos son líneas imaginarias las cuales son útiles para obtener la imagen, sin embargo no existen, por lo que les denomina imágenes virtuales. Estas imágenes se forman cuando los rayos después de interactuar con un espejo o lente, divergen y son sus proyecciones las que se unen en un punto (ver Figura 2.4).

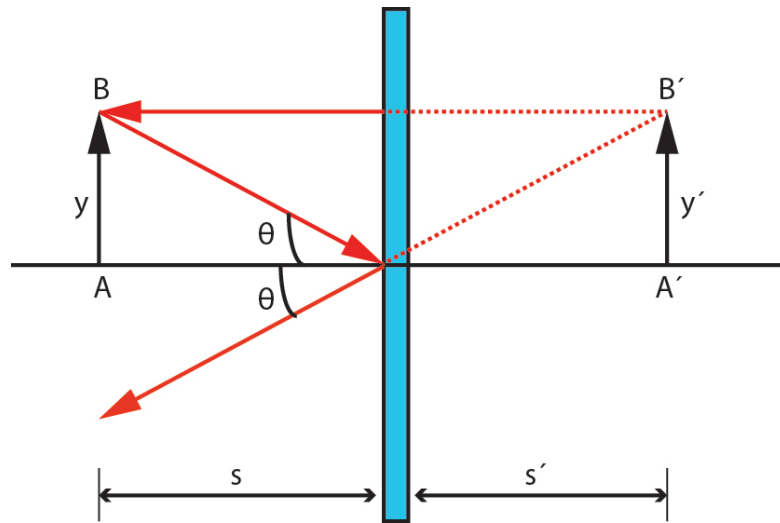


FIGURA 2.4: Rayo de luz incidente en un espejo plano.

La relación de los espejos planos esta dada por:

$$s = s' \quad (2.15)$$

donde s y s' son las distancias del objeto y la imagen respectivamente al origen O situado en el vértice óptico [Ortiz-Acevedo et al., 2007].

Un espejo esférico cóncavo se caracteriza porque cuando inciden en él rayos de luz paralelos, los refleja hacia un punto denominado foco el cual es situado a una distancia igual a la mitad del radio de curvatura del espejo. la Figura 2.5 muestra como se direccionan los rayos paralelos de un espejo concavo hacia el foco.

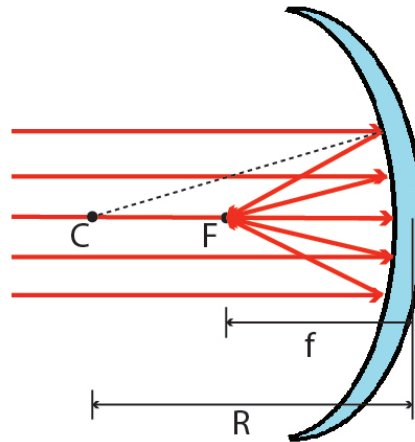


FIGURA 2.5: Incidencia de rayos de luz paralelos en un espejo cóncavo.

donde F es el foco, f la distancia focal, C el centro de curvatura y R el radio de curvatura. En este tipo de espejos las características de imagen dependen de donde se encuentre situado el objeto a reflejar. Las características pueden ser de una imagen real cuando los rayos reflejados se intersectan en un punto o una imagen virtual si los rayos reflejados divergen y sus proyecciones son las que unen a un punto. Con respecto a su posición, la imagen puede ser derecha si están orientadas al igual que el objeto o invertida si se encuentran en posición contraria a él. Respecto a su tamaño, las imágenes pueden estar aumentadas si son más grandes que el objeto o disminuidas si son más pequeños que él. En un espejo cóncavo cuando un objeto se encuentra a la izquierda del centro de curvatura, la imagen es real, invertida y situada entre el centro y el foco, con un tamaño menor que el objeto. Si el objeto está en el centro de curvatura, la imagen es real, invertida y situada en el mismo punto con un tamaño igual que el objeto. Si el objeto está situado entre el centro de curvatura y el foco, la imagen es real, invertida y se encontrará a la izquierda del centro de curvatura con un tamaño mayor que el objeto. Si el objeto se encuentra situado en el foco del espejo, los rayos reflejados serán paralelos y la imagen se formará en el infinito. Por último, si el objeto se encuentra a la derecha del foco, la imagen es virtual y conservará su orientación con un tamaño mayor que el objeto [Hernández et al., 2019].

Un espejo esférico convexo, por el contrario, realiza una divergencia de los rayos paralelos reflejados, de modo que las prolongaciones de estos rayos son los que pasan por el foco [Pons Martí et al., 2013]. la Figura 2.6 muestra como se unen las prolongaciones de los rayos paralelos que inciden en un espejo convexo hacia el foco.

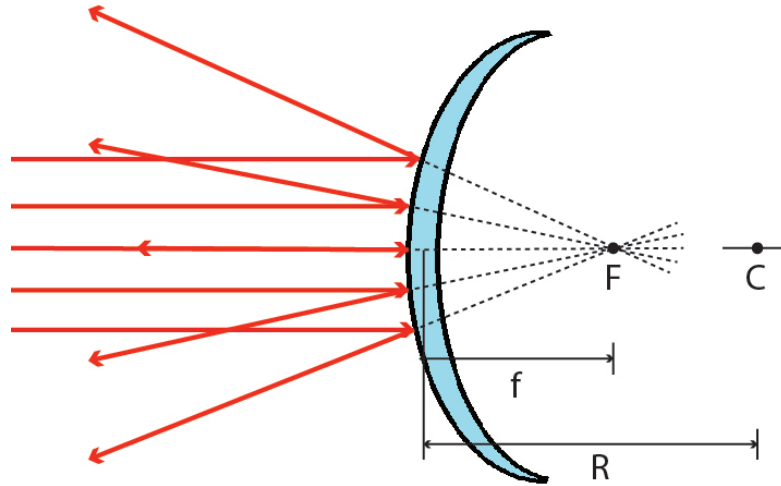


FIGURA 2.6: Incidencia de rayos de luz paralelos en un espejo convexo.

Las características de una imagen en estos espejos a diferencia de los espejos cóncavos es que siempre la imagen sera virtual, derecha y de menor tamaño del objeto. Se pueden encontrar diferentes elementos de los espejos esféricos los cuales se relacionan de la siguiente manera:

$$\frac{HO}{HI} = \frac{do}{di} \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{do} + \frac{1}{di} \quad (2.17)$$

donde HO representa el tamaño del objeto, HI el tamaño de la imagen, do la distancia del objeto al espejo, di la distancia de la imagen al espejo y f la distancia focal.

2.2.4. Lentes

Los lentes refractan los rayos desviándolos de su trayectoria, lo que permite que sean utilizados para direccionarlos a un punto en particular. Por lo general, el material que las conforman son vidrio, cristal o plástico limitados por dos superficies, siendo curva al menos una de ellas. Las lentes existentes pueden ser divergentes o convergentes, en la Figura 2.7 se pueden apreciar como pasan los rayos de luz en estos dos tipos de lentes.

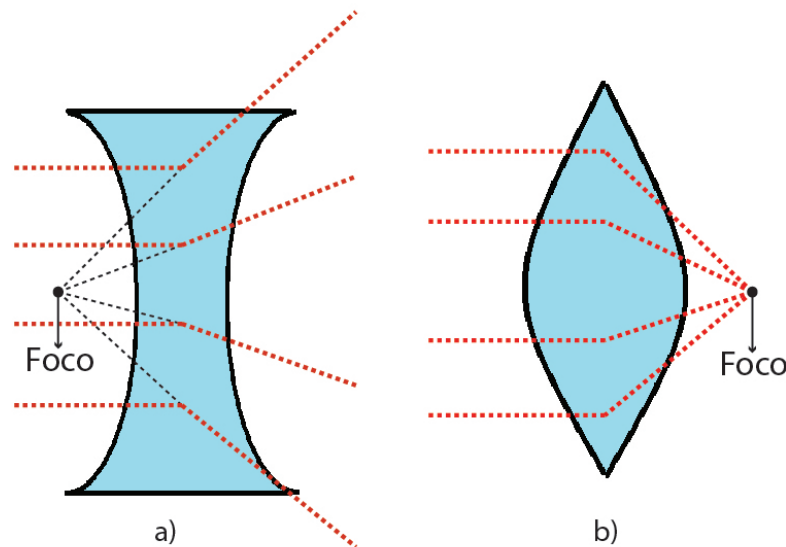


FIGURA 2.7: Incidencia de los rayos de luz en lentes. a) Lente divergente. b) Lente convergente.

Las lentes convergentes pueden dividirse en 3 tipos: biconvexas, las cuales tienen dos superficies convexas; planconvexas, que tienen una superficie plana y otra convexa, y la cóncavoconvexas o menisco convergente, las cuales tienen una superficie ligeramente cóncava y otra convexa (ver Figura 2.8). Estas lentes son más gruesas por el centro que por el borde, concentrando los rayos de luz que las atraviesan en un solo punto (foco) [Córdova, 1999]. Las lentes convergentes se utilizan principalmente como lentes de aumento con lo cual se debe considerar la distancia a la que se coloca el objeto con respecto a la lente y conocer su distancia focal. Dependiendo de la distancia entre el objeto y la lente, la imagen que se obtiene al mirar a través de la lente variará, presentándose 4 diferentes casos citados de la siguiente manera:

1. Cuando el objeto se encuentra a una distancia superior a dos veces la distancia focal, la imagen que se forma es una imagen invertida y de tamaño

menor que el objeto real. Este es el único caso en el que la lente convergente no actúa como una lente de aumento.

2. Cuando la distancia del objeto es igual a dos veces la distancia focal, la imagen obtenida tiene exactamente el mismo tamaño que el objeto real.
3. Cuando el objeto se encuentra a una distancia contenida entre una y dos veces la distancia focal, la imagen que se forma es una imagen invertida y de mayor tamaño que el objeto real.
4. Cuando el objeto se encuentra a una distancia inferior a la distancia focal los rayos de luz no convergen al otro lado de la lente, formándose una imagen virtual en el mismo lado del objeto y de mayor tamaño.

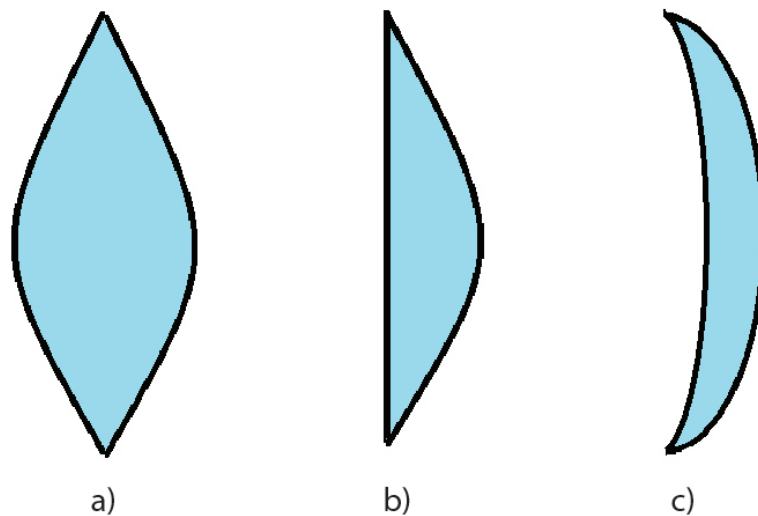


FIGURA 2.8: Lentes convergentes. a) Lente biconvexa. b) Lente planoconvexa. c) Lente cóncavoconvexa.

Por otro lado, las lentes divergentes pueden dividirse en 3 tipos: bicóncavas, las cuales tienen dos superficies cóncavas, plancóncavas que tienen una superficie plana y otra cóncava, y la cóncavoconvexas o menisco divergente las cuales tienen una superficie ligeramente convexa y otra cóncava (ver Figura 2.9). A diferencia de las lentes convergentes, estas lentes son más gruesas en los bordes que en el centro, refractando los rayos de luz que llegan a ella de manera que se separan entre ellos [Fuentes Betancourt et al., 2005]. Independientemente de donde se encuentre situada la imagen con respecto a la lente, estas siempre formarán imágenes virtuales de los objetos y de un menor tamaño que este.

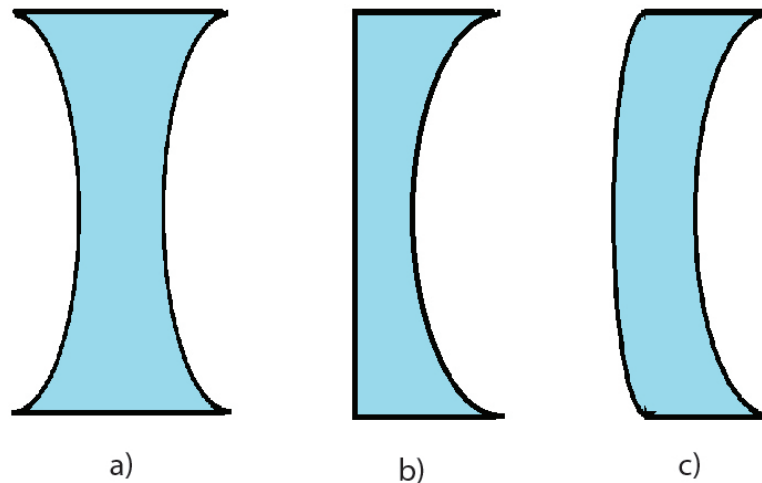


FIGURA 2.9: Lentes divergentes. a) Lente bicóncava. b) Lente planocóncava. c) Lente convexocóncava.

2.2.5. Aberraciones

Las aberraciones ópticas son desviaciones o comportamientos no esperados respecto a los modelos ópticos ideales. Desde el punto de vista matemático, las aberraciones son funciones que caracterizan las propiedades de formación de imágenes en cualquier sistema óptico. Estas pueden dividirse en dos tipos: aberraciones monocromáticas y aberraciones cromáticas [Mejía, 2001].

2.2.5.1. Aberraciones Monocromáticas

Las aberraciones monocromáticas son producto de las leyes de reflexión y refracción y no por el defecto en el diseño de los sistemas ópticos. Estas aberraciones se producen por la dispersión de la luz, considerando 5 diferentes tipos: la aberración esférica, la de coma, el astigmatismo, la curvatura de campo y la distorsión [Vidal, 2011].

La aberración esférica se produce cuando los rayos paralelos de un espejo o lente esférico se concentran en un punto y los alejados del eje óptico en otro, en lugar de hacerlo todos en el foco. Este comportamiento es debido a la propia simetría esférica de las superficies. La Figura 2.10 muestra un ejemplo de aberración esférica en un espejo y una lente esférica.

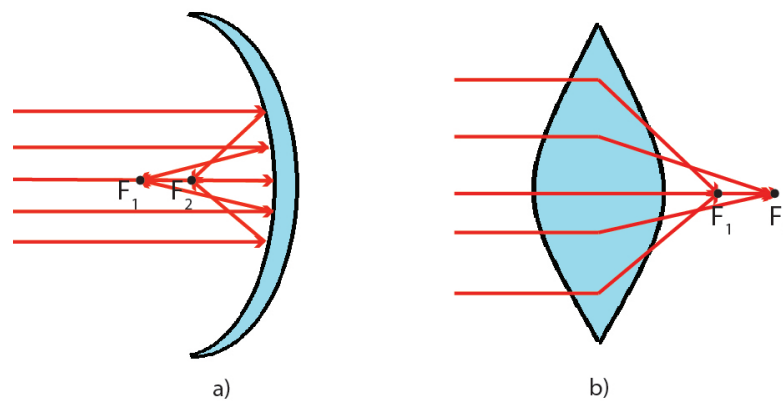


FIGURA 2.10: Aberración esférica a) Presente en un espejo esférico. b) Presente en una lente esférica.

La aberración de coma se produce cuando los rayos no llegan paralelos al eje óptico sino oblicuos. La Figura 2.11 muestra un ejemplo de aberración de coma.

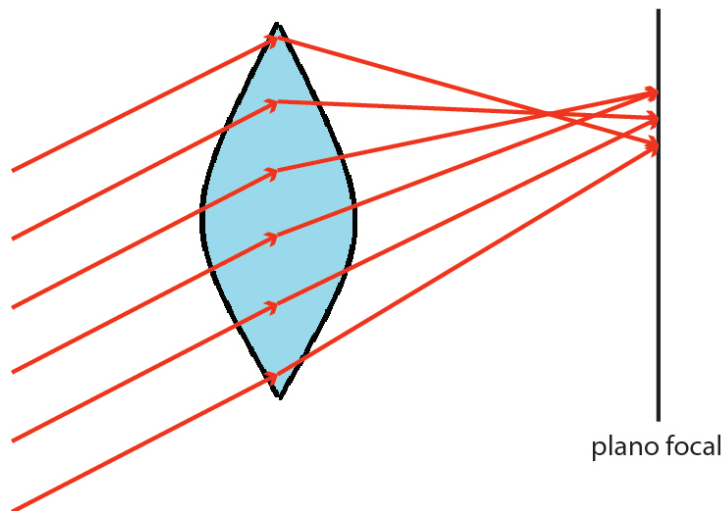


FIGURA 2.11: Aberración de coma.

La aberración de astigmatismo se presenta cuando la fuente de luz proyecta planos distintos a diferentes distancias debido a que presenta curvaturas para distintos planos. La Figura 2.12 muestra un ejemplo de aberración de astigmatismo.

La aberración de curvatura de campo se presenta cuando los rayos de luz que se encuentran más alejados del eje óptico convergen antes de llegar al espejo o lente, viéndose la imagen en forma de curva. la Figura 2.13 muestra un ejemplo de aberración de curvatura de campo.

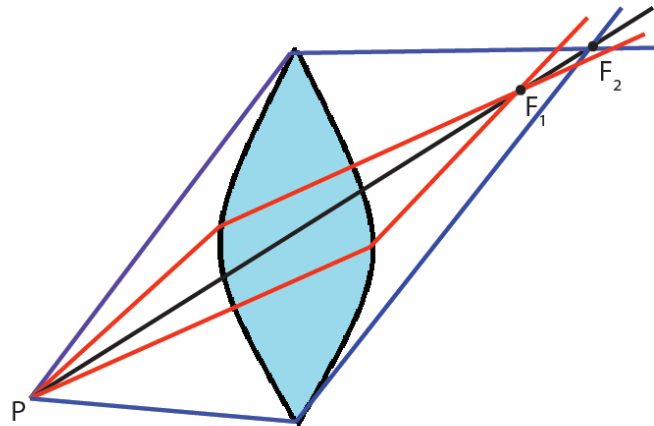


FIGURA 2.12: Aberración de astigmatismo.

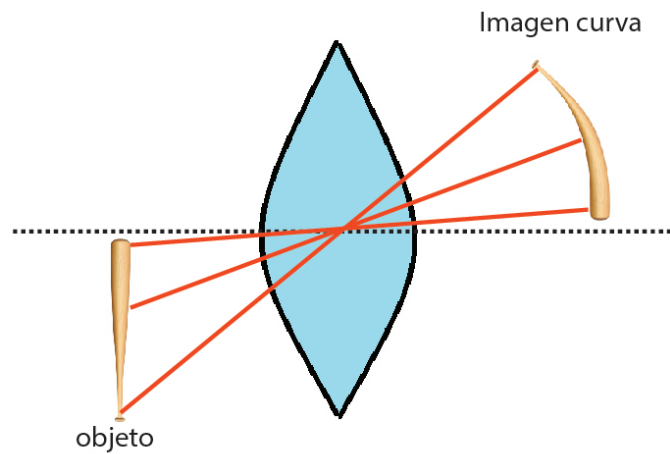


FIGURA 2.13: Aberración de curvatura de campo.

El aumento lateral de los sistemas ópticos varía con la distancia del objeto a la lente, lo cual hace que las distintas partes del objeto formen las diferentes partes de su imagen con distintos tamaños. Este aumento lateral puede provocar una aberración denominada distorsión, la cuál hace que las líneas rectas de las imágenes se vean curvas [Wang et al., 2016]. Los diferentes tipos de distorsión que se pueden presentar son la de barril, de cojín y de mostacho. En la figura 2.14 se ve un ejemplo de la forma en que se presenta cada una de ellas. La distorsión de barril se presenta en distancias focales cortas al utilizar grandes angulares. En esta distorsión, las líneas rectas de la imagen tienden a encorvarse hacia dentro, afectando de mayor manera en los bordes de la imagen y presentando una menor distorsión a medida que se tiende al centro de la imagen. Por otra parte, en la distorsión de cojín

las líneas rectas de la imagen tienden a encurvarse hacia afuera, presentándose generalmente en angulares cortos. Por último, se presenta la distorsión de mostacho generalmente en angulares que cuentan un FOV variable en la que se tienen las líneas rectas del centro de la imagen encurvadas hacia dentro y las líneas rectas de los extremos de esta hacia fuera, teniendo una combinación de una distorsión de barril y una de cojín. Para eliminar cualquier tipo de distorsión se utilizan métodos de calibración de cámaras, los cuales ayudan a reparar las líneas deformadas por la distorsión, regresandolas a las líneas rectas originales de la imagen.

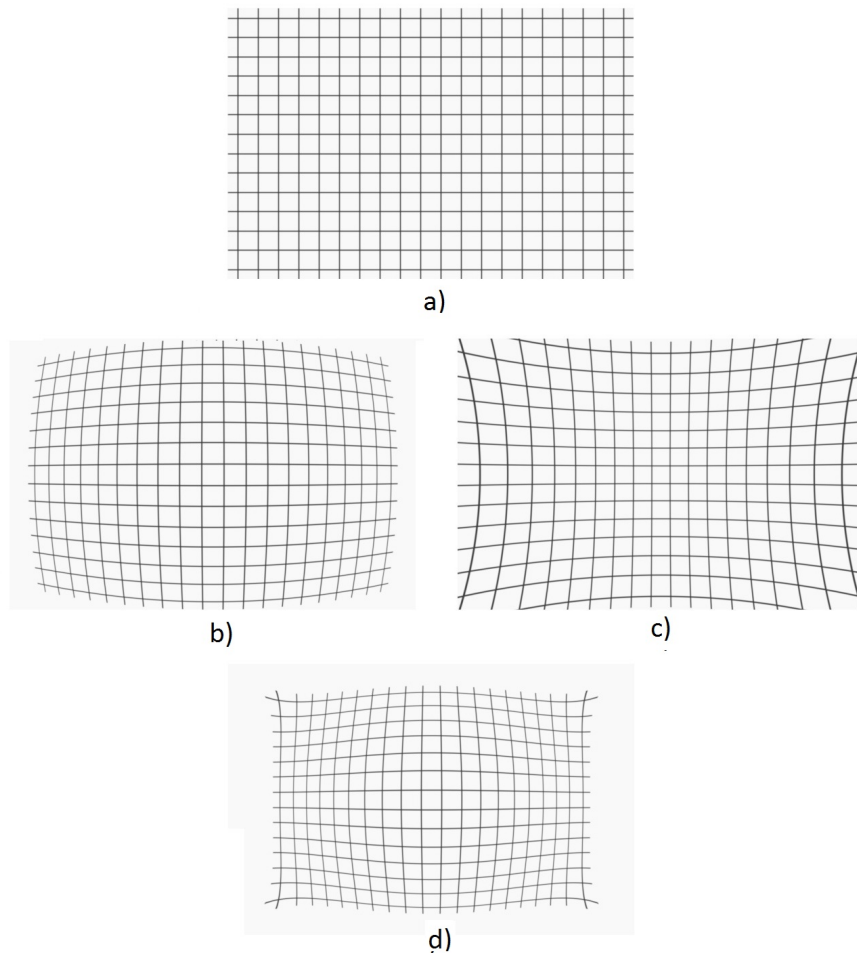


FIGURA 2.14: Tipos de distorsión presentes en imágenes. a) Imagen original. b) Distorsión de barril. c) Distorsión de cojín. d) Distorsión de mostacho.

2.2.5.2. Aberraciones Cromáticas

Estas aberraciones son un defecto óptico causado por la distorsión de la lente en la cuál no se proyectan las longitudes de onda de color al mismo plano focal [Molesini et al., 2013]. Según la calidad de la lente, ciertas longitudes de onda llegarán antes

o después con respecto a donde se encuentre el plano focal lo que hará variar los colores de estas aberraciones. Existen dos tipos de aberraciones de este tipo: la aberración cromática axial y la lateral. La primera ocurre cuando diferentes longitudes de onda de color no convergen en el mismo punto focal después de que la luz atraviesa la lente. Este tipo de aberraciones pueden presentarse tanto en las esquinas de la imagen, como en el centro. La Figura 2.15 muestra un ejemplo de este tipo de aberración.

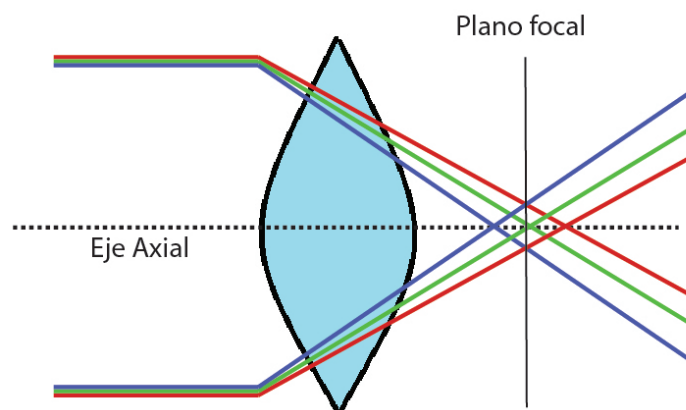


FIGURA 2.15: Aberración cromática axial.

Por otra parte, en la aberración cromática lateral a diferencia de la axial si coinciden las longitudes de onda de color, sin embargo, no todas se encuentran en el mismo punto y por lo general se localizan en las esquinas de las imagenes. La Figura 2.16 muestra un ejemplo de una aberración cromática lateral.

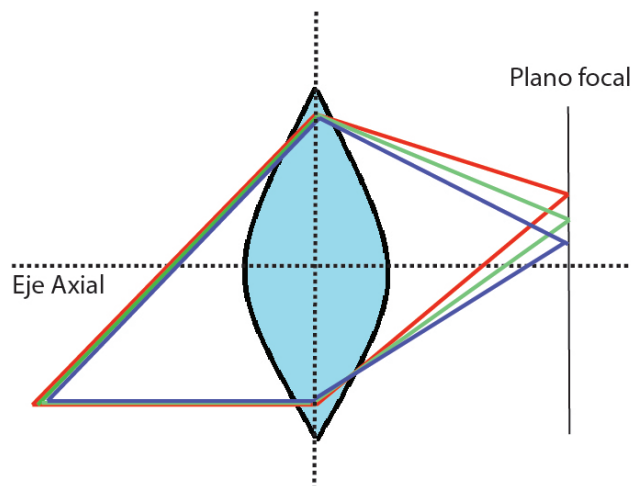


FIGURA 2.16: Aberración cromática lateral.

2.3. Estereoscopía

La estereoscopía es utilizada para la obtención de la forma de los objetos en una escena en particular. Esta se determina a través de la distancia que existe entre el objeto y un sistema de referencia [Martín et al., 2004]. En los sistemas ópticos se pueden diferenciar los métodos activos y los pasivos. Los métodos activos son aquellos en lo que los sistemas están presentes de manera interna en la escena. Por el contrario, los métodos pasivos son aquellos en donde los sistemas intervienen externamente sobre la escena. En estos últimos encontramos los SVE la cuál toma como referencia un modelo estereoscópico biológico. Este sistema consiste de 2 cámaras, las cuales están desplazadas entre sí a una distancia horizontal relativa y se utilizan para obtener imágenes correspondientes de una escena en particular. El par de imágenes obtenido tendrá un pequeño desplazamiento horizontal de la escena denominando disparidad el cuál es utilizado para obtener la tercera dimensión de la escena [Montalvo Martínez, 2010]. La Figura 2.17 muestra un ejemplo de 2 imágenes tomadas con un SVE en el que se aprecia que las imágenes tienen un desplazamiento horizontal en ellas pero mantienen un mismo enfoque vertical.

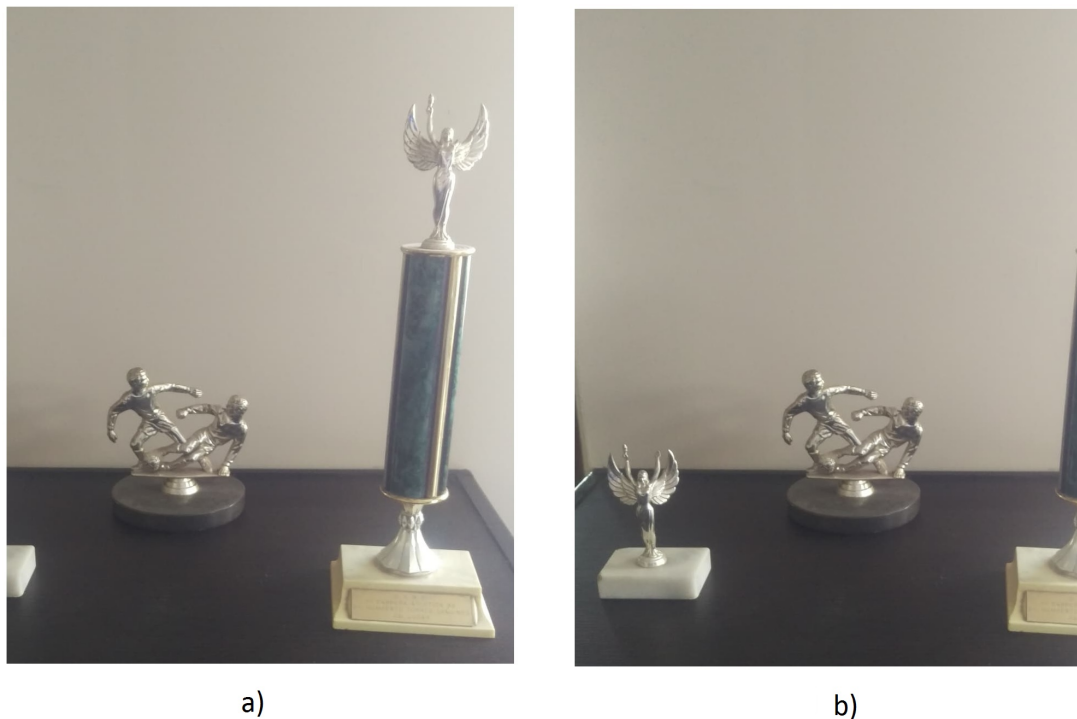


FIGURA 2.17: Ejemplo de dos imágenes tomadas con un SVE. a) Imagen Izquierda. b) Imagen derecha.

Las imágenes de la escena se pueden obtener ya sea alineando dos o más cámaras de forma que se sitúen desplazadas horizontalmente o utilizar una sola cámara que tome una imagen y posteriormente se desplace a cierta distancia para captar la escena a diferentes posiciones de desplazamiento. En ambos casos, el sistema se diseña de manera que los ejes ópticos se encuentren paralelos entre ellos para tener una relación geométrica horizontal y verticalmente definida la cuál permite encontrar las coordenadas tridimensionales del objeto de una escena en particular. El proceso de visión estereoscópica consta de 5 principales fases: la adquisición de imágenes, la geometría del sistema, la extracción de características, la correspondencia de características y la obtención de las coordenadas tridimensionales [Barnard and Fischler, 1982]. La adquisición de imágenes refiere al hecho de la obtención de pares de imágenes de una misma escena para posteriormente ser procesadas por el SVE. Las demás fases del SVE se describirán más a detalle en las secciones posteriores.

2.3.1. Geometría de un Sistema Estereoscópico

Un sistema SVE utilizado comúnmente contiene un par de cámaras con sus ejes ópticos mutuamente paralelos y están desplazados a una distancia horizontal denominada línea base [Montalvo Martínez, 2010]. Las cámaras cuentan con sus ejes ópticos perpendiculares y las líneas epipolares paralelas a la línea base, respectivamente. Las líneas epipolares son líneas que unen el par de imágenes del SVE en un mismo punto. En este sistema, el desplazamiento entre los centros ópticos de ambas cámaras es horizontal, en el que se puede determinar que las imágenes captadas de la escena solo serán reflejadas en la componente horizontal. En la Figura 2.18 se puede observar la geometría de una par de cámaras estereo con ejes ópticos paralelos. Como se aprecia en la Figura 2.18, el origen de coordenadas de referencia O y los ejes de coordenadas reales X, Y, Z se encuentra entre los ejes de ambas cámaras [Hernández et al., 2011]. También se pueden apreciar que los puntos P_I y P_D representan las proyecciones del punto $P(X, Y, Z)$ de la escena en la imagen izquierda y derecha, respectivamente, y que los rayos de proyección PO_I y PO_D definen los planos de proyección de cada imagen con respecto a la escena y son llamados en su conjunto como plano epipolar. Por otra parte, se tiene que para un punto P_I de la imagen izquierda se tendrá un punto en común en la imagen derecha el cuál debe encontrarse en el mismo plano epipolar [Gutiérrez and Juárez, 2008].

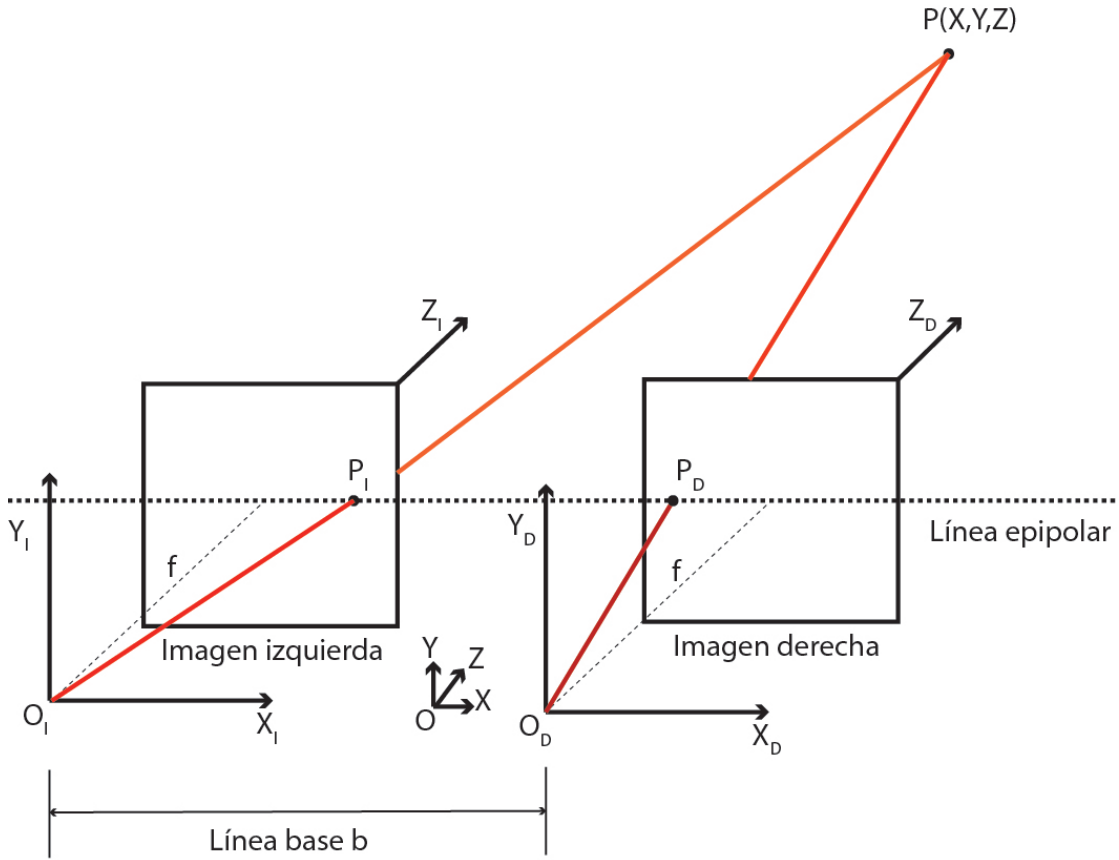


FIGURA 2.18: Geometría de un SVE de dos cámaras.

En este sistema se obtiene un valor denominado disparidad d que se define como el desplazamiento horizontal, que se tiene de cada par de puntos correspondientes de la imagen izquierda y derecha con respecto a un punto en particular de la escena, y esta dado por la siguiente relación:

$$d = X_I - X_D \quad (2.18)$$

En este sistema podemos encontrar una relación geométrica de semejanza de triángulos con respecto al punto $P(X, Y, Z)$ de la escena por medio de la siguiente manera:

$$X_I = \frac{f}{Z}(X + 0.5b) \quad (2.19)$$

$$X_D = \frac{f}{Z}(X - 0.5b) \quad (2.20)$$

$$d = x_I - x_D = \frac{fb}{Z} \quad (2.21)$$

$$Z = \frac{fb}{d} \quad (2.22)$$

donde f es la distancia focal. En esta relación, la profundidad Z es inversamente proporcional a la disparidad d de las imágenes y que para una profundidad dada, a una mayor línea base b , corresponderá una mayor disparidad d .

2.3.2. Extracción de Características en un Sistema Estereoscópico

En este paso se obtienen elementos específicos de la imagen que identifican a la escena. Una de las características es la intensidad de píxeles en el que se buscan patrones en diferentes regiones de la imagen para encontrar correspondencias de píxeles en los pares de imágenes tomadas por el SVE [Quiroga et al., 2015]. En la Figura 2.19 se ilustra un ejemplo de una imagen en escala de grises en donde se observa el valor de intensidad de cada pixel existente en una región de la imagen.

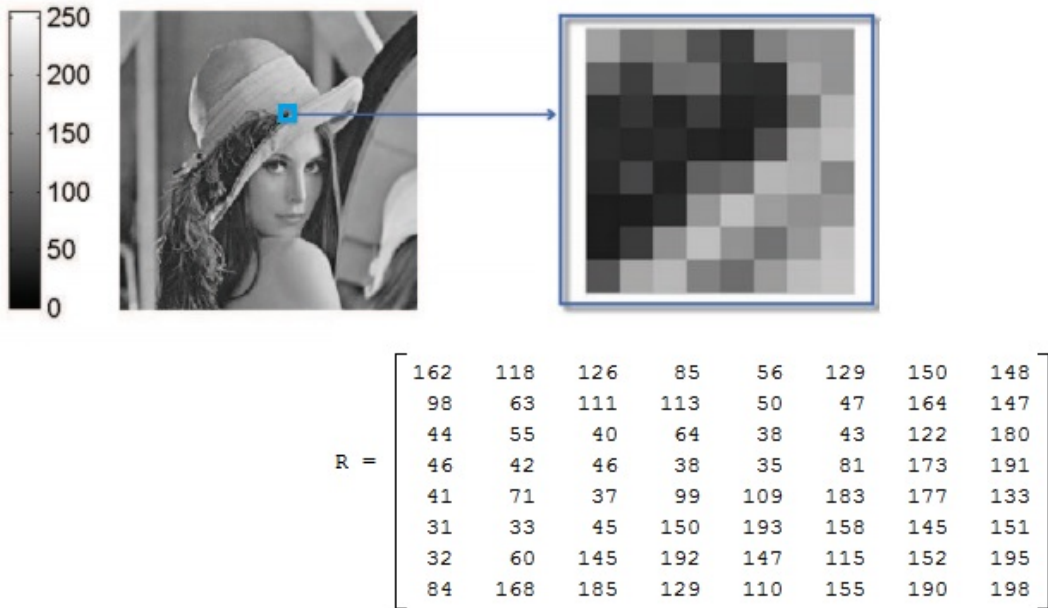


FIGURA 2.19: Valor numérico de los píxeles en una región de la imagen.

Otras características son representaciones simbólicas obtenidas de las imágenes como lo son los puntos de borde aislados, cadenas de puntos de bordes y regiones delimitadas por bordes. Los puntos de borde consisten en segmentos rectos, no rectos, cadenas que forman estructuras geométricas definidas como cuadrados, elipses, circunferencias entre otras o formas con estructuras geométricas no identificadas. En la Figura 2.20 se muestra un ejemplo de la detección de bordes en una imagen.

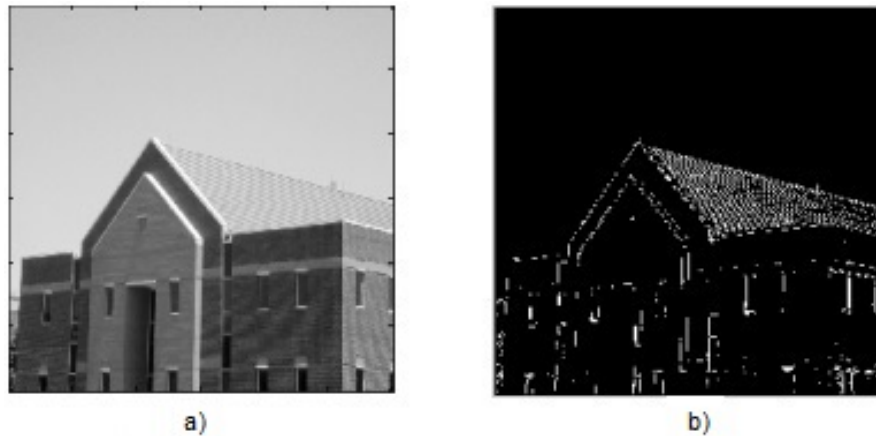


FIGURA 2.20: Ejemplo de detección de bordes. a) Imagen original. b) Detección de bordes en la imagen.

La detección de bordes es un proceso en el que se detectan los cambios en la intensidad de luz, los cuales se pueden usar para determinar la profundidad, tamaño, orientación, entre otras características de la imagen [Compañ et al., 2001]. Dentro del proceso de detección de bordes puede presentarse ruido en la imagen que es independiente del umbral en el píxel de cambio que define un borde. Para este tipo de problemas, por lo general se realiza un pre-proceso en el que se filtra el ruido digital de la escena y se puedan extraer las características de la escena con la mejor calidad para posteriores procesos del SVE [Revelo-Luna et al., 2012]. Una vez identificadas estas características, se puede realizar un paso de segmentación para extraer de ellas más información que consiste en una serie de atributos asociados la cuál se codifica y cuantifica en un vector de atributos. La obtención de estas características servirán para realizar un proceso de correspondencia entre las imágenes, tema que se tratará en la siguiente sección.

2.3.3. Correspondencia en Sistemas Estereoscópicos

En este proceso se determinan las proyecciones en el par de imágenes del SVE dado un punto tridimensional de una escena en particular. En la correspondencia se consideran los atributos del par de imágenes en donde se establece una correspondencia local utilizando una métrica que determine la semejanza entre los vectores de atributos (generalmente se utiliza la distancia Euclídea, Mahalanobis, entre otras). Los pares de imágenes del SVE se toman de diferentes posiciones y ángulos con lo que las condiciones de iluminación pueden variar o presentar detalles en una imagen que no se encuentren en la otra [Herrera Caro, 2010]. Estos últimos son conocidos como oclusiones, lo que imposibilita realizar una correspondencia estereoscópica ya que solo en una región de una imagen pueden obtenerse estas características pero no en la otra imagen que complementa el par estereo de la escena. Dentro del proceso de correspondencia estereoscópica, podemos encontrar dos tipos de enfoques: las técnicas basadas en el área y las basadas en características. Estas técnicas serán descritas en la siguiente sección.

2.3.3.1. Técnicas Basadas en el Área

En estas técnicas se proporciona un mapa de profundidad denso, basándose en hacer corresponder cada uno de los píxeles de una imagen con los píxeles de la otra. Los inconvenientes que surgen de esta técnica son una elevada sensibilidad a distorsiones ocasionada por variación de puntos de vista y los cambios en el contraste o la iluminación. También se pueden originar falsas correspondencias por la discontinuidad de las superficies en donde una imagen puede ocultar un borde con respecto a la otra. El método consiste en utilizar un punto de la imagen izquierda y seguir la línea epipolar buscando en la imagen derecha un punto que tenga una intensidad más parecida a la del punto de la imagen izquierda [Luccioni and Juliá, 2008]. Al hacer esto, pueden aparecer más de un punto con esa misma intensidad por lo que se utilizan restricciones que aumentan la fiabilidad del método. Para cada punto de la imagen derecha con coordenadas $x_d < x_i$ y sobre la misma línea epipolar, se obtiene un coeficiente de correlación de la siguiente forma:

$$C = \frac{\sigma_{ID}^2}{\sqrt{\sigma_I^2 \sigma_D^2}} \quad (2.23)$$

donde I y D representan la imagen izquierda y derecha, respectivamente, σ_I^2 y σ_D^2 son la varianza de los niveles de intensidad de las ventanas izquierda y derecha, respectivamente, y σ_{ID}^2 la varianza que combina los niveles de intensidad de las ventanas izquierda y derecha. Estos coeficientes pueden ser obtenidos con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_I^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{(I_I(i, j) - \mu_I)^2}{MN} \quad (2.24)$$

$$\sigma_D^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{(I_D(i, j) - \mu_D)^2}{MN} \quad (2.25)$$

$$\sigma_{ID}^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{(I_I(i, j) - \mu_I)(I_D(i, j) - \mu_D)}{MN} \quad (2.26)$$

donde las dimensiones de la ventana de las imágenes esta dada por M y N , la intensidad de cada pixel de la imagen izquierda y derecha esta dada por $I_I(i, j)$ y $I_D(i, j)$, respectivamente, y el nivel medio de gris en el entorno de ventana tanto de la imagen izquierda como derecha es μ_I y μ_D , respectivamente. La correspondencia se obtiene sobre la línea epipolar, encontrando un mínimo de la función de semejanza para cada par de puntos de las imágenes [Colodro et al., 2012].

2.3.3.2. Técnicas Basadas en las Características

Estas técnicas establecen la correspondencia entre características extraídas de las imágenes. A diferencia de las técnicas basadas en el área, estas son más estables a cambios en el contraste e iluminación, permiten realizar comparaciones entre los atributos con mayor rapidez, es más exacta ya que se localizan los bordes con una mayor precisión y son menos sensibles a variaciones fotométricas y al ruido digital [García Montiel et al., 2009]. Sin embargo, las desventajas que se pueden presentar son fallos en los cálculos si las características elegidas no son fiables y tienen mapas de profundidad poco densos a comparación de las técnicas basadas en el área, lo que necesitan de un procedimiento adicional de interpolación para extraer características de profundidad de una escena. Las características que se utilizan son los puntos o segmentos de borde (se muestra la detección de bordes en una imagen

en la Figura 2.20). Los operadores utilizados para este proceso es el Laplaciano de la Gaussiana en los cuales se obtiene la dirección del gradiente [Revelo-Luna et al., 2012]. Cuando se presentan segmentos de borde rectos se utilizan los mismo atributos definidos para los puntos de borde, en donde se obtiene un valor final promedio de cada punto a lo largo de los puntos que constituyen el segmento de ese borde. Los algoritmos basados en bordes son más robustos que los métodos basados en el área, debido a que se centran en encontrar más características de cada región de la imagen. Existen muchos métodos en la literatura relacionados con estos algoritmos, los cuales se pueden encontrar en Pajares [Pajares, 1995].

2.3.3.3. Restricciones Utilizadas en la Correspondencia Estereoscópica

Las restricciones se utilizan en los algoritmos de SVE para facilitar la correspondencia entre características del par de imagen estereo. Estas restricciones se citan a continuación:

1. Restricción epipolar: esta restricción menciona que cada par de puntos de las imágenes estereo debe proyectarse sobre una misma línea epipolar. Esta es derivada de la misma geometría de cámaras por lo que es de gran importancia que las cámaras se encuentren perfectamente alineadas. En la Figura 2.21 se muestra esta restricción dentro de un SVE.

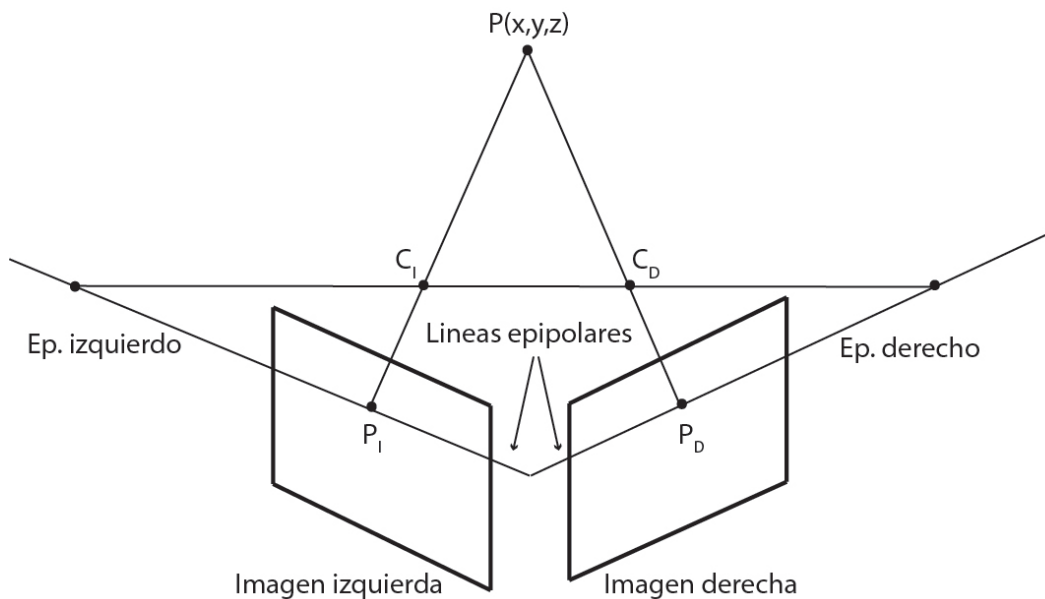


FIGURA 2.21: Restricción epipolar en un SVE. Se muestra que C_I y C_D deben corresponder a las líneas epipolares de ambas imágenes.

2. Restricción de semejanza: menciona que cada par de puntos de las imágenes estereo deben de tener propiedades o atributos similares. La Figura 2.22 muestra un ejemplo de semejanza en el que existe una similitud en las regiones presentes en ambas imágenes.

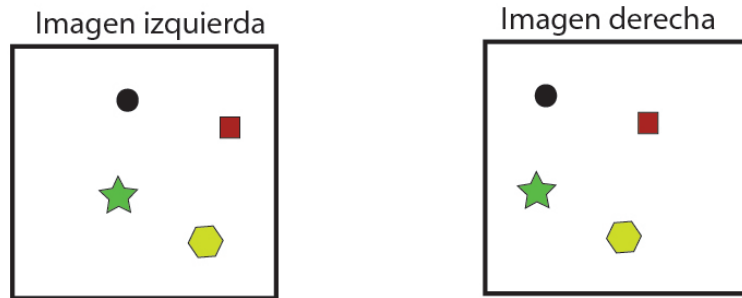


FIGURA 2.22: Restricción de semejanza. Existe similitud en las regiones de ambas imágenes.

3. Restricción de unicidad: menciona que en cada una de las características en una imagen debe haber un único atributo en la otra imagen, con la excepción que se produzcan oclusiones las cuáles no permiten que haya una correspondencia de una determinada característica. La Figura 2.23 muestra un ejemplo de unicidad en el que se aprecia que ambas imágenes tienen la propiedad única de estar en escala de grises.



FIGURA 2.23: Restricción de unicidad. Ambas imágenes se encuentran en escala de grises

4. Restricción de orden posicional: supone que los ordenes de dos características de una imagen se encuentren ordenadas de la misma manera que las características homólogas de la otra imagen. La Figura 2.24 muestra un ejemplo de orden posicional en el que se debe verificar que $x_i < x_h$ y $x_j < x_k$.

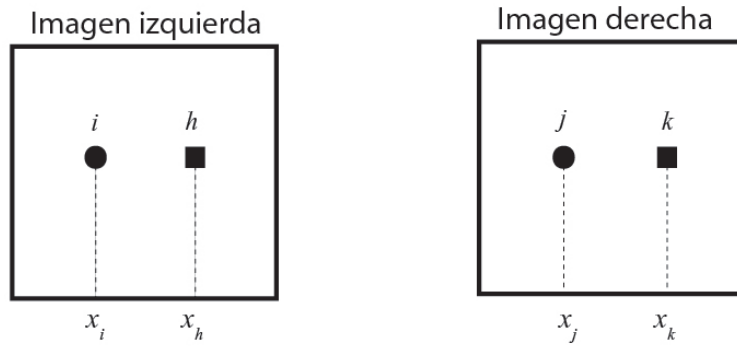


FIGURA 2.24: Restricción de orden posicional. Se muestra que se debe cumplir $x_i < x_h$ y $x_j < x_k$.

5. Reestricción de la continuidad de la disparidad: menciona que la relación de valores de disparidades son mínimos, es decir, el mapa de disparidad se presenta continuo con excepción de pocas discontinuidades que se pueden presentar. La Figura 2.25 muestra un ejemplo de un par de imágenes estereo con un mapa continuo de disparidad.

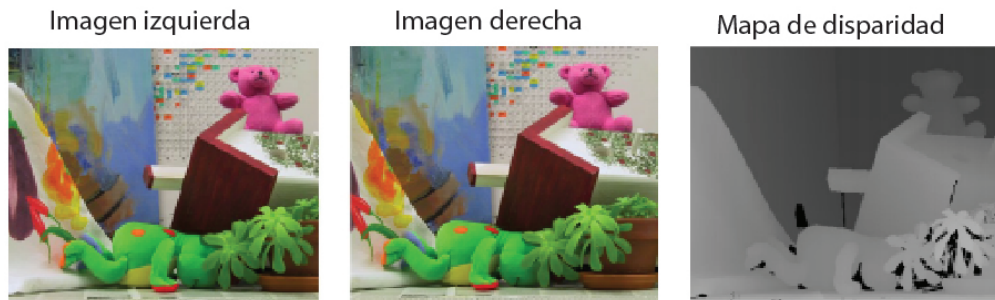


FIGURA 2.25: Restricción de la continuidad de la disparidad. Se muestra un mapa de disparidad continuo del par de imágenes.

2.3.3.4. Obtención de las Coordenadas Tridimensionales

Después de la correspondencia estereoscópica en donde se obtiene la relación de puntos correspondientes del par de imágenes, se da paso a la obtención de las coordenadas del punto real con respecto a la información bidimensional de ambas imágenes. Para esto se realiza una conversión de la posición bidimensional de los píxeles a ángulos reales formados por la propia geometría del SVE. Cada imagen contiene un FOV tanto en la dirección horizontal como vertical, teniendo una resolución en grados de cada uno de los píxeles presentes en la imagen. Por

lo general el sistema de coordenadas real de los SVE se situa en el centro de ambas cámaras, tomando como referencia este sistema, se toma la correspondiente relación en grados de la proyección bidimensional obtenida de ambas cámaras de un punto en particular de la escena y con la información de estos ángulos se realiza un proceso de triangulación con la cual se obtienen las coordenadas tridimensionales X, Y, Z por medio de la ley de senos [Rodríguez-Quinonez et al., 2017].

2.4. Calibración de Cámaras

Dentro de un SVE, la calibración de cámaras es un proceso que permite encontrar diversas características de las cámaras las cuales son utilizadas para precisar las mediciones obtenidas del sistema estereoscópico [Wu and Zhu, 2015]. Las principales aplicaciones para el empleo de la calibración es en reconstrucción, en donde cada punto es determinado al pasar los rayos a través de un punto focal de las cámaras del SVE hacia la escena, obteniendo relaciones entre las coordenadas bidimensionales de las imágenes y las coordenadas tridimensionales de la escena en particular [Lin and Subbarao, 2003]. También es utilizada en inspección visual en el que los objetos reconstruidos por el SVE pueden ser comparados para buscar imperfecciones de manufactura tales como golpes, abolladuras o grietas [Molleda et al., 2013]. Otras de las aplicaciones en donde se utiliza la calibración es en la localización de objetos en donde se determina la posición relativa de ellos y en navegación autónoma en donde las mismas cámaras se emplean dentro de una estructura robótica para controlar la posición y orientación del robot y poder evadir obstáculos [Negishi et al., 2004]. La calibración se puede dividir en 2 fases. La primera consiste en el modelo de cámara en el que se tiene la aproximación matemática física y óptica, obteniendo mediciones de la escena por medio de los sensores de las cámaras. La segunda fase utiliza métodos directos o iterativos para estimar los parámetros de las cámaras. Los parámetros de las cámaras pueden clasificarse en 2 tipos: los parámetros intrínsecos y los parámetros extrínsecos. Los primeros modelan la geometría interna y características ópticas de los sensores de las cámaras [Xu et al., 2011]. Estos constituyen la distancia focal, el factor de escala, las coordenadas centrales de la imagen y los coeficientes de distorsión presentes en las lentes de las cámaras. Por otro lado, los parámetros extrínsecos lo conforman los factores de rotación y translación entre las coordenadas de imagen de las cámaras y las coordenadas tridimensionales de la escena. En esta investigación se

cambia el enfoque de la obtención de los parámetros de cámaras por un método de calibración en el que se modelan los errores ocasionados por la distorsión y digitalización de las imágenes con el fin de precisar las mediciones obtenidas por el SVE empleándolo en la reconstrucción tridimensional. Sin embargo, se explican los diferentes métodos existentes de calibración de cámaras debido a que son considerados en la investigación para comprobar la efectividad del método de calibración desarrollado con respecto a los métodos existentes en la literatura [Salvi et al., 2002].

2.4.1. Modelo de Cámara

El modelo de cámara consiste en la aproximación de la geometría interna y externa de las cámaras [Nedevschi et al., 2003]. La Figura 2.26 muestra la relación geométrica entre un punto de la escena y sus proyecciones bidimensionales en las imágenes de un SVE.

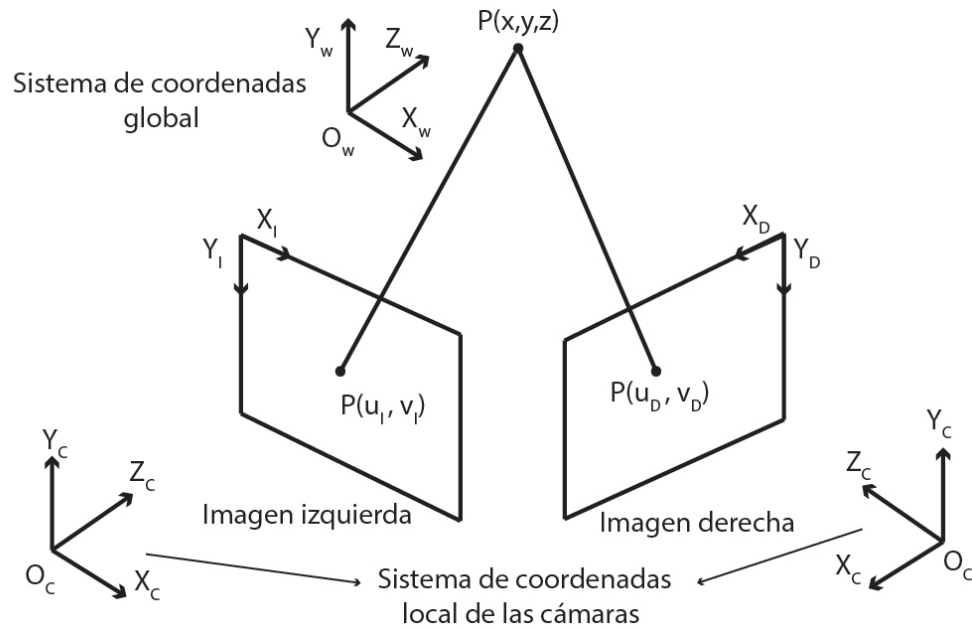


FIGURA 2.26: Relación geométrica entre un punto de la escena y sus proyecciones bidimensionales en las imágenes de un SVE.

El cambio en el sistema de coordenadas del mundo real al sistema de coordenadas de la cámara se lleva a cabo de la misma manera en todos los modelos de calibración existentes. Esta transformación se modela usando un vector de traslación y una matriz de rotación, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = R_{wc} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + T_{wc} \quad (2.27)$$

donde R_{wc} expresa la orientación del sistema de coordenadas del mundo real con respecto a los ejes del sistema de coordenadas de las cámaras y T_{wc} es la posición del origen del sistema de coordenadas del mundo real medido con respecto al sistema de coordenadas de las cámaras [Zhang, 1999]. Considerando un sensor óptico con un modelo de cámara pinhole como se observa en la Figura 2.27, en donde el plano de imagen es localizado a una distancia f del centro óptico O_c y es paralelo al plano $X_c Y_c$, se puede relacionar un punto P_c con coordenadas (u_c, v_c) del sistema de coordenadas de la cámara con un punto P_w con coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) del sistema de coordenadas global de la siguiente manera:

$$u_c = f \frac{X_w}{Z_w} \quad (2.28)$$

$$v_c = f \frac{Y_w}{Z_w} \quad (2.29)$$

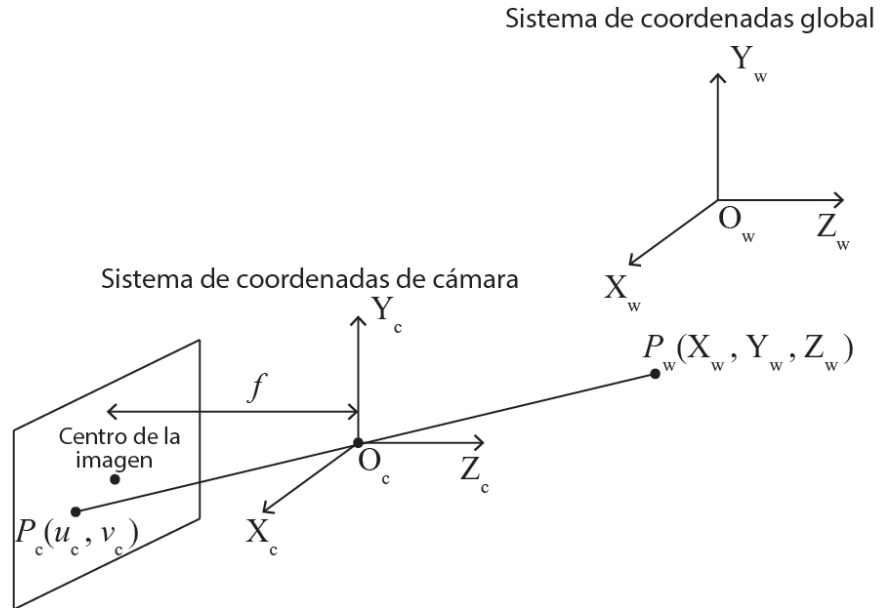


FIGURA 2.27: Relación geométrica entre un punto de coordenada global y su proyección bidimensional en el plano $X_c Y_c$ del sistema de coordenadas de la cámara.

2.4.2. Tipos de Calibración de Cámaras

Dentro de la literatura podemos encontrar varios tipos de calibración los cuales podemos clasificar en 5 diferentes métodos que se describirán a continuación:

1. DLMT: Estas técnicas utilizan el método LS para obtener una matriz de transformación el cuál relaciona los puntos de coordenada del mundo real con los puntos de proyección bidimensional de las imágenes. La ventaja del modelo es que es muy sencilla y rápida de realizar, sin embargo, la precisión del modelo no es alta debido a que no consideran un modelo de distorsión de las lentes [Faugeras, 1986], [Ito, 1990].
2. NLOT: Esta técnica de calibración incluye un modelo de distorsión de la lente. Estos métodos obtienen los parámetros de las cámaras por medio de iteraciones con el objetivo de minimizar una función de error. Por lo general, esta función a minimizar son las distancias que hay entre los valores obtenidos con el sistema de visión y los valores deseados los cuáles se van mejorando en cada iteración empleada en el método. La precisión de este modelo es muy alta, sin embargo, se necesita de una buena suposición inicial para asegurar la convergencia ya que sin ella puede ocasionar un gran costo computacional [Bevilacqua et al., 2013], [Yang et al., 2019].
3. TSM: Estas técnicas usan una optimización lineal para computar algunos parámetros de las cámaras y el resto los obtienen por medio de iteraciones. Las ventajas de estos métodos combinan tanto una rápida calibración como una buena precisión de las mediciones [Gai et al., 2018], [Shan et al., 2019].
4. CMANN: Utiliza redes neuronales para computar los parámetros de las cámaras. Consiste en computar unidades llamadas neuronas las cuáles están conectadas por sinápsis que envían la información desde una capa de entrada hacia una de salida. La relación de cada neurona que se procesa es definida por medio de unos pesos dentro de la red neuronal. [Pedra et al., 2013], [Díaz and Loaiza, 2015].
5. CMGA: Este método utiliza algoritmos genéticos para estimar los parámetros de las cámaras. El método de algoritmos genéticos depende de codificar procesos de cromosomas utilizando operadores de selección, de cruce y de mutación. En este caso, el vector de cromosoma consiste de los parámetros

de cámara los cuales se van modificando dentro del algoritmo genético al ir moviendo los operadores mencionados de tal manera que se va minimizando una función de error que relaciona las mediciones de las coordenadas de los puntos obtenidas por el sistema de visión y los valores ideales de las coordenadas de estos puntos [Jiang, 2012], [Rodríguez and Mejía Alanís, 2016].

2.4.3. Modelo de Distorsión de las Lentes

Uno de los pasos dentro del modelo de calibración es encontrar los coeficientes que modelan la distorsión de las lentes [Masmoudi et al., 1995]. La distorsión horizontal y vertical de un punto en la escena proyectada en la imagen esta dada por la siguiente relación:

$$u_c = u_d + \delta_x \quad (2.30)$$

$$v_c = v_d + \delta_y \quad (2.31)$$

donde (u_c, v_c) son las coordenadas bidimensionales sin distorsión, (u_d, v_d) las coordenadas bidimensionales distorsionadas, y (δ_x, δ_y) los coeficientes de distorsión horizontal y vertical. El desplazamiento dado por la distorsión radial (d_{xr}, d_{yr}) en la dirección horizontal y vertical puede ser modelado de la siguiente manera [Weng et al., 1992]:

$$\delta_{xr} = k_1 u_c (u_c^2 + v_c^2) \quad (2.32)$$

$$\delta_{yr} = k_1 v_c (u_c^2 + v_c^2) \quad (2.33)$$

donde k_1 representa el primer término de la serie de distorsión radial. Otro tipo de distorsión que se modela es la de centrado $(\delta_{xd}, \delta_{yd})$, que considera una distorsión radial y otra tangencial de la siguiente manera [Wang et al., 2008]:

$$\delta_{xd} = k_1 (3u_c^2 + v_c^2) + 2k_2 u_c v_c \quad (2.34)$$

$$\delta_{yd} = 2k_1u_cv_c + k_2(u_c^2 + 3v_c^2) \quad (2.35)$$

donde k_1 representa la distorsión radial y k_2 es la distorsión tangencial.

2.4.4. Método Least Square

Este método es un procedimiento de análisis numérico en el que dado un conjunto de pares ordenados, se intenta determinar una función la cuál se aproxime de la mejor manera a los datos [Quintanilla et al., 2005]. El procedimiento que realiza es buscar minimizar las diferencias de estos pares ordenados en la cuál se obtiene una función polinomial de la siguiente forma:

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots a_nx^n \quad (2.36)$$

donde $\{a_0, a_1, \dots a_n\}$ son los coeficientes obtenidos por LS. Para determinar los coeficientes mencionados, se procede minimizando la siguiente función de error:

$$E = \sum_{k=0}^m |y_k - (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots a_nx^n)|^2 \quad (2.37)$$

donde y_k es el valor ideal de la función a obtener. LS es utilizado en el método de calibración desarrollado para mejorar la precisión de las mediciones en el SVE.

2.5. Visual Servoing Control

El Visual Servoing Control (VSC) consiste en controlar el posicionamiento de robots manipuladores utilizando información visual de una o varias cámaras. El procedimiento consiste de extraer diferentes características de la imagen para estimar la posición del robot con respecto al sistema de coordenadas de la cámara, creando una señal entre la posición actual y la deseada la cuál es utilizada para controlar el extremo final del robot [Perez and Lopez, 2015]. Se puede configurar el sistema de visión de un VSC de dos formas: el primero consiste en una configuración de camara-brazo (eye in hand) en donde la cámara esta ubicada en el extremo

final de la articulación del brazo robótico y la otra es la configuración de cámara fija en donde la cámara interviene en el sistema robótico de forma que lo controla externamente [Aracil et al., 2005]. Dentro de esta investigación se considera la configuración cámara fija ya que las cámaras del SVE desarrollado se encuentran externamente colocadas del mecanismo de dos grados de libertad diseñado, por lo que la teoría descrita tratará solamente de la configuración de cámara fija para el control de retroalimentación visual.

2.5.1. Dinámica del Robot

Dentro de un manipulador robótico se debe considerar el modelo dinámico de su movimiento. La ecuación dinámica considerando n grados de libertad de la estructura robótica viene dada por la siguiente relación [Spong and Vidyasagar, 1989]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.38)$$

donde $M(q)$ representa la matriz de inercia del manipulador, q el vector de posiciones articulares, $\dot{q}$ el vector de velocidades articulares, $\ddot{q}$ el vector de aceleraciones articulares, $C(q, \dot{q})$ la matriz de fuerzas centrífugas, $g(q)$ el vector de pares gravitacionales y τ el vector de torques. También tenemos que la matriz $C(q, \dot{q})$ y la derivada de la matriz de inercia $\dot{M}(q)$ se relacionan de la siguiente manera [Spong et al., 2006]:

$$\dot{q}^T \left[\frac{1}{2} \dot{M}(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} = 0 \quad (2.39)$$

Dentro del sistema también podemos encontrar la cinemática directa la cuál describe la relación existente entre la posición articular y las coordenadas cartesianas de la siguiente manera:

$$\mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m \quad (2.40)$$

donde n representa el número de grados de libertad y m la dimensión de las coordenaas cartesianas. Por último, la posición x_R del objeto final del manipulador se da en términos de las posiciones articulares $f(q)$ de la siguiente forma:

$$x_R = f(q) \quad (2.41)$$

2.5.2. Modelo de Visión Cámara Fija

Dentro del VSC se crea un modelo que obtiene el sistema de coordenadas del mundo real a partir de imágenes [Cid and Reyes, 2009]. Este toma información de una escena en particular a partir de sus proyecciones bidimensionales. En la Figura 2.28 se puede ver la relación del sistema de coordenadas de una cámara fija con respecto al sistema de coordenadas del mundo real asociado al brazo robótico.

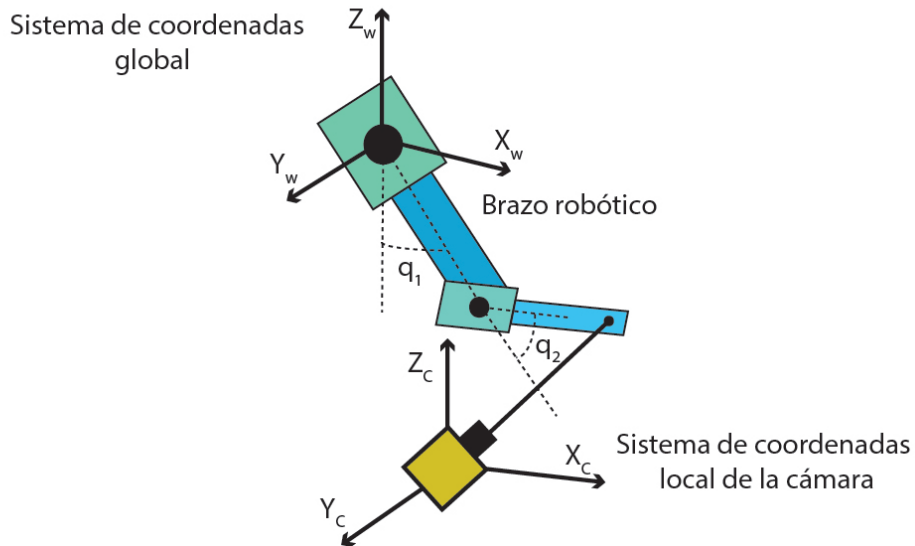


FIGURA 2.28: Configuración de una cámara fija con respecto al sistema de coordenadas global.

Para una escena en particular que es tomada de la cámara, se tiene un nuevo sistema de coordenadas bidimensionales con puntos u_i, v_i cuyo origen se encuentra en la parte superior izquierda de la imagen. Para la configuración de cámara fija, expresando estas coordenadas en píxeles, se tiene el modelo del sistema de visión siguiente para la relación de un punto en la escena:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \frac{f}{f + z_{ci}} \begin{bmatrix} a_u & 0 \\ 0 & -a_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

donde x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} representan las coordenadas del punto en el sistema de coordenadas de la cámara, a_u y a_v son factores de escalamiento y f es la distancia focal.

2.5.3. Controlador PID

El controlador PID es la combinación de tres acciones básicas de control, la acción proporcional, la derivativa y la integral. La parte proporcional nos da la diferencia entre un punto a controlar y el punto deseado al que se quiere establecer dicho punto variable. La parte derivativa controla la velocidad para que la acción de control se lleve a cabo en menor tiempo. Cuando este tiempo de acción es grande, hay una inestabilidad en el proceso de control, y de manera contraria cuando este es pequeño, la etapa de control oscila bastante en relación al valor deseado, por lo que se debe encontrar una constante derivativa que permita poca oscilación y estabilidad para un proceso de control óptimo. La parte integral se utiliza para eliminar o disminuir en lo posible el error en estado estacionario el cuál ayuda a la parte proporcional para poder llegar al valor deseado. Para la estructura del controlador PID se considera un lazo cerrado de control con una entrada y una salida como se muestra en la Figura 2.29 [Tacconi et al., 2005].

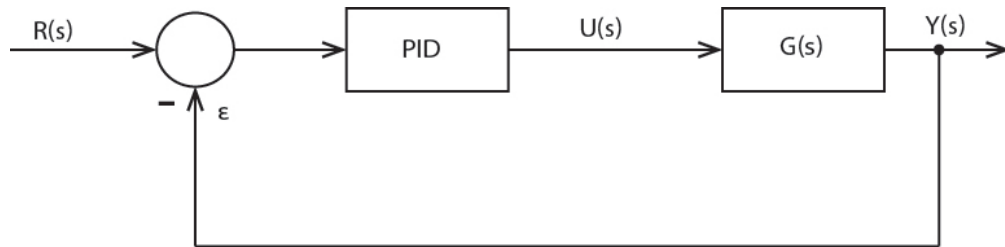


FIGURA 2.29: Diagrama a bloques en lazo cerrado donde interviene un control PID.

El control proporcional da una salida al controlador que es proporcional al error, resultando la siguiente función de transferencia [Roca, 2014]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.43)$$

donde K_p se define como la ganancia proporcional que puede ser ajustada. Si al controlador proporcional le incluimos un control integral tendremos un controlador proporcional-integral el cuál entrega una salida proporcional al error acumulado y controla las desviaciones en estado estable que presenta la parte proporcional [Laguado et al., 2009]. La función de transferencia de este controlador es definida de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (2.44)$$

donde T_i se le denomina la constante de integración. Si al sistema se le añade un control derivativo, se tendrá el controlador PID, combinando las ventajas de las 3 acciones de control [Medina et al., 2011]. La función de transteferencia característica del controlador PID esta dada de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.45)$$

donde T_d se le denomina la constante de tiempo derivativa. El control derivativo actua como predictor ya que gracias a él se puede anticipar la dirección del error por lo que se mejora el proceso de control en el sistema.

2.5.4. Servomotor

El servomotor es un tipo específico de motor que se desplaza por medio de una señal PWM la cuál es controlada por varios dispositivos que se encuentran dentro de su sistema [Enríquez Quilumbaquin, 2019]. La Figura 2.30 muestra el esquema general y la forma de operación de un servomotor. Este funcionamiento comienza en un regulador de posición en donde se recibe la posicion final del motor por medio de un encoder, comparando esta posición y deteniendo el proceso en caso de que se obtenga la posición deseada. Después entra a una etapa de regulación de velocidad que cuenta con una serie de engranajes para el control de velocidad. Enseguida entra a una etapa de potencia que se encarga de proveer el voltaje y corriente suficiente para que el motor se desplace a la posición deseada. Después del desplazamiento del motor, se cuenta con un enconder el cuál almacena la

información de la posición final del motor enviándosela al regulador de posición. Este proceso se repite hasta que el servomotor llegue a la posición deseada.

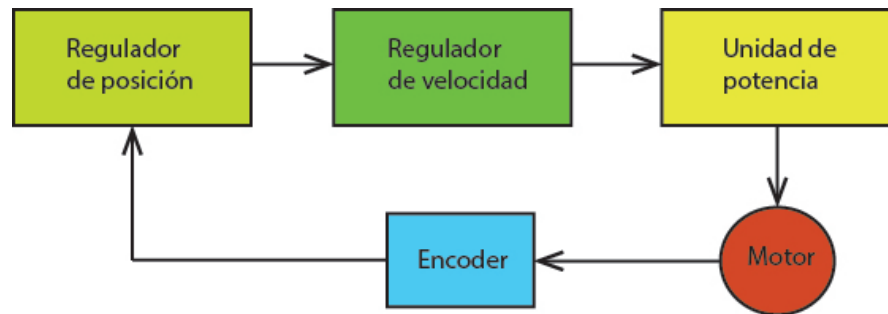


FIGURA 2.30: Esquema y funcionamiento de un servomotor.

2.5.5. Señal PWM

La señal PWM se emplea para el control de servomotores el cuál consiste de una onda cuadrada en la que el tiempo de pulso en nivel alto puede ser modificado, conservando un mismo periodo [Morales et al., 2019]. La Figura 2.31 muestra un rango de operación que recorre un PWM en un periodo determinado. El control del servomotor limita a que posición debe ser situado según el ancho de la señal PWM. Se puede colocar al servomotor a 0° para una señal PWM aproximada de 10 %, y hasta 180° para una señal PWM aproximada de 20 %.

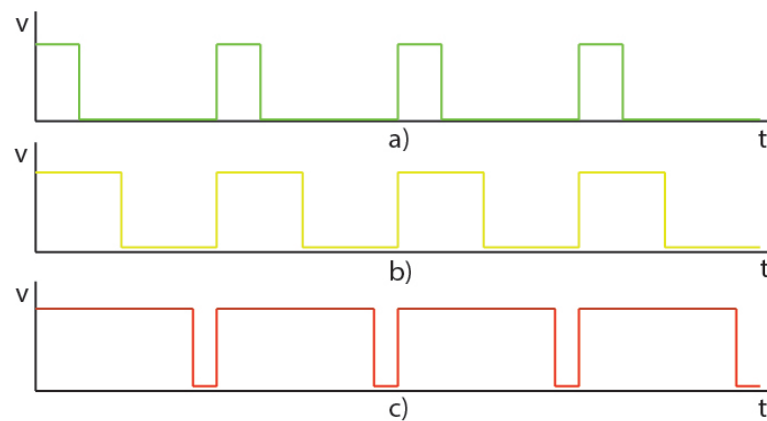


FIGURA 2.31: Rango de operación de un PWM. a) Señal PWM a 25 %. b) Señal PWM a 50 %. c) Señal PWM a 90 %.

Capítulo 3

Procedimiento de Investigación

3.1. Propuesta de Método de Calibración en SVE para Control Servo-Visual

La propuesta para este trabajo de tesis se divide en dos fases. La primera fase consiste en realizar un nuevo método de calibración que se utilice en SVE con el fin de mejorar la precisión de las mediciones tridimensionales que se realizan de una escena en particular. El método de calibración utilizará el método de LS con la cuál se obtendrá una ecuación polinomial para modelar los errores causados por la distorsión de las lentes y la pérdida de información debido a la digitalización de las imágenes. Este modelo se obtiene al encontrar el error entre los puntos tridimensionales de la escena obtenidos por el SVE con los puntos tridimensionales deseados de esos puntos. La segunda fase consiste en controlar un mecanismo de 2 grados de libertad por medio del SVE, empleando el método de calibración desarrollado para precisar de la mejor forma la colocación del mecanismo a la posición que se desee. El procedimiento para el control servo-visual se empieza en establecer un punto deseado en el que el mecanismo se desea ubicar, el cuál tendrá en el extremo final un láser que indicará su posición actual. El sistema detectará el centroide de este láser en la imagen, realizando comparaciones de este punto con el punto deseado. Se utilizará el SVE para encontrar las coordenadas tridimensionales de ambos puntos y un control PID que se encargará de controlar la velocidad y posición de los servomotores para llegar al punto deseado. El objetivo final de la investigación es combinar el SVE y el servo mecanismo para la realización de un

escaneo tridimensional de la superficie de una pieza trapezoidal. El mecanismo se desplazará a medida que se realiza el escaneo en las diferentes regiones de la pieza, utilizando el láser ubicado en el mecanismo para guiar su posicionamiento al punto específico a escanear.

3.1.1. Diagrama de Flujo de la Investigación Propuesta

La Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo de la investigación propuesta en donde se indica cada una de las fases que se realizan en el proceso de investigación para la localización de puntos tridimensionales de una escena en particular y el proceso de control para el desplazamiento del mecanismo hacia el punto deseado. Las fases principales son el método de calibración propuesto, seguido de la utilización del sistema de visión estereoscópica y terminando con el sistema de servo-control. Estas fases se explicarán a detalle dentro de esta sección.

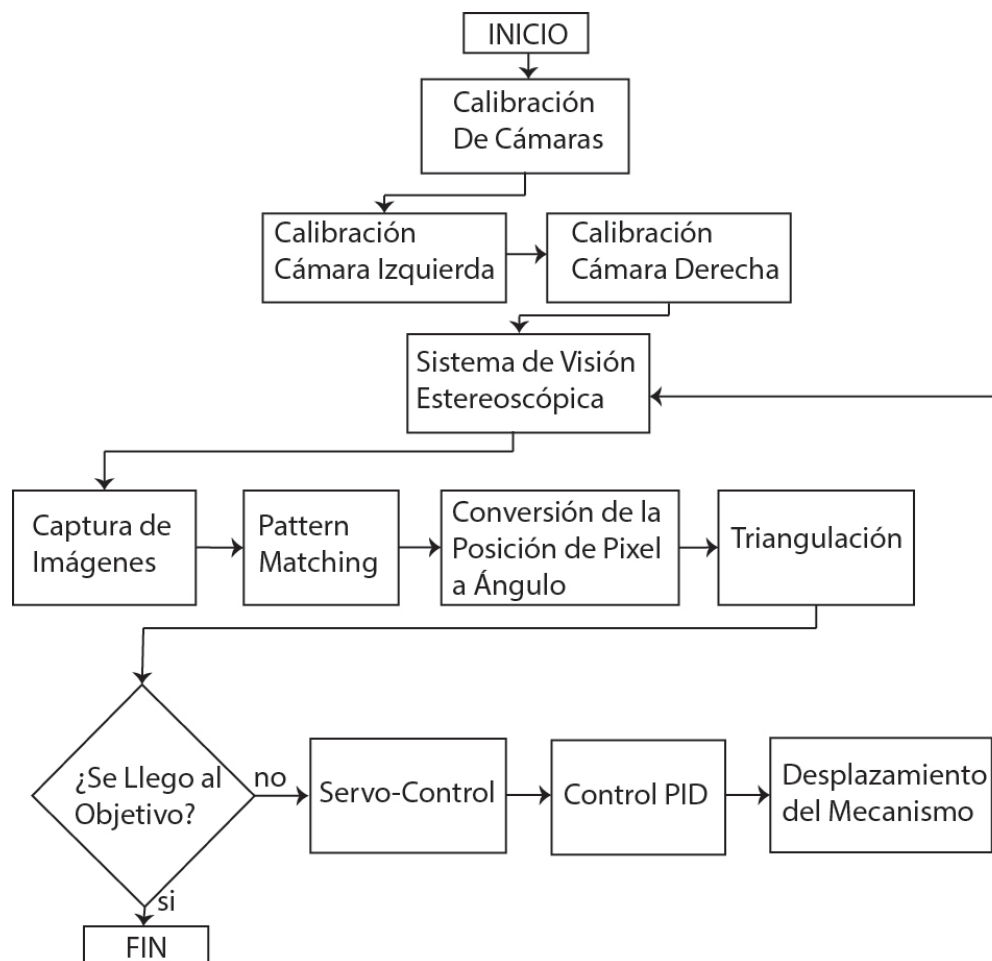


FIGURA 3.1: Diagrama de flujo de la investigación propuesta.

3.2. Desarrollo del SVE

En esta sección se mostrará todo el procedimiento desarrollado del SVE diseñado. Este sistema toma como referencia investigaciones vistas en [Rodríguez-Quíñonez et al., 2017], considerando las fases principales para el desarrollo del sistema las cuales son la captación de imágenes, el proceso PM, la conversión de la posición del pixel en ángulos y la triangulación para la obtención de las coordenadas 3D de un punto en la escena. Este SVE utiliza 2 cámaras, las cuales están separadas a una distancia fija entre ellas en el eje horizontal y sus imágenes resultan coplanares, compartiendo un mismo plano epipolar entre ellas. A diferencia de los SVE vistos en la literatura, este sistema únicamente necesita la información de un par de imágenes para realizar el proceso antes mencionado y localizar puntos tridimensionales de una escena en particular.

3.2.1. Diagrama del SVE

La Figura 3.2 muestra un diagrama en el cuál se aprecia la localización un punto en particular de una escena, el cuál es proyectado en una imagen izquierda y una imagen derecha tomadas por el SVE. Las variables que intervienen son la línea base que corresponde a la separación que hay entre las cámaras y los ángulos que intervienen en la geometría del SVE, los cuales serán utilizados para la localización de las coordenadas de un punto $P(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ en la escena.

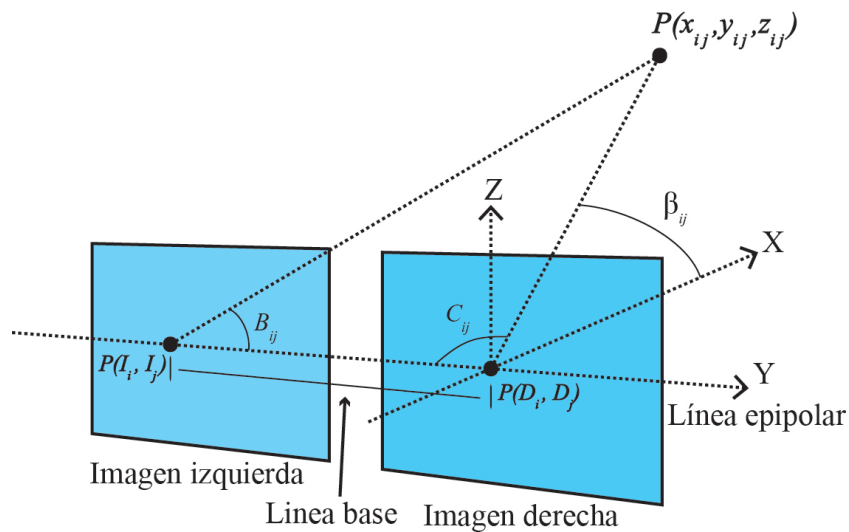


FIGURA 3.2: Diagrama de localización de un punto 3D por medio del SVE.

3.2.2. Captura de Imágenes

En este proceso se da paso a la captura de imágenes de la escena en particular en la que se localizarán los puntos de coordenada real con el SVE. La figura 3.3 muestra un par de imágenes de una escena en particular capturadas con el SVE.

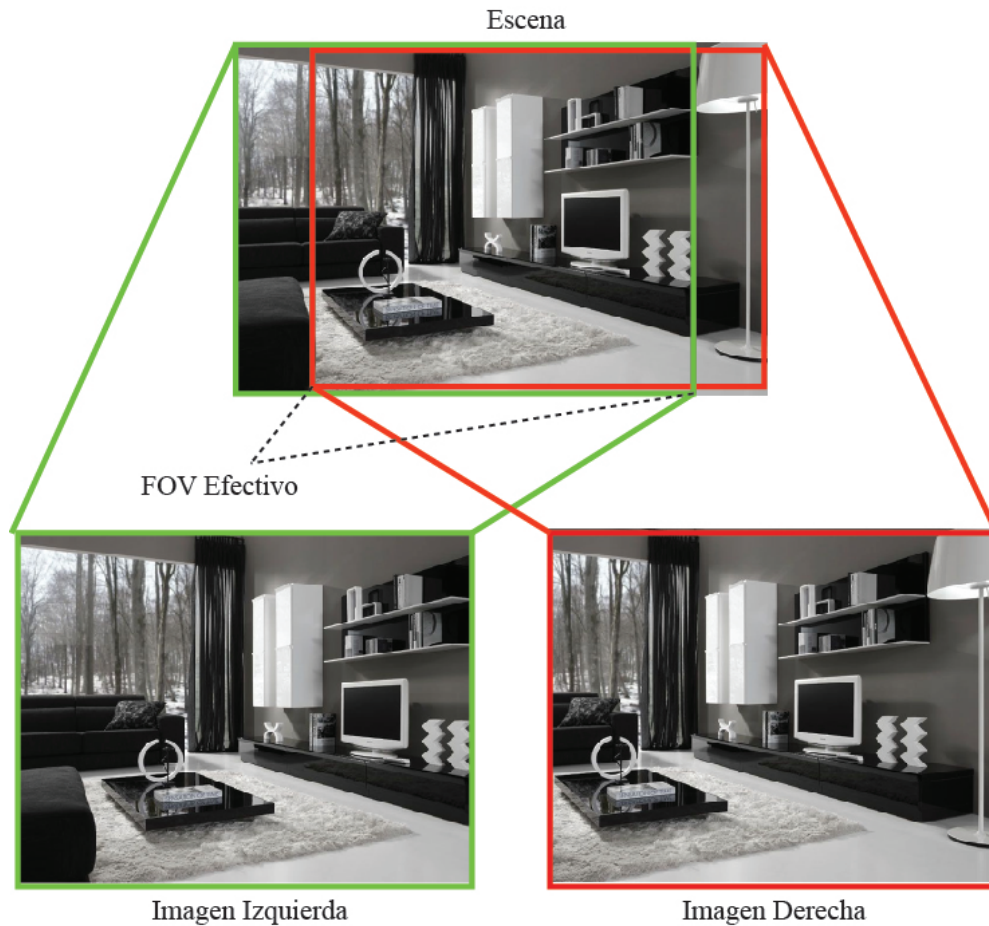


FIGURA 3.3: Par de imágenes de una escena en particular capturadas con el SVE.

En la figura se puede ver que las imágenes capturadas de la escena tienen un desfazamiento de la escena entre ellas. Para la localización de coordenadas tridimensionales de la escena se deben considerar el FOV efectivo en donde ambas imágenes contienen esa región de la escena. Dentro de la captura de las imágenes se deben evitar los problemas de oclusión, los cuales se presentan cuando se detectan regiones en una imagen pero no en la otra, imposibilitando el proceso de correspondencia estereoscópica ya que no se tendría la información en ambas imágenes para encontrar las dimensiones tridimensionales en esa región en particular [Chambon and Crouzil, 2011].

3.2.3. Proceso PM

En este paso se obtienen las coordenadas bidimensionales de los puntos $P(I_i, I_j)$ y $P(D_i, D_j)$ que corresponden a las proyecciones de un punto en la escena en las imágenes izquierda y derecha, respectivamente. El primer paso de este proceso es seleccionar una región que se desee localizar en la imagen izquierda, considerando el FOV efectivo de la escena como se explicó en la sección anterior. El método PM busca una ventana de correlación de patrones de intensidad entre la región elegida de la imagen izquierda y la imagen derecha, localizando en esta última aquella ventana que tenga la mayor correspondencia de intensidad [Ploumpis et al., 2015]. La Figura 3.4 muestra dos procesos PM en las que se ve la correcta localización de dos regiones de la imagen y también un fallo en el proceso debido a que la región a localizar se encuentra fuera del FOV efectivo dentro de la cámara derecha. Considerando que no se tuvo ningún fallo en el proceso PM, el algoritmo toma la coordenada bidimensional central de cada región localizada en la imagen izquierda y derecha, denotándolos como los puntos $P(I_i, I_j)$ y $P(D_i, D_j)$, respectivamente.

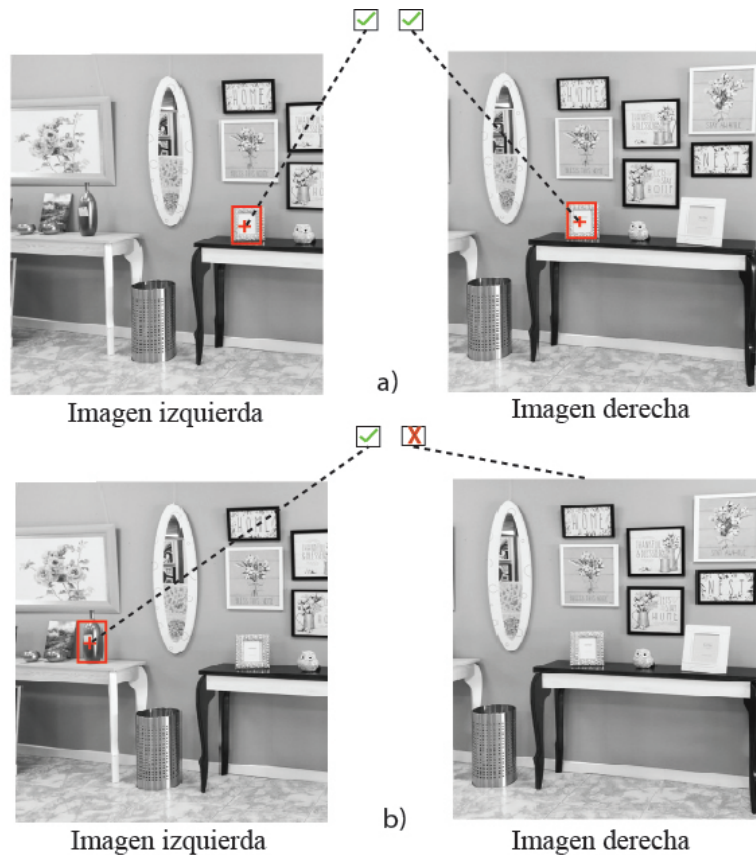


FIGURA 3.4: Proceso PM de una escena en particular. a) Detección correcta en ambas imágenes. b) La región no fue localizada en la imagen derecha.

3.2.4. Conversión de la Posición del Pixel en Ángulos

En la Figura 3.2 se muestra una relación geométrica entre las coordenadas bidimensionales de los puntos $P(I_i, I_j)$ y $P(D_i, D_j)$ con los ángulos B_{ij} , C_{ij} y β_{ij} . Estos ángulos como se mostrará más adelante en el proceso de triangulación son necesarios para la obtención de las coordenadas tridimensionales del punto en particular de la escena y pueden ser obtenidas realizando una conversión del equivalente en ángulo de las coordenadas bidimensionales de cada proyección del punto ubicado en la imagen izquierda y derecha. Para la obtención del ángulo B_{ij} el cuál esta relacionado con el punto $P(I_i, I_j)$ de la imagen izquierda, se necesita conocer la dimensión horizontal D_h medida en píxeles de las cámaras, la resolución horizontal R_h que indica los grados que abarcan cada pixel en la dirección horizontal, y el valor de la coordenada I_i del punto de proyección en la imagen izquierda. El valor de B_{ij} puede cambiar dependiendo si $P(I_i, I_j)$ es localizado a la izquierda o a la derecha del centro de imagen, relacionándolo de la siguiente manera:

$$B_{ij} = 90^\circ + \left(\left| \frac{D_h}{2} - I_i \right| \cdot R_h \right)_{para\ I_i \leq \frac{D_h}{2}} \quad (3.1)$$

$$B_{ij} = 90^\circ - \left(\left| \frac{D_h}{2} - I_i \right| \cdot R_h \right)_{para\ I_i \geq \frac{D_h}{2}} \quad (3.2)$$

Para la obtención del ángulo C_{ij} el cuál esta relacionado con el punto $P(D_i, D_j)$ de la imagen derecha, se necesita conocer D_h , R_h , y el valor de la coordenada R_i . El valor de C_{ij} al igual que B_{ij} puede cambiar dependiendo si $P(D_i, D_j)$ es localizado a la izquierda o a la derecha del centro de imagen. Esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$C_{ij} = 90^\circ + \left(\left| \frac{D_h}{2} - R_i \right| \cdot R_h \right)_{para\ R_i \geq \frac{D_h}{2}} \quad (3.3)$$

$$C_{ij} = 90^\circ - \left(\left| \frac{D_h}{2} - R_i \right| \cdot R_h \right)_{para\ R_i \leq \frac{D_h}{2}} \quad (3.4)$$

Por último, el ángulo β_{ij} se obtiene relacionando la dimensión vertical D_v medida en píxeles, la resolución vertical R_v que me indica los grados que abarcan cada

pixel en la dirección vertical y el valor de la posición vertical del pixel V_j , de la siguiente manera:

$$\beta_{ij} = \left(\frac{D_v}{2} - V_j \right) \cdot R_v \quad (3.5)$$

Debido a la configuración de las cámaras, el desplazamiento de las imágenes se da solamente en la coordenada horizontal y no de forma vertical, por lo que se puede considerar que $V_j = I_j = R_j$.

3.2.5. Triangulación

El proceso de triangulación relaciona los ángulos B_{ij} , C_{ij} y β_{ij} con las coordenadas de los puntos $P(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$. Considerando la línea base b como la distancia fija entre las cámaras, se pueden obtener las coordenadas tridimensionales de un punto en la escena la cuál es deducida de forma geométrica por medio de la ley de los senos de la siguiente manera [Rodríguez-Quinonez et al., 2017]:

$$x_{ij} = b \left(\frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin (B_{ij} + C_{ij})} \right) \quad (3.6)$$

$$y_{ij} = b \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin (B_{ij} + C_{ij})} \right) \quad (3.7)$$

$$z_{ij} = b \left(\frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \tan \beta_{ij}}{\sin (B_{ij} + C_{ij})} \right) \quad (3.8)$$

En estas ecuaciones de triangulación se puede notar que b es directamente proporcional a cada una de las coordenadas (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) y que el ángulo β_{ij} solo esta relacionado con la coordenada z_{ij} . En este sistema de coordenadas se considera x_{ij} como la coordenada que obtiene la profundidad de la imagen, esto es, la distancia que hay entre las cámaras y la escena. En la literatura se muestra que esta coordenada es la que más varía en un SVE y depende del método de calibración empleado para encontrar la medida que más se asemeje a la medida ideal de un determinado punto en la escena [Fraser, 2001].

3.3. Desarrollo del Método de Calibración

En esta sección se muestra el desarrollo del nuevo método de calibración de cámaras que es utilizado para mejorar las mediciones obtenidas de los puntos tri-dimensionales de una escena por medio del SVE. El código realizado en LabVIEW referente a esta calibración puede verse en el anexo II. A diferencia de los métodos vistos en la literatura que se enfocan en la localización de los parámetros de las cámaras, en este método se modelan los errores causados por la distorsión de las lentes y la pérdida de información debido a la digitalización de las imágenes. Esta calibración entra en la categoría de los métodos NLOT, empleando el método LS, el cual encuentra una ecuación polinomial que compensa los errores mencionados. En las siguientes secciones se detallan cada uno de los pasos para el desarrollo de este método de calibración.

3.3.1. Características de la Rejilla de Calibración Utilizada

Para realizar la calibración de cámaras es necesario la utilización de una rejilla de calibración que cuenta con medidas reales identificadas de las cuales se pueden obtener ángulos ideales que serán comparados con los ángulos obtenidos de la misma rejilla de calibración pero empleando el SVE. La Figura 3.5 muestra la rejilla de calibración utilizada, que cuenta con 15 X 19 cruces de las cuales se considera únicamente la coordenada central de cada una de ellas.

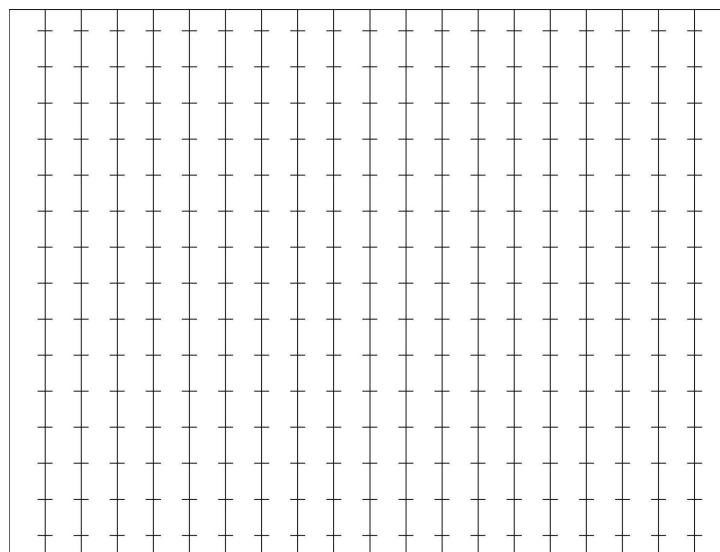


FIGURA 3.5: Rejilla de Calibración Desarrollada.

3.3.2. Obtención de los Ángulos Ideales

El primer paso en la calibración es obtener los ángulos horizontales y verticales de cada centro de las cruces que contiene la rejilla de calibración. El diseño de esta rejilla mantiene 1 centímetro de separación de cada centro de las cruces tanto en la dirección horizontal como vertical. La Figura 3.6 muestra el sistema de coordenadas para cada uno de los puntos que contiene la rejilla de calibración.

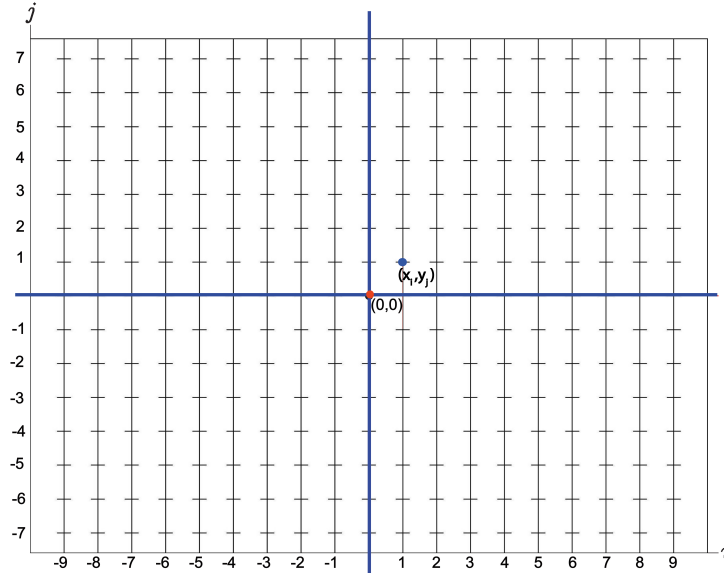


FIGURA 3.6: Sistema de coordenadas de la rejilla de calibración para cada punto a localizar.

Para la localización de cada uno de los valores de estos ángulos se debe considerar el origen en el centro de la rejilla de calibración como lo muestra la Figura 3.6. Considerando las coordenadas bidimensionales (x_i, y_j) de cada centro de las cruces que se encuentran en la rejilla de calibración y una distancia l ubicada entre el sensor CCD de la cámara y la rejilla de calibración, se tiene que:

$$\alpha_{ij} = \arctan\left(\frac{l}{x_i}\right) \quad (3.9)$$

$$v_{ij} = \arctan\left(\frac{l}{y_j}\right) \quad (3.10)$$

donde α_{ij} y v_{ij} representan los valores de los ángulos ideales de todos los centros de las cruces ubicadas en la rejilla de calibración en la dirección horizontal y vertical, respectivamente.

3.3.3. Obtención de los Ángulos por Medio del SVE

El siguiente paso en el proceso de calibración es obtener los ángulos del centro de las cruces de la rejilla de calibración en las cámaras izquierda y derecha utilizando el SVE. La Figura 3.7 muestra la relación de ángulos horizontales y verticales que se obtienen de los centros de las cruces de la rejilla de calibración.

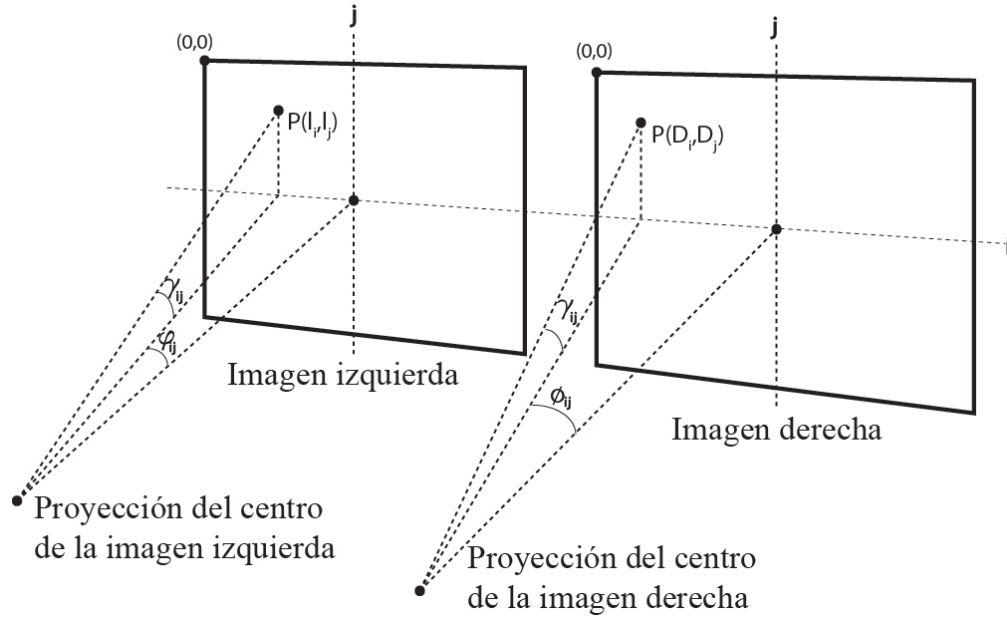


FIGURA 3.7: Ubicación de ángulos horizontales y verticales de las proyecciones bidimensionales de los puntos de la escena.

El proceso para la obtención de estos ángulos comienza con alinear el centro de la rejilla de calibración con el pixel central de la imagen izquierda de manera que solo queden separados por una distancia l comprendida entre la rejilla de calibración y el sensor CCD de la cámara. Después, se emplea una muestra de una imagen que contiene una cruz de la rejilla de calibración la cuál es utilizada en el proceso de PM para encontrar todas las coordenadas bidimensionales de los centros de las cruces presentes en la imagen. Los ángulos horizontales ϕ_{ij} y verticales γ_{ij} de cada uno de estas cruces se pueden obtener de la siguiente forma:

$$\phi_{ij} = \left(I_i - \frac{D_h}{2} \right) \cdot R_h \quad (3.11)$$

$$\gamma_{ij} = \left(\frac{D_v}{2} - I_j \right) \cdot R_v \quad (3.12)$$

donde I_i y I_j representan las coordenadas en píxeles del centro de una cruz de la imagen izquierda, R_h y R_v son las resoluciones medidas en grados/píxel en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, y por último, D_h y D_v son las dimensiones horizontal y vertical de la imagen, respectivamente. El proceso continua alineando ahora el centro de la rejilla de calibración con el píxel central de la imagen derecha de manera que solo queden separados por la distancia l como en el proceso anterior. Después se procede de la misma manera que como se realizó con la imagen izquierda, empleando el proceso de PM de una imagen muestra de la cruz de la rejilla de calibración para localizar todas las coordenadas bidimensionales de los centros presentes en la imagen derecha. En este caso ya no es necesario obtener la información de ángulos verticales en la imagen derecha ya que el diseño del sistema hace que estos ángulos sean los mismos en la imagen izquierda y derecha, por lo que solo se procede a obtener los ángulos horizontales ϕ_{ij} mediante la siguiente relación:

$$\phi_{ij} = \left(R_i - \frac{D_h}{2} \right) \cdot R_h \quad (3.13)$$

donde R_i representa la coordenada en píxel del centro de una cruz de la imagen derecha.

3.3.4. Obtención de la Ecuación Polinomial por LS

Con los ángulos obtenidos se procede a encontrar un procedimiento que logre minimizar los errores cuadráticos absolutos de los ángulos horizontales y verticales obtenidos, esto es:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\alpha_{ij} - \varphi_{ij}|^2 \right\} \quad (3.14)$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\alpha_{ij} - \phi_{ij}|^2 \right\} \quad (3.15)$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |v_{ij} - \gamma_{ij}|^2 \right\} \quad (3.16)$$

Estos problemas de minimización son resueltos usando LS [Quintanilla et al., 2005], de donde se obtienen los ángulos de ajuste ΔB_{ij} , ΔC_{ij} y $\Delta \beta_{ij}$ los cuales serán utilizados para corregir todos los ángulos que se obtienen en el SVE. El método LS puede obtener una ecuación polinomial de cualquier orden la cuál modela cada uno de estos ángulos de ajuste. En esta investigación, se consideró hasta una ecuación de tercer orden ya que considerar un mayor orden traerían resultados muy similares según experimentaciones realizadas. Por consiguiente, empleando el método LS se obtuvieron tres ecuaciones polinomiales para cada ángulo de ajuste de la siguiente manera:

$$\Delta B_{ij} = \sum_{n=0}^3 A_n \cdot \varphi_{ij}^n \quad (3.17)$$

$$\Delta C_{ij} = \sum_{n=0}^3 B_n \cdot \phi_{ij}^n \quad (3.18)$$

$$\Delta \beta_{ij} = \sum_{n=0}^3 C_n \cdot \gamma_{ij}^n \quad (3.19)$$

donde A_n , B_n and C_n son coeficientes de ajuste que se obtienen en el proceso de LS. Como se ha mencionado anteriormente, para la corrección de las mediciones se consideran los ángulos B_{ij} , C_{ij} y β_{ij} obtenidos del SVE, a los cuales se les agrega su respectivo ángulo de ajuste ΔB_{ij} , ΔC_{ij} y $\Delta \beta_{ij}$ para cada par de proyecciones bidimensionales de los puntos localizados en la escena, obteniendo los ángulos calibrados Bc_{ij} , Cc_{ij} y βc_{ij} de la siguiente manera:

$$Bc_{ij} = B_{ij} + \Delta B_{ij} \quad (3.20)$$

$$Cc_{ij} = C_{ij} + \Delta C_{ij} \quad (3.21)$$

$$\beta c_{ij} = \beta_{ij} + \Delta \beta_{ij} \quad (3.22)$$

3.4. Desarrollo del Sistema de Control Servo-Visual

En esta sección se muestra el procedimiento desarrollado para controlar un mecanismo que cuenta con 2 servomotores por medio de la información de las imágenes. Este sistema cuenta con un láser en el extremo final del mecanismo el cuál apunta hacia la escena a analizar. Generalmente, en un SVE se consideran escenas las cuales cuentan con un patron definido para lograr la correspondencia estereoscópica en las imágenes. El problema surge cuando existe una escena en donde no hay un patron definido, que es lo que comúnmente se tendría en una escena en particular. La inclusión de este láser en el extremo del mecanismo se utiliza como referencia para poder localizar la región de la imagen que se desea analizar debido a que el láser arroja un rayo de luz que incide en esa región la cuál puede ser captado por las imágenes y asi poder dar paso al proceso de correspondencia estereoscópica.

3.4.1. Diagrama de Flujo del Sistema de Control Servo-Visual

La Figura 3.8 muestra el diagrama de flujo del proceso que sigue el sistema de control servo-visual para el desplazamiento del mecanismo a la posición deseada. El proceso de control del mecanismo empieza detectando la ubicación del láser en la escena en ambas imágenes. Después, se procede a encontrar el centroide de los rayos de luz en el par de imágenes para considerarlos como los puntos bidimensionales que se utilizarán para encontrar las coordenadas tridimensionales del punto empleando el SVE. El valor de esta coordenada será comparada con las coordenadas deseadas del punto, procediendo a desplazar el mecanismo a las direcciones que necesite para lograr llegar al punto deseado. Después de este desplazamiento se volverá a repetir el proceso de captura de imágenes, realizando la detección del centroide del láser en ambas imágenes considerando la nueva posición que tenga, se encontrará la nueva medida tridimensional del punto y se hará de nuevo la comparación hasta que esta posición sea lo más parecida a la posición deseada, de lo contrario, el mecanismo seguirá desplazándose y el proceso seguira repitiéndose.

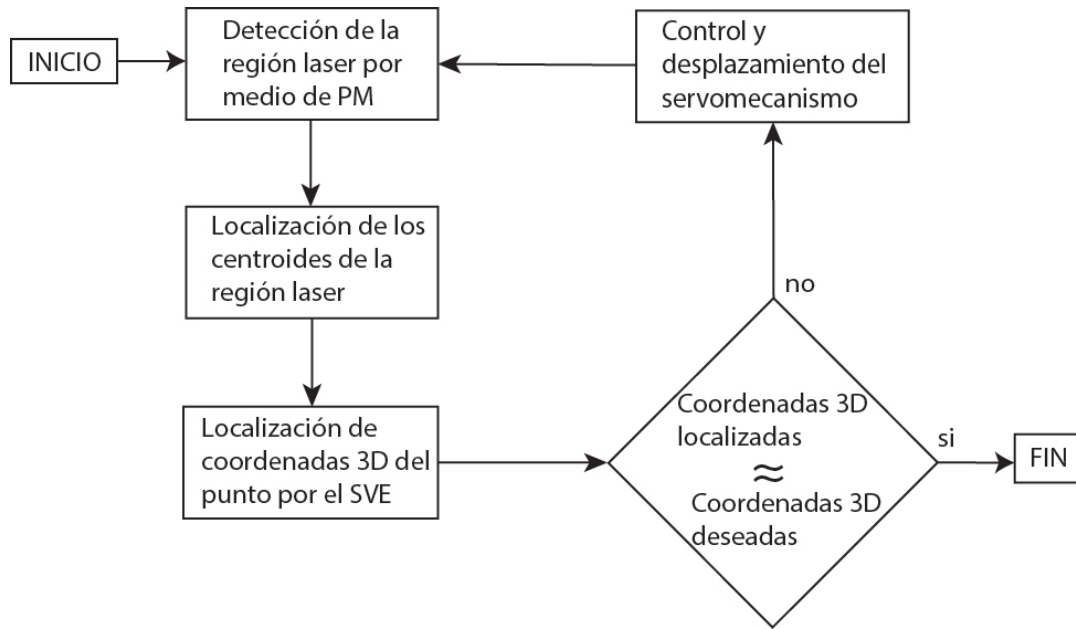


FIGURA 3.8: Diagrama de flujo del sistema de control servo-visual.

3.4.2. Localización del Centroide del Rayo de Luz

Este proceso consiste de localizar el punto central del rayo de luz identificado en las 2 imágenes. La Figura 3.9 muestra un ejemplo de la detección del centroide de un rayo láser en un par de imágenes estéreo.

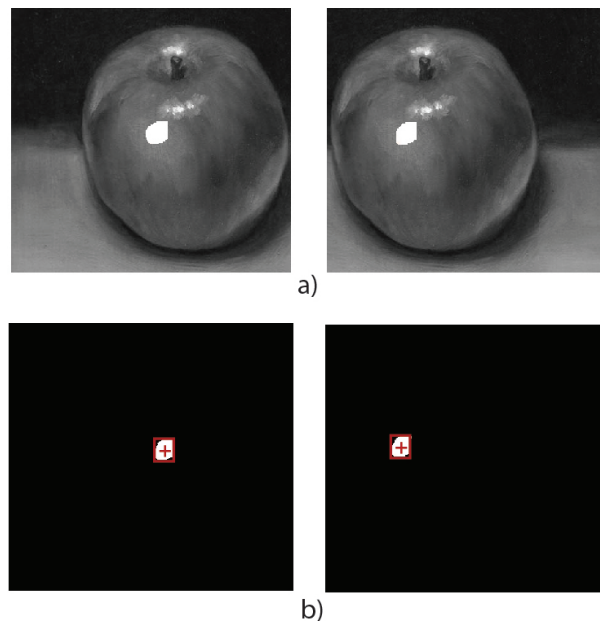


FIGURA 3.9: Localización del centroide de un rayo de luz en una imagen estéreo.
 a) Imágenes estéreo que contienen un rayo de luz. b) Localización del centroide del rayo de luz en donde se filtran los demás píxeles de las imágenes.

Como se muestra en la figura, se debe primero detectar la región que contiene el rayo de luz en la imagen. Para esto se realiza una imagen binaria en la que se filtran todos los píxeles que no corresponden al rayo de luz los cuales tendrán un menor número en la escala de grises (valores menores a 256) que los valores que contienen los píxeles del rayo láser (valor de 256 en escala de grises para estos píxeles). Todos los píxeles filtrados tendrán un valor de 0 (píxeles negros), teniendo únicamente valores de 256 en cada uno de los píxeles que componen el rayo láser. Para la obtención de las coordenadas del centroide del rayo láser C_x y C_y se tiene la siguiente relación para cada imagen:

$$C_x = \frac{\sum_{i=0}^n (X_i \cdot V_i)}{\sum_{i=0}^n V_i} \quad (3.23)$$

$$C_y = \frac{\sum_{i=0}^n (Y_i \cdot V_i)}{\sum_{i=0}^n V_i} \quad (3.24)$$

donde X_i y Y_i son las coordenadas horizontal y vertical de un pixel en la imagen, respectivamente; V_i es el valor numérico de cada pixel, y n es el número total de píxeles que intervienen en el rayo de luz.

3.4.3. Conversión de la señal PWM a Grados

La señal dirigida hacia los servomotores depende del valor de la coordenada tridimensional del punto obtenido con el SVE. Esta señal pasa de una cantidad numérica digital que representa las coordenadas del punto a una señal PWM que es convertida por un CVS encargado de procesar la información de las imágenes. Los sistemas servomotores controlan su movimiento en un cierto rango de señal PWM mínima para un valor de 0° a una señal máxima para un valor de 180° . La Figura 3.10 muestra la respuesta del movimiento del servomotor en grados con respecto a la señal PWM que recibe.

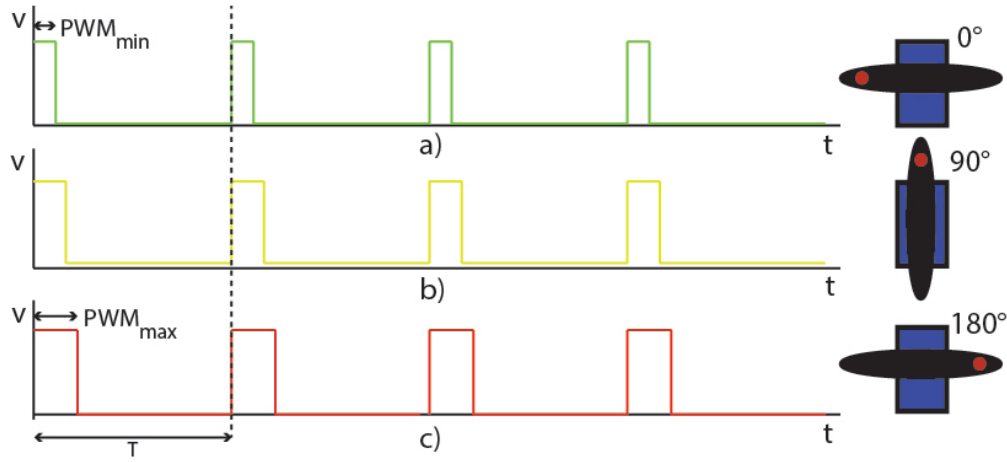


FIGURA 3.10: Respuesta en grados del servomotor con respecto a la señal PWM recibida. a) Señal PWM mínima para 0° . b) Señal PWM para 90° . c) Señal PWM máxima para 180° .

3.4.4. Control del Servomecanismo

El proceso de control se da cuando se busca determinar la señal adecuada a los servomotores para que estos se posicionen al punto deseado en la escena. Como se indicó anteriormente, se tiene la posición actual obtenida por el SVE del láser, el cual indica la posición del servomecanismo. En el sistema desarrollado se tienen 2 servomotores los cuales se desplazan sobre el plano $Y_w Z_w$ y tiene como objetivo posicionar al láser en (Y_{wi}, Z_{wj}) que representan las coordenada horizontal y vertical del punto deseado, respectivamente. Teniendo el punto (Y_{ri}, Z_{rj}) como la coordenada de ubicación del servomecanismo, el desplazamiento a realizar en las direcciones horizontal y vertical esta dado por la siguiente relación:

$$Ds_h = K_{ph} \left[(Y_{ri} - Y_{wi}) + \frac{1}{T_{ih}} \int (Y_{ri} - Y_{wi}) dt + T_{dh} \frac{d(Y_{ri} - Y_{wi})}{dt} \right] \quad (3.25)$$

$$Ds_v = K_{pv} \left[(Z_{rj} - Z_{wj}) + \frac{1}{T_{iv}} \int (Z_{rj} - Z_{wj}) dt + T_{dv} \frac{d(Z_{rj} - Z_{wj})}{dt} \right] \quad (3.26)$$

donde Ds_h es la distancia entre la ubicación del servomecanismo y el punto deseado en la dirección horizontal, Ds_v es la distancia entre la ubicación del servomecanismo y el punto deseado en la dirección vertical, K_{ph} y K_{pv} son las ganancias proporcionales en la dirección horizontal y vertical, respectivamente; T_{ih} y T_{iv} son

las constantes de integración en la dirección horizontal y vertical, respectivamente; además, T_{dh} y T_{dv} son las constantes de tiempo derivativas en la dirección horizontal y vertical, respectivamente. Para cada posicionamiento del servomecanismo se debe considerar una señal PWM que represente su ubicación horizontal y vertical. Esta relación esta dada de la siguiente manera:

$$PWMh_d = PWMh_i + \frac{(Y_{ri} - lh_i)(PWMh_F - PWMh_i)}{lh_F - lh_i} \quad (3.27)$$

$$PWMv_d = PWMv_i + \frac{(Z_{ri} - lv_i)(PWMv_F - PWMv_i)}{lv_F - lv_i} \quad (3.28)$$

donde $PWMh_d$ y $PWMv_d$ son los desplazamientos que debe realizar el servomecanismo en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, $(PWMh_i, PWMh_f)$ y $(PWMv_i, PWMv_f)$ son los límites mínimo y máximo que puede tener la señal PWM dentro de la imagen en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, y (lh_i, lh_F) y (lv_i, lv_F) son los límites mínimo y máximo de los valores en coordenada real dentro de la imagen en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente. Considerando el desplazamiento horizontal Ds_h y vertical Ds_v que debe realizar el servomecanismo, la señal PWM próxima $PWMh_{d+}$ y $PWMv_{d+}$ de desplazamiento para el mecanismo en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, esta dado de la siguiente manera:

$$PWMh_{d+} = PWMh_i + \frac{(Y_{ri} - Ds_h - lh_i)(PWMh_F - PWMh_i)}{lh_F - lh_i} \quad (3.29)$$

$$PWMv_{d+} = PWMv_i + \frac{(Z_{ri} - Ds_v - lv_i)(PWMv_F - PWMv_i)}{lv_F - lv_i} \quad (3.30)$$

Capítulo 4

Análisis de Resultados

Para comprobar la mejora en los resultados de mediciones 3D del método de calibración desarrollado y el empleo del sistema de control servo-visual para el escaneo de superficies utilizando SVE, se realizan dos experimentos diferentes: en el primero se realiza una comparación entre los valores conocidos de una rejilla de prueba y datos obtenidos con el SVE. Se obtienen resultados de las mediciones con y sin la utilización del método de calibración realizado a diferentes alturas comprendidas entre los sensores CCD de las cámaras y la rejilla de prueba. En el segundo experimento se realiza un escaneo de la superficie de una pieza trapezoidal manipulando un servomecanismo que lleva un láser en el extremo final utilizando el SVE. El mecanismo se va posicionando en una región determinada de la pieza hasta lograr el escaneo de la superficie. La Figura 4.1 muestra el equipo de pruebas utilizado para la experimentación desarrollada.

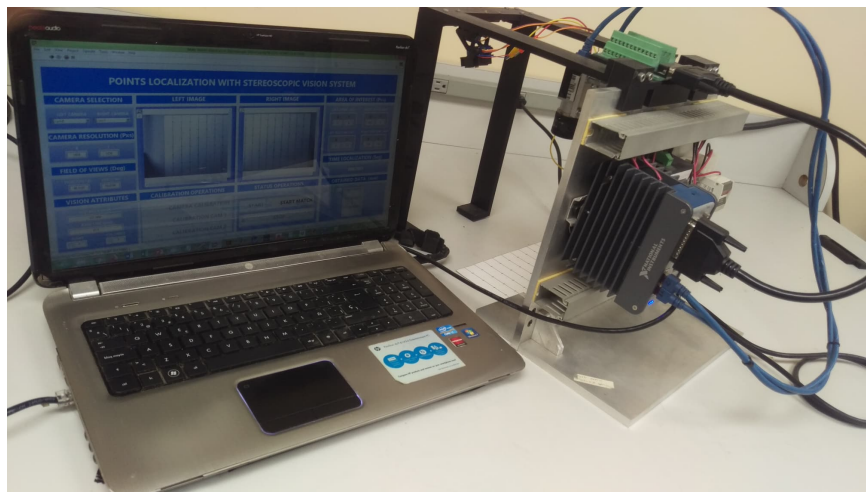


FIGURA 4.1: Equipo de pruebas utilizado para la experimentación.

4.1. Características del Equipo Experimental

El equipo utilizado para la experimentación junto con su marca y modelo se muestra en la Tabla 4.1.

Equipo	Marca	Modelo
Cámaras	Basler	acA1600-20gm
CVS	NI	1458RT
Servomotores	Tecneu	SG90
Laptop	HP	Pavilion dv7-6143

TABLA 4.1: Características del equipo utilizado.

El par de cámaras capturan imágenes en blanco y negro, contando con una resolución de 1626px X 1236px, 20 frames por segundo (FPS) y una profundidad de píxeles de 12 bits. El CVS cuenta con un procesador intel Atom quad core 1.91GHz con entradas y salidas digitales TTL y un sistema operativo Linux. Los servomotores soportan un torque de 1.6 kg con un rango de operación de 3-5 volts y un desplazamiento de 60 grados cada 0.12 segundos. El equipo de cómputo cuenta con un procesador intel core i7-2630QM 2.00GHz y un sistema operativo windows 8.1 de 64 bits. El software utilizado para el diseño de los algoritmos y la experimentación fue LabVIEW de la compañía National Instruments en su versión 2016 en el que se crearon interfaces gráficas y se obtienen resultados de puntos tridimensionales de una rejilla de prueba. La Figura 4.2 muestra el panel frontal en LabVIEW utilizado para las experimentaciones desarrolladas.

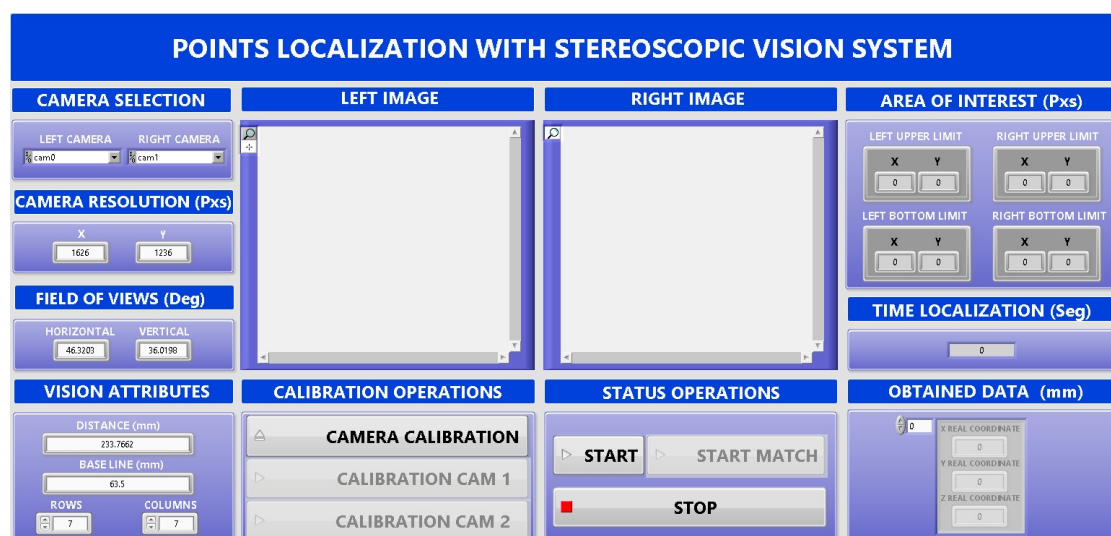


FIGURA 4.2: Programa realizado en LabVIEW para la experimentación.

4.2. Experimentación y Resultados de las Mediciones 3D Empleando el Método de Calibración Desarrollado en el SVE

En el primer experimento se considera una rejilla de prueba como la que se muestra en la Figura 4.3. Las características principales de esta rejilla es que cuenta con una cuadrícula de 7 X 9 cruces con una separación de 2 centímetros de forma horizontal y vertical entre ellas, de las cuáles el algoritmo busca las coordenadas tridimensionales de los centros de cada una que se encuentren en el FOV efectivo del SVS.

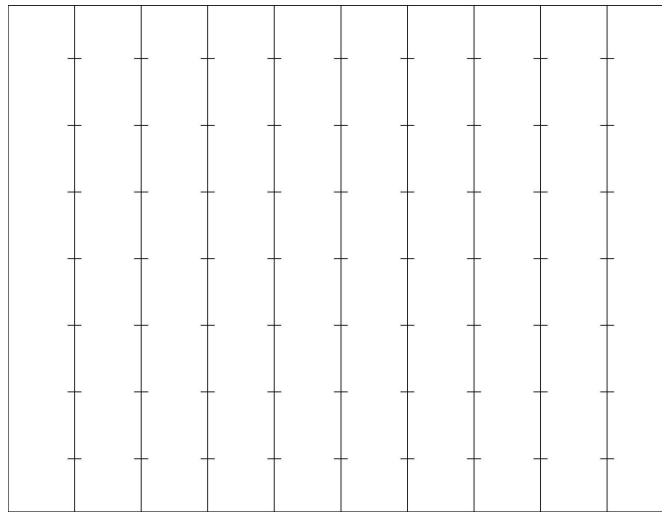


FIGURA 4.3: Rejilla de prueba utilizada en la experimentación.

El procedimiento que se realiza en esta experimentación es primero localizar el centro de las cruces de esta rejilla de prueba utilizando el SVE. Después, se emplea el método de calibración desarrollado dentro del SVE y se vuelven a obtener las mediciones descritas anteriormente. En la Figura 4.4 se muestra el diseño del SVE operando en un punto de la rejilla de prueba. Las coordenadas de origen comienzan en el centro de la rejilla de prueba con una medida en las coordenadas del mundo real (X_w, Y_w, Z_w) de $(l, 0, 0)$. Las especificaciones de los rangos de medición se consideran según el FOV horizontal y vertical de las cámaras con valores de 46.32° y 36.01° , respectivamente. La rejilla de prueba tiene un rango de medidas que van de -8 a 8 centímetros en su eje horizontal, y de -6 a 6 centímetros en su eje vertical. Como se observa en la Figura 4.4 el diseño emplea una línea base b con un valor de 63.5 milímetros y una altura l variable comprendida entre los sensores

CCD de las cámaras y la rejilla de prueba. En la experimentación desarrollada se obtienen coordenadas tridimensionales del centro de las cruces a diferentes alturas. Después, se realizan comparaciones entre datos ideales y datos obtenidos con el sistema desarrollado con y sin la utilización del método de calibración dentro del SVE. Para cada distancia l se tiene un FOV efectivo que determina la cantidad de puntos que se pueden analizar en rejilla de prueba. La cantidad de puntos analizados para cada distancia l empleada se puede apreciar en la Tabla 4.2.

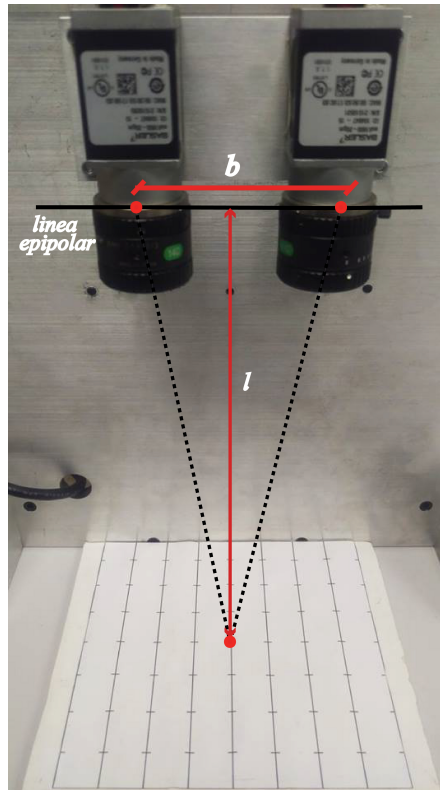


FIGURA 4.4: Operación del SVS en un punto de la rejilla de prueba.

Altura l (cm)	Puntos Analizados
22.87	49
21.87	35
20.87	35
19.87	35
18.87	25
17.87	25
16.87	15
15.87	15
14.87	15
13.87	15

TABLA 4.2: Cantidad de puntos analizados para cada altura empleada.

4.2.1. Resultados de Mediciones a Una Altura de 22.87 Centímetros

La Tabla 4.3 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 22.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.4 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
22.87	-4	6	23.72	-3.97	6.20	0.84	0.02	0.20
22.87	2	6	24.01	2.05	6.22	1.13	0.05	0.22
22.87	-4	4	23.52	-3.98	4.09	0.64	0.01	0.09
22.87	2	4	23.92	2.04	4.10	1.04	0.04	0.10
22.87	-2	2	23.97	-2.01	2.06	1.10	0.01	0.06
22.87	2	2	23.87	2.03	2.03	1.00	0.03	0.03
22.87	-2	0	23.92	-2.02	0.01	1.05	0.02	0.01
22.87	-2	-2	23.92	-2.03	-2.04	1.04	0.03	0.04
22.87	0	-4	24.04	-0.01	-4.15	1.17	0.01	0.15
22.87	2	-6	24.11	2.01	-6.28	1.24	0.01	0.28

TABLA 4.3: Localización de coordenadas 3D a una altura de 22.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
22.87	-4	6	23.11	-3.99	6.13	0.23	0.01	0.13
22.87	2	6	23.04	2.04	6.06	0.16	0.04	0.06
22.87	-4	4	22.93	-4.00	4.08	0.05	0.01	0.08
22.87	2	4	22.95	2.03	4.02	0.08	0.03	0.02
22.87	-2	2	22.98	-1.99	2.03	0.11	0.01	0.03
22.87	2	2	22.91	2.02	2.00	0.03	0.02	0.01
22.87	-2	0	22.94	-2.00	0.01	0.06	0.01	0.01
22.87	-2	-2	22.94	-2.02	-2.02	0.06	0.02	0.02
22.87	0	-4	22.93	-0.01	-4.04	0.06	0.01	0.04
22.87	2	-6	23.13	2.00	-6.10	0.25	0.01	0.10

TABLA 4.4: Localización de coordenadas 3D a una altura de 22.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 49 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.69cm, 0.04cm y 0.09cm dentro de las coordenadas x, y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.13cm, 0.03cm y 0.05cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 81.07 %, 17.47 % y 45.12 %, respectivamente. La Figura 4.5 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

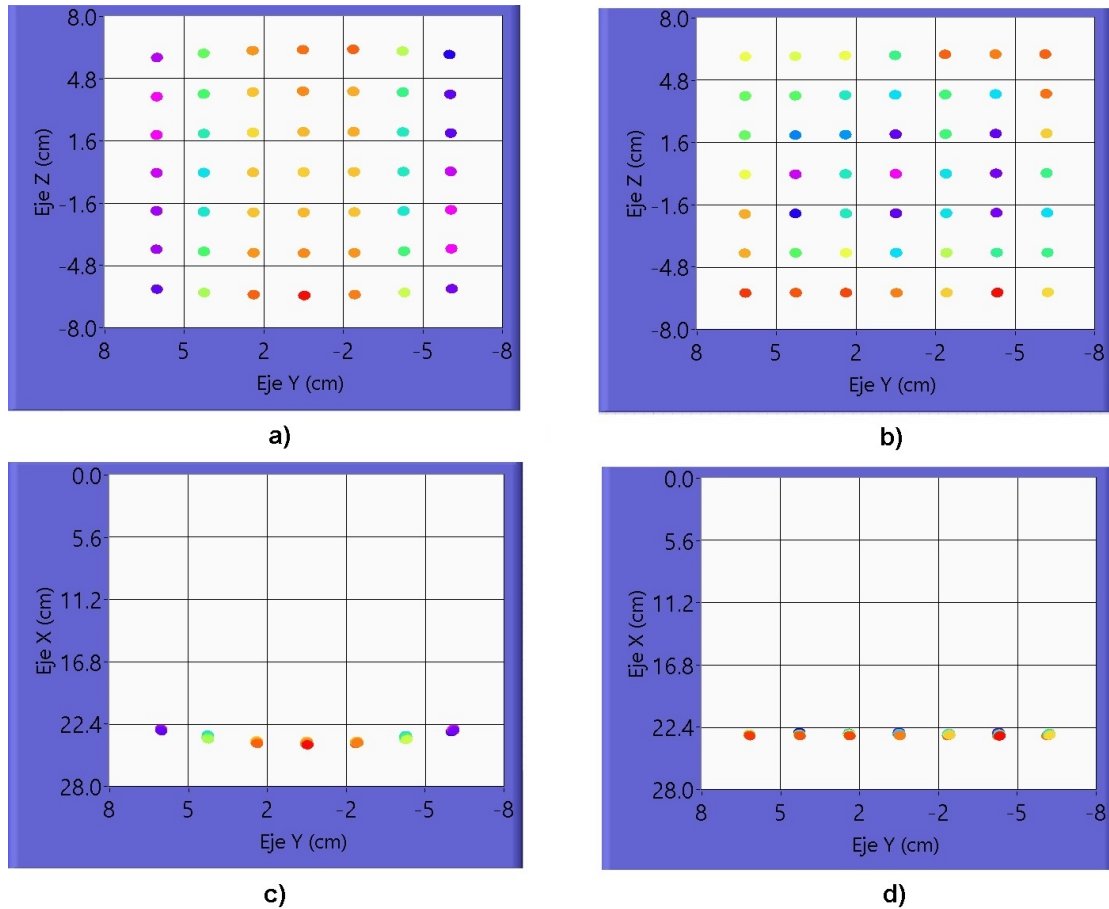


FIGURA 4.5: Gráficas de mediciones a 22.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

Como se aprecia en 4.5a, el plano YZ utilizando el SVE sin calibración muestra una desviación de los datos semejante a una distorsión de barril. También se puede apreciar como en 4.5c se afecta en mayor medida a la coordenada x la cual representa la coordenada de profundidad. Al utilizar el método de calibración dentro del SVE se puede notar en 4.5b y 4.5d como estos errores fueron compensados y por consiguiente mejoraron las mediciones obtenidas.

4.2.2. Resultados de Mediciones a Una Altura de 21.87 Centímetros

La Tabla 4.5 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 21.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.6 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
21.87	-4	6	22.68	-3.98	6.19	-0.81	-0.01	-0.19
21.87	2	6	22.94	2.03	6.21	-1.06	-0.03	-0.21
21.87	-2	4	22.98	-2.00	4.14	-1.11	0.01	-0.14
21.87	4	4	22.50	4.01	4.00	-0.62	-0.01	-0.01
21.87	4	2	22.41	4.01	1.97	-0.53	-0.01	0.02
21.87	-4	-2	22.36	-4.02	-2.00	-0.49	0.02	0.01
21.87	4	-2	22.32	4.00	-2.02	-0.45	-0.01	0.02
21.87	2	-4	22.94	2.02	-4.14	-1.06	-0.02	0.14
21.87	-2	-6	22.98	-2.04	-6.28	-1.10	0.04	0.28
21.87	4	-6	22.59	3.99	-6.16	-0.72	0.01	0.16

TABLA 4.5: Localización de coordenadas 3D a una altura de 21.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
21.87	-4	6	22.11	-3.99	6.12	-0.24	-0.01	-0.12
21.87	2	6	22.01	2.02	6.04	-0.13	-0.02	-0.04
21.87	-2	4	22.01	-1.98	4.07	-0.14	-0.01	-0.07
21.87	4	4	21.96	4.03	4.00	-0.09	-0.03	-0.01
21.87	4	2	21.88	4.03	1.99	-0.01	-0.03	0.01
21.87	-4	-2	21.86	-4.04	-2.01	0.01	0.04	0.01
21.87	4	-2	21.80	4.02	-2.02	0.06	-0.02	0.02
21.87	2	-4	22.01	2.01	-4.04	-0.13	-0.01	0.04
21.87	-2	-6	22.05	-2.03	-6.08	-0.18	0.03	0.08
21.87	4	-6	22.05	4.01	-6.07	-0.17	-0.01	0.07

TABLA 4.6: Localización de coordenadas 3D a una altura de 21.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 35 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.86cm, 0.02cm y 0.11cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.11cm, 0.019cm y 0.05cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 86.78 %, 10.7 % y 56.12 %, respectivamente. La Figura 4.6 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

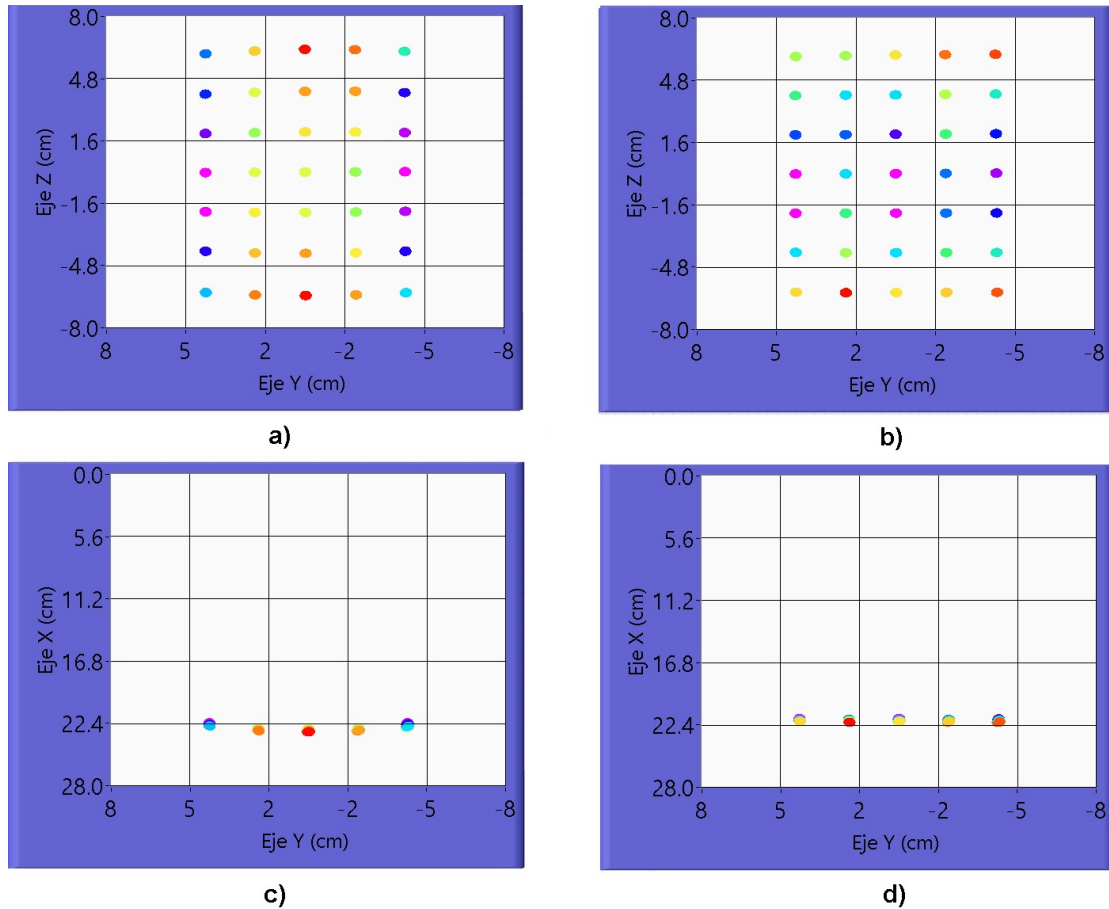


FIGURA 4.6: Gráficas de mediciones a 21.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

La cantidad de mediciones a obtener depende del FOV efectivo el cuál es el FOV en donde las cámaras ven una misma región de la escena. A una menor altura, este FOV efectivo va disminuyendo y con esto, se van teniendo una menor cantidad de puntos. Sin embargo, se puede apreciar en 4.5a y 4.6c los mismos problemas vistos en la experimentación anterior los cuáles fueron atenuados por el método de calibración desarrollado, obteniéndose resultados como los vistos en 4.6b y 4.6d.

4.2.3. Resultados de Mediciones a Una Altura de 20.87 Centímetros

La Tabla 4.7 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 20.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.8 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
20.87	-2	6	21.95	-2.01	6.25	-1.08	0.01	-0.25
20.87	2	6	21.91	2.01	6.22	-1.04	-0.01	-0.22
20.87	4	6	21.45	3.98	6.05	-0.57	0.01	-0.05
20.87	2	4	21.80	2.01	4.08	-0.92	-0.01	-0.08
20.87	4	4	21.40	3.99	3.98	-0.53	0.01	0.01
20.87	2	2	21.76	2.01	2.01	-0.88	-0.01	-0.01
20.87	-2	0	21.75	-2.02	-0.01	-0.88	0.02	0.01
20.87	-2	-2	21.71	-2.02	-2.06	-0.84	0.02	0.06
20.87	-2	-4	21.83	-2.03	-4.15	-0.95	0.03	0.15
20.87	4	-6	21.48	3.99	-6.16	-0.61	0.01	0.16

TABLA 4.7: Localización de coordenadas 3D a una altura de 20.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
20.87	-2	6	21.08	-2.01	6.08	-0.20	0.01	-0.08
20.87	2	6	21.06	2.01	6.06	-0.18	-0.01	-0.06
20.87	4	6	21.04	4.01	6.02	-0.16	-0.01	-0.02
20.87	2	4	20.95	2.00	4.01	-0.07	-0.01	-0.01
20.87	4	4	21.01	4.01	3.99	-0.12	-0.01	0.01
20.87	2	2	20.91	2.00	1.99	-0.03	-0.01	0.01
20.87	-2	0	20.90	-2.01	-0.01	-0.02	0.01	0.01
20.87	-2	-2	20.86	-2.01	-2.02	0.01	0.01	0.02
20.87	-2	-4	20.97	-2.02	-4.06	-0.09	0.02	0.06
20.87	4	-6	21.07	4.02	-6.08	-0.20	-0.02	0.08

TABLA 4.8: Localización de coordenadas 3D a una altura de 20.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 35 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.99cm, 0.04cm y 0.25cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.10cm, 0.01cm y 0.05cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 89.14 %, 56.97 % y 80.33 %, respectivamente. La Figura 4.7 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

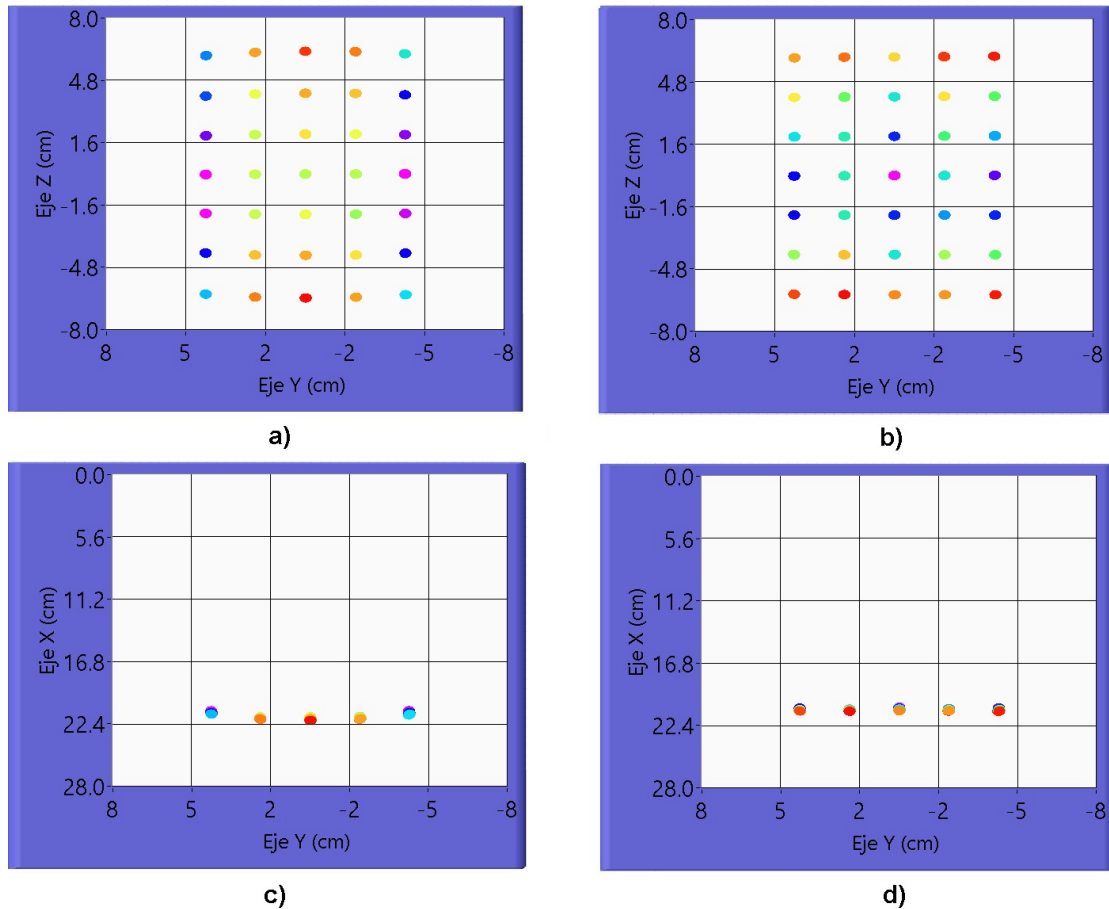


FIGURA 4.7: Gráficas de mediciones a 20.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

Al igual que la experimentación anterior, en este también se analizan 35 mediciones y se vuelve a apreciar una corrección de medición al utilizar el método de calibración desarrollado. En este caso se puede destacar que se obtuvo un mayor porcentaje de reducción de la media del error absoluto en la coordenada y a diferencia de las anteriores experimentaciones realizadas.

4.2.4. Resultados de Mediciones a Una Altura de 19.87 Centímetros

La Tabla 4.9 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 19.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.10 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
19.87	-4	6	20.61	-4.01	6.18	-0.73	0.01	-0.18
19.87	2	6	20.97	2.02	6.26	-1.09	-0.02	-0.26
19.87	-2	4	20.97	-2.02	4.14	-1.09	0.02	-0.14
19.87	4	4	20.46	4.01	3.99	-0.59	-0.01	0.01
19.87	4	2	20.39	4.01	1.97	-0.51	-0.01	0.02
19.87	-4	-2	20.27	-4.02	-2.01	-0.40	0.02	0.01
19.87	4	-2	20.31	4.02	-2.01	-0.43	-0.02	0.01
19.87	2	-4	20.97	2.03	-4.15	-1.09	-0.03	0.15
19.87	-2	-6	21.00	-2.04	-6.35	-1.12	0.04	0.35
19.87	4	-6	20.53	4.02	-6.16	-0.66	-0.02	0.16

TABLA 4.9: Localización de coordenadas 3D a una altura de 19.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
19.87	-4	6	20.19	-4.02	6.13	-0.31	0.02	-0.13
19.87	2	6	20.17	2.01	6.09	-0.29	-0.01	-0.09
19.87	-2	4	20.17	-2.01	4.08	-0.29	0.01	-0.08
19.87	4	4	20.08	4.03	4.01	-0.20	-0.03	-0.01
19.87	4	2	20.01	4.04	2.00	-0.13	-0.04	-0.01
19.87	-4	-2	19.88	-4.04	-2.02	-0.01	0.04	0.03
19.87	4	-2	19.94	4.04	-2.02	-0.06	-0.04	0.02
19.87	2	-4	20.17	2.02	-4.07	-0.29	-0.02	0.07
19.87	-2	-6	20.20	-2.03	-6.14	-0.33	0.03	0.14
19.87	4	-6	20.15	4.04	-6.07	-0.27	-0.04	0.07

TABLA 4.10: Localización de coordenadas 3D a una altura de 19.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 35 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.85cm, 0.02cm y 0.12cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.20cm, 0.02cm y 0.06cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 76.64 %, 8.44 % y 50.08 %, respectivamente. La Figura 4.8 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

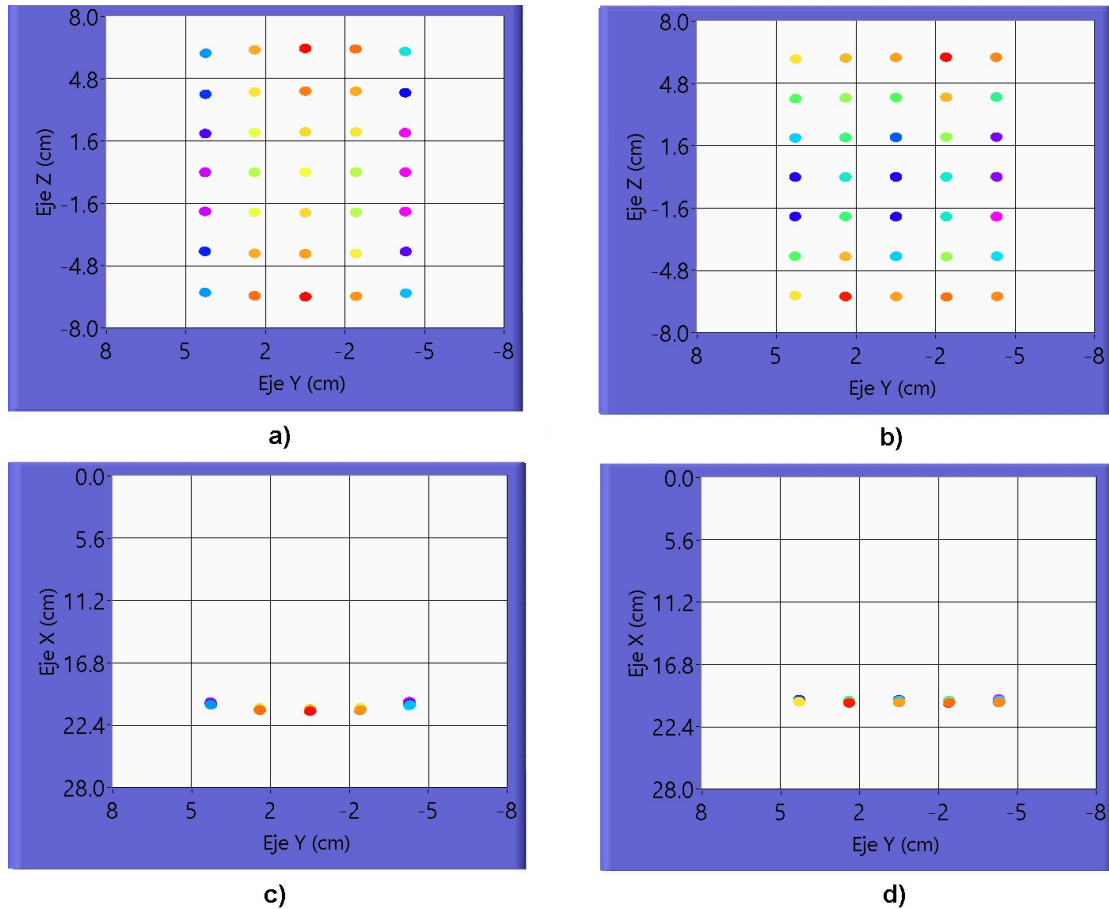


FIGURA 4.8: Gráficas de mediciones a 19.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

En la Figura 4.8 se puede seguir observando la mejora de las mediciones tridimensionales al utilizar el método de calibración desarrollado. También se sigue mostrando un análisis de 35 mediciones como en los 2 experimentos anteriores, sin embargo, en este caso es en el que se ha obtenido el menor porcentaje de reducción de la media del error absoluto en las coordenadas x y y .

4.2.5. Resultados de Mediciones a Una Altura de 18.87 Centímetros

La Tabla 4.11 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 18.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.12 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
18.87	-2	4	19.80	-2.04	4.13	-0.92	0.04	-0.13
18.87	2	4	19.74	2.01	4.11	-0.86	-0.01	-0.11
18.87	-4	2	19.15	-4.02	1.99	-0.27	0.02	0.01
18.87	0	2	19.78	-0.01	2.06	-0.91	0.01	-0.06
18.87	-2	0	19.67	-2.02	-0.01	-0.80	0.02	0.01
18.87	2	0	19.67	2.02	0	-0.80	-0.02	0
18.87	-2	-2	19.67	-2.02	-2.06	-0.80	0.02	0.06
18.87	4	-2	19.15	4.03	-1.98	-0.27	-0.03	-0.01
18.87	-2	-4	19.77	-2.02	-4.16	-0.89	0.02	0.16
18.87	2	-4	19.76	2.05	-4.13	-0.89	-0.05	0.13

TABLA 4.11: Localización de coordenadas 3D a una altura de 18.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
18.87	-2	4	19.07	-2.02	4.07	-0.19	0.02	-0.07
18.87	2	4	19.00	2.00	4.05	-0.12	-0.01	-0.05
18.87	-4	2	18.90	-4.05	2.03	-0.02	0.05	-0.03
18.87	0	2	18.90	-0.01	2.03	-0.02	0.01	-0.03
18.87	-2	0	18.95	-2.01	-0.01	-0.07	0.01	0.01
18.87	2	0	18.97	2.02	0.01	-0.09	-0.02	-0.01
18.87	-2	-2	18.95	-2.01	-2.04	-0.07	0.01	0.04
18.87	4	-2	18.86	4.06	-2.01	0.01	-0.06	0.01
18.87	-2	-4	19.04	-2.01	-4.09	-0.16	0.01	0.09
18.87	2	-4	19.03	2.04	-4.04	-0.15	-0.04	0.04

TABLA 4.12: Localización de coordenadas 3D a una altura de 18.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 25 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.62cm, 0.03cm y 0.05cm dentro de las coordenadas x, y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.06cm, 0.02cm y 0.03cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 89.31 %, 25.54 % y 43.07 %, respectivamente. La Figura 4.9 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

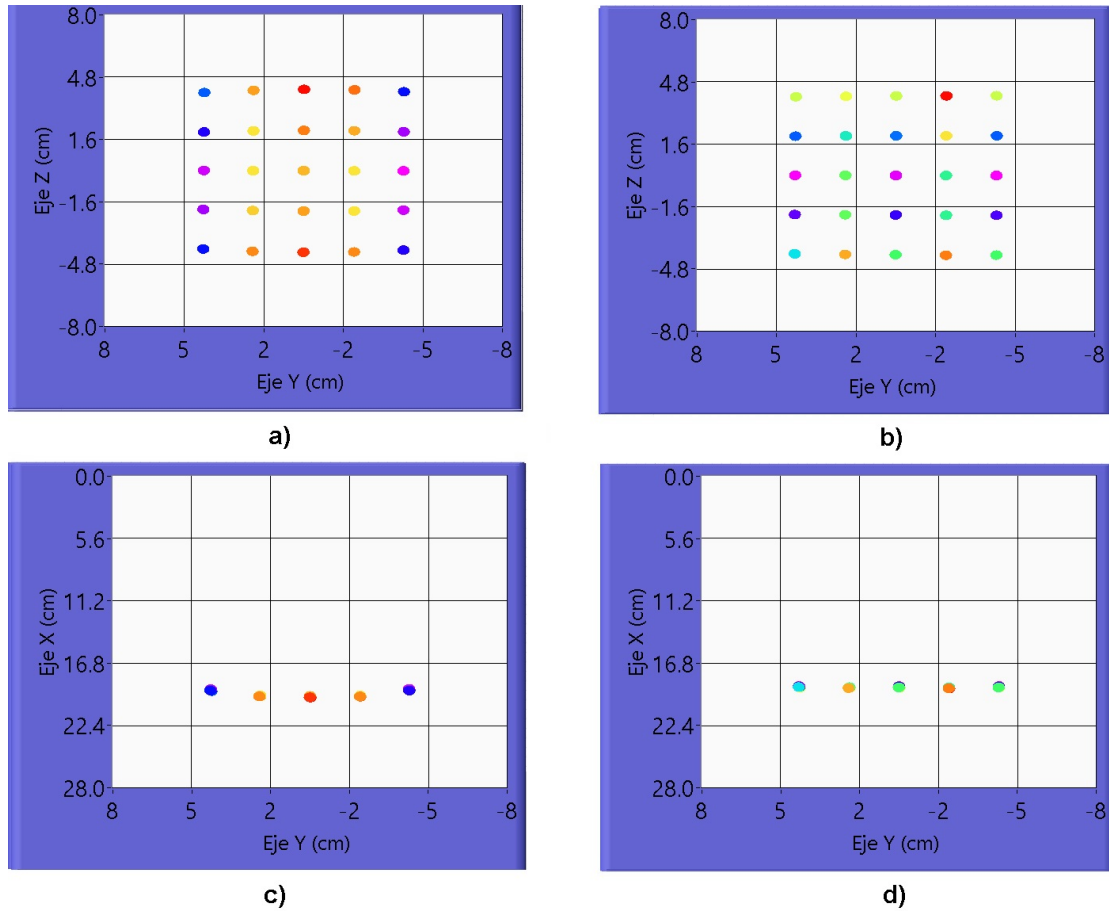


FIGURA 4.9: Gráficas de mediciones a 18.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

En esta altura se redujo el FOV efectivo de tal manera que se lograron obtener 25 mediciones. Se puede apreciar en 4.9a y 4.9b que la disminución de este FOV efectivo afectó de forma vertical, obteniendo 2 filas de 5 datos menos a diferencia de las experimentaciones anteriores, sin embargo, se sigue mostrando la mejoría de las mediciones en 4.9b y 4.9d al emplear el método de calibración desarrollado.

4.2.6. Resultados de Mediciones a Una Altura de 17.87 Centímetros

La Tabla 4.13 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 17.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.14 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
17.87	-4	4	18.10	-4.01	4.01	-0.23	0.01	-0.01
17.87	2	4	18.61	2.02	4.08	-0.73	-0.02	-0.08
17.87	4	4	18.12	3.98	3.95	-0.24	0.01	0.04
17.87	-2	2	18.61	-2.03	2.02	-0.73	0.03	-0.02
17.87	2	2	18.55	2.02	2.00	-0.67	-0.02	-0.01
17.87	4	2	18.02	4	1.94	-0.14	0	0.05
17.87	-4	-2	17.96	-4.00	-2.02	-0.08	0.01	0.02
17.87	4	-2	17.98	4.02	-1.99	-0.10	-0.02	-0.01
17.87	-4	-4	18.08	-4.00	-4.06	-0.20	0.01	0.06
17.87	4	-4	18.10	4.03	-4.02	-0.22	-0.03	0.02

TABLA 4.13: Localización de coordenadas 3D a una altura de 17.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
17.87	-4	4	17.97	-4.04	4.06	-0.10	0.04	-0.06
17.87	2	4	17.98	2.01	4.02	-0.10	-0.01	-0.02
17.87	4	4	17.96	4.01	4.00	-0.09	-0.01	-0.01
17.87	-2	2	17.98	-2.02	2.01	-0.10	0.02	-0.01
17.87	2	2	17.92	2.01	1.99	-0.05	-0.01	0.01
17.87	4	2	17.88	4.03	1.98	-0.01	-0.03	0.01
17.87	-4	-2	17.84	-4.03	-2.06	0.03	0.03	0.06
17.87	4	-2	17.85	4.05	-2.02	0.02	-0.05	0.02
17.87	-4	-4	17.92	-4.03	-4.09	-0.04	0.03	0.09
17.87	4	-4	17.96	4.06	-4.05	-0.08	-0.06	0.05

TABLA 4.14: Localización de coordenadas 3D a una altura de 17.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 25 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.49cm, 0.02cm y 0.06cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.06cm, 0.02cm y 0.04cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 86.92 %, 26.03 % y 25.76 %, respectivamente. La Figura 4.10 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

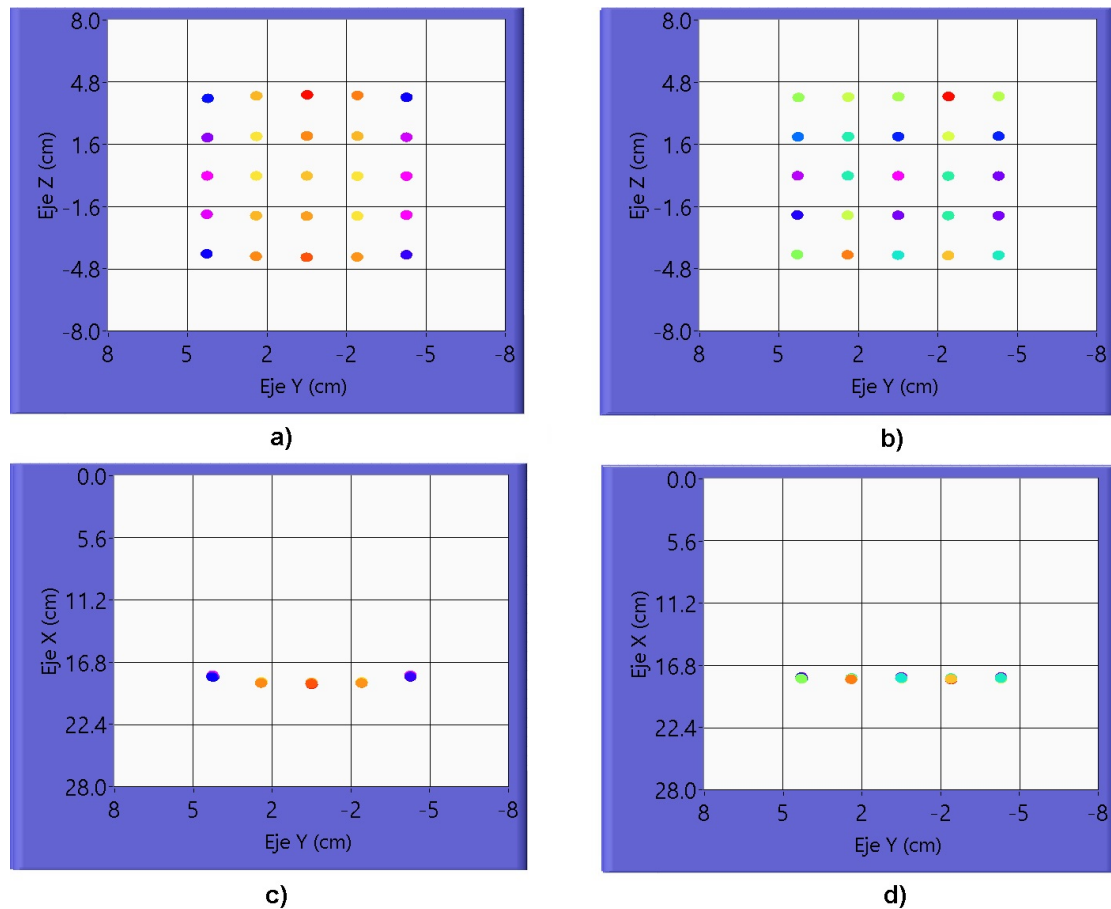


FIGURA 4.10: Gráficas de mediciones a 17.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

Los resultados de la gráfica resultante mostrados en esta altura es similar a la experimentación pasada con el análisis de 25 mediciones. Se aprecia la mejoría de mediciones en 4.10b y 4.10d al utilizar el método calibración desarrollado, sin embargo, se obtuvo el menor porcentaje de reducción de la media del error absoluto en la coordenada z a diferencia de las experimentaciones anteriores.

4.2.7. Resultados de Mediciones a Una Altura de 16.87 Centímetros

La Tabla 4.15 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 16.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.16 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
16.87	-2	4	17.62	-2.02	4.14	-0.75	0.02	-0.14
16.87	2	4	17.54	2.03	4.11	-0.66	-0.03	-0.11
16.87	-2	2	17.52	-2.02	2.05	-0.64	0.02	-0.05
16.87	0	2	17.59	0.01	2.05	-0.72	-0.01	-0.05
16.87	-2	0	17.47	-2.01	0.01	-0.59	0.01	-0.01
16.87	2	0	17.46	2.04	0	-0.59	-0.04	0
16.87	-2	-2	17.47	-2.02	-2.04	-0.59	0.02	0.04
16.87	2	-2	17.49	2.05	-2.02	-0.61	-0.05	0.02
16.87	-2	-4	17.54	-2.02	-4.14	-0.67	0.02	0.14
16.87	2	-4	17.56	2.05	-4.12	-0.69	-0.05	0.12

TABLA 4.15: Localización de coordenadas 3D a una altura de 16.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
16.87	-2	4	17.07	-2.00	4.08	-0.19	0.01	-0.08
16.87	2	4	16.99	2.02	4.05	-0.12	-0.02	-0.05
16.87	-2	2	16.97	-2.00	2.04	-0.10	0.01	-0.04
16.87	0	2	16.87	0.00	2.03	-0.01	-0.01	-0.03
16.87	-2	0	16.92	-2.00	0.01	-0.05	0.01	-0.01
16.87	2	0	16.92	2.02	0.01	-0.04	-0.02	-0.01
16.87	-2	-2	16.92	-2.01	-2.02	-0.05	0.01	0.02
16.87	2	-2	16.94	2.03	-2.01	-0.07	-0.03	0.01
16.87	-2	-4	17.00	-2.00	-4.07	-0.12	0.01	0.07
16.87	2	-4	17.02	2.03	-4.04	-0.14	-0.03	0.04

TABLA 4.16: Localización de coordenadas 3D a una altura de 16.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 15 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.67cm, 0.02cm y 0.07cm dentro de las coordenadas x, y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.08cm, 0.01cm y 0.03cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 87.86 %, 42.26 % y 51.48 %, respectivamente. La Figura 4.11 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

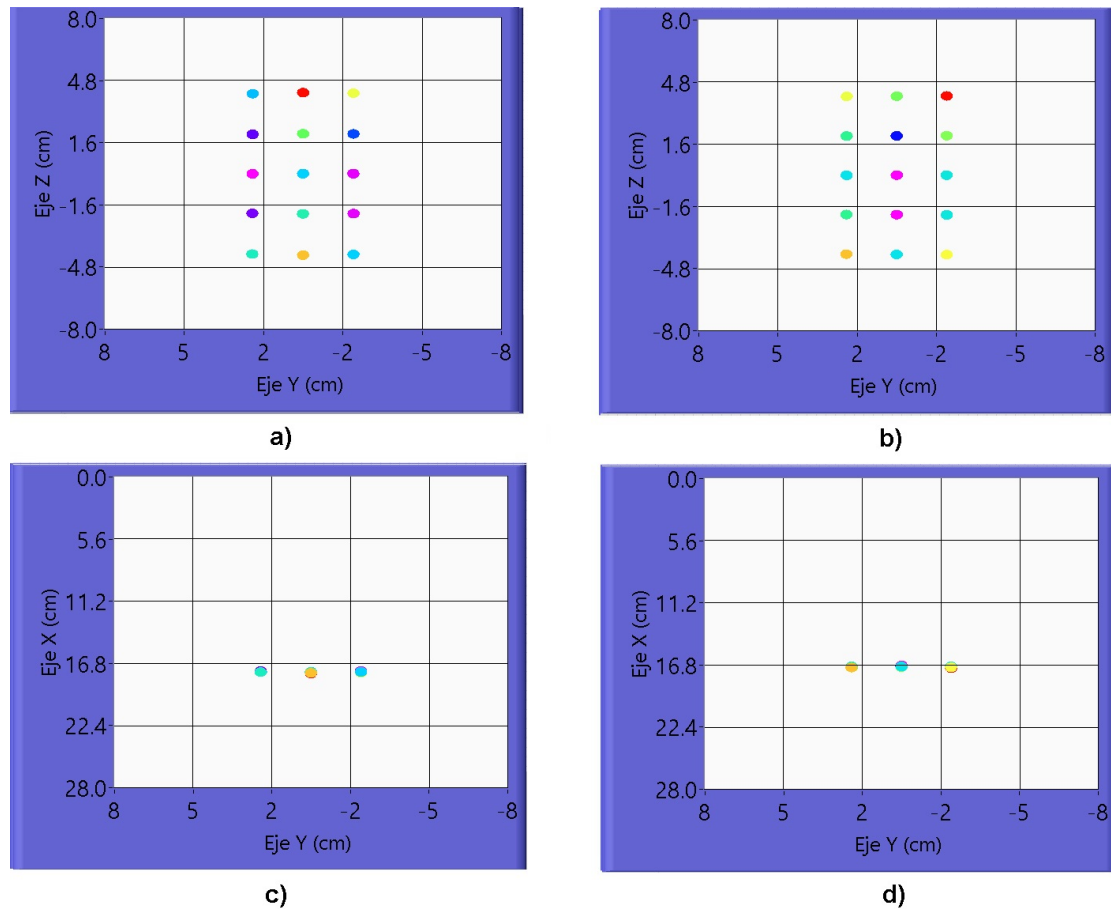


FIGURA 4.11: Gráficas de mediciones a 16.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

En esta experimentación se aprecia una disminución de 10 mediciones a diferencia de la experimentación anterior. En relación a la Figura 4.11, ya no se puede apreciar en 4.11b la mejoría de las mediciones con respecto a 4.11a, sin embargo, en 4.11d aun se puede observar un poco la corrección de la coordenada x con respecto a 4.11c al utilizar el método de calibración desarrollado.

4.2.8. Resultados de Mediciones a Una Altura de 15.87 Centímetros

La Tabla 4.17 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 15.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.18 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
15.87	2	4	16.42	2.06	4.09	-0.54	-0.06	-0.09
15.87	-2	2	16.41	-2.00	2.03	-0.53	0.01	-0.03
15.87	0	2	16.49	0.02	2.04	-0.61	-0.02	-0.04
15.87	2	2	16.37	2.05	2.01	-0.50	-0.05	-0.01
15.87	2	0	16.35	2.05	-0.01	-0.47	-0.05	0.01
15.87	-2	-2	16.36	-2.02	-2.04	-0.48	0.02	0.04
15.87	2	-2	16.37	2.04	-2.03	-0.50	-0.04	0.03
15.87	-2	-4	16.42	-2.02	-4.13	-0.55	0.02	0.13
15.87	0	-4	16.55	0.01	-4.17	-0.68	-0.01	0.17
15.87	2	-4	16.47	2.05	-4.12	-0.59	-0.05	0.12

TABLA 4.17: Localización de coordenadas 3D a una altura de 15.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
15.87	2	4	15.91	2.02	4.03	-0.04	-0.02	-0.03
15.87	-2	2	15.92	-1.99	2.03	-0.04	-0.01	-0.03
15.87	0	2	15.82	0.01	2.02	0.05	-0.01	-0.02
15.87	2	2	15.89	2.03	2.00	-0.02	-0.03	-0.01
15.87	2	0	15.87	2.02	-0.01	0	-0.02	0.01
15.87	-2	-2	15.88	-2.01	-2.02	-0.01	0.01	0.02
15.87	2	-2	15.89	2.02	-2.02	-0.02	-0.02	0.02
15.87	-2	-4	15.94	-2.01	-4.06	-0.06	0.01	0.06
15.87	0	-4	15.90	-0.01	-4.06	-0.02	0.01	0.06
15.87	2	-4	15.96	2.01	-4.05	-0.08	-0.01	0.05

TABLA 4.18: Localización de coordenadas 3D a una altura de 15.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 15 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.56cm, 0.02cm y 0.07cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.05cm, 0.01cm y 0.03cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 90.8 %, 50.86 % y 53.04 %, respectivamente. La Figura 4.12 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

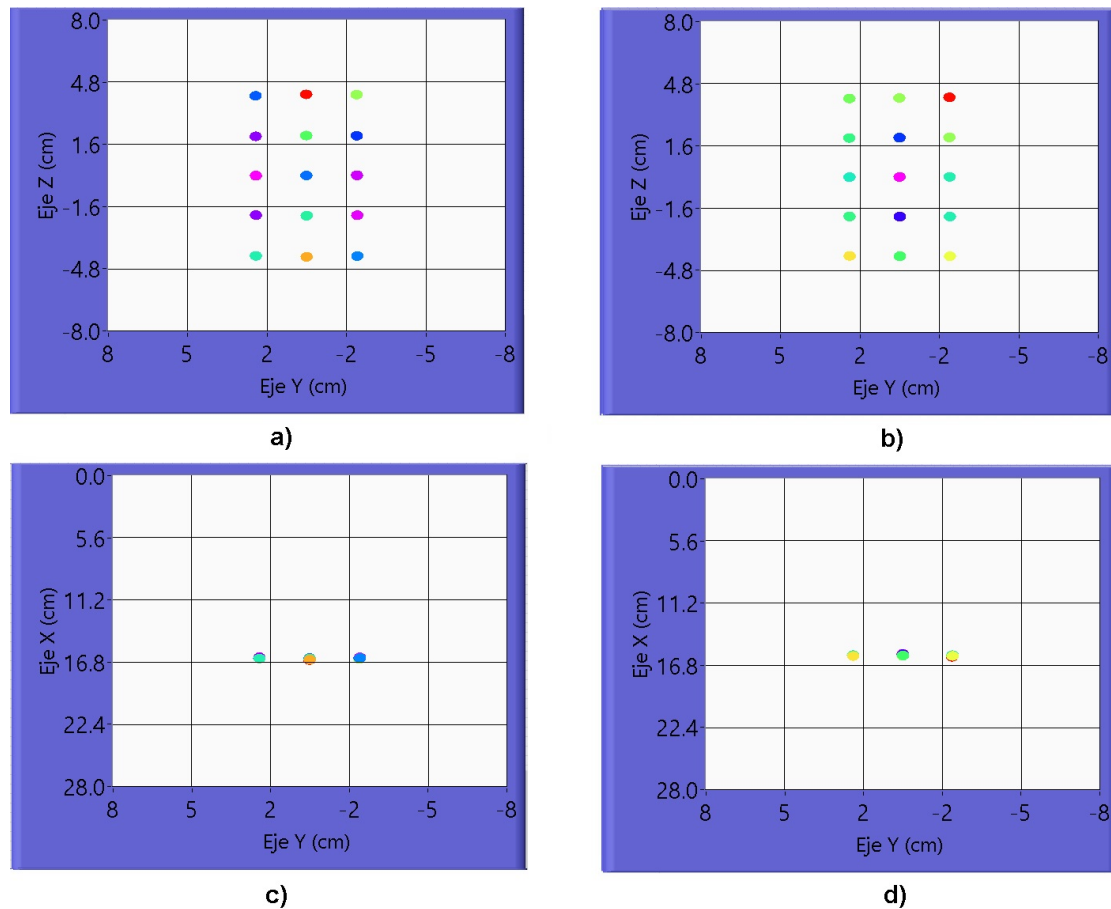


FIGURA 4.12: Gráficas de mediciones a 15.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

Se observan unos resultado muy parecidos a la experimentación mostrada anteriormente con al análisis de 15 mediciones. A pesar de que en la Figura 4.12 no se nota la corrección de mediciones en todas las coordenadas como se observaba en las anteriores, el porcentaje de reducción de las medias de los errores absolutos en todas las coordenadas al utilizar el método de calibración desarrollado a sido mayor al 50 %.

4.2.9. Resultados de Mediciones a Una Altura de 14.87 Centímetros

La Tabla 4.19 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 14.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.20 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
14.87	2	4	15.30	2.06	4.06	-0.43	-0.06	-0.06
14.87	-2	2	15.29	-2.01	2.02	-0.42	0.01	-0.02
14.87	0	2	15.39	0.01	2.03	-0.52	-0.01	-0.03
14.87	2	2	15.24	2.05	1.97	-0.37	-0.05	0.02
14.87	0	0	15.33	0.01	-0.01	-0.46	-0.01	0.01
14.87	2	0	15.23	2.04	-0.03	-0.35	-0.04	0.03
14.87	-2	-2	15.23	-2.04	-2.04	-0.35	0.04	0.04
14.87	2	-2	15.27	2.03	-2.04	-0.39	-0.03	0.04
14.87	-2	-4	15.30	-2.05	-4.14	-0.43	0.05	0.14
14.87	2	-4	15.35	2.02	-4.14	-0.47	-0.02	0.14

TABLA 4.19: Localización de coordenadas 3D a una altura de 14.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
14.87	2	4	14.90	2.03	4.02	-0.03	-0.03	-0.02
14.87	-2	2	14.89	-2.00	2.04	-0.01	0.01	-0.04
14.87	0	2	14.79	0.01	2.02	0.08	-0.01	-0.02
14.87	2	2	14.85	2.02	1.99	0.02	-0.02	0.01
14.87	0	0	14.73	-0.01	0.01	0.13	0.01	-0.01
14.87	2	0	14.83	2.01	-0.01	0.04	-0.01	0.01
14.87	-2	-2	14.83	-2.02	-2.01	0.04	0.02	0.01
14.87	2	-2	14.87	2.00	-2.03	0.01	-0.01	0.03
14.87	-2	-4	14.90	-2.03	-4.05	-0.03	0.03	0.05
14.87	2	-4	14.94	1.99	-4.05	-0.06	0.01	0.05

TABLA 4.20: Localización de coordenadas 3D a una altura de 14.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 15 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.45cm, 0.02cm y 0.07cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.05cm, 0.01cm y 0.03cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 88.29 %, 47.54 % y 54.21 %, respectivamente. La Figura 4.13 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

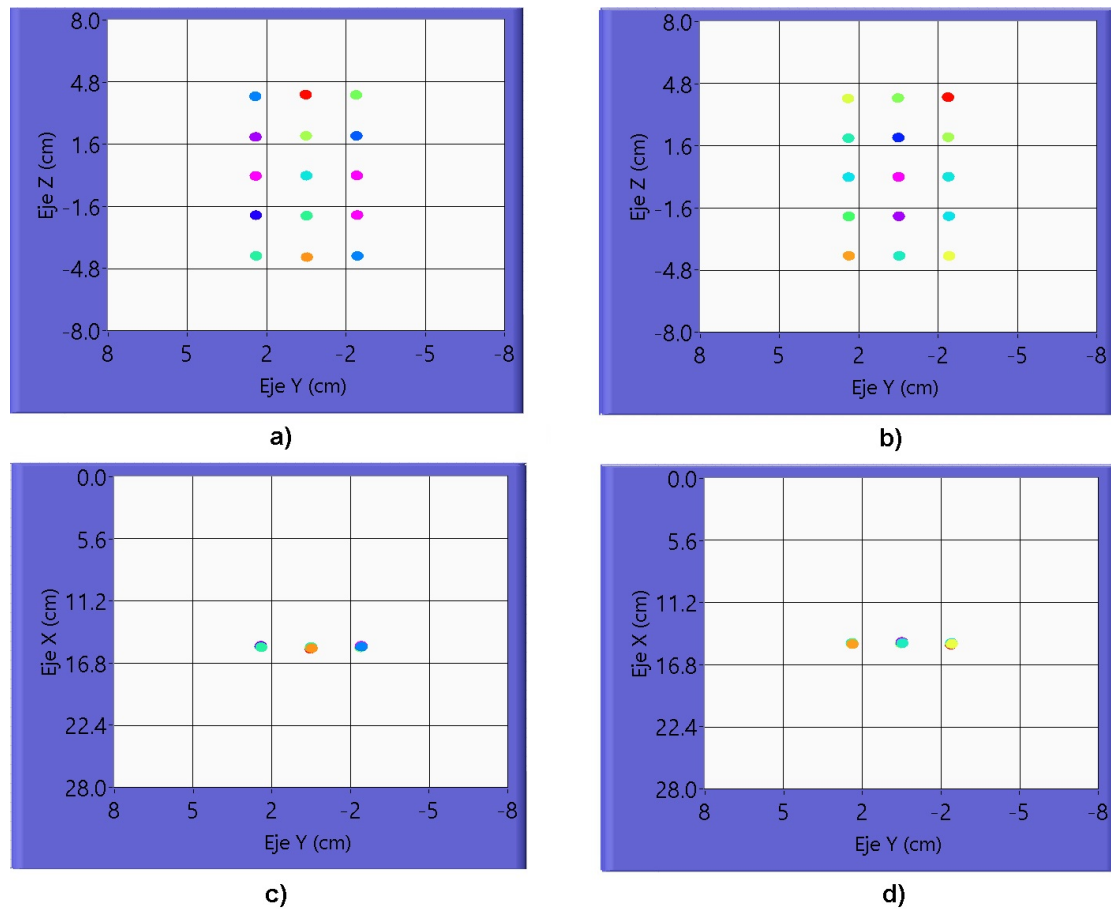


FIGURA 4.13: Gráficas de mediciones a 14.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

Como se aprecia en los resultados, se siguen obteniendo porcentajes de reducción de la media del error absoluto considerables en cada uno de las coordenadas al utilizar el método de calibración desarrollado, pero ya no se aprecia en 4.13 el mejoramiento de estas medidas en comparación con los experimentos que por tener un FOV efectivo más alto lograban analizar una mayor cantidad de puntos.

4.2.10. Resultados de Mediciones a Una Altura de 13.87 Centímetros

La Tabla 4.21 muestra una tabla simplificada de la localización de coordenadas 3D de la rejilla de prueba a una altura de 13.87cm empleando el SVE sin calibración. En la Tabla 4.22 se muestra la localización de estas mismas coordenadas 3D a la misma altura empleando el método de calibración dentro del SVE.

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
13.87	-2	4	14.27	-2.05	4.11	-0.39	0.05	-0.11
13.87	2	4	14.21	2.00	4.08	-0.33	-0.01	-0.08
13.87	-2	2	14.20	-2.04	2.01	-0.32	0.04	-0.01
13.87	0	2	14.28	-0.01	2.04	-0.40	0.01	-0.04
13.87	-2	0	14.18	-2.04	-0.01	-0.31	0.04	0.01
13.87	2	0	14.15	2.02	0	-0.28	-0.02	0
13.87	-2	-2	14.20	-2.03	-2.03	-0.33	0.03	0.03
13.87	2	-2	14.20	2.03	-2.00	-0.33	-0.03	0
13.87	-2	-4	14.29	-2.03	-4.14	-0.41	0.03	0.14
13.87	2	-4	14.29	2.05	-4.08	-0.41	-0.05	0.08

TABLA 4.21: Localización de coordenadas 3D a una altura de 13.87cm empleando el SVE sin calibración (tabla simplificada).

Coordenadas Ideales (cm)			Coordenadas Medidas (cm)			Error Absoluto (cm)		
x	y	z	x	y	z	error en x	error en y	error en z
13.87	-2	4	13.94	-2.03	4.06	-0.07	0.03	-0.06
13.87	2	4	13.88	1.97	4.03	-0.01	0.02	-0.03
13.87	-2	2	13.88	-2.02	2.02	-0.01	0.02	-0.02
13.87	0	2	13.74	-0.01	2.01	0.13	0.01	-0.01
13.87	-2	0	13.86	-2.01	-0.01	0.01	0.01	0.01
13.87	2	0	13.83	1.99	0.01	0.03	0.01	-0.01
13.87	-2	-2	13.88	-2.01	-2.02	-0.01	0.01	0.02
13.87	2	-2	13.88	2.00	-1.99	-0.01	-0.01	-0.01
13.87	-2	-4	13.94	-2.00	-4.07	-0.07	0.01	0.07
13.87	2	-4	13.98	2.02	-4.02	-0.10	-0.02	0.02

TABLA 4.22: Localización de coordenadas 3D a una altura de 13.87cm empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE (tabla simplificada).

El resultado de la media de los errores absolutos considerando las 15 mediciones obtenidas con esta altura sin emplear la calibración en el SVE fue de 0.38cm, 0.02cm y 0.06cm dentro de las coordenadas x, y y z de los puntos obtenidos,

respectivamente. Por otro lado, la media de los errores absolutos empleando el método de calibración desarrollado dentro del SVE fue de 0.05cm, 0.01cm y 0.02cm dentro de las coordenadas x , y y z de los puntos obtenidos, respectivamente. Estos resultados representan una reducción de la media de los errores absolutos al utilizar el método de calibración en términos de porcentaje en las coordenadas x , y y z de 85.44 %, 50.72 % y 56.13 %, respectivamente. La Figura 4.14 muestra los resultados gráficos de las mediciones obtenidas en los planos YZ y YX con y sin el uso del método de calibración dentro del SVE.

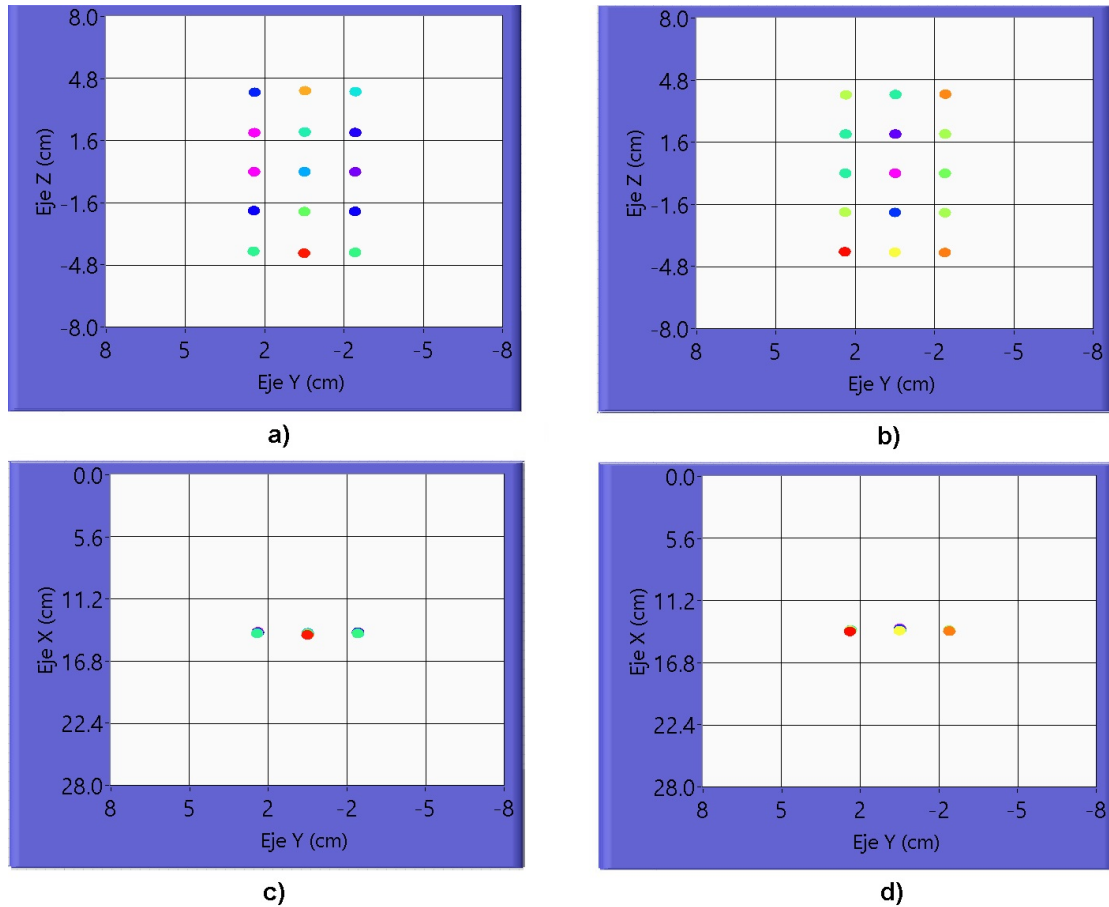


FIGURA 4.14: Gráficas de mediciones a 13.87cm de altura. a)Plano YZ sin calibrar. b)Plano YZ calibrado. c)Plano YX sin calibrar. d)Plano YX calibrado.

Al igual que las últimas 3 experimentaciones, en esta altura también se alcanzan a analizar 15 puntos. Se puede destacar que apesar de haber disminuido el FOV efectivo en el sistema, el método de calibración redujo en gran medida los errores causados por la distorsión y la digitalización de las imágenes, destacando una mayor mejoría en la coordenada de profundidad x en cada una de las experimentaciones realizadas.

4.3. Experimentación y Resultados de Escaneo de la Superficie de una Pieza Empleando el Sistema de Control Servo-Visual

En este segundo experimento, se emplea una pieza trapezoidal como la mostrada en la Figura 4.15. Se consideró esta pieza ya que como se puede apreciar su altura cambia en los extremos de la misma, lo que permite analizar las mediciones que realiza el SVE a diferentes alturas. En este experimento únicamente se tomará en consideración el escaneo obtenido utilizando el método de calibración desarrollado dentro del SVE a diferencia de las experimentaciones pasadas en el que se consideraron mediciones con y sin utilizar el método de calibración. Esto es debido a que lo importante de esta experimentación es el escaneo de la superficie de esta pieza trapezoidal y la forma en que el servomecanismo se va posicionando en cada punto que se indique con la ayuda de la información de las imágenes.

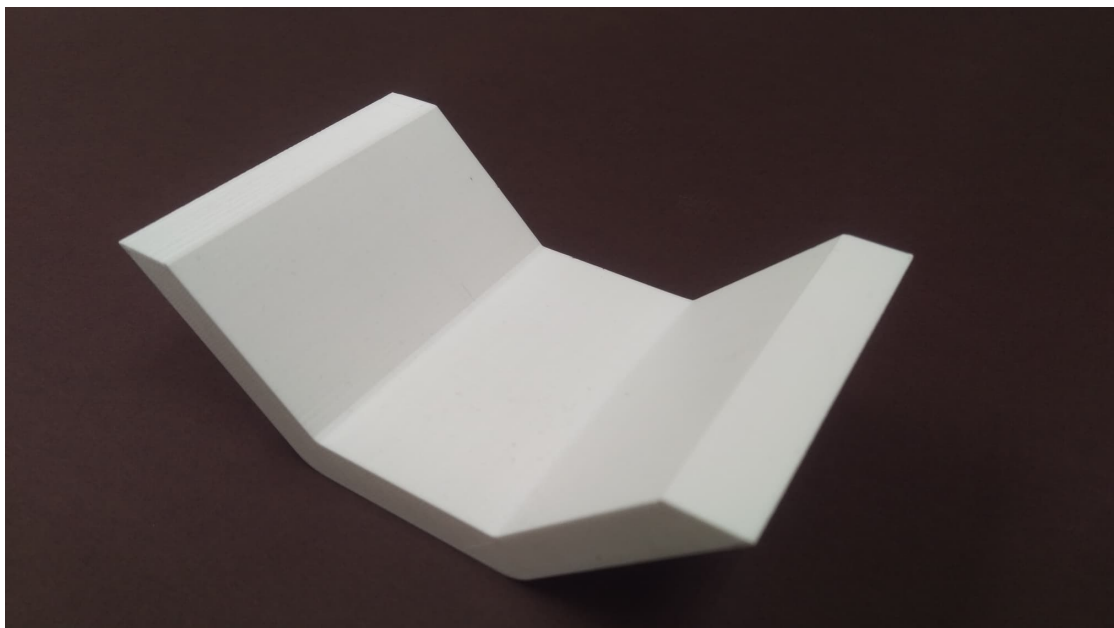


FIGURA 4.15: Pieza trapezoidal utilizada en la experimentación.

El procedimiento que se realiza en esta experimentación es primero realizar la calibración de cámaras para precisar la obtención de las mediciones de la pieza. Después, se escoge una región dentro de la escena que tome en mayor medida a la superficie de la pieza trapezoidal dentro del FOV efectivo (ver Figura 4.16).

El escaneo comienza en la esquina superior izquierda de la región escogida, considerando que todas las coordenadas de los puntos dentro de esta región ya están perfectamente identificados por el programa.

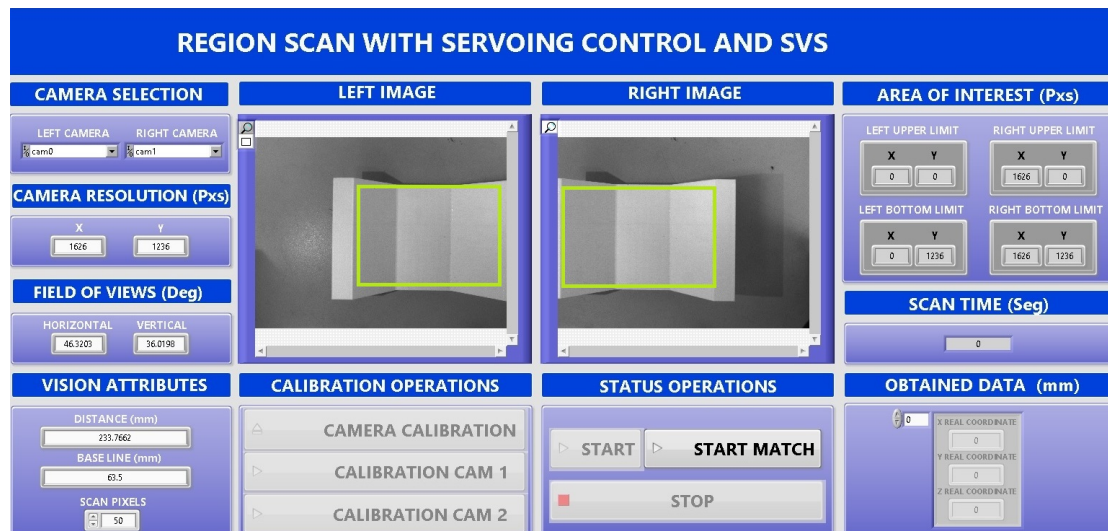


FIGURA 4.16: Selección de la región a escanear de la pieza trapezoidal dentro del FOV efectivo.

El objetivo en cada punto analizado dentro de esta región es posicionar un láser que se encuentra en el extremo final del servomecanismo a cada punto escogido de esta región por medio de la información tridimensional obtenida tanto del punto destino como de la posición del láser. Para realizar este proceso en cada punto, se siguen los pasos de la Figura 3.8 en donde se va desplazando el láser al punto destino empleando el sistema de control servo-visual explicado en la sección 3.4. Este proceso se repite hasta terminar el escaneo total de la pieza en la esquina inferior derecha de la región seleccionada. El barrido láser que se va realizando se va desplazando 20 píxeles tanto en la dirección horizontal como vertical dentro de cada punto de la región seleccionada. En la Figura 4.17 se muestran los resultados de la pieza en una vista tridimensional y en diferentes planos bidimensionales. El escaneo final resultó de 176 puntos obtenidos a lo largo de la región seleccionada de la pieza trapezoidal. En la experimentación se observó que el proceso para la localización de los puntos en los extremos de la pieza fue más tardado. Esto es debido a que el contacto del láser en estas regiones era un poco más alargado, dificultando el proceso de PM para localizarlo en ambas imágenes. En 4.17a se muestra una vista isométrica del escaneo en el que se aprecia que la zona mejor localizada fue la parte central de la superficie de la pieza, mientras que en los extremos podemos ver una mayor dispersión de las mediciones obtenidas. En 4.17b se muestra la pieza

vista desde el plano YZ en el que se aprecia de mejor manera esta dispersión en los extremos de la superficie de la pieza y se puede notar que el barrido realizado fue de 16 puntos localizados por cada fila escaneada. En 4.17c se muestra una vista en el plano YX en el que se visualiza como se realizó la profundidad del escaneo. Se puede apreciar como la profundidad en la parte izquierda esta mejor definida que en la parte derecha de la pieza, sin embargo, las mediciones obtenidas son muy consistentes a la profundidad ideal en todas las regiones en donde se realiza el escaneo. Por último, en 4.17d se muestra una vista en el plano ZX, en el que se visualizan las diferentes alturas que contiene la pieza, resultando de capas consistentes a la altura que tiene la pieza con respecto a los sensores CCD de las cámaras.

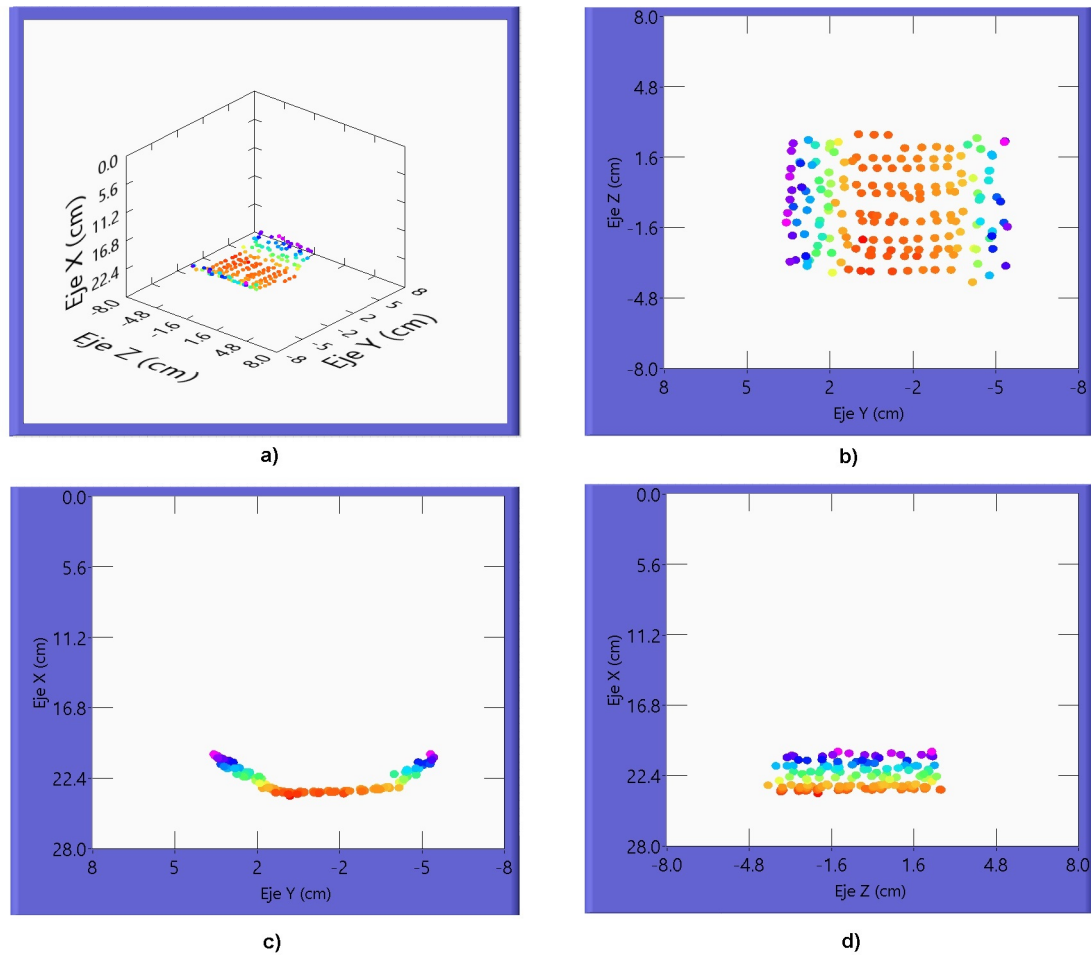


FIGURA 4.17: Resultados de la pieza trapezoidal en diferentes planos. a) Vista Isométrica. b) Plano YZ. c) Plano YX. d) Plano ZX.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de investigación se presentó el desarrollo de un nuevo método de calibración para SVE y la manipulación de un servomecanismo que fue controlado por medio de la información del par estéreo de imágenes de una escena en particular.

Referente al SVE, se diseñó un sistema capaz de encontrar las coordenadas tridimensionales de puntos de la escena por medio de la información bidimensional de las imágenes, iniciando con la captura de las imágenes, después la detección de los puntos por medio del proceso PM, seguido de la conversión de las coordenadas bidimensionales obtenidas a ángulos, y por último, el empleo de la triangulación para la localización de las coordenadas 3D.

Para mejorar la precisión de estas coordenadas, se diseñó un nuevo método de calibración, en el cual se encuentra una ecuación que modela los errores causados por la distorsión y la digitalización de las imágenes. La calibración realizada es novedosa, ya que a diferencia de otros métodos de calibración, no se buscan los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras, sin embargo, ambos procedimientos cumplen con el mismo objetivo de mejorar las mediciones tridimensionales de puntos de una escena en particular. El desarrollo de esta calibración, experimentaciones y comparaciones de este con otros métodos existentes pueden consultarse en el artículo incluido en el anexo I.

Se creó una interfaz dentro de LabVIEW que realizaba todo el proceso de visión estereoscópica para la localización de puntos de coordenada real 3D. Además, se implementaron algoritmos del nuevo método de calibración desarrollado dentro de

este mismo programa en el cuál se da la opción de poder utilizar esta calibración y así poder realizar comparaciones de las mediciones tridimensionales con y sin la implementación de este método de calibración.

Para realizar la experimentación, se diseño una rejilla que contenia 63 cruces, las cuáles contaban con una separación entre ellas de 2cm tanto de manera horizontal como vertical. La información que se obtuvo de esta rejilla son las coordenadas del centro de las cruces que entraban dentro del FOV efectivo a diferentes alturas comprendidas entre la escena y el sensor CCD de las cámaras. Al disminuir esta altura, el FOV efectivo se iba reduciendo y por lo tanto la cantidad de puntos analizados era menor.

Para comprobar la efectividad del método de calibración desarrollado, se obtuvieron resultados a diferentes alturas entre los que destaca la dispersión de error resultante de cada una de las coordenadas obtenidas. Para una altura de 22.87cm se obtuvo una dispersión de error de 0.38mm a 2.58mm en la coordenada x , de 0.02mm a 0.42mm en la coordenada y , y de 0.03mm a 1.3mm en la coordenada z . Para una altura de 21.87cm se obtuvo una dispersión de error de -2.4mm a 0.68mm en la coordenada x , de -0.35mm a 0.45mm en la coordenada y , y de -1.24mm a 0.87mm en la coordenada z . Para una altura de 20.87cm se obtuvo una dispersión de error de -2.08mm a 0.12mm en la coordenada x , de -0.22mm a 0.21mm en la coordenada y , y de -0.89mm a 0.86mm en la coordenada z . Para una altura de 19.87cm se obtuvo una dispersión de error de -3.3mm a -0.11mm en la coordenada x , de -0.47mm a 0.36mm en la coordenada y , y de -1.34mm a 1.48mm en la coordenada z . Para una altura de 18.87cm se obtuvo una dispersión de error de -1.96mm a 0.08mm en la coordenada x , de -0.6mm a 0.52mm en la coordenada y , y de -0.77mm a 0.89mm en la coordenada z . Para una altura de 17.87cm se obtuvo una dispersión de error de -1.08mm a 0.34mm en la coordenada x , de -0.63mm a 0.45mm en la coordenada y , y de -0.64mm a 0.94mm en la coordenada z . Para una altura de 16.87cm se obtuvo una dispersión de error de -1.97mm a -0.02mm en la coordenada x , de -0.39mm a 0.1mm en la coordenada y , y de -0.82mm a 0.7mm en la coordenada z . Para una altura de 15.87cm se obtuvo una dispersión de error de -0.85mm a 0.55mm en la coordenada x , de -0.3mm a 0.18mm en la coordenada y , y de -0.34mm a 0.64mm en la coordenada z . Para una altura de 14.87cm se obtuvo una dispersión de error de -0.69mm a 1.38mm en la coordenada x , de -0.31mm a 0.38mm en la coordenada y , y de -0.43mm a 0.59mm en la coordenada z . Para una altura de 13.87cm se obtuvo una dispersión de error de -1.05mm a 1.32mm en

la coordenada x , de -0.2mm a 0.3mm en la coordenada y , y de -0.66mm a 0.71mm en la coordenada z . Además de lo mencionado anteriormente, la Tabla 5.1 muestra los porcentajes de reducción del error absoluto de las coordenadas obtenidas empleando el método de calibración desarrollado.

Altura Experimental (cm)	Reducción de Error en x (%)	Reducción de Error en y (%)	Reducción de Error en z (%)
13.87	85.44	50.72	56.13
14.87	88.29	47.54	54.21
15.87	90.8	50.86	53.04
16.87	87.86	42.26	51.48
17.87	86.92	26.03	25.76
18.87	89.31	25.54	43.07
19.87	76.64	8.44	50.08
20.87	89.14	56.97	80.33
21.87	86.78	10.7	56.12
22.87	81.07	17.47	45.12

TABLA 5.1: Porcentajes de reducción del error absoluto de las coordenadas obtenidas empleando el método de calibración desarrollado.

Como se puede apreciar en la Tabla 5.1, se destacan los mayores porcentajes de reducción del error absoluto en la coordenada x del 90 % para una altura de 15.87cm, y en la coordenada y y z del 56 % y 80 %, respectivamente, que corresponden a las mediciones obtenidas a una altura de 20.87cm. En las figuras mostradas en esta primera experimentación se puede apreciar la corrección de la distorsión de barril presente al utilizar el sistema de calibración desarrollado dentro del SVE y una mejora considerable en la coordenada de profundidad x .

Para la manipulación de un mecanismo por medio de control servo-visual, se diseñó un mecanismo con 2 servomotores los cuáles dirigen a un láser al extremo final del mecanismo hacia las coordenadas de un punto deseado. Este mecanismo se desplaza por medio de una señal PWM correspondiente a la distancia entre la coordenada 3D del centro del láser obtenida por el SVE y el punto deseado, siendo controlado por medio de un controlador PID.

Los algoritmos, programas y la experimentación correspondiente para probar el sistema fueron desarrollados dentro de LabVIEW, en el cuál se creó una interfaz gráfica en el que se programó el dispositivo de procesamiento de imágenes CVS para realizar el proceso de control del sistema servo-visual y combinarlo junto con el SVE y el método de calibración desarrollado. El programa desarrollado en LabVIEW para esta investigación puede consultarse en el anexo II.

Para probar el sistema de control servo-visual, se realizó una experimentación en el que se escaneo la superficie de una pieza trapezoidal manipulando la posición del mecanismo hacia cada uno de los puntos obtenidos de la pieza. Los resultados mostraron una exitosa localización de cada uno de los puntos a obtener dentro de la pieza, sin embargo, se presentaron dificultades en la localización de estos puntos en los extremos de la pieza. Estas dificultades fueron debido a la inclinación de la pieza en estos extremos que provocaban un alargamiento y un erroneo posicionamiento del area del láser, lo que dificultaba ubicar al mecanismo a la posición deseada en estas zonas. Para este problema se tiene pensado en trabajos futuros la utilización de un láser de mayor intensidad y una superficie a escanear menos reflejante para que el láser pueda mantener su área circular y se pueda ubicar de mejor forma en estas zonas y así posicionar sin problemas al mecanismo hacia los puntos deseados.

El nuevo método de calibración desarrollado y empleado en SVE mostró una mejoría en términos de precisión en la localización de puntos de coordenada real a diferentes alturas, sin embargo, para trabajos futuros se considerará probar la efectividad del sistema a profundidades más lejanas. Por otra parte, a pesar de que el sistema de control servo-visual desarrollado logró el escaneo de la superficie de un objeto, se pretende mejorar este sistema para evitar problemas en regiones en donde se dificultó la localización de puntos y así lograr un escaneo más eficiente.

Bibliografía

- Aracil, R., García, N., Perez, C., Paya, L., Sabater, J., Azorin, J., and Jimenez, L. (2005). Robust image-based visual servoing system using a redundant architecture. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1):445–450.
- Barnard, S. T. and Fischler, M. A. (1982). Computational stereo. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 14(4):553–572.
- Benacer, I., Hamissi, A., and Khouas, A. (2015). A novel stereovision algorithm for obstacles detection based on uv-disparity approach. In *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pages 369–372. IEEE.
- Bevilacqua, M., Di Leo, G., Landi, M., Liguori, C., Paciello, V., Paolillo, A., and Pietrosanto, A. (2013). A flexible stereo calibration for a structured-light profilometer. In *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pages 1026–1031. IEEE.
- Cerveri, P., Borghese, N., and Pedotti, A. (1998). Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates. *Journal of biomechanics*, 31(10):935–940.
- Chambon, S. and Crouzil, A. (2011). Similarity measures for image matching despite occlusions in stereo vision. *Pattern Recognition*, 44(9):2063–2075.
- Cid, J. and Reyes, F. (2009). Visual servoing controller for robot manipulators. In *2009 International Conference on Electrical, Communications, and Computers*, pages 153–158. IEEE.
- Clédat, E., Cucci, D. A., and Skaloud, J. (2020). Camera calibration models and methods for corridor mapping with uavs. Technical report.

- Colodro, C., Toledo, J., Martínez, J., Garrigós, J., and Ferrández, J. M. (2012). Evaluación de algoritmos de correspondencia estereoscópica y su implementación en fpga. *Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones (JCRA)*, pages 88–93.
- Compañ, P., Satorre, R., Villagrà, C., and Rizo, R. (2001). Visión estereoscópica en un modelo multirresolución. In *Actas de la IX Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial*, pages 1291–1300.
- Córdova, G. B. (1999). *Un sistema para determinar la imagen de un objeto a partir de un espejo*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Corke, P. I. et al. (1996). *Visual Control of Robots: high-performance visual servoing*. Research Studies Press Taunton, UK.
- Díaz, J.-P. and Loaiza, H. (2015). Classical and neural models for binocular stereoscopic reconstruction. In *2015 20th Symposium on Signal Processing, Images and Computer Vision (STSIVA)*, pages 1–5. IEEE.
- Enríquez Quilumbaquin, E. J. (2019). Control aperiódico de posición de un servomotor. B.S. thesis.
- Faugeras, O. D. (1986). The calibration problem for stereo. *CVPR, 1986*.
- Fernandez, S., Forest, J., and Salvi, J. (2012). Active stereo-matching for one-shot dense reconstruction. In *ICPRAM (2)*, pages 541–545.
- Fraser, C. S. (2001). Photogrammetric camera component calibration: A review of analytical techniques. *Calibration and Orientation of cameras in Computer Vision*, pages 95–121.
- Fuentes Betancourt, J., Hidalgo Alonso, O., Calzadilla Amaya, O., and Perez Perdomo, A. (2005). Empleo del tratamiento matricial en el curso de óptica: sistema de lentes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27(3):357–361.
- Gai, S., Da, F., and Dai, X. (2018). A novel dual-camera calibration method for 3d optical measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 104:126–134.
- Gao, J., Li, C., Li, B., Zhao, F., Li, J., Zhang, G., Wang, C., Zeng, C., Cui, S., Wu, Q., et al. (2020). Single-event induced failure mode of pwm in dc/dc converter. *Microelectronics Reliability*, 114:113820.

- García, J. R. (1997). *Fundamentos de óptica geométrica*. Universidad de Oviedo.
- García Montiel, C. J., Hernández Llodra, P., and Merchán García, D. (2009). *Visión estereoscópica v3d*.
- Gil, S. and Rodriguez, E. (2001). *Física re-creativa*. Prentice Hall Buenos Aires.
- Gutiérrez, A. I. B. and Juárez, J. d. J. M. (2008). *Visión estereoscópica por computadora*. IPN, Centro de Investigación en Computación.
- Hall, E. L., Tio, J. B., McPherson, C. A., and Sadjadi, F. A. (1982). Measuring curved surfaces for robot vision. *Computer*, 15(12):42–54.
- Hernández, C. A. O. et al. (2019). Formación de imágenes con espejos cóncavos. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*, 7(14):34–39.
- Hernández, J., Sanz, G., and Guijarro, M. (2011). Técnicas de procesamiento de imágenes estereoscópicas. *Revista del CES Felipe II*, 13:1–20.
- Herrera Caro, P. J. (2010). Correspondencia estereoscópica en imágenes obtenidas con proyección omnidireccional para entornos forestales.
- Ito, M. (1990). Robot vision modelling-camera modelling and camera calibration. *Advanced robotics*, 5(3):321–335.
- Ji, Q. and Zhang, Y. (2001). Camera calibration with genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 31(2):120–130.
- Jiang, X. K. (2012). A new binocular camera calibration method based on an improved genetic algorithm. In *Advanced Materials Research*, volume 411, pages 602–608. Trans Tech Publ.
- Kanellakis, C., Kyritsis, G., Tsilomitrou, O., and Manesis, S. (2015). A low-cost stereoscopic μ p-based vision system for industrial light objects grasping. In *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 759–765. IEEE.
- Laguado, L. M., Chamorro, H., and Soriano, J. (2009). Análisis y comparación entre un controlador pi difuso y un controlador pi óptimo convencional para un convertidor reductor. *Ingeniería e Investigación*, 29(3):61–66.

- Laserna, D. B. (2015). Luz y ondas. huygens: la luz como propagación ondulatoria. *arbor*, 191(775):263.
- Lin, H.-Y. and Subbarao, M. (2003). Multiple base-angle rotational stereo for accurate 3d model reconstruction. In *3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2003. ISPA 2003. Proceedings of the*, volume 2, pages 931–935. IEEE.
- Luccioni, G. M. and Juliá, J. E. (2008). Correspondencia de imágenes basada en área. *Mapping*, (124):18–22.
- Machikhin, A. S., Batshev, V. I., Gorevoy, A. V., Khokhlov, D. D., and Bykov, A. A. (2019). A miniature prism-based stereoscopic system for 3d machine vision applications. In *Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*, volume 11041, page 110410M. International Society for Optics and Photonics.
- Malacara, D. (2015). *Óptica básica*. Fondo de cultura económica.
- Marion, J. B. (2014). *Dinámica clásica de las partículas y sistemas*. Reverté.
- Martín, S., Suárez, J., Rubio, R., and Gallego, R. (2004). Aplicación de los sistemas de visión estereoscópica en las enseñanzas técnicas. *Escuela de Ingenieros Técnicos Industriales de Gijón. Universidad de Oviedo*.
- Masip, J. G. (2015). Maxwell: la teoría electromagnética de la luz. *arbor*, 191(775):265.
- Masmoudi, L., Coronado, J. L., and García-Bermejo, J. G. (1995). Calibración precisa de cámaras con modelo de distorsión y reconstrucción robusta de coordenadas tridimensionales. *Informática y automática: revista de la Asociación Española de Informática y Automática*, 28(3):34–41.
- Medina, M. A. P. L., Saba, M., de Guevara Durán, M., and Silva, M. (2011). Controladores pid y controladores difusos. *Revista de ingeniería industrial*, 5(1).
- Mejía, S. (2001). Aberraciones ópticas: un nuevo concepto. *Ciencias de la optometría: Revista trimestral de la Asociación de antiguos alumnos del Centro Boston de Optometría*, (32):16–20.

- Molesini, G., Quercioli, F., and Trivi, M. (2013). Rugosímetros ópticos basados en la aberración cromática y esférica del sistema de enfoque. In *ANALES AFA*, volume 2.
- Molleda, J., Usamentiaga, R., García, D. F., Bulnes, F. G., Espina, A., Dieye, B., and Smith, L. N. (2013). An improved 3d imaging system for dimensional quality inspection of rolled products in the metal industry. *Computers in Industry*, 64(9):1186–1200.
- Montalvo Martínez, M. (2010). Técnicas de visión estereoscópica para determinar la estructura tridimensional de la escena.
- Morales, M. E. P., Zamora, M., and Rodriguez-Liñán, Á. (2019). Caracterización paramétrica para un modelo de segundo orden del servomotor rc. *Ingenierías*, 22(82):7.
- Mosaad, A. M., Attia, M. A., and Abdelaziz, A. Y. (2019). Whale optimization algorithm to tune pid and pida controllers on avr system. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4):755–767.
- Nedevschi, S., Marita, T., Danescu, R., Oniga, F., Frentiu, D., and Pocol, C. (2003). Camera calibration error analysis in stereo measurements. In *microCAD International Scientific Conference*, pages 51–56. Citeseer.
- Negishi, Y., Miura, J., and Shirai, Y. (2004). Calibration of omnidirectional stereo for mobile robots. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, volume 3, pages 2600–2605. IEEE.
- Ortiz-Acevedo, A., Mata-Méndez, O., and Avendaño, J. (2007). Ley de reflexión para espejos planos en movimiento relativista. *Revista mexicana de física E*, 53(2):134–142.
- Pajares, G. (1995). *Estrategia de Solucion al Problema de la Correspondencia en Vision Estereoscópica por la Jerarquía Metodológica y la Integración de Criterios*. PhD thesis, PhD thesis, Dpto. Informática y Automática, Facultad Ciencias UNED: Madrid.
- Pastorino, S., Djirikián, D., and Juanto, S. (2015). Los modelos atómicos, analogías y análogos concretos.

- Patterson, T., McClean, S., Morrow, P., Parr, G., and Luo, C. (2014). Timely autonomous identification of uav safe landing zones. *Image and Vision Computing*, 32(9):568–578.
- Pedra, A. V. B. M., Mendonça, M., Finocchio, M. A. F., de Arruda, L. V. R., and Castanho, J. E. C. (2013). Camera calibration using detection and neural networks. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(7):245–250.
- Perez, M. A. A. and Lopez, M. B. (2015). 3d visual servoing control for robot manipulators without parametric identification. *IEEE Latin America Transactions*, 13(3):569–577.
- Perlick, V. (2000). *Ray optics, Fermat's principle, and applications to general relativity*, volume 61. Springer Science & Business Media.
- Ploumpis, S., Amanatiadis, A., and Gasteratos, A. (2015). A stereo matching approach based on particle filters and scattered control landmarks. *Image and Vision Computing*, 38:13–23.
- Pons Martí, A., Barreiro Hervás, J. C., and Saavedra Tortosa, G. (2013). Demo 43. espejos esféricos.
- Qi, W., Li, F., and Zhenzhong, L. (2010). Review on camera calibration. In *2010 Chinese Control and Decision Conference*, pages 3354–3358. IEEE.
- Quintanilla, S. O., Dávila, J. S., and VElez, R. C. (2005). Métodos numéricos aplicados a la ingeniería. *Ciencia & Desarrollo*, (9):79–82.
- Quiroga, E. A. C., Martín, L. Y. M., and Caycedo, A. U. (2015). La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. *Revista Científica General José María Córdova*, 13(16):201–219.
- Revelo-Luna, D. A., Usama, F. D., and Flórez-Marulanda, J. F. (2012). Reconstrucción 3d de escenas mediante un sistema de visión estéreo basado en extracción de características y desarrollado en opencv. *Ingeniería y Universidad*, 16(2):485–485.
- Roca, A. (2014). *Control automático de procesos industriales: con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC*. Díaz de Santos.

- Rodríguez, J. A. M. and Mejía Alanís, F. C. (2016). Binocular self-calibration performed via adaptive genetic algorithm based on laser line imaging. *Journal of Modern Optics*, 63(13):1219–1232.
- Rodríguez-Quinonez, J., Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., Rascón, R., and Mercorelli, P. (2017). Improve a 3d distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods' approach. *Opto-Electronics Review*, 25(1):24–32.
- Rojas, W. (2015). Ecuaciones de maxwell y el campo electromagnético.
- Salvi, J., Armangué, X., and Batlle, J. (2002). A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern recognition*, 35(7):1617–1635.
- Schroeder, D. J. (1999). *Astronomical optics*. Elsevier.
- Shan, B., Yuan, W., and Xue, Z. (2019). A calibration method for stereovision system based on solid circle target. *Measurement*, 132:213–223.
- Slama, C. C. (1980). Manual of photogrammetry. Technical report, America Society of Photogrammetry,.
- Slavchov, R. I. and Ivanov, T. I. (2014). Quadrupole terms in the maxwell equations: Born energy, partial molar volume, and entropy of ions. *The Journal of chemical physics*, 140(7):074503.
- Spong, M. and Vidyasagar, M. (1989). Robot dynamics and control. new york: John willey & sons.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., et al. (2006). *Robot modeling and control*, volume 3. wiley New York.
- Tacconi, E., Mantz, R., Solsona, J., and Puleston, P. (2005). Controladores basados en estrategias pid. *LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP*.
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4):323–344.
- Vidal, R. (2011). Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas. *Ciencia y tecnología para la salud visual y ocular*, 9(2):105–122.

- Wang, J., Shi, F., Zhang, J., and Liu, Y. (2008). A new calibration model of camera lens distortion. *Pattern recognition*, 41(2):607–615.
- Wang, Q., Cheng, W.-C., Suresh, N., and Hua, H. (2016). Development of the local magnification method for quantitative evaluation of endoscope geometric distortion. *Journal of biomedical optics*, 21(5):056003.
- Wen, J. and Schweitzer, G. (1991). Hybrid calibration of ccd cameras using artificial neural nets. In *[Proceedings] 1991 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, pages 337–342. IEEE.
- Weng, J., Cohen, P., Herniou, M., et al. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(10):965–980.
- Wilson, J. D. and Buffa, A. J. (2002). *Física*. Pearson Educación.
- Wu, L. and Zhu, B. (2015). Binocular stereovision camera calibration. In *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pages 2638–2642. IEEE.
- Xu, G. Y., Chen, L. P., and Gao, F. (2011). Study on binocular stereo camera calibration method. In *2011 International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, pages 133–137. IEEE.
- Yan, Y., Zhu, Q., Lin, Z., and Chen, Q. (2006). Camera calibration in binocular stereo vision of moving robot. In *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, volume 2, pages 9257–9261. IEEE.
- Yang, T., Zhao, Q., Wang, X., and Huang, D. (2019). Accurate calibration approach for non-overlapping multi-camera system. *Optics & Laser Technology*, 110:78–86.
- Zapata-Farfan, J., Contreras-Martínez, R., Rosete-Aguilar, M., Garduño-Mejía, J., Castro-Marín, P., Rodríguez-Herrera, O. G., Bruce, N. C., Ordóñez-Pérez, M., Qureshi, N., and Ascanio, G. (2019). Low-energy/pulse response and high-resolution-cmos camera for spatiotemporal femtosecond laser pulses characterization@ 1.55 μ m. *Review of Scientific Instruments*, 90(4):045116.
- Zhang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *Proceedings of the seventh ieee international conference on computer vision*, volume 1, pages 666–673. Ieee.

**Anexo I: Artículo Publicado:
Improve Three-Dimensional Point
Localization Accuracy in Stereo
Vision Systems Using a Novel
Camera Calibration Method**

Improve three-dimensional point localization accuracy in stereo vision systems using a novel camera calibration method

Luis R Ramírez-Hernández¹ , Julio C Rodríguez-Quiñonez¹,
Moises J Castro-Toscano¹, Daniel Hernández-Balbuena¹,
Wendy Flores-Fuentes¹ , Raúl Rascón-Carmona¹,
Lars Lindner²  and Oleg Sergiyenko²

Abstract

Computer vision systems have demonstrated to be useful in applications of autonomous navigation, especially with the use of stereo vision systems for the three-dimensional mapping of the environment. This article presents a novel camera calibration method to improve the accuracy of stereo vision systems for three-dimensional point localization. The proposed camera calibration method uses the least square method to model the error caused by the image digitalization and the lens distortion. To obtain particular three-dimensional point coordinates, the stereo vision systems use the information of two images taken by two different cameras. Then, the system locates the two-dimensional pixel coordinates of the three-dimensional point in both images and converts them into angles. With the obtained angles, the system finds the three-dimensional point coordinates through a triangulation process. The proposed camera calibration method is applied in the stereo vision systems, and a comparative analysis between the real and calibrated three-dimensional data points is performed to validate the improvements. Moreover, the developed method is compared with three classical calibration methods to analyze their advantages in terms of accuracy with respect to tested methods.

Keywords

Computer vision, stereo vision, calibration methods, 3-D point localization, autonomous navigation

Date received: 30 May 2019; accepted: 28 November 2019

Topic: Vision Systems

Topic Editor: Antonio Fernandez-Caballero

Associate Editor: Antonio Fernandez-Caballero

Introduction

Nowadays, applications like manufacturing process, structural health monitoring, microsurgery, laparoscopic surgery, and specially in autonomous navigation have used three-dimensional (3-D) measuring techniques.¹⁻⁵ In these applications, the accuracy is essential for the tasks that must be developed; therefore, there are methods to improve the accuracy of the 3-D measurements.^{6,7} In autonomous navigation systems, the aim is to move an autonomous

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, México

² Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, México

Corresponding author:

Julio C. Rodríguez-Quiñonez, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, Mexicali, Baja California 21280, México.

Email: julio.rodriguez81@uabc.edu.mx



Creative Commons CC BY: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) which permits any use, reproduction and distribution of the work without

further permission provided the original work is attributed as specified on the SAGE and Open Access pages (<https://us.sagepub.com/en-us/nam/open-access-at-sage>).

object through a 3-D environment with classic interpolation methods (inertial sensors) or external references (computer vision, ultrasonic sensors, GPS, CCD, and CMOS).^{8–11} Recently, research in autonomous navigation applications has focused on stereo vision, which is used for 3-D mapping, detection, and location of objects.^{12–14} Advantages of the stereo vision are the portability and the wide field of view (FOV) due to the use of cameras, obtaining more information of the environment to scan compared with other 3-D measuring techniques, for example, time of flight, pulse modulation method, dynamic laser triangulation, among others.^{15–17} Stereo vision systems (SVS) process visual information from two or more cameras to obtain features of a specific scene. The SVS setup employs two cameras in which each camera captures images from different perspectives.¹⁸ In each stereo image, the corresponding points between them are detected, and finally, a triangulation process is performed with each corresponding pair of points.^{19–21} The two main reasons of loss of accuracy in SVS for 3-D measurements are the loss of information due to the image digitalization and the lens distortion.²² The loss of information in image digitalization entails that specific areas of the images have low quality in terms of brightness, sharpness, and contrast, causing a difficult and inaccurate localization of the 3-D points in these areas. On the other hand, the lens distortion causes deformation in the straight lines of the images, resulting on inaccurate measurements of the 3-D points in SVS. These errors are minimized using camera calibration methods, where intrinsic and extrinsic parameters of the cameras are obtained.²³ The mentioned parameters are the position and orientation of the cameras, focal distance, optical center, and lens distortion coefficients, where their estimation entails a high computational cost because it is necessary to perform many steps to obtain them. The novel camera calibration method for SVS is developed with the purpose of locating 3-D points of a specific scene without estimating these parameters, obtaining a low computational cost. Moreover, the developed method is created to have higher accuracy in the localization of 3-D points than other calibration methods that use the estimation of the mentioned parameters. The developed SVS prototype is presented in Figure 1; it performs the developed camera calibration method, high-speed pattern recognition feature, and triangulation process to obtain the 3-D points coordinates. The proposed calibration method uses the least square technique, in which an equation is obtained to compensate the loss of information due to the image digitalization and the errors generated by the lens distortion. The presented article shows the implementation of an SVS to locate 3-D points coordinates in real-time applications and a novel calibration method to improve the accuracy of the 3-D points coordinates. Experimentations are performed, where 3-D points coordinates of a specific scene are located at different depths, obtaining databases of 3-D points coordinates with the implemented SVS and, afterward, databases

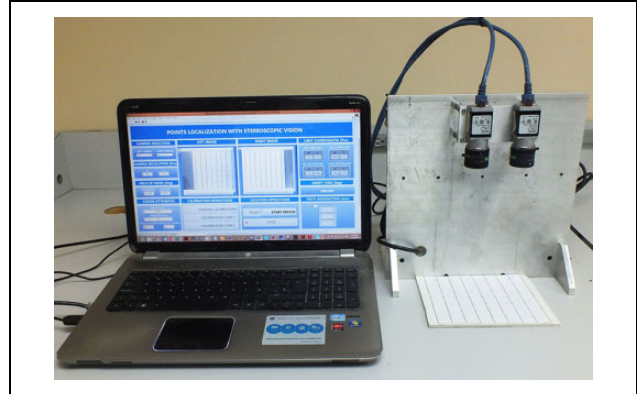


Figure 1. Developed SVS with interface in LabVIEW. SVS: stereo vision systems.

including the calibration method on the SVS, comparing the results to validate the improvements of the developed calibration method. Moreover, an experimentation where a comparative analysis is performed between the developed calibration method with other three classical calibration methods is presented. In this experimentation, the errors obtained by each calibration method tested in planes XY, XZ, YZ, and XYZ are compared.

Image digitalization errors and lens distortion

Image digitalization is employed a CCD or CMOS sensor, which gets the light information from the scene, converting it into electric signals. The intensity of each electrical signal will depend on the amount of light obtained by the sensor in different parts of the scene.²⁴ These signals are amplified and converted into digital signals, creating a bit-map (pixels) with the digital information of the scene. In this process, there is a loss of information due to signal noise, the conversion of light information to electric signals made by the sensor, and the conversion of the analog signal to digital signal made by the analog–digital converter.²⁵ Generally, in SVS, a matching process of a specific region is performed between images from different perspectives in order to locate 3-D points of a scene. A low quality of the images due to the loss of information can cause mismatch of the specific region between the images and also entails to inaccurate measurements of the 3-D points. Figure 2 shows an example of how the errors of image digitalization affect the SVS in this matching process.

Another problem that occurs in cameras is the lens distortion. The problem consists in the curvature of the straight lines presented in the image due to the camera lens. This curvature can be presented in three forms: barrel distortion, pincushion distortion, and mustache distortion.²⁶ Figure 3 shows the types of distortions that can be presented in camera lens. The barrel distortion is seen on wide angle lenses, where the FOV of the lens is wider than the

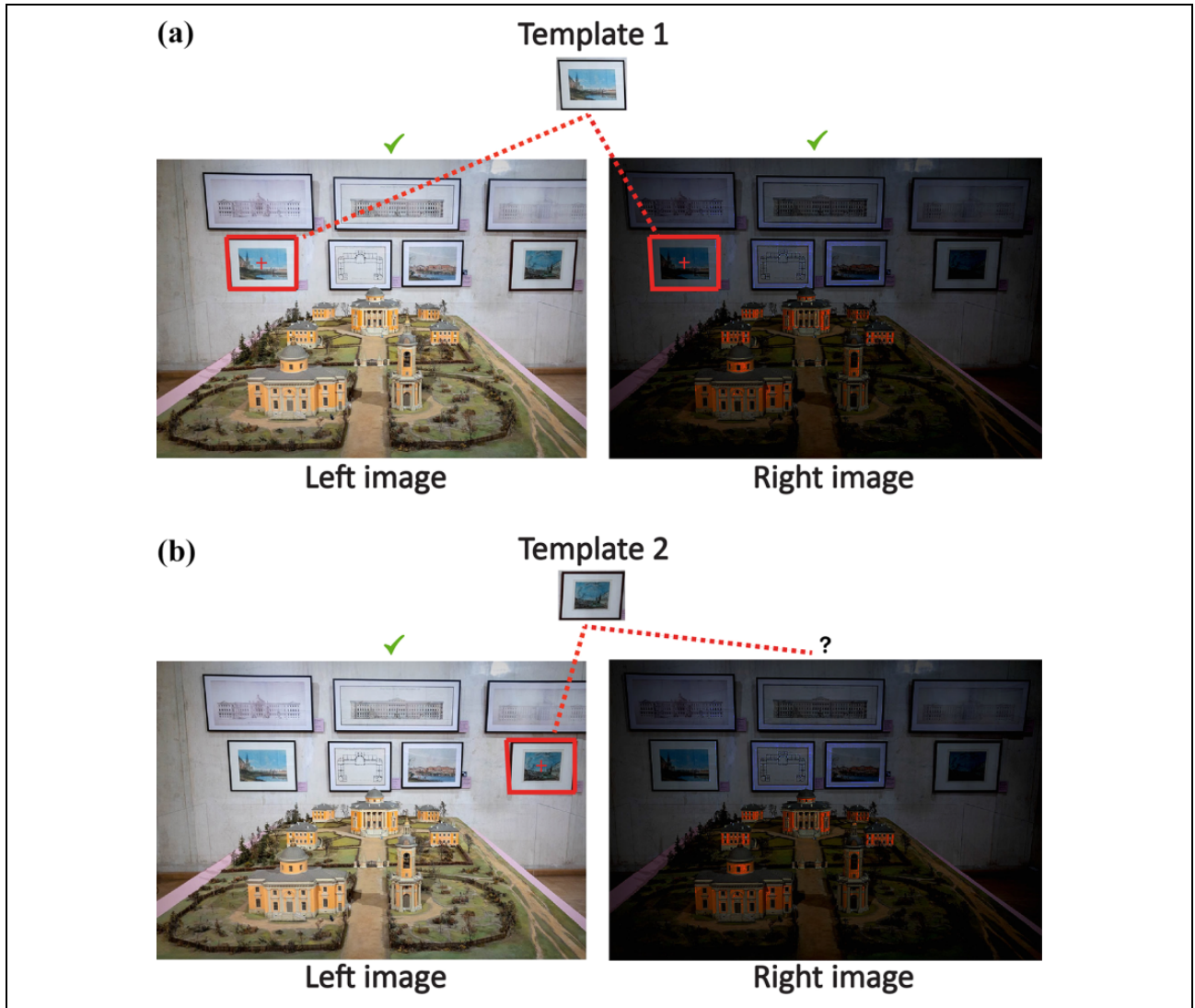


Figure 2. Template matching in stereoscopic images. (a) The template was successful located in both images despite the quality between the images. (b) The template was found only in left image, the low quality entails the mismatch in right image.

size of the image sensor, resulting in straight lines curved inward. In the opposite way, the pincushion distortion is seen on telephoto lens, where the FOV of the lens is smaller than the size of the image sensor, resulting in straight lines curved outward. In addition, the mustache distortion appears in several lens with variable FOV. In this distortion, the straight lines are seen curved inward toward the center of the image and curved outward at the extreme corners of the image. The lens distortion in SVS causes inaccurate measurements in the 3-D points localization, especially toward the extreme edges of the images where the distortion affects more.

SVS implementation

The SVS obtains 3-D information from two images captured from two different cameras separated by a known distance. Similar design of SVS can be found in the

literature,^{27–29} The developed computer program for 3-D point localization using SVS can be divided into five steps: images capture, camera calibration, pattern match, computing pixel coordinates to angles, and triangulation. Figure 4 shows the localization of a 3-D point in the scene using the developed SVS. The coordinates (Pl_i, Pl_j) and (Pr_i, Pr_j) are the pixel coordinates of the projection points in the left and right camera, respectively, over the 3-D point located in the coordinates x , y , and z . Angles B_{ij} , C_{ij} , and β_{ij} are related to the 3-D point and its projections in the images. Variable b is the fixed distance between the two cameras which is named as base line.

Specifications of the SVS

The developed SVS in a particular 3-D point is presented in Figure 5, where b is the base line, l is the distance from the base line to the scene, and B_{ij} and C_{ij} are the left and right

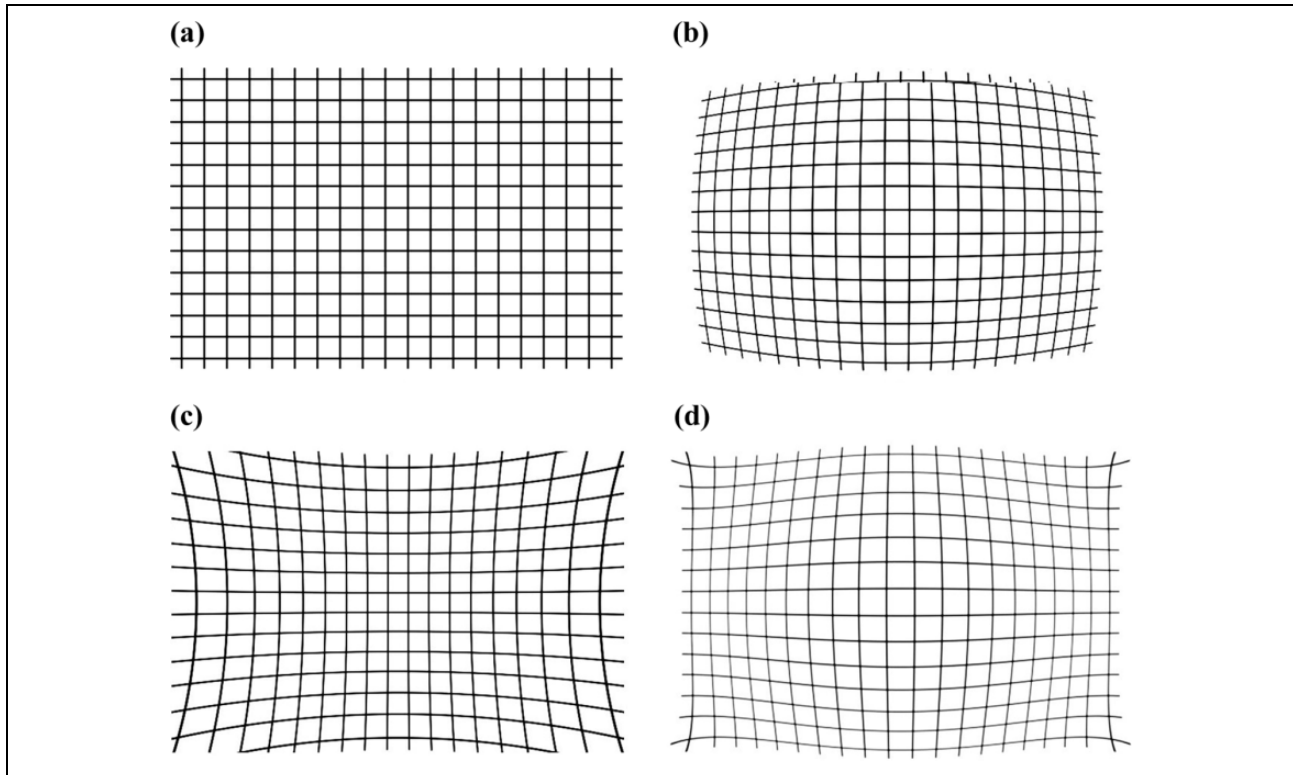


Figure 3. Types of lens distortion: (a) Non-distortion. (b) Barrel distortion. (c) Pincushion distortion. (d) Mustache distortion.

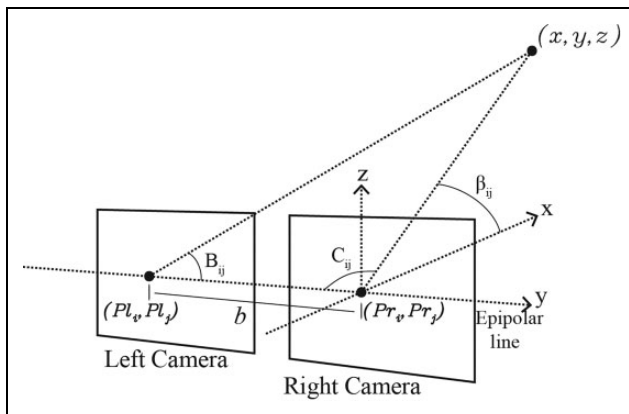


Figure 4. Localization of a 3-D point in SVS. SVS: stereo vision systems; 3-D: three-dimensional.

angles of the cameras, respectively. The design of the developed SVS has two cameras horizontally aligned between them (as shown in Figure 5), with their image planes coplanar from each other and separated by the base line b . This configuration is an epipolar geometry between both cameras, which ensures a same height of the pair of points in the vertical coordinates of the images.³⁰ The SVS uses two identical high definition cameras with an image dimension of $1626 \times 1236 \text{ px}^2$ and a frame rate of 20 fps; both cameras are separated by a base line of 6.35 cm and the main optical axis of the cameras is parallel to each other. Thereby, the particular SVS configuration presents

FOV values of 46.32° in the horizontal FOV (0.028° per pixel) and 36.01° in the vertical FOV (0.029° per pixel).

Images capture

The first step of the developed SVS is to obtain visual information through the image capture of both cameras which will be processed to obtain 3-D points of a particular scene. In this case, a specific test grid with known distances is used, where 3-D points will be obtained. The test grid used is shown in Figure 6, where 63 crosses along the grid can be appreciated, with 2 cm separation between them. The developed SVS locates the center of the crosses and obtains the 3-D coordinate of each one. Due to the displacement between cameras, both cameras capture a different scene,^{31,32} and to perform the stereo vision technique, it is required to identify the same scene in the image pair; therefore, the developed computer program is able to choose the region of interest in both cameras. For the experimentation, the test grid is placed in the middle of the cameras (as shown in Figure 5); using a distance from the base line to the test grid at 22.87 cm, the developed computer program locates the same scene with a slight displacement in both images, where 49 of the 63 crosses are observed.

Camera calibration

The developed calibration method used in SVS consists of four main steps:

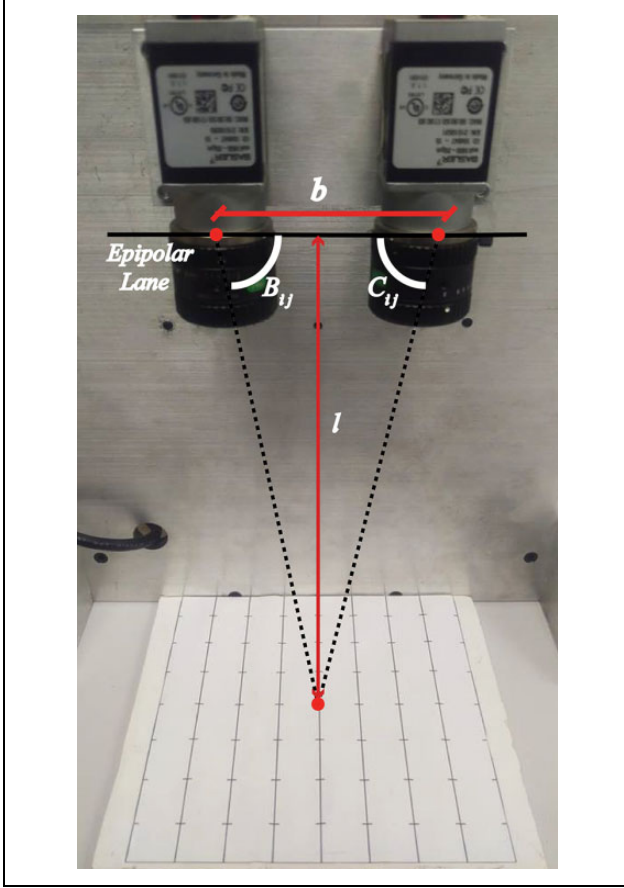


Figure 5. Developed SVS with the angle location in a particular 3-D point. SVS: stereo vision systems; 3-D: three-dimensional.

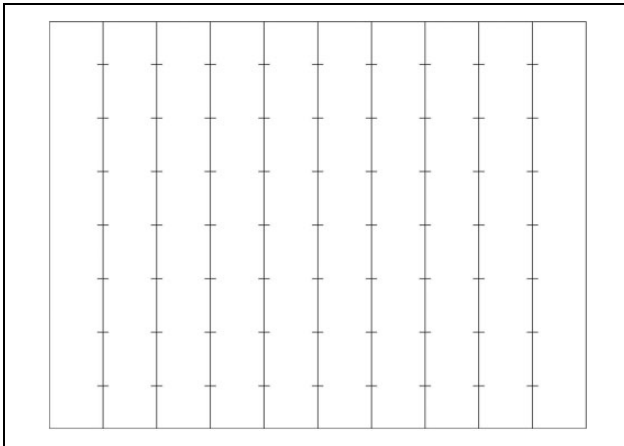


Figure 6. Test grid used for the experimentation.

Step 1: Estimate the horizontal and vertical angles for each of the crosses in the calibration grid.

Step 2: Use the developed SVS to estimate the same horizontal and vertical angles with the information of left and right camera.

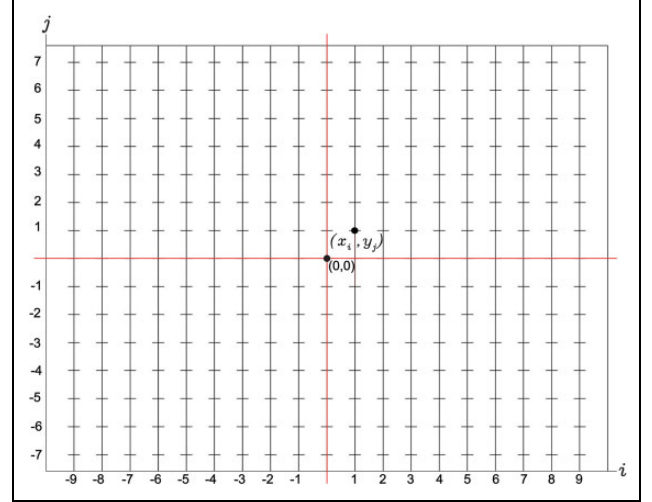


Figure 7. Developed calibration grid with origin in the center.

Step 3: With the estimated angles, find the adjustment angles ΔB_{ij} , ΔC_{ij} , and $\Delta \beta_{ij}$ using the least square method.

Step 4: Adjust the angles B_{ij} , C_{ij} , and β_{ij} (obtained by the SVS) by adding each ΔB_{ij} , ΔC_{ij} , and $\Delta \beta_{ij}$ to its respective angle.

In the first step, it is required to obtain the corresponding horizontal and vertical angles for each of the crosses in the calibration grid. The angles can be obtained according to the horizontal and vertical separation that the points have between them for any calibration grid. Figure 7 shows the developed calibration grid, using a total of 285 crosses with a separation of 1 cm between them.

The angles α_{ij} (horizontal angles) and v_{ij} (vertical angles) for each cross are obtained by the following equations

$$\alpha_{ij} = \arctan\left(\frac{l}{x_i}\right) \quad (1)$$

$$v_{ij} = \arctan\left(\frac{l}{y_j}\right) \quad (2)$$

where l is the distance from the base line to the calibration grid, and (x_i, y_j) are the coordinates of the located points with origin in the center of the calibration grid. To perform the developed calibration, the calibration grid must be perpendicular to the cameras. In the developed SVS, the cameras are parallel to a metal base which is perpendicular to the surface where the calibration grid is located. With these conditions, the SVS is able to locate 3-D points with great accuracy from any point of view (in the FOV) even if the scene is not perpendicular to the cameras. The second step is to obtain the angles of the corresponding two-dimensional points on the left and right camera using the developed SVS. Figure 8 shows the angle location of the 3-D point projection in both images.

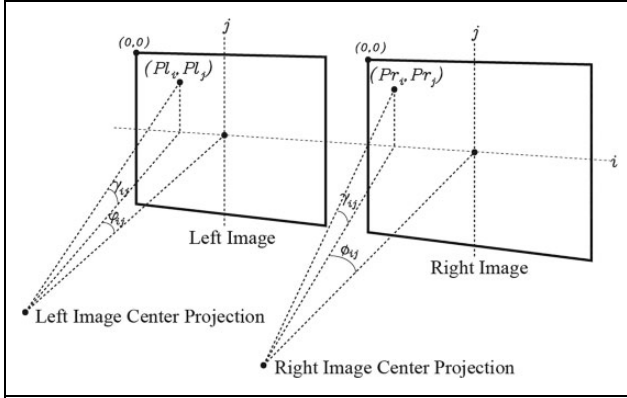


Figure 8. Angle location of the 3-D point projection in both images. 3-D: three-dimensional.

To obtain the angles on the left camera, the center of calibration grid and the center of left camera must be orthogonally aligned. Afterward, pattern matching is used to obtain the pixel coordinates of the points. Considering the origin coordinate in the center of left camera, the angles φ_{ij} (horizontal measurements of left angles) and γ_{ij} (vertical angle measurements) of the points are obtained in the following equations

$$\varphi_{ij} = \left(Pl_i - \frac{D_h}{2} \right) \cdot R_h \quad (3)$$

$$\gamma_{ij} = \left(\frac{D_v}{2} - Pl_j \right) \cdot R_v \quad (4)$$

where Pl_i and Pl_j are the horizontal and vertical pixel positions of the 3-D point projection in the left image, respectively; R_h and R_v are the angular gradients per pixel in horizontal and vertical directions, respectively; and D_h and D_v are the horizontal and vertical dimensions in pixels of the images, respectively. To obtain the angles on the right camera, it is necessary to align orthogonally the center of calibration grid and the center of the right camera and, afterward, perform pattern matching to obtain the pixel coordinates of the points. Equation (5) yields the angle ϕ_{ij} (horizontal measurements of right angles) relative to the right camera

$$\phi_{ij} = \left(Pr_i - \frac{D_h}{2} \right) \cdot R_h \quad (5)$$

where Pr_i is the horizontal pixel position of the 3-D point projection in the right image. For the vertical angles in the right camera, the resulting vertical angles from the left camera are used as the cameras are horizontally aligned and their image planes are coplanar from each other, obtaining the same vertical angle measurements γ_{ij} in both images. With the obtained angles, the third step is to find the adjustment angles that minimize the following square absolute errors in the horizontal and vertical angles (equations (6) to (8))

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\alpha_{ij} - \varphi_{ij}|^2 \right\} \quad (6)$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\alpha_{ij} - \phi_{ij}|^2 \right\} \quad (7)$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |v_{ij} - \gamma_{ij}|^2 \right\} \quad (8)$$

These minimization problems are solved using the least square method, where polynomial equations to find the adjustment angles ΔB_{ij} , ΔC_{ij} , and $\Delta \beta_{ij}$ are obtained.³³ The adjustment angles will be necessary to correct the angles of all points located in both images. Least square method can obtain any order polynomial equations, in the proposed calibration method is employed until third-order polynomial equations (equations (9) to (11))

$$\Delta B_{ij} = \sum_{n=0}^3 A_n \cdot \varphi_{ij}^n \quad (9)$$

$$\Delta C_{ij} = \sum_{n=0}^3 B_n \cdot \phi_{ij}^n \quad (10)$$

$$\Delta \beta_{ij} = \sum_{n=0}^3 C_n \cdot \gamma_{ij}^n \quad (11)$$

where A_n , B_n , and C_n are the adjustment coefficients of the functions obtained by the least square method. In the final step, the angles B_{ij} , C_{ij} , and β_{ij} are adjusted by adding each ΔB_{ij} , ΔC_{ij} , and $\Delta \beta_{ij}$ to its respective angle, obtaining the calibrated angles Bc_{ij} , Cc_{ij} , and βc_{ij} (equations (12) to (14))

$$Bc_{ij} = B_{ij} + \Delta B_{ij} \quad (12)$$

$$Cc_{ij} = C_{ij} + \Delta C_{ij} \quad (13)$$

$$\beta c_{ij} = \beta_{ij} + \Delta \beta_{ij} \quad (14)$$

Pattern match

In this step, the central coordinates in pixels of all the crosses of the test grid are located for both cameras. To estimate the coordinates, pattern matching method (also called area-based image match) is employed. This match method has been widely studied and applied in the literature.^{34–37} In pattern matching, a correlation window of brightness (intensity) patterns is performed between a template image and the two images, providing the regions in each image that has the most correspondence brightness with respect to the template image.³⁸ The developed computer program uses an image template with dimensions of 20 pixels per side with a cross in the middle. This template is used to locate regions with a similar cross in the middle of 20 pixels per side in the images from both cameras.

When the square regions are located, the program estimates the central coordinates in pixels of all the located regions (the coordinates match with the center of the cross in each region). The developed computer program uses a score to identify how closely the template image matches in different regions of both images (score range is between 0 and 1000). The minimum score tolerance to find the pattern matches in the developed program is 800. Common problems presented in the pattern matching are occlusions which occurs when a particular region of the scene is observed in one image but not in the other.³⁹ Priya and Anand⁴⁰ focus on the problem of occlusion and provide a solution to avoid them through a novel modified geometric mapping technique. In the developed program, if the match score is low, or an occlusion is presented, the localized point is not considered in the next step.

Computing pixel coordinates to angles

As shown in Figure 4, the angles B_{ij} , C_{ij} , and β_{ij} are required to obtain the coordinates of the 3-D points. The coordinates in pixels of each 3-D point projections on the pair images estimated in the pattern match are used to calculate the angles. To obtain the angle B_{ij} , it is required the horizontal dimension D_h of the cameras, the horizontal resolution R_h , and the horizontal pixel position Pl_i of the 3-D point projection in the left image. Equations (15) and (16) show the value of the angle B_{ij} when the 3-D point projection is located on the left or right side of the center image

$$B_{ij} = 90^\circ + \left(\left| \frac{D_h}{2} - Pl_i \right| \cdot R_h \right)_{\text{at } Pl_i \leq \frac{D_h}{2}} \quad (15)$$

$$B_{ij} = 90^\circ - \left(\left| \frac{D_h}{2} - Pl_i \right| \cdot R_h \right)_{\text{at } Pl_i \geq \frac{D_h}{2}} \quad (16)$$

To obtain the angle C_{ij} , the horizontal pixel position Pr_i of the 3-D point projection in the right image must be considered. An inverse relation at the angle B_{ij} can be appreciated (equations (17) and (18))

$$C_{ij} = 90^\circ + \left(\left| \frac{D_h}{2} - Pr_i \right| \cdot R_h \right)_{\text{at } Pr_i \geq \frac{D_h}{2}} \quad (17)$$

$$C_{ij} = 90^\circ - \left(\left| \frac{D_h}{2} - Pr_i \right| \cdot R_h \right)_{\text{at } Pr_i \leq \frac{D_h}{2}} \quad (18)$$

Angle β_{ij} can be obtained with the vertical dimension D_v of the cameras, the vertical resolution R_v , and the vertical pixel position Pv_j of the 3-D point projection in left or right image (equation (19))

$$\beta_{ij} = \left(\frac{D_v}{2} - Pv_j \right) \cdot R_v \quad (19)$$

Because both cameras are placed in an epipolar lane, the vertical pixel position of the 3-D point projection in both images is the same.^{41,42}

Triangulation

Triangulation process is widely used in multiple applications to locate point coordinates in a scene.^{43–45} In the currently developed SVS, the triangulation is performed with the base line of the cameras and the center point position of the crosses in the test grid located in the left and right images. For each triangulation, angles B_{ij} , C_{ij} , and β_{ij} are obtained to calculate the x_{ij} , y_{ij} , and z_{ij} coordinates of the 3-D points in the scene. Therefore, a set of triangulation equations were developed derived from the law of sines (equations (20) to (22))^{21,46,47}

$$x_{ij} = b \left(\frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin (B_{ij} + C_{ij})} \right) \quad (20)$$

$$y_{ij} = b \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin (B_{ij} + C_{ij})} \right) \quad (21)$$

$$z_{ij} = b \left(\frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \tan \beta_{ij}}{\sin (B_{ij} + C_{ij})} \right) \quad (22)$$

Experimentation

To test the proposed calibration method, a routine has been developed in LabVIEW, which is able to find 3-D point coordinates with and without using the calibration method. The computer program is enabling to change several settings of the SVS such as camera resolution, FOV (horizontal and vertical), distance from the base line to the scene, base line, and number of rows and columns of the test grid. Also, the computer program indicates the area of interest to search in the image, time localization, and the obtained data of the 3-D points found in the scene. Figure 9 shows the processes performed by the computer program to obtain the coordinates of the points, where it can be appreciated the variables obtained in each process.

The first experiment was developed where a surface was scanned at different distances. Figure 10 shows two same grids with a total of 100 crosses separated by a distance of 5 cm in the x -axis. The developed program performed the scan of the crosses two times, one using the developed calibration method and other without using it.

A second experiment was developed, obtaining databases of 3-D points at different distances from the base line to the test grid using the proposed method and the developed computer program. For each distance, it obtained two databases, one using the calibration method and another without using it. In the developed experimentation, it obtained 22 databases (534 measurements), changing the distance every 1 cm. For the analysis, four databases were chosen, in which the distance was changed every 3 cm,

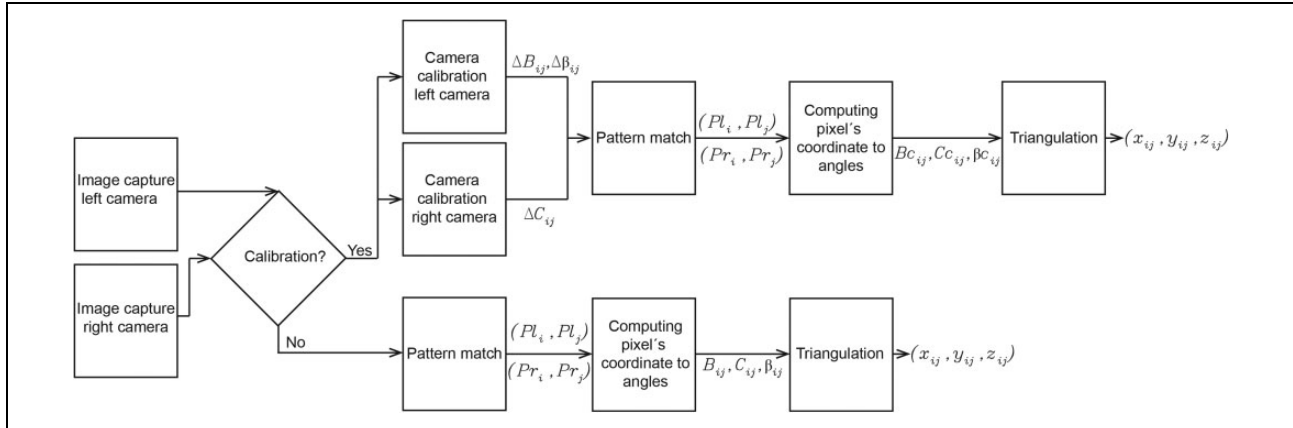


Figure 9. Block diagram of the developed SVS. SVS: stereo vision systems.

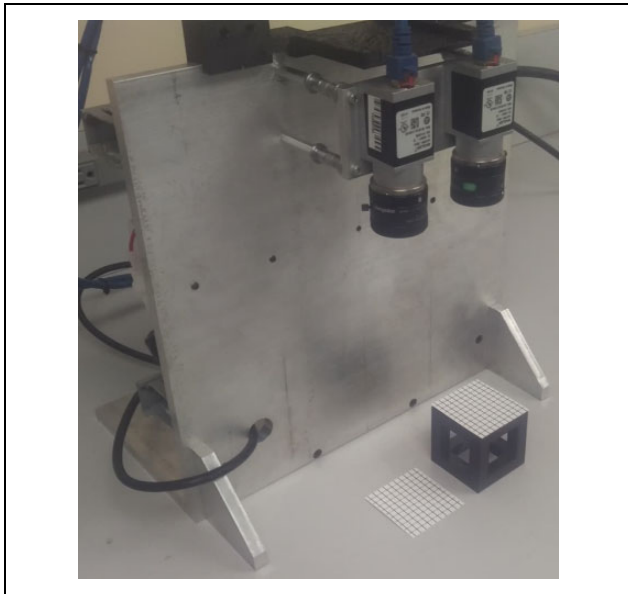


Figure 10. Experiment SVS of a surface at different distances. SVS: stereo vision systems.

starting at a distance of 22.87 cm, where two databases with a total of 98 measurements were obtained. Other databases selected were at distances of 19.87, 16.87, and 13.87 cm, where two databases were obtained of each one. Seventy measurements were obtained at 19.87 cm, 30 measurements at 16.87 cm, and 30 measurements at 13.87 cm.

Moreover, the third experimentation was performed, comparing the developed method with the three methods that use extrinsic and intrinsic parameters to calibrate the cameras: method of Zhang,⁴⁸ method of Jia et al.,⁴⁹ and method of Cui et al.⁵⁰ For this experimentation, a database of 49 3-D points is estimated at a distance of 22.87 cm using the developed calibration method and the previously mentioned calibration methods in the SVS. Finally, with each estimated database, a reconstruction error is calculated and compared between the calibration methods. The system is able to perform the calibration in 280 ms, while

the location of 49 3-D points can be realized in 200 ms. This execution time was obtained using a compact vision system from national instruments, with a processor Intel Atom quad-core 1.91 GHz.

Experimentation results

Referring to the first experiment, Figure 11 shows the scan of the grid on a 3-D view, and Figure 12 shows the scan of the grid at different planes. Figures 11(a) and 12(a) and (c) show a barrel distortion that produces a curvature in straight lines of the images and therefore inaccuracy of the measurements. Moreover, the quality of the images due to the image digitalization causes dispersion of the points in XZ plane (Figure 12(e)). On the other hand, Figures 11(b) and 12(b) to (f) show the corrections of the errors by the developed calibration method.

For the second experiment, Table 1 shows 10 measurements located along the test grid employing a distance of 22.87 cm from the base line to the test grid. Furthermore, Table 1 shows the absolute error compared with the real database without using the calibration method. In the same way, Table 2 shows the analysis using the calibration method. As it can be appreciated, the measurements on each coordinate are better in the calibrated SVS than the SVS without using the calibration. Averages of absolute errors considering the 49 measurements obtained without using the calibration in x , y , and z coordinates were of 0.6908, 0.0412, and 0.0933 cm, respectively. Otherwise, averages of absolute error in x , y , and z coordinates in the SVS using the calibration were of 0.1307, 0.034, and 0.0512 cm, respectively. These results using the calibration method represent improvements in terms of percentage in x , y , and z coordinates of 81.07%, 17.47%, and 45.12%, respectively.

The proposed calibration was performed in other three scenarios, changing the distances from the base line to the test grid at 19.87, 16.87, and 13.87 cm. Figure 13 shows the absolute error comparison of 10 measurements obtained with and without using the calibration method in x

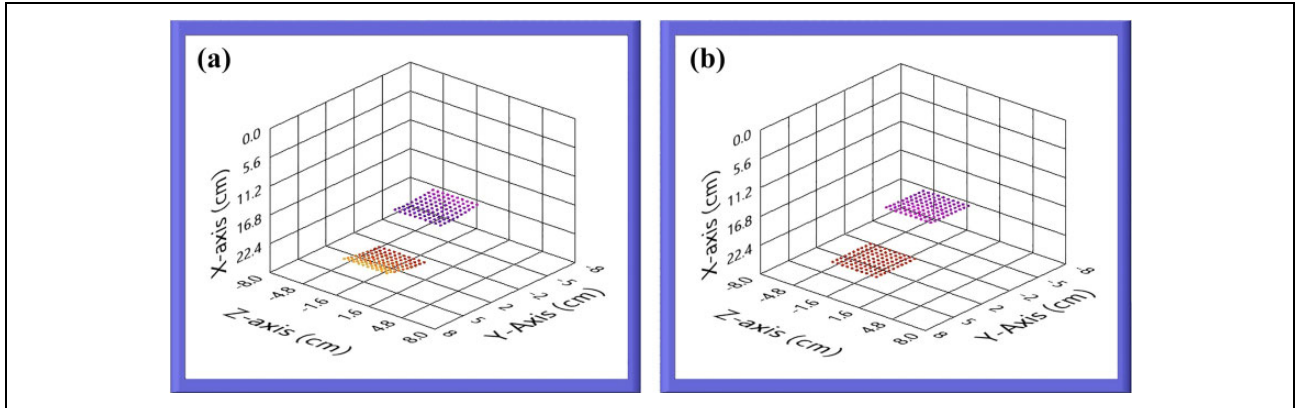


Figure 11. Scanned surface 3-D view: (a) Uncalibrated scan. (b) Calibrated scan. 3-D: three-dimensional.

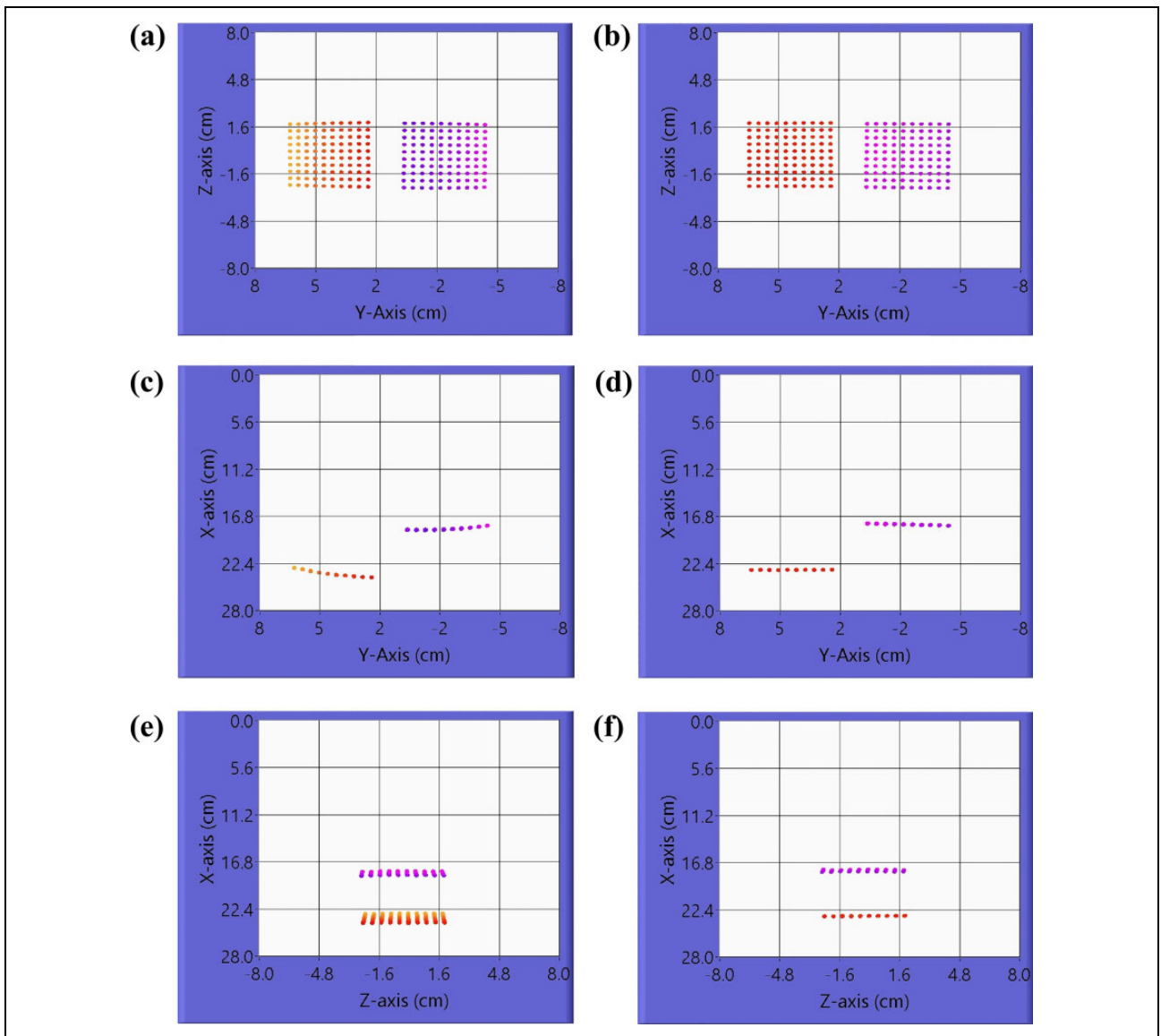


Figure 12. Surface scan at different planes: (a) Uncalibrated scan YZ plane. (b) Calibrated scan YZ plane. (c) Uncalibrated scan XY plane. (d) Calibrated scan XY plane. (e) Uncalibrated scan XZ plane. (f) Calibrated scan XZ plane.

Table 1. 3-D points localization without using calibration at 22.87 cm (simplified table).

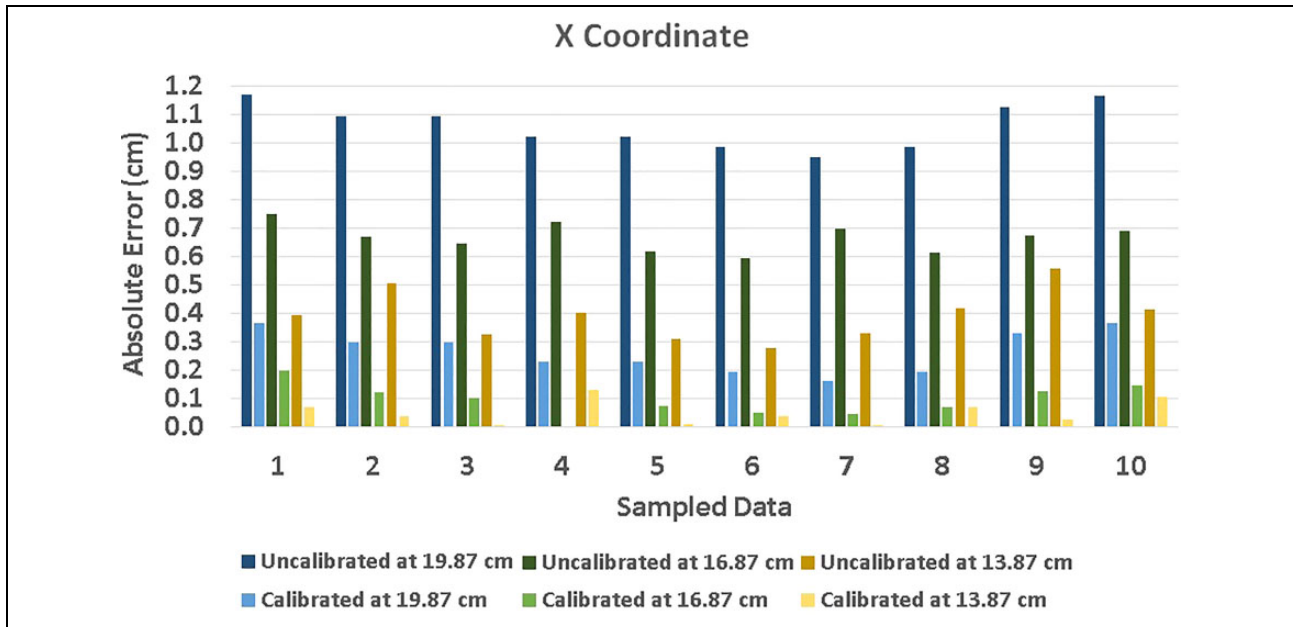
Real coordinates (cm)			Measured coordinates (cm)			Absolute error (cm)		
x	y	z	x	y	z	X error	Y error	Z error
.87	-4	6	23.72	-3.97	6.20	0.84	0.02	0.20
.87	2	6	24.01	2.05	6.22	1.13	0.05	0.22
.87	-4	4	23.52	-3.98	4.09	0.64	0.01	0.09
.87	2	4	23.92	2.04	4.10	1.04	0.04	0.10
.87	-2	2	23.97	-2.00	2.06	1.10	0.006	0.06
.87	2	2	23.87	2.03	2.03	1.00	0.03	0.03
.87	-2	0	23.92	-2.02	0.01	1.05	0.02	0.01
.87	-2	-2	23.92	-2.03	-2.04	1.04	0.03	0.04
.87	0	-4	24.04	-0.01	-4.15	1.17	0.01	0.15
.87	2	-6	24.11	2.01	-6.28	1.24	0.01	0.28

3-D: three-dimensional.

Table 2. 3-D points localization employing the developed calibration method at 22.87 cm (simplified table).

Real coordinates (cm)			Measured coordinates (cm)			Absolute error (cm)		
x	y	z	x	y	z	X error	Y error	Z error
.87	-4	6	23.11	-3.99	6.13	0.23	0.002	0.13
.87	2	6	23.04	2.04	6.06	0.16	0.04	0.06
.87	-4	4	22.93	-4.00	4.08	0.05	0.004	0.08
.87	2	4	22.95	2.03	4.02	0.08	0.03	0.02
.87	-2	2	22.98	-1.99	2.03	0.11	0.005	0.03
.87	2	2	22.91	2.02	2.00	0.03	0.02	0.003
.87	-2	0	22.94	-2.00	0.008	0.06	0.009	0.008
.87	-2	-2	22.94	-2.02	-2.02	0.06	0.02	0.02
.87	0	-4	22.93	-0.01	-4.04	0.06	0.01	0.04
.87	2	-6	23.13	2.00	-6.10	0.25	0.002	0.10

3-D: three-dimensional.

**Figure 13.** Absolute error comparison in x coordinate at 19.87, 16.87, and 13.87 cm (simplified graph).

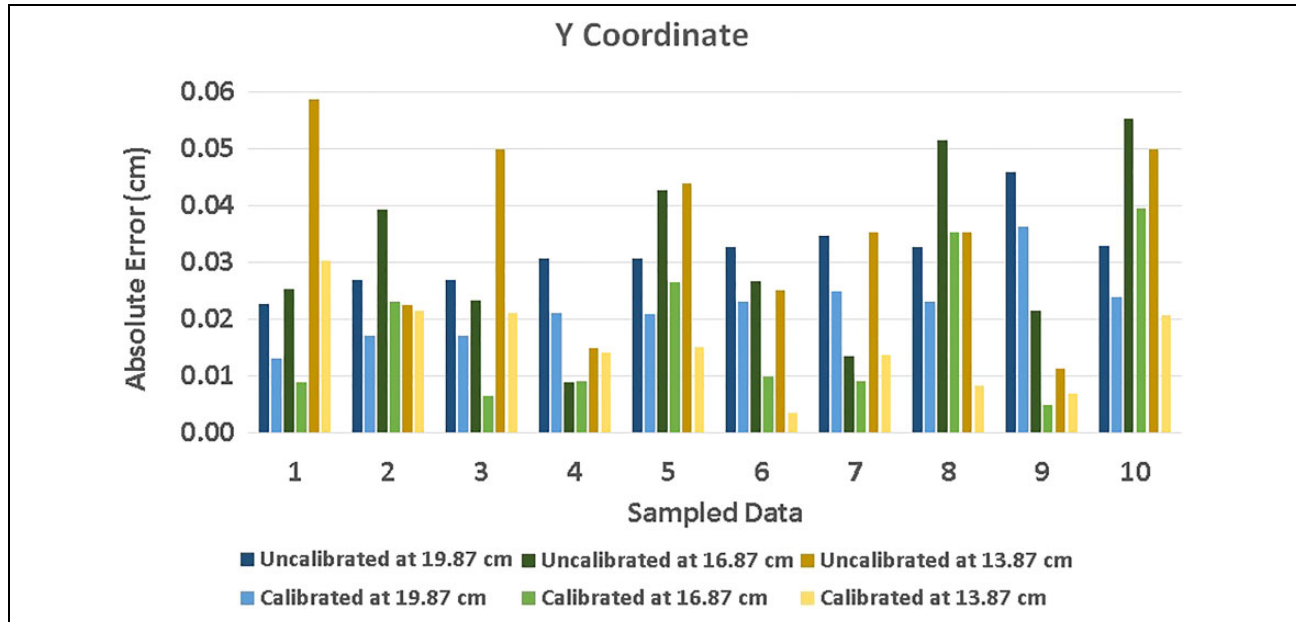


Figure 14. Absolute error comparison in y coordinate at 19.87, 16.87, and 13.87 cm (simplified graph).

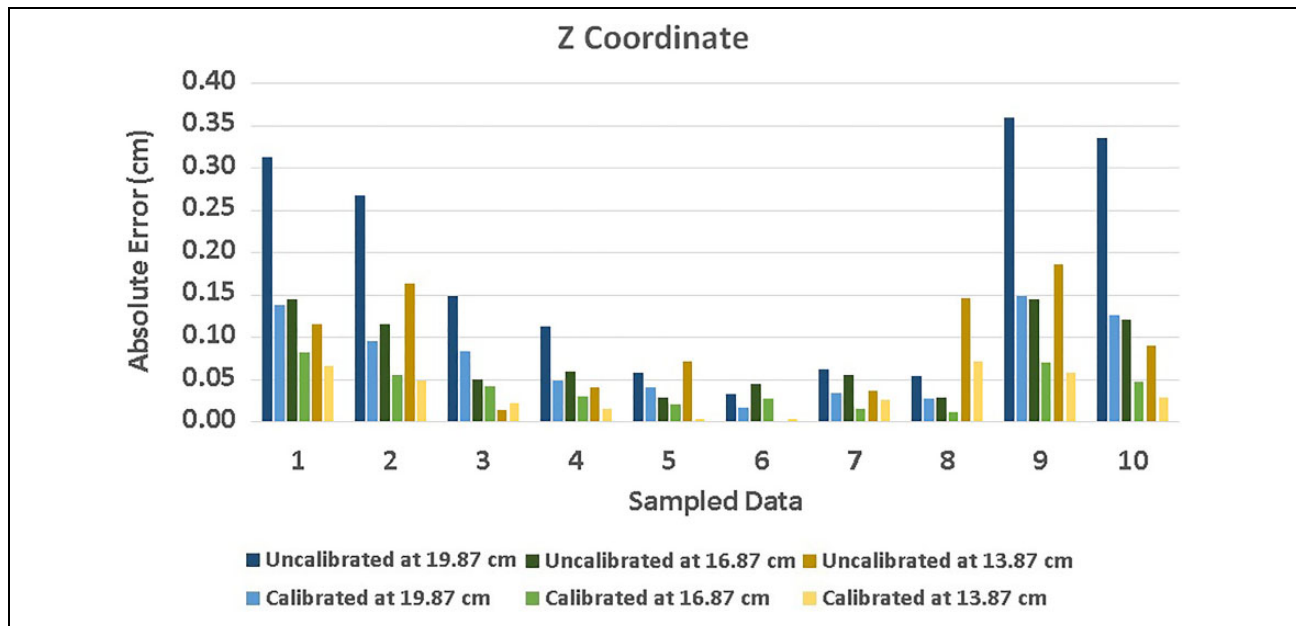


Figure 15. Absolute error comparison in z coordinate at 19.87, 16.87, and 13.87 cm (simplified graph).

coordinate, Figure 14 in y coordinate, and Figure 15 in z coordinate.

In each coordinate, it can be appreciated the improvements of the calibration method, obtaining improvements in averages of absolute errors in x coordinate of 76.65%, 87.86%, and 85.44%, with distances of 19.87, 16.87, and 13.87 cm, respectively. Furthermore, improvements in averages of absolute errors in y coordinate were of 34.53%, 42.28%, and 50.72%. Moreover, improvements in averages of absolute errors in z coordinate were of

50.09%, 51.48%, and 56.13%. With the databases at different distances, a comparative analysis is developed; Table 3 shows the error variability between the estimated data and the real data. Using the SVS without calibration, variabilities greater than 14 mm in x coordinate, in y coordinate greater than 2 mm, and in z coordinate greater than 7 mm was obtained. Implementing the calibration method, the variabilities decrease to a maximum of 3.2 mm in x coordinate, 1.7 mm in y coordinate, and 2.5 mm in z coordinate. Furthermore, a comparative error analysis was performed

Table 3. Error variability of the measured coordinates between the estimated data and the real data.

Distance (cm)	Dispersion error			Dispersion error		
	Without calibration (mm)			With calibration (mm)		
	x	y	z	x	y	z
At 22.87	−12.4 to 1	−1.5 to 1.2	−2.9 to 3.2	−2.6 to 0.5	−0.7 to 1	−1.3 to 1.1
At 19.87	−10.9 to −4	−0.5 to 0.7	−3.3 to 3.8	−3.6 to −0.4	−0.4 to 0.6	−1.3 to 1.2
At 16.87	−8.2 to −5.9	−0.5 to 0.2	−1.7 to 1.7	−1.9 to 0.4	−0.3 to 0.1	−0.8 to 0.7
At 13.87	−5.5 to −2.8	−0.5 to 0.5	−1.6 to 1.8	−1 to 1.6	−0.2 to 0.3	−0.6 to 0.7

Table 4. Comparative MSE analysis between the estimated data and the real data.

Distance (cm)	MSE without calibration			MSE with calibration			MSE reduction (%)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
At 22.87	67.8856	2.328	0.3034	0.1747	1.6403	0.3982	96.57	42.4	75.73
At 19.87	81.4649	4.9882	0.1082	0.0693	2.7695	0.5615	93.88	35.95	79.73
At 16.87	46.0581	0.9019	0.095	0.0367	0.9576	0.2009	98.04	61.36	79.03
At 13.87	15.0246	0.5439	0.1069	0.0249	0.7757	0.1268	96.38	76.67	83.65

MSE: mean square error.

by employing the mean square error (MSE) that provides a measurement error for each x , y , and z coordinates set of each database obtained.⁵¹

The MSE is obtained by

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (23)$$

where Y_i are the real values, $\hat{Y}_i$ are the predicted values, and n is the number of data points. Table 4 shows the comparative MSE analysis between the estimated databases and the real databases, where it can be appreciated the MSE reduction employing the calibration method in x coordinate is greater than 90%, in y coordinate is greater than 70%, and in z coordinate is greater than 80%. Furthermore, the results of Table 4 validate that the calibration method can improve the 3-D points localization in different distances.

For the third experiment, 3-D reconstruction error is used to compare the accuracy of 3-D points localization with different calibration methods.

The mean reconstruction error E_{pt} is obtained by

$$E_{\text{pt}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\|M_i - \hat{M}_i\|^2} \quad (24)$$

where n is the total number of the 3-D points and E_{pt} represents the reconstruction error between real 3-D coordinate M_i and estimated results $\hat{M}_i$. Then, the calibration results $\hat{M}_i$ of the 49 3-D points in each calibration method are compared with the real values of the 49 3-D points M_i using equation (24). These results are the mean reconstruction errors of each calibration method. For convenience, these errors are projected in XY, XZ, YZ, and XYZ

Table 5. Statistics of mean 3-D reconstruction errors of the calibration's methods in planes XY, XZ, YZ, and XYZ.

Calibration Method	XY (mm)	XZ (mm)	YZ (mm)	XYZ (mm)
Zhang	0.563	0.644	0.690	0.948
Jia et al.	0.465	0.574	0.545	0.793
Proposed	0.454	0.530	0.526	0.728
Cai et al.	0.288	0.307	0.297	0.446

3-D: three-dimensional.

planes. Table 5 shows the results of the reconstruction errors in planes XY, XZ, YZ, and XYZ of each calibration method.

As result, the mean errors by the proposed method are 0.454, 0.530, 0.526, and 0.728 mm in planes XY, XZ, YZ, and XYZ, respectively. In Table 5, it can be seen that the accuracy of the proposed method is better than Zhang's and Jia et al.'s methods in all planes, while Cai et al. present the best accuracy. Although the proposed method improves the accuracy in only two of the three methods, it demonstrates a high accuracy for 3-D points localization. Moreover, the proposed method requires a few number of steps to perform the calibration than Zhang, Jia et al., and Cai et al., obtaining simplicity in the implementation and a lower computational cost than classic calibration methods that require several steps to obtain the necessary parameters of the cameras for calibration.

Conclusions

The developed SVS is able to locate 3-D points in a scene by intensity pattern match localization methods and

performing a calibration method to improve accuracy of the measurements. In this article, a novel calibration method for SVS was presented, where using the SVS, several 3-D points at different distances were obtained. Furthermore, a comparative analysis between the obtained databases and the real databases was developed. Moreover, a comparative analysis of mean reconstruction errors in planes XY, XZ, YZ, and XYZ between classic calibration methods and the proposed method was performed. The dispersion error was reduced by employing the calibration method, obtaining the best ranges at 13.87 cm of distance, with error ranges in x coordinate from -1 mm to 1.6 mm, in y coordinate from -0.2 mm to 0.3 mm, and z coordinate from -0.6 mm to 0.7 mm. The MSE results validate the improvements in the localization of 3-D coordinates, obtaining the best MSE reduction in terms of percentage in x , y , and z coordinates of 98.04%, 76.67%, and 83.65%, respectively. Furthermore, the mean reconstruction errors of the proposed method are better in terms of accuracy than Zhang's and Jia et al.'s methods, with values in planes XY, XZ, YZ, and XYZ of 0.454, 0.530, 0.526, and 0.728 mm, respectively. The proposed method can be used to calibrate the SVS which requires a reliable localization of a specific 3-D point in the scene for decision-making or obtains reliable spatial information, for example, for autonomous navigation tasks and robotic vision applications. Advantage of the developed calibration method is the competitive accuracy in the 3-D points localization and a high execution speed due to the use of only the distortion of the cameras as information to perform the calibration in comparison with actual calibration methods that require many steps to obtain several parameters of the cameras for calibration. The developed calibration can be used in multiple machine vision applications, particularly machine vision applications where descalibrations are expected, and, therefore, it is necessary to perform a fast calibration to ensure the accuracy localization of the 3-D points.

Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The author(s) disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: This study was supported with funding from Universidad Autónoma de Baja California.

ORCID iD

Luis R Ramírez-Hernández  <https://orcid.org/0000-0001-5578-8745>

Wendy Flores-Fuentes  <https://orcid.org/0000-0002-1477-7449>

Lars Lindner  <https://orcid.org/0000-0002-0623-6976>

References

1. Malassiotis S and Stintzis MG. Stereo vision system for precision dimensional inspection of 3D holes. *Mach Vision Appl* 2003; 15(2): 101–113.
2. Kim SC, Kim HK, Lee CG, et al. A vision system for identifying structural vibration in civil engineering constructions. In: *SICE-ICASE international joint conference*, Busan, South Korea, 18–21 October 2006, pp. 5813–5818. IEEE.
3. Palma SR, Becker B, and Riviere C. Simultaneous calibration of stereo vision and 3D optical tracker for robotic microsurgery. In: *38th Annual northeast bioengineering conference (NEBEC)*, Philadelphia, PA, USA, 16–18 March 2012, pp. 351–352. IEEE.
4. Kang X, Azizian M, Wilson E, et al. Stereoscopic augmented reality for laparoscopic surgery. *Surg Endo* 2014; 28(7): 2227–2235.
5. Real-Moreno O, Rodríguez-Quinonez JC, Sergiyenko O, et al. Accuracy improvement in 3D laser scanner based on dynamic triangulation for autonomous navigation system. In: *2017 IEEE 26th international symposium on industrial electronics (ISIE)*, Edinburgh, UK, 19–21 June 2017, pp. 1602–1608. IEEE.
6. Rodríguez-Quinonez J, Sergiyenko O, Hernández-Balbuena D, et al. Improve 3D laser scanner measurements accuracy using a FFBP neural network with Widrow-Hoff weight/bias learning function. *Opto-Electronics Review* 2014; 22(4): 224–235.
7. Real-Moreno O, Castro-Toscano MJ, Rodríguez-Quinonez JC, et al. Implementing k-nearest neighbor algorithm on scanning aperture for accuracy improvement. In: *IECON 2018-44th annual conference of the IEEE industrial electronics society*, Washington, DC, USA, 21–23 October 2018, pp. 3182–3186. IEEE.
8. Castro-Toscano MJ, Rodríguez-Quinonez JC, Hernández-Balbuena D, et al. A methodological use of inertial navigation systems for strapdown navigation task. In: *2017 IEEE 26th international symposium on industrial electronics (ISIE)*, Edinburgh, UK, 19–21 June 2017, pp. 1589–1595.
9. Castro-Toscano MJ, Rodríguez-Quinonez JC, Hernández-Balbuena D, et al. Obtención de trayectorias empleando el marco strapdown ins/kf: Propuesta metodológica. *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* 2018; 15(4): 391–403.
10. Mac TT, Copot C, De Keyser R, et al. The development of an autonomous navigation system with optimal control of a UAV in partly unknown indoor environment. *Mechatronics* 2018; 49: 187–196.
11. Hui X, Bian J, Zhao X, et al. Vision-based autonomous navigation approach for unmanned aerial vehicle transmission-line inspection. *Int J Adv Robot Syst* 2018; 15(1): 1729881417752821.
12. Huntsberger T, Aghazarian H, Howard A, et al. Stereo vision-based navigation for autonomous surface vessels. *J Field Robot* 2011; 28(1): 3–18.

13. Tang D, Hu T, Shen L, et al. Ground stereo vision-based navigation for autonomous take-off and landing of UAVs: a Chan-Vese model approach. *Int J Adv Robot Syst* 2016; 13(2): 67.
14. Chavez AG, Mueller CA, Doembach T, et al. Underwater navigation using visual markers in the context of intervention missions. *Int J Adv Robot Syst* 2019; 16(2): 1729881419838967.
15. Kilpela A. *Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high-precision measurement applications*. Cambridge: Academic Press, 2002.
16. Bradshaw G. *Non-contact surface geometry measurement techniques*. Dublin: Technical report, Trinity College Dublin, Department of Computer Science, 1999.
17. Rodríguez-Quinonez JC, Sergiyenko OY, Preciado LCB, et al. Optical monitoring of scoliosis by 3D medical laser scanner. *Opt Laser Eng* 2014; 54: 175–186.
18. Mohamed A, Culverhouse PF, De Azambuja R, et al. Automating active stereo vision calibration process with cobots. *IFAC-PapersOnLine* 2017; 50(2): 163–168.
19. Hernández J, Sanz G, and Guijarro M. Técnicas de procesamiento de imágenes estereoscópicas. *Revista del CES Felipe II* 2011; 13: 1–20.
20. Machikhin AS, Batshev VI, Gorevoy AV, et al. A miniature prism-based stereoscopic system for 3D machine vision applications. In: *Eleventh international conference on machine vision (ICMV 2018)*, International Society for Optics and Photonics, Munich, Germany, 15 March 2019, pp. 110410 M.
21. Rodríguez-Quinonez J, Sergiyenko O, Flores-Fuentes W, et al. Improve a 3D distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods' approach. *Opto-Electron Rev* 2017; 25(1): 24–32.
22. Fitzgibbon AW. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion. In *Computer vision and pattern recognition, 2001. Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference*, Vol. 1, Kauai, HI, USA, 8–14 December, 2001, pp. I–I. IEEE.
23. Salvi J, Armangué X, and Batlle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern Recognit* 2002; 35(7): 1617–1635.
24. Zapata-Farfan J, Contreras-Martinez R, Rosete-Aguilar M, et al. Low-energy/pulse response and high-resolution-CMOS camera for spatiotemporal femtosecond laser pulses characterization@ 1.55 μ m. *Rev Sci Instrum* 2019; 90(4): 045116.
25. Damulira E, Yusoff MNS, Omar AF, et al. A review: photonic devices used for dosimetry in medical radiation. *Sensors* 2019; 19(10): 2226.
26. Wang Q, Cheng WC, Suresh N, et al. Development of the local magnification method for quantitative evaluation of endoscope geometric distortion. *J Biomed Opt* 2016; 21(5): 056003.
27. Carabias DM, Garca RR, and Salor JAR. Sistema de visión estereoscópica para navegación autónoma de vehículos no tripulados. *Universidad Complutense de Madrid* 2010; 1: 1–21.
28. Chang Q and Maruyama T. Real-time stereo vision system: a multi-block matching on GPU. *IEEE Access* 2018; 6: 42030–42046.
29. Mohamed A, Culverhouse P, Cangelosi A, et al. Active stereo platform: online epipolar geometry update. *EURASIP J Image Video Process* 2018; 2018(1): 54.
30. Campos MB, Tommaselli AMG, Castanheiro LF, et al. A fisheye image matching method boosted by recursive search space for close range photogrammetry. *Remote Sens* 2019; 11(12): 1404.
31. López Valles JM, Fernández Caballero A, and Fernández MA. Conceptos y técnicas de estereovisión por computador. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 2005; 9(27): 35–62.
32. Fan R and Dahnoun N. Real-time stereo vision-based lane detection system. *Meas Sci Technol* 2018; 29(7): 074005.
33. Kreyszig ENE and Kreyszig H. *Advanced engineering mathematics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
34. Faugeras O and Keriven R. Complete dense stereovision using level set methods. In: *European conference on computer vision*, Freiburg, Germany, 2–6 June 1998, pp. 379–393. Springer.
35. Brown MZ, Burschka D, and Hager GD. Advances in computational stereo. *IEEE Trans Pattern Anal* 2003; 25(8): 993–1008.
36. Bai C, Ma Q, Hao P, et al. Improving stereo matching algorithm with adaptive cross-scale cost aggregation. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 2018; 15(1): 1–9.
37. Ploumpis S, Amanatiadis A, and Gasteratos A. A stereo matching approach based on particle filters and scattered control landmarks. *Image Vision Comput* 2015; 38: 13–23.
38. Fernandez S, Forest J, and Salvi J. Active stereo-matching for one-shot dense reconstruction. In: *ICPRAM (2)*, Algarve, Portugal, 6–8 February 2012, pp. 541–545.
39. Anderson BL. Stereoscopic occlusion and the aperture problem for motion: a new solution1. *Vision Res* 1999; 39(7): 1273–1284.
40. Priya L and Anand S. Object recognition and 3D reconstruction of occluded objects using binocular stereo. *Cluster Comput* 2017; 21: 29–38.
41. Quiroga EAC, Martn LYM, and Caycedo AU. La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. *Revista Científica General José Mara Córdova* 2015; 13(16): 201–219.
42. Zhou Y, Gallego G, Rebecq H, et al. Semi-dense 3D reconstruction with a stereo event camera. In: *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, Munich, Germany, 8–14 September 2018, pp. 235–251.
43. Básaca LC, Rodríguez J, Sergiyenko OY, et al. Resolution improvement of dynamic triangulation method for 3D vision system in robot navigation task. In: *IECON 2010-36th annual conference on IEEE industrial electronics society*, Glendale, AZ, USA, 7–10 November 2010, pp. 2886–2891. IEEE.
44. Rodríguez-Quinonez JC, Sergiyenko O, Gonzalez-Navarro FF, et al. Surface recognition improvement in 3D medical

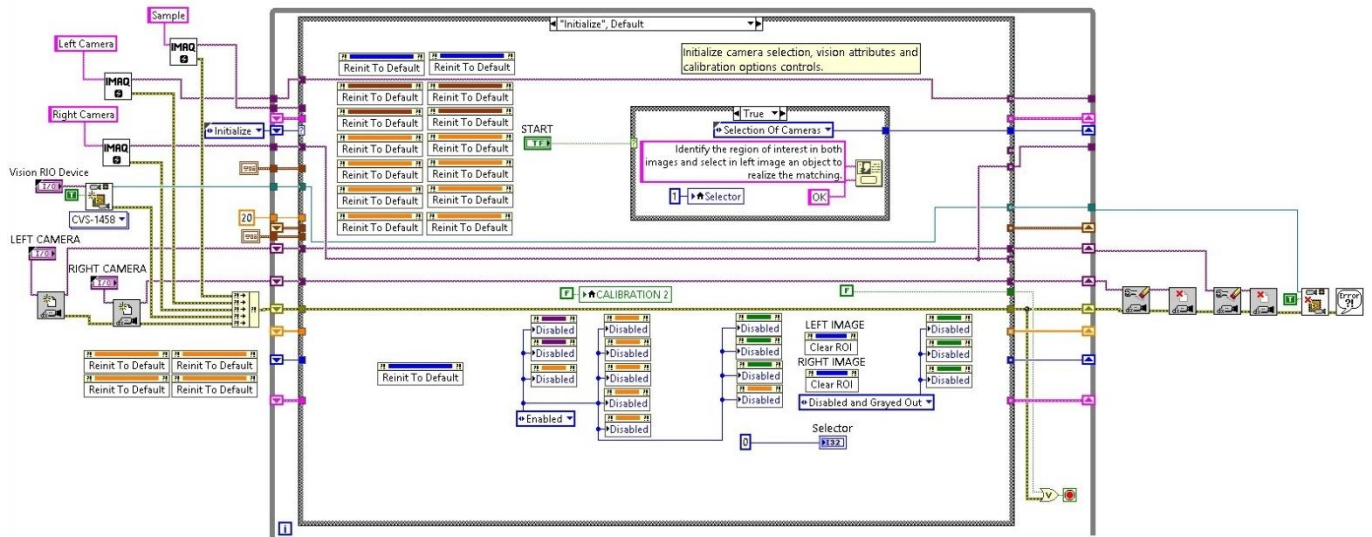
- laser scanner using Levenberg–Marquardt method. *Signal Process* 2013; 93(2): 378–386.
45. Rivera-Castillo J, Rivas-Lopez M, Nieto-Hipolito JI, et al. Structural health monitoring based on optical scanning systems and SVM. In: *Industrial electronics (ISIE), 2014 IEEE 23 rd international symposium*, Istanbul, Turkey, 1–4 June 2014, pp. 1961–1966. IEEE.
 46. Basaca-Preciado LC, Sergiyenko OY, Rodriguez-Quinonez JC, et al. Optoelectronic 3D laser scanning technical vision system based on dynamic triangulation. In: *Photonics conference (IPC), 2012 IEEE*, Burlingame, CA, USA, 23–27 September 2012, pp. 648–649. IEEE.
 47. Basaca-Preciado LC, Sergiyenko OY, Rodríguez-Quinonez JC, et al. Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot. *Opt Las Engine* 2014; 54: 159–169.
 48. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transact Patt Analys Mach Intell* 2000; 22(11): 1330–1334.
 49. Jia Z, Yang J, Liu W, et al. Improved camera calibration method based on perpendicularity compensation for binocular stereo vision measurement system. *Optics Exp* 2015; 23(12): 15205–15223.
 50. Cui Y, Zhou F, Wang Y, et al. Precise calibration of binocular vision system used for vision measurement. *Optic Exp* 2014; 22(8): 9134–9149.
 51. Lehmann EL and Casella G. *Theory of point estimation*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2006.

Anexo II: Código del Método de Calibración y el SVE con Control Servo-Visual Desarrollado en LabVIEW para la Localización de Puntos 3D.

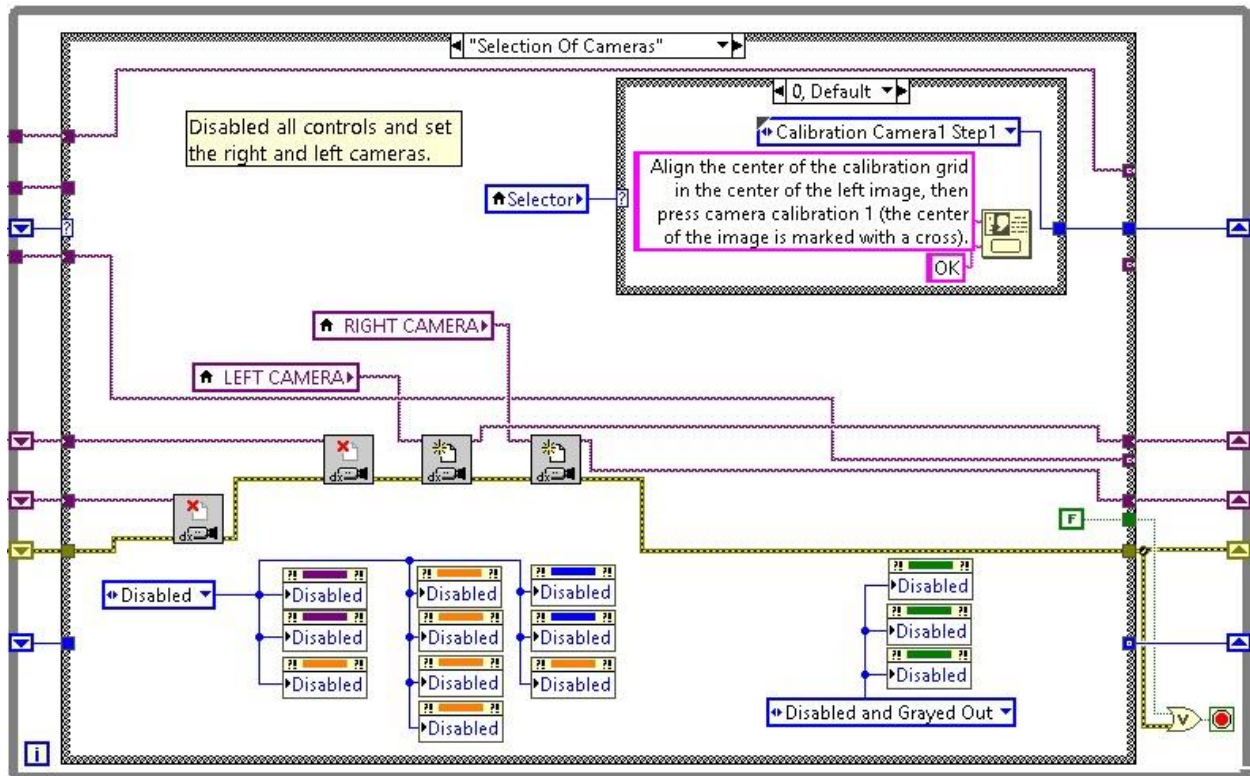
Interfaz del Programa

POINTS LOCALIZATION WITH STEREOSCOPIC VISION SYSTEM			
CAMERA SELECTION LEFT CAMERA: cam0 RIGHT CAMERA: cam1	LEFT IMAGE 		RIGHT IMAGE 
CAMERA RESOLUTION (PxS) X: 1626 Y: 1236			AREA OF INTEREST (PxS) LEFT UPPER LIMIT: X=0, Y=0 RIGHT UPPER LIMIT: X=0, Y=0 LEFT BOTTOM LIMIT: X=0, Y=0 RIGHT BOTTOM LIMIT: X=0, Y=0
FIELD OF VIEWS (Deg) HORIZONTAL: 46.3207 VERTICAL: 36.0198			TIME LOCALIZATION (Seg) 0
VISION ATTRIBUTES DISTANCE (mm): 233.7662 BASE LINE (mm): 63.5 ROWS: 7 COLUMNS: 7	CALIBRATION OPERATIONS CAMERA CALIBRATION CALIBRATION CAM 1 CALIBRATION CAM 2	STATUS OPERATIONS START START MATCH STOP	OBTAINED DATA (mm) X REAL COORDINATE: 0 Y REAL COORDINATE: 0 Z REAL COORDINATE: 0

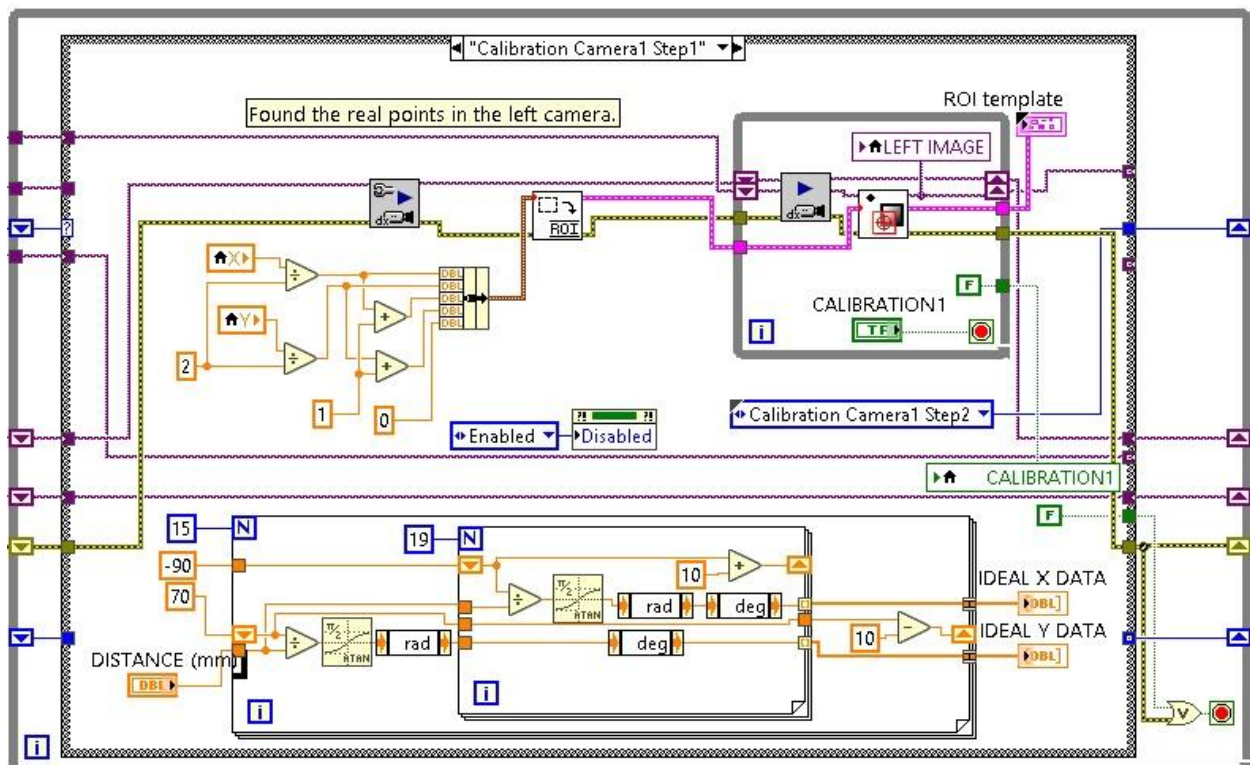
Código de Inicialización del Programa



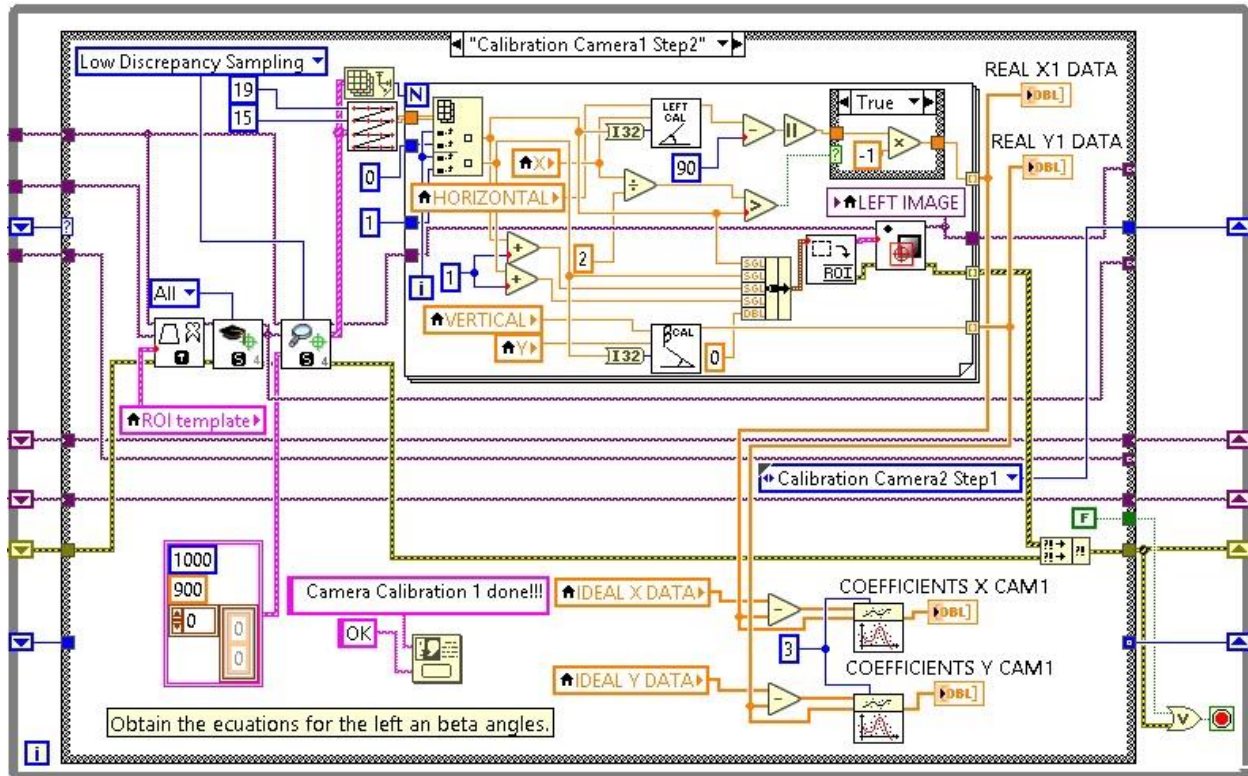
Código de Selección de Cámaras



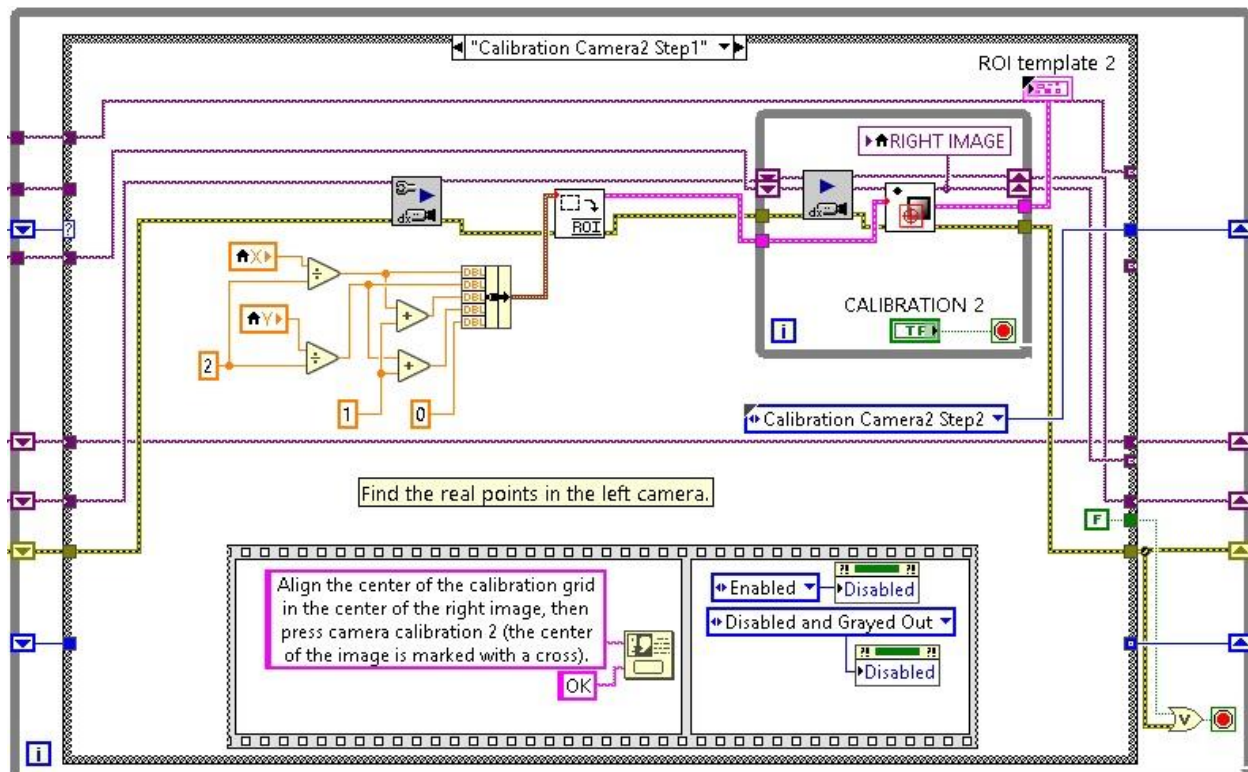
Código de Calibración de Cámara Izquierda Paso 1



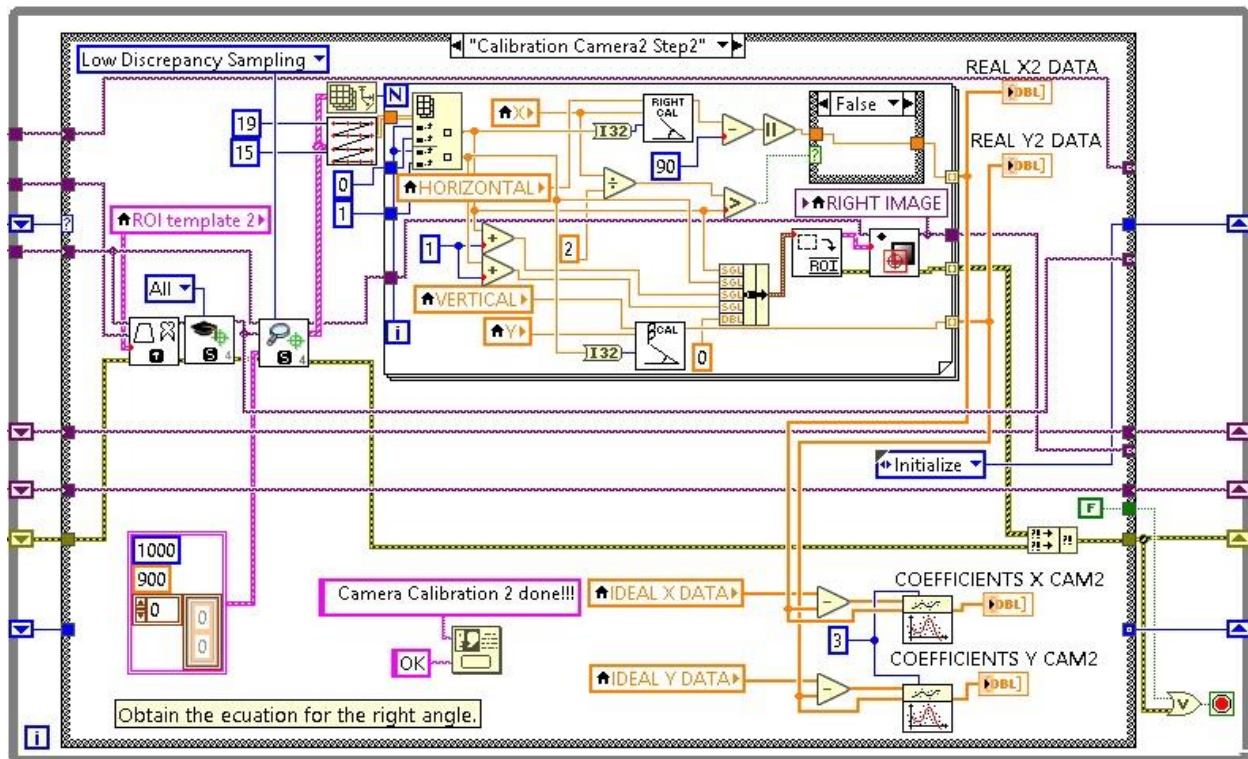
Código de Calibración de Cámara Izquierda Paso 2



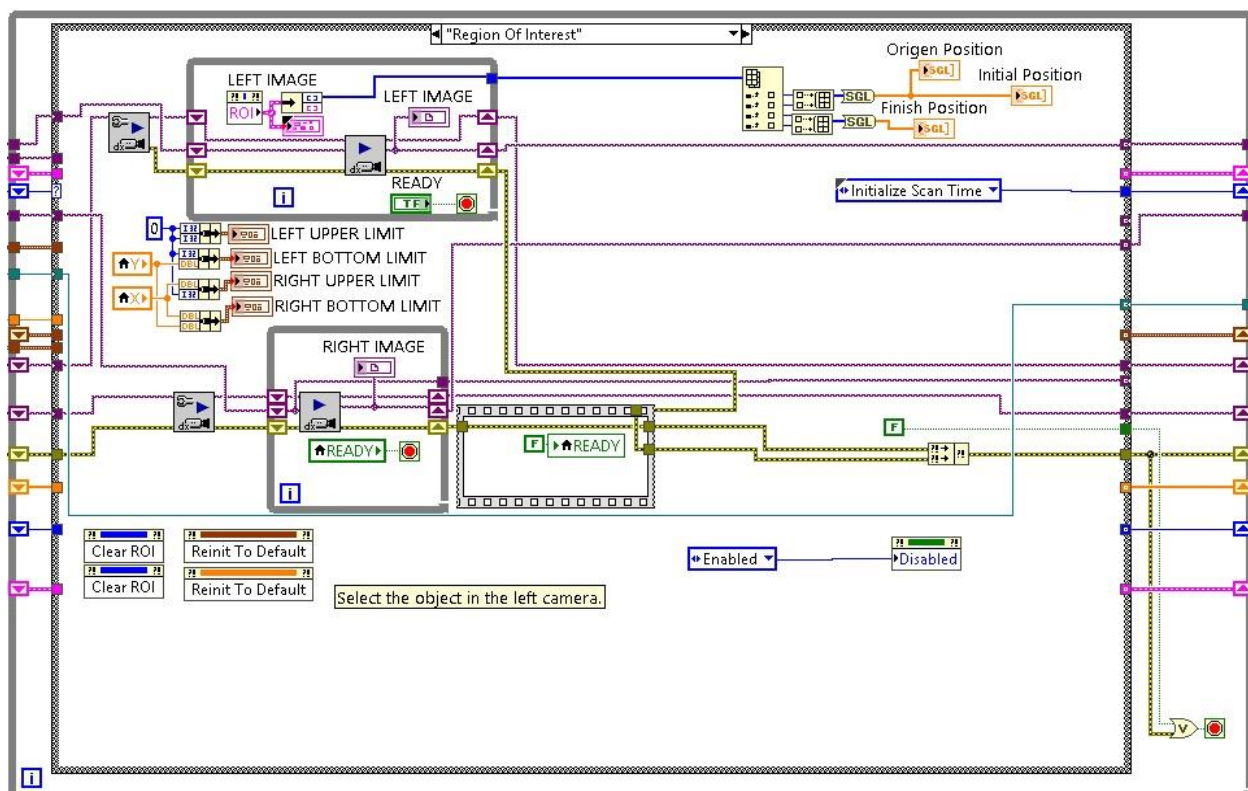
Código de Calibración de Cámara Derecha Paso 1



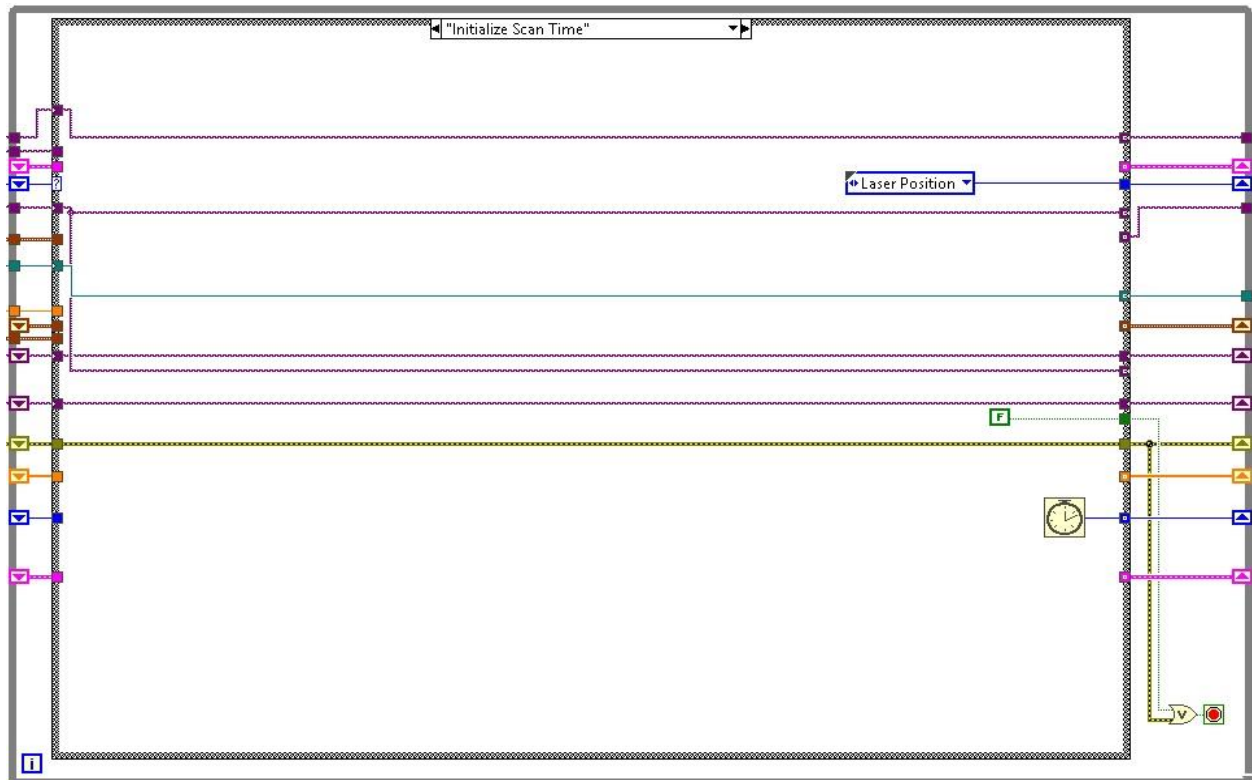
Código de Calibración de Cámara Derecha Paso 2



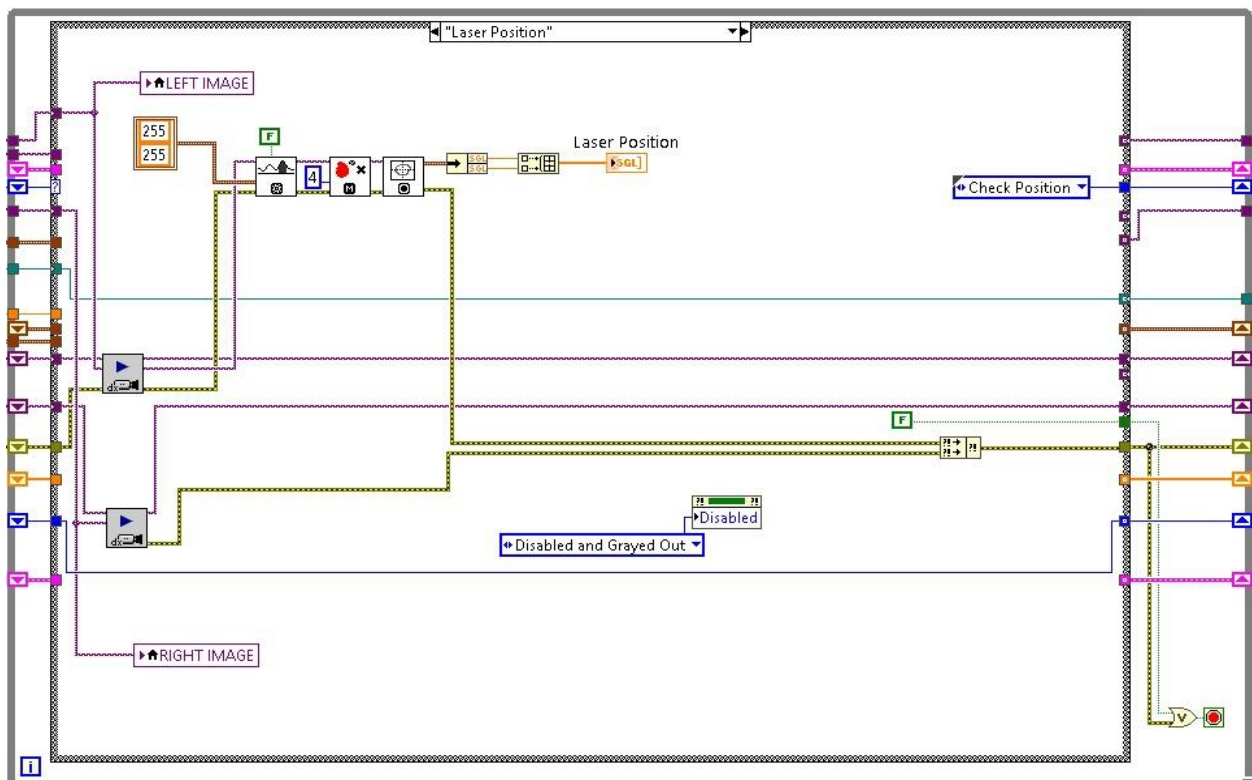
Código de Localización de la Región de Interés



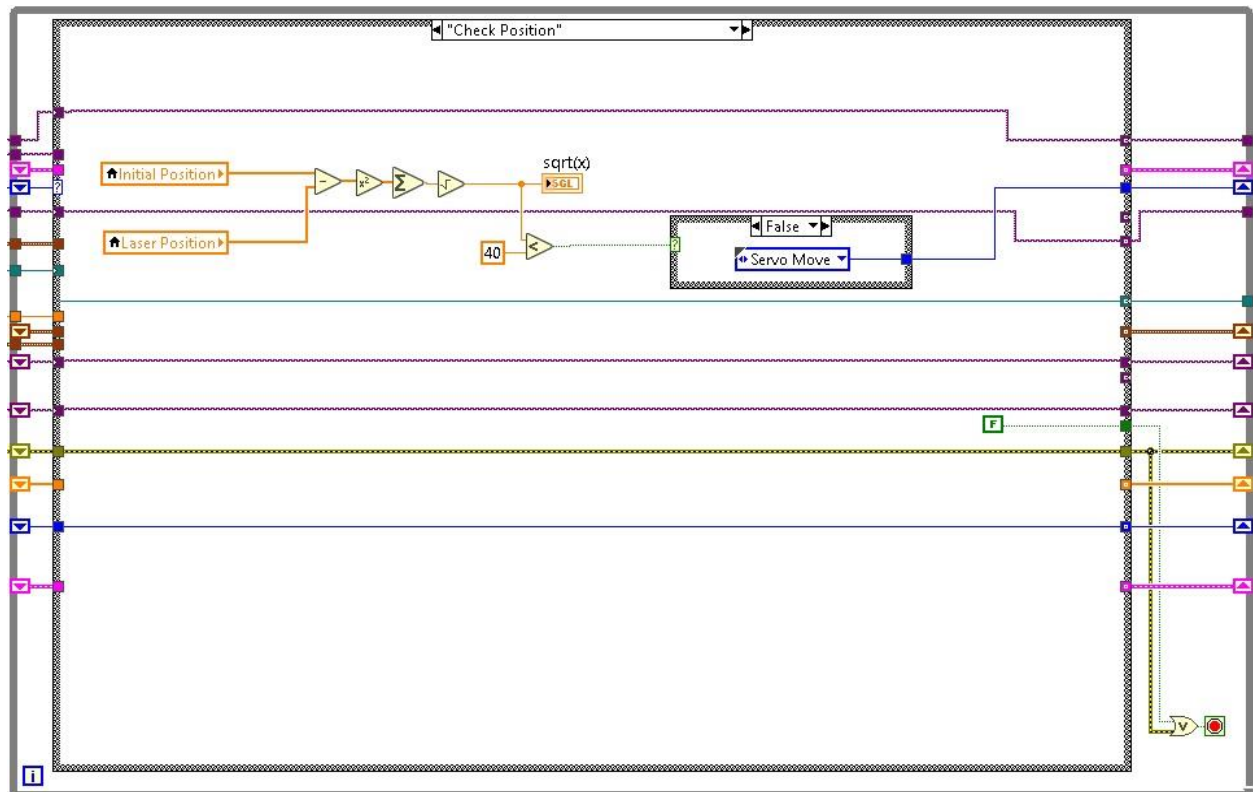
Código de Inicialización del Tiempo de Escaneo



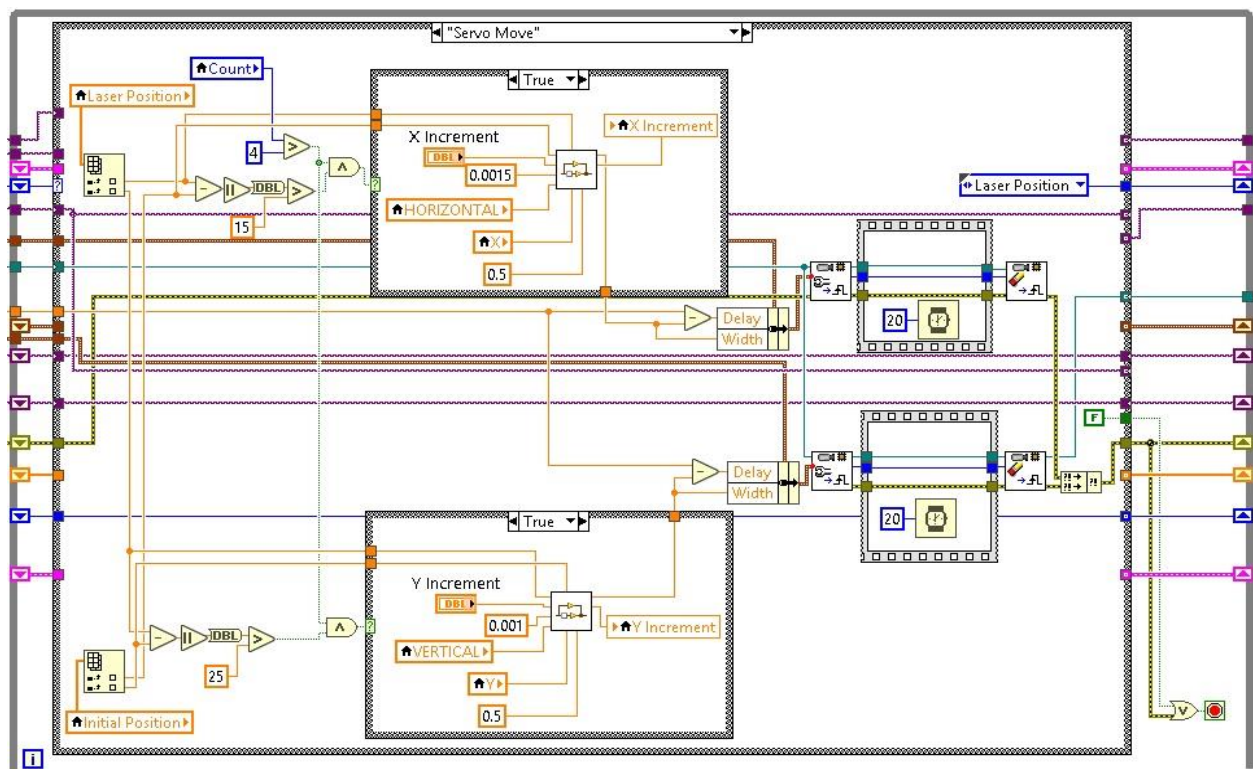
Código de la Posición del Láser



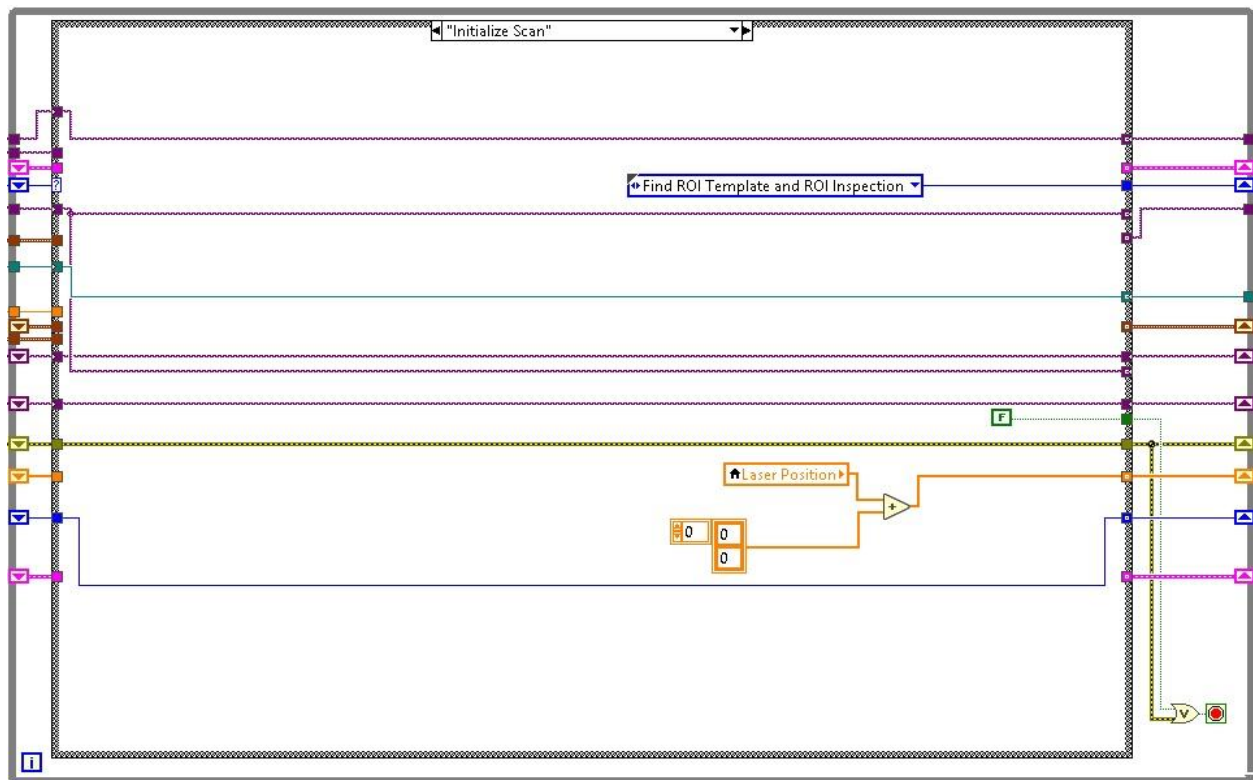
Código de Verificación de la Posición del Láser con Respecto al Punto Deseado



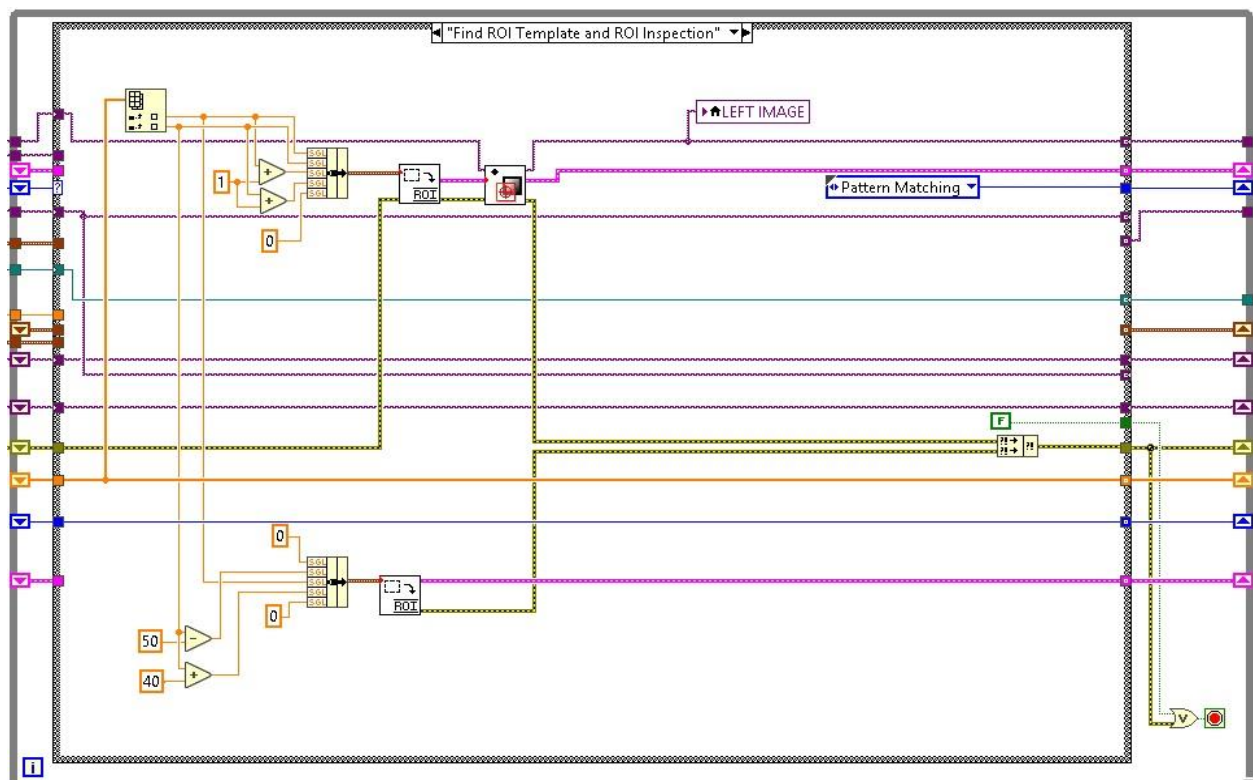
Código del Movimiento de los Servomotores



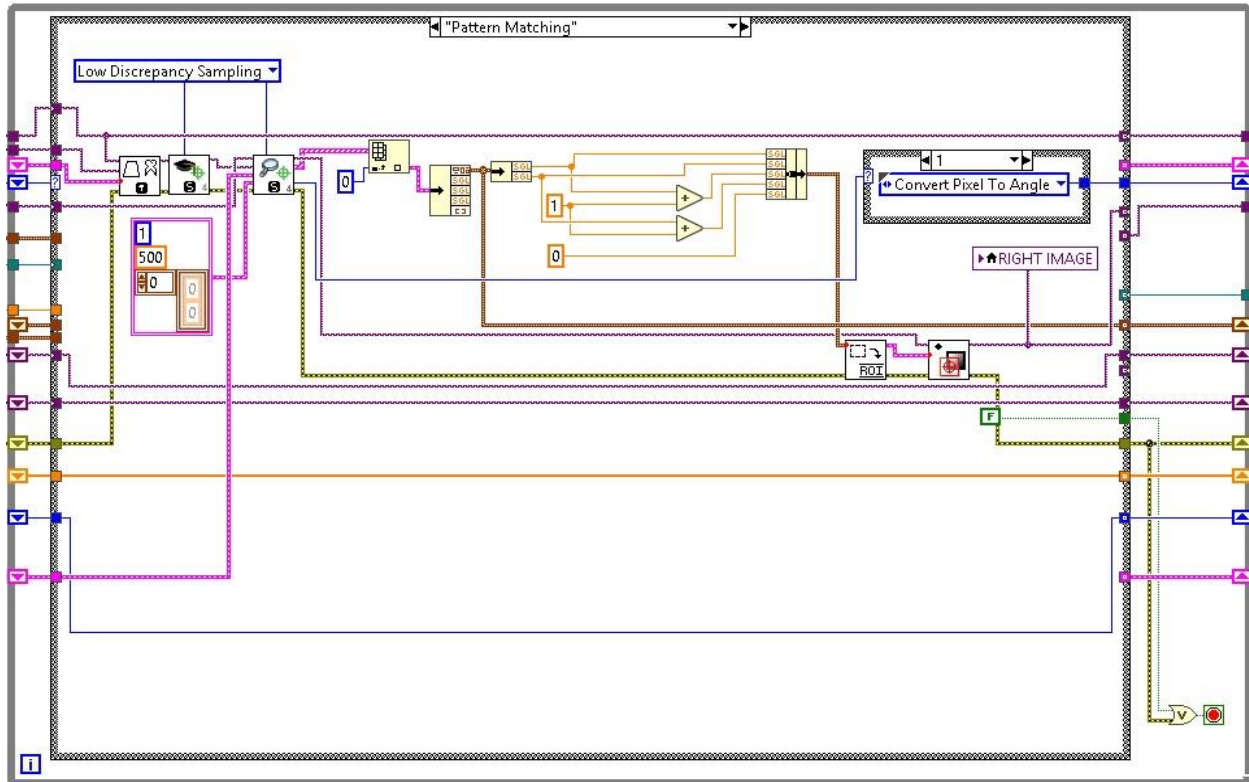
Código de Inicialización del Escaneo



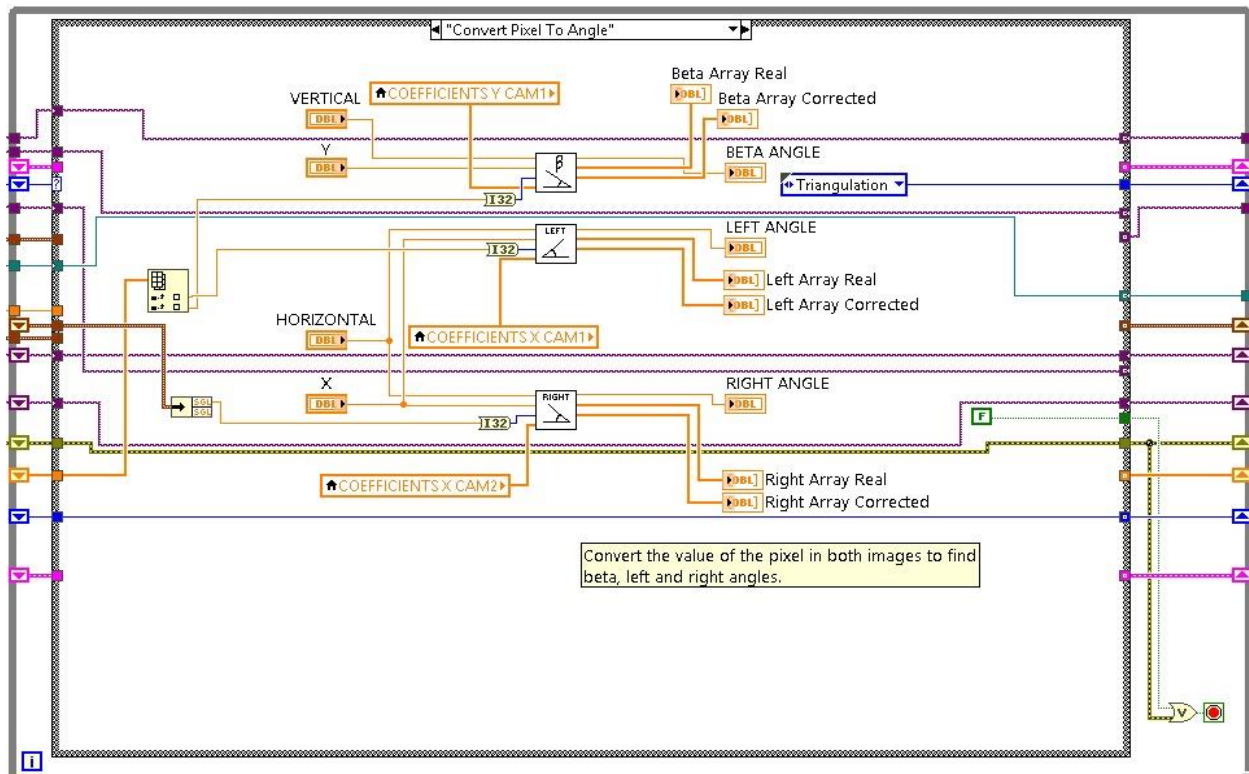
Código de Localización de las Regiones de Muestra e Inspección



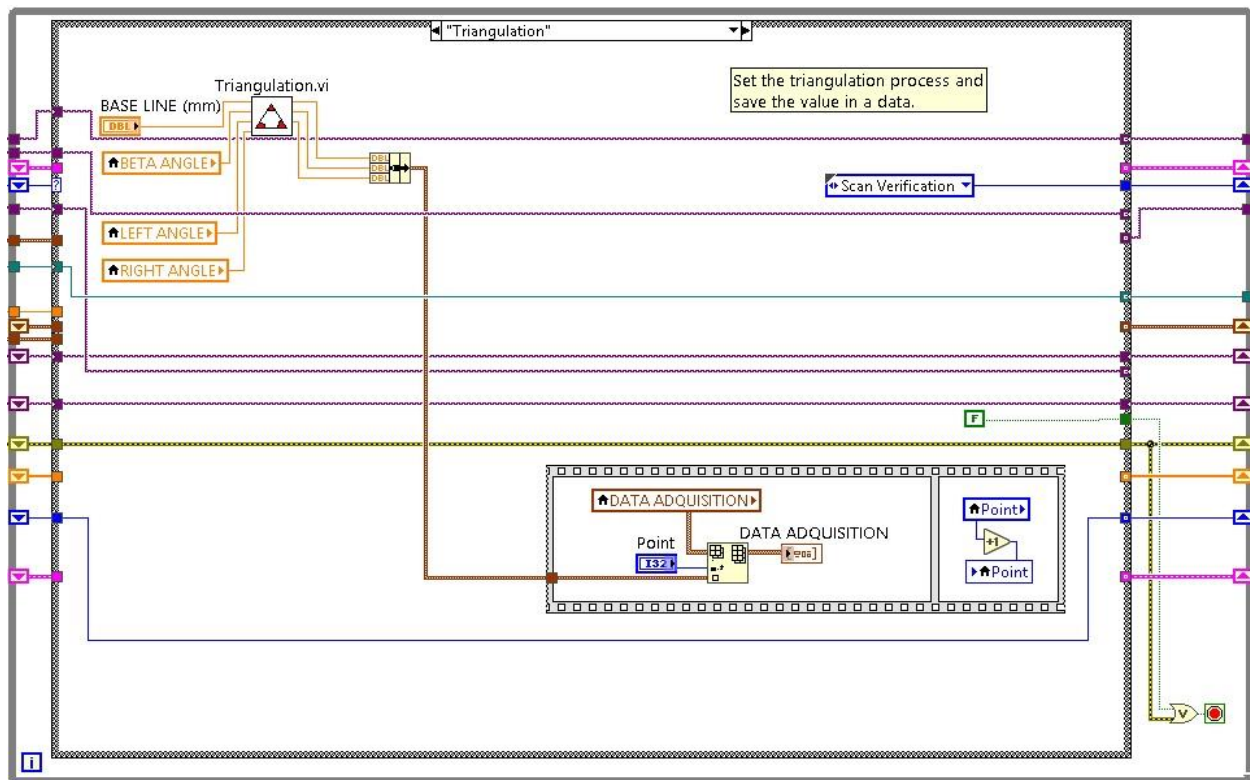
Código del Proceso PM



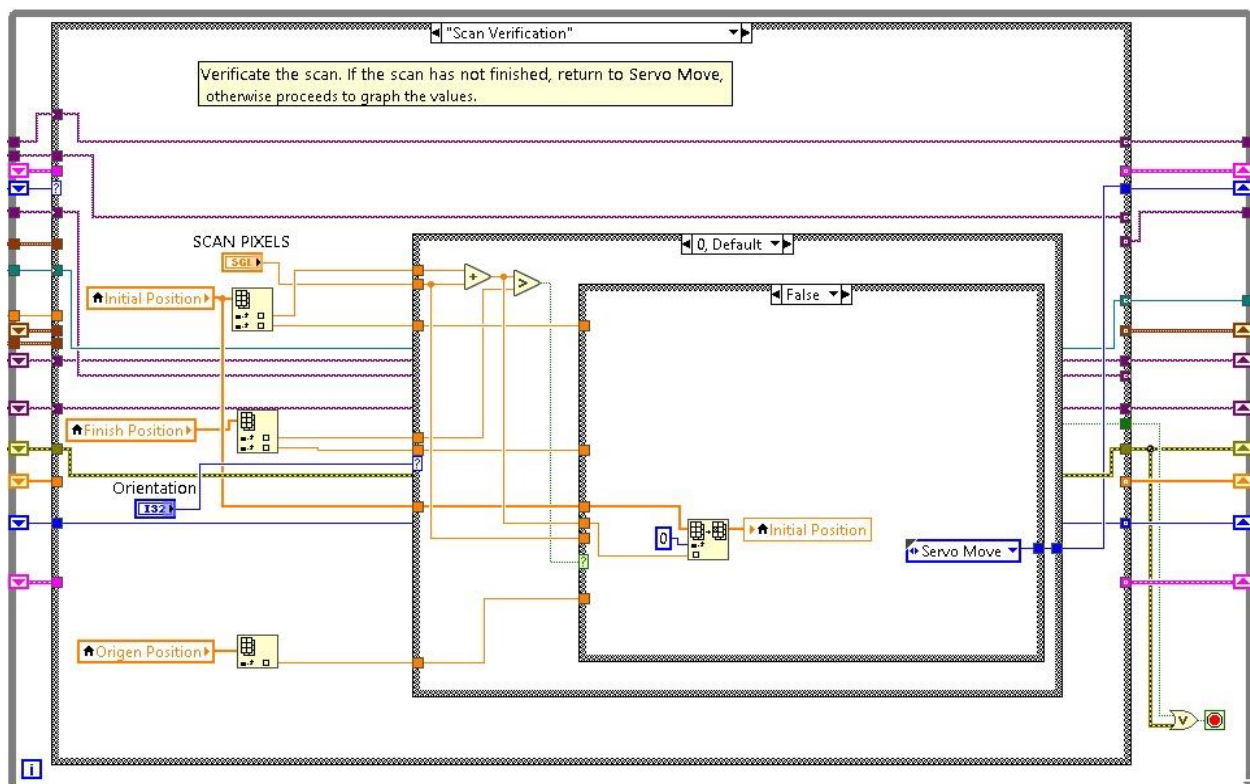
Código de Conversión de la Posición de Píxeles a Ángulos



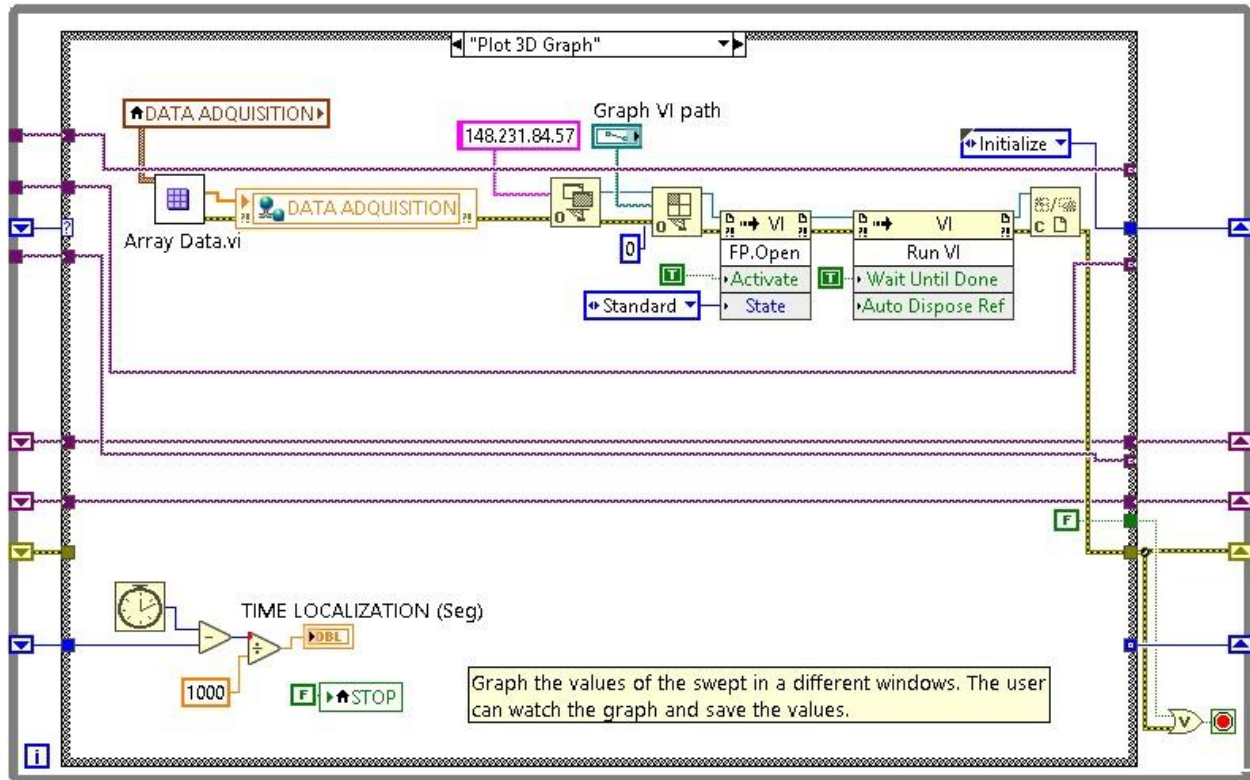
Código de Triangulación



Código de Verificación de Escaneo



Código para Graficar los Puntos Localizados



Código de Finalización del Programa

