

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

TESIS DE MAESTRÍA

---

**Desarrollo de un Método de Visión Artificial en  
Bastones Guías como Auxiliar en el  
Desplazamiento de Personas con Discapacidad  
Visual**

---

*Autor:*

Leonardo Daniel Medina Madrazo

*Director de Tesis:*

Dr. Julio Cesar Rodríguez  
Quiñonez

*Co-Director de Tesis:*

Dra. Wendy Flores  
Fuentes

*Una tesis presentada en cumplimiento de los requisitos  
para el grado de Maestro en Ingeniería.*

*en la*

Facultad de Ingeniería

Campus Mexicali

25 de mayo de 2023



Universidad Autónoma de Baja California  
**Facultad de Ingeniería**  
Mexicali

# Declaración de Autoría

Yo, Leonardo Daniel Medina Madrazo, declaro que esta tesis titulada, “Desarrollo de un Método de Visión Artificial en Bastones Guías como Auxiliar en el Desplazamiento de Personas con Discapacidad Visual ” y el trabajo presentado en ella es de mi autoría. Confirmo que este trabajo ha sido elaborado por mí y se expresa en mis propias palabras. Cualquier uso que se haga en él de las obras de otros autores en cualquier forma (por ejemplo, ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente al momento de su uso. Se incluye una lista de las referencias empleadas.

Firma:

---

Fecha:

---

*“Lo bueno de la ciencia es que es cierta independientemente de si crees o no en ella”.*

Neil deGrasse Tyson

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

## *Resumen*

Facultad de Ingeniería

Campus Mexicali

Maestro en Ingeniería.

### **Desarrollo de un Método de Visión Artificial en Bastones Guías como Auxiliar en el Desplazamiento de Personas con Discapacidad Visual**

por Leonardo Daniel Medina Madrazo

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un método de visión artificial para el continuo análisis de superficie en la que transita una persona, mediante un sistema de perfilometría láser bidimensional integrado en un bastón guía para personas con discapacidad visual. El diseño responde mediante una señal que provee información háptica con cambios de intensidad y frecuencia proporcionales a las condiciones de la superficie transitada. En la presente investigación se implementa un sistema de visión artificial como una propuesta para ayudar a las personas con discapacidad visual a moverse con el bastón guía. Principalmente, a diferencia de otras propuestas que utilizan sensores y respuestas audibles, este sistema proporciona retroalimentación háptica variable por medio de actuadores electromecánicos.

# *Agradecimientos*

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo brindado económicamente y materialmente para el desarrollo de la investigación durante estos dos años.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), al permitir hacer uso de sus instalaciones para desarrollo de investigación y por la oportunidad brindada para poder realizar mis estudios de posgrado y permitirme obtener el grado de Maestro en Ciencias.

A la Facultad de Ingeniería de la UABC Campus Mexicali, por permitirme hacer uso de sus excelentes instalaciones y además de proveer del equipo necesario para el desarrollo de la investigación.

A mi director de tesis, el Dr. Julio Cesar Rodríguez Quiñonez al haber brindado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado bajo su tutela, por su tiempo y dedicación en el apoyo brindado para realización de esta investigación.

A mi Co-directora de tesis, la Dra. Wendy Flores Fuentes por su apoyo brindado con sugerencias y retroalimentación para desarrollo y mejora de la investigación durante el transcurso de estos dos años.

A mi comité de tesis, el Dr. Oleg Sergiyenko, Dr. Moises Jesús Castro Toscano, Dr. Daniel Hernández Balbuena por su apoyo brindado cada semestre con retroalimentación en cada presentación de avances de tesis.

# Índice General

Declaración de Autoría	I
Resumen	III
Agradecimientos	IV
Índice General	v
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	x
Abreviaturas	XI
Símbolos	XII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Planteamiento del Problema . . . . .	3
1.3. Justificación y Uso de los Resultados . . . . .	3
1.4. Objetivos de la Investigación . . . . .	4
1.4.1. Objetivo General . . . . .	4
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
1.5. Hipótesis . . . . .	4
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Discapacidades . . . . .	5
2.1.1. Tipos de Discapacidades . . . . .	5
2.1.2. Discapacidad Visual y Herramientas de Apoyo . . . . .	6
2.2. Visión de Máquina . . . . .	9
2.2.1. Visión Artificial . . . . .	9
2.2.2. Visión Artificial: Aplicaciones . . . . .	9
2.3. Sistema de Escaneo . . . . .	11

2.3.1.	Sistema de Escaneo Láser . . . . .	11
2.3.2.	Sistema de Escaneo Láser: Aplicaciones . . . . .	11
2.4.	Perfilometría Láser . . . . .	12
2.4.1.	Perfilometría Láser: Aplicaciones . . . . .	12
<b>3.</b>	<b>Procedimiento de Investigación</b>	<b>14</b>
3.1.	Primer Acercamiento, Sistema de Perfilometría Láser . . . . .	14
3.1.1.	Fabricación de Soporte . . . . .	14
3.1.2.	Metodología para Detección de la Luz en Punto del Láser . . . . .	16
3.1.3.	Cálculo del Centro de la Información de los Datos . . . . .	16
3.1.4.	Desarrollo de Ecuaciones de Triangulación . . . . .	19
3.1.5.	Cálculo de Distancia y Centroide . . . . .	22
3.2.	Segundo Acercamiento, Sistema de Perfilometría Láser . . . . .	23
3.2.1.	Fabricación de Bases de Soporte . . . . .	23
3.2.2.	Metodología para Detección del Láser de Luz en Línea . . . . .	24
3.2.3.	Cálculo de los Centros del Haz de Luz en Línea del Láser . . . . .	25
3.2.4.	Cálculo de Distancia de la Línea del Haz de Luz del Láser con Cambios en la Densidad de Información . . . . .	27
3.3.	Tercer Acercamiento, Perfilómetro en Bastón Guía . . . . .	28
3.3.1.	Fabricación de Piezas de Soporte . . . . .	28
3.3.2.	Metodología para Detección del Láser de Luz en Línea en el Bastón Guía . . . . .	31
3.3.3.	Cálculo de Distancias de la Línea del Haz de Luz Láser en el Bastón Guía . . . . .	31
3.3.4.	Cálculo de Distancia para un Láser de Línea Integrado en un Bastón Guía . . . . .	32
3.3.5.	Retroalimentación Háptica . . . . .	34
3.3.6.	Método de Retroalimentación . . . . .	37
3.3.7.	Programa Final . . . . .	38
<b>4.</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>39</b>
4.1.	Análisis de Detección . . . . .	39
4.1.1.	Resultados con el Uso del Láser que Genera un Haz de Luz en Punto. . . . .	39
4.1.2.	Resultados con el Uso del Láser que Genera un Haz de Luz en Línea. . . . .	40
4.1.3.	Resultados del Uso del Láser de Línea y la Cámara, Integra- do en el Bastón Guía. . . . .	42
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>48</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo I: Código para Funcionamiento de Módulo de Vibración</b>	<b>51</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo II: Artículo de Congreso.</b>	<b>53</b>





# Índice de Figuras

2.1. Representación de perfilómetro láser, en la parte derecha se encuentra la construcción de la profundidad del objeto a partir de la reflexión de la emisión del láser. . . . .	12
3.1. Ambiente de prueba y vista de la pieza diseñada con los componentes acomodados. . . . .	15
3.2. Diseño de pieza para el láser y la cámara. . . . .	15
3.3. Carpetas donde se encuentran las funciones a utilizar en LabVIEW™ para la conexión con la cámara. . . . .	17
3.4. Programación en LabVIEW™ de las ecuaciones 3.2 y 3.3. . . . .	19
3.5. Programación en LabVIEW™ que muestra el diagrama a bloques sobre la creación de la línea horizontal y vertical. . . . .	19
3.6. Principio de funcionamiento de detección de láser de punto. . . . .	21
3.7. Ecuaciones 3.4 y 3.5 en LabVIEW™. . . . .	22
3.8. Programa que muestra el pixel del centroide de la información y el resultado del cálculo de la distancia de la reflexión del láser, en el lado izquierdo lo que observa la cámara y dos líneas que interceptan la ubicación la reflexión del láser. . . . .	22
3.9. Diseño de encapsulado de cámara y láser, con una distancia mayor entre cada componente. . . . .	24
3.10. Configuración de cámara y láser de línea para pruebas de primer acercamiento. . . . .	24
3.11. Representación de imagen filtrada sobre lo que observa la cámara en la superficie. . . . .	25
3.12. Diseño de posicionamiento de la cámara para bastón guía. . . . .	26
3.13. Cálculo de distancia del vector de centros de la imagen. . . . .	27
3.14. Programa que calcula la distancia en centímetros de la reflexión del láser de línea, que tiene opciones sobre la densidad de información a conocer, y un apartado para controlar el funcionamiento del programa. . . . .	27
3.15. Representación de los componentes, tanto la posición y la inclinación de la cámara y el láser en el bastón guía. . . . .	28
3.16. Prototipo final con la colocación de los componentes en el bastón guía. . . . .	29
3.17. Diseño en dos partes sobre la pieza de encapsulado de la cámara tomando en cuenta la inclinación que tendrá en el bastón guía para observar la reflexión del láser en la superficie. . . . .	30

3.18. Diseño de posicionamiento de láser para bastón guía. . . . .	30
3.19. Principio de funcionamiento de detección de láser de línea. . . . .	31
3.20. SubVI que contiene el proceso de la ecuación 3.2. . . . .	33
3.21. Diseño de programa productor/consumidor para adquirir los datos de lo que ve la cámara, calcular las distancias, mandar y conectar al Arduino Nano para enviar la información en voltaje. . . . .	33
3.22. SubVI que contiene el proceso de conversión de las distancias a voltajes. . . . .	34
3.23. Programa que transforma los datos del vector de distancias desde un rango de voltaje de 3.2 voltios, con una distancia mínima de 15 cm, hasta 4.6 voltios con la distancia máxima de 40 cm o más. . . .	34
3.24. SubVI que contiene el proceso del cálculo de la media de los datos. . . . .	35
3.25. Programa con el caso True, de la desviación estándar. . . . .	35
3.26. Programa con el caso False, cuando la diferencia del dato máximo y mínimo no es mayor a 10 cm. . . . .	36
3.27. Diagrama de flujo con el proceso de lectura de distancia y notificación al usuario. . . . .	37
3.28. Programa final, donde el desarrollador observa el funcionamiento del sistema. . . . .	38
4.1. Primer escenario, con dos objetos. . . . .	41
4.2. Segundo escenario, con un solo objeto. . . . .	42
4.3. Conjunto de escenarios en donde se realizaron las pruebas y la adquisición de los datos obtenidos. . . . .	43
4.4. Gráfica de datos que el sistema otorga en uso. . . . .	43
4.5. Gráfica de datos que el sistema brinda mientras se camina en el primer escenario y se encuentra con un obstáculo. . . . .	44
4.6. Gráfica de datos que el sistema otorga mientras se camina sobre el segundo escenario y se encuentra con un obstáculo. . . . .	45
4.7. Datos que el sistema brinda mientras se camina en una superficie completamente irregular. . . . .	46
4.8. Programa que se observa en el cuadro negro lo que ve la cámara sobre la reflexión del láser en la superficie, en el lado derecho un vector en centímetros sobre las distancias que se calculan y un rango de voltaje siendo lo que entrega a la retroalimentación háptica para brindar el aviso al usuario. . . . .	46

# Índice de Tablas

4.1. Comparación de mediciones con el programa que utiliza el láser de punto. . . . .	40
4.2. Comparación de mediciones con el primer escenario. . . . .	41
4.3. Comparación de mediciones con el segundo escenario. . . . .	41

# Abreviaturas

<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem
<b>CAM</b>	<b>C</b> entro de <b>A</b> tención <b>M</b> últiple
<b>OMS</b>	<b>O</b> rganización <b>M</b> undial de la <b>S</b> alud
<b>ICIDH</b>	<b>I</b> nternational <b>C</b> lassification of <b>I</b> mpairments, <b>D</b> isabilities and <b>H</b> andicaps
<b>PWM</b>	<b>P</b> ulse <b>W</b> idth <b>M</b> odulation
<b>AOV</b>	<b>A</b> ngle <b>O</b> f <b>V</b> iew
<b>USB</b>	<b>U</b> niversal <b>S</b> erial <b>B</b> us

# Símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Nombre</i>
$\mu_j$	Promedio de Posiciones Horizontales.
$\mu_i$	Promedio de Posiciones Verticales.
$P_i$	Momento de Resolución Vertical de la Imagen.
$P_j$	Momento de Resolución Horizontal de la Imagen.
$h$	Resolución Vertical de la Imagen.
$w$	Resolución Horizontal de la Imagen.
$Y$	Valor de Voltaje.

*Esta tesis se la dedico principalmente a mis padres y a mi hermano por su amor, apoyo y consejos brindados durante el transcurso de mi vida, los cuales me han permitido llegar a ser la persona que soy actualmente.*

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

La Visión de Máquina estudia las características de la visión artificial para adaptarse en aplicaciones prácticas, usualmente en el área de la ingeniería y la ciencia de la visión. Por lo tanto, se encuentran diversas aplicaciones de las características de la visión artificial para enfocarse en el sentido de la visión del ser humano, por ejemplo, el monitoreo y control del tráfico, mediciones biométricas o análisis de imágenes con sensores remotos. Por otro lado, se han desarrollado programas informáticos que permiten realizar análisis de visión por medio de la entrada de imágenes. Estos programas han dado lugar a diversas aplicaciones, como la verificación de firmas y el reconocimiento de caracteres. Estas aplicaciones analizan una imagen y utilizan la información obtenida para cumplir distintos objetivos según las necesidades del usuario, [Davies \[2012\]](#). Ahora, se menciona lo anterior para entrar en contexto sobre la creación de sistemas que realizan análisis con imágenes. Por esa razón, se crea una herramienta donde se integra un sistema de visión artificial en un bastón guía, lo último mencionado es una herramienta de apoyo importante para las personas con discapacidad visual, la herramienta creada tiene el propósito de brindar una mayor autonomía en las personas con discapacidad en la visión. Ahora bien, los bastones guía se clasifican en diferentes colores dependiendo del tipo de discapacidad visual que se llegue a presentar, existe el bastón guía de color verde y amarillo, según el país, los cuales están orientados a personas con baja visión, y por otro lado, el bastón guía de color blanco para personas con visión nula, [Sorrentino and Remmert \[2020\]](#). Durante los últimos años se han

desarrollado diversas adaptaciones en los bastón guía para asistir a personas con discapacidad visual. Una adaptación del bastón guía encontrado, es uno que utiliza sensores de agua y ultrasonicos, están conectados a un microcontrolador para analizar el área y brindar una respuesta a través de un componente que suena como una campana, integran un sistema de GPS, el usuario, con un botón puede activar un envío de auxilio en caso de que la persona se pierda en el camino hacia el lugar a donde se dirige. Sin embargo, la retroalimentación que brindan al usuario limita el sentido audible hacia el entorno, la aproximación de vehículos, personas u objetos, entre otras cosas que se encuentren en el entorno, [Ahmed et al. \[2022\]](#). Por lo tanto, la retroalimentación para dar aviso a la persona con discapacidad visual sobre cualquier deterioro urbanístico que pueda poner en peligro su integridad debe ser a través de retroalimentación háptica, al no ser invasivo, ante el sentido de la escucha la persona conocerá lo que sucede a su alrededor sin limitar algún otra habilidad que se ha desarrollado. Ahora, otra adaptación recientemente encontrada es una integración de retroalimentación con un auricular, es un bastón para personas con baja visión y diferentes grados de discapacidad visual, el sistema detecta obstáculos y avisa al usuario por medio del auricular y cuenta también con un zumbador para reforzar la retroalimentación, consta de tres sensores ultrasónicos para mapear una superficie amplia en la que pueda encontrarse un obstáculo que ponga en peligro a la persona con discapacidad visual, por lo tanto, como se menciono anteriormente, utilizar un dispositivo que limite la capacidad del oído sería peligroso para la persona con discapacidad visual, [Salat and Habib \[2019\]](#). Otra adaptación encontrada es un bastón guía que funciona por medio de sensores láser, y una aplicación para calibrar el sistema tomando en cuenta características del usuario. A diferencia de otros bastones guías, en esta adaptación se elimina el uso de la herramienta de apoyo, eliminando el soporte que brinda el bastón guía respecto a la superficie y con la facilidad de tomarlo con la mano para evaluar la superficie. La eliminación del bastón guía igualmente elimina el soporte ante una caída, o un cambio brusco en la superficie que no sea percibida porque carece del tacto con la herramienta de apoyo, [Soares et al. \[2021\]](#). Por lo tanto, a diferencia de las adaptaciones mencionadas, se quiere brindar mayor seguridad e información con nuestro sistema, haciendo que mediante retroalimentación háptica con cambios de intensidad y frecuencia como retroalimentación, la persona pueda identificar la profundidad que existe en la calle, alcantarillas, o baches; decidiendo si es seguro enfrentarse al obstáculo, si es preferible tomar una ruta diferente, u obteniendo el simple conocimiento de cómo podrá afrontar la situación. En esta investigación



se trabajó con un bastón guía blanco, en el cual se integra un sistema, sin cambiar su estructura o ergonomía que presta el bastón guía y de esta manera no ser incomodo en su uso.

## 1.2. Planteamiento del Problema

Un sistema de perfilometría integrado a un bastón guía para personas con discapacidad visual, con una retroalimentación háptica deberá de considerar la densidad de información y el campo de visión a ofrecer. Por consiguiente, un sistema que tiene el propósito de advertir sobre una irregularidad a una persona con discapacidad visual que esta desplazándose tiene que tener un tiempo de respuesta oportuno.

## 1.3. Justificación y Uso de los Resultados

Existen alrededor del mundo 2.200 millones de personas con discapacidad visual de diferentes deterioros de visión, desde personas que utilizan lentes hasta personas con ceguera total, aproximadamente la mitad de esta cifra su discapacidad visual podría evitarse con tratamiento. También, en México existe un 4.9 por ciento con alguna discapacidad, siendo 6,179,890 personas del total que hay en México. De forma específica ante el último dato el 44 por ciento representa a personas con una perdida de visión ya sea en un ojo o en ambos, al igual que los diferentes grados de discapacidad de la visión representando a un total de 2,719,152 personas, [INEGI \[2014\]](#) ,[Mundial et al. \[2011\]](#), [Organization \[2019\]](#). Por otra parte, el intervalo de aprendizaje que generalmente requieren para adaptarse al bastón guía, es de 6 a 12 meses; esto difiere en cada persona, ya que interviene mucho el reconocimiento de diferentes técnicas para poder caminar, cruzar calles, subir escaleras, entre otras cosas, como la edad, seguridad de la persona, escolaridad y la familiaridad con los sentidos. Los datos indican que en el momento donde toman la decisión de tener mayor autonomía para caminar es donde se enfrentan a nuevos riesgos al no tener a una persona que los guíe o advierta sobre el camino a pasar. Por lo tanto, esta investigación desarrolla un sistema que permite conocer de manera oportuna las irregularidades de la superficie; previendo las caídas y brindando seguridad por el terreno que deban enfrentarse las personas con discapacidad visual con el apoyo del sistema en el bastón guía.

## 1.4. Objetivos de la Investigación

### 1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema y método teórico de perfilometría láser integrado a un bastón guía que funcione como apoyo para las personas con discapacidad visual al proporcionar retroalimentación háptica sobre irregularidades de la superficie donde el usuario transita.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Construir un prototipo que se adapte adecuadamente al ancho del bastón guía, sin alejarse de la comodidad que ofrece el mismo.
- Desarrollar un programa en el software LabVIEW™ con un tiempo corto de respuesta y que calcule la distancia de la posición del láser colocado en el bastón guía hacia el suelo, asegurando que el aviso sea perceptible por el usuario al utilizar actuadores hápticos.
- Realizar pruebas de campo con el programa integrado al bastón guía para corregir errores de medición sobre distancias calculadas en ambientes controlados y el exterior.

## 1.5. Hipótesis

Los sistemas de visión artificial se pueden crear para aplicaciones que ayuden con las dificultades de la visión, sea desde tener una pérdida parcial o total de la visión. El desarrollo de un sistema de perfilometría láser, para analizar la superficie y con retroalimentación háptica ofrece una respuesta sensitiva, ambos integrados en un bastón guía, brindan a las personas con discapacidad visual mayor información de la superficie sobre la que caminan, mejorando la percepción de su entorno, autonomía, y seguridad en comparación con la información y certeza que les brinda el propio bastón guía.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Discapacidades

En 1970, se desarrolló el termino ICIDH (International Classification of Impairments, Disabilities and Handicaps), arraigado por la OMS (Organización Mundial de la Salud) en 1980 como una herramienta para las consecuencias de distintas enfermedades, sean desordenes o lesiones en el ser humano. Ahora, años previos se ha difundido esta herramienta, y diferentes organizaciones la han arraigado con el objetivo de ofrecer una mejoría en el camino de discapacidades, minusvalías y deficiencias que llegue a presentar el ser humano, [Organization et al. \[1993\]](#), [De Kleijn-De Vrankrijker \[2003\]](#).

#### 2.1.1. Tipos de Discapacidades

La discapacidad se refiere al hecho de efectuar una actividad con dificultad, sea alta o baja dependiendo del grado que se presente, siendo algo habitual a realizar por un ser humano, tanto cognitivo, visual, motora o puede ser asociado a la edad, [Vadillo \[2021\]](#), [INEGI \[2014\]](#), [Hernández Posada \[2004\]](#).

Existen diferentes actividades que pueden resultar difíciles:

- Caminar. La limitación de desplazarse por diferentes superficies.
- Ver. La dificultad de la visión, ocasiona perdida en el reconocimiento del entorno.

- Oír. Restricción parcial o total del sentido audible.
- Hablar. Limitación al intentar conversar de una forma accesible al entendimiento.
- Recordar. Inconveniente en el proceso de aprendizaje, o tener presente una tarea o actividad recién.
- Cuidado personal. Dificultades para desenvolverse en cuidados de la salud.

Las actividades que pueden resultar difíciles con una discapacidad que se representan con mayor frecuencia son aquellas con una limitación en el sentido de la visión, siendo desde baja visión hasta una pérdida total, y por otro lado, con dificultad en la movilidad, sin la exclusividad de ser una sola parte del cuerpo, [INEGI \[2014\]](#).

### 2.1.2. Discapacidad Visual y Herramientas de Apoyo

La discapacidad visual es una deficiencia ocular, que afecta a la estructura del ojo, [Organization et al. \[1993\]](#), [De Kleijn-De Vrankrijker \[2003\]](#). Dependiendo de la gravedad que se presente en la persona, utiliza desde un asistente hasta una herramienta de asistencia para garantizar un traslado seguro, [Hollins \[2022\]](#), [Giudice and Legge \[2008\]](#).

Las personas que presentan discapacidad visual agravante o de visión nula aprenden un idioma nuevo para tomar lectura a documentos, puertas o sitios que busquen, entre otros. Por ello, se ha creado el alfabeto Braille, consta de puntos que representan por medio de separaciones y posiciones la escritura que usualmente se utiliza, consiste en organizar un vector, siendo separado con renglones con los puntos para una lectura de izquierda a derecha, esta escritura no ofrece la fluidez que tiene una persona sin esta discapacidad, pero es una gran herramienta de lectura para las personas con discapacidad visual total, [Cabrerizo \[2000\]](#).

La discapacidad visual presenta dos diferentes grupos que se diferencian por la distancia y cercanía de ver. Primeramente por la distancia, es clasificada desde leve, moderado, grave hasta la ceguera o pérdida total de la visión. Por otro lado, la cercanía es respecto a una agudeza visual que va a partir de los 40 cm donde la persona le sea difícil mirar algo con claridad, superior a ello entra en discapacidad

visual por distancia, [Flaxman et al. \[2017\]](#), [Bourne et al. \[2021\]](#), [Bashshur et al. \[2023\]](#).

Ahora, ambas clasificaciones pueden tener diferentes causas de origen y ser tratadas, a excepción de las personas con ceguera total, siendo la situación más grave en donde la persona pierde por completo la visión. Por lo tanto, las diferentes causas que producen u ocasionan una discapacidad visual son:

- Degeneración macular relacionada con la edad. Se presenta usualmente en personas mayores a 60 años, el factor mas común es la genética, y algunas adicciones que pueden causar la degeneración, [Verdaguer \[2010\]](#), [Gómez and Carrillo \[2017\]](#).
- Cataratas. Es una opacificación cristalina que ocurre en el ojo que si se llega a omitir su tratamiento puede agravarse a un grado de ceguera, es tratable y puede suceder por una enfermedad intraocular, [Shaw and Patel \[2022\]](#).
- Ametropias. Se conoce como imperfección ocular en la retina que ocasiona una perdida de la agudeza visual, [Sankaridurg and Holden \[2014\]](#).
- Tracoma y oncocercosis. Es una enfermedad que se transmite por el uso compartido de prendas, o a través de los dedos las cuales pueden tener una bacteria llamada Chlamydia, [Méndez Galván and Olgún Bernal \[2011\]](#).
- Retinopatía diabética. Es mayormente común en personas con diabetes, siendo una afección que ocasiona ceguera o perdida de agudeza visual. Existen tratamientos para tratar que la perdida de agudeza visual no empeore, pero, esta causa al no ser tratada puede llegar a una perdida total de la visión, [Institute \[1975\]](#), [Duh \[2008\]](#).

Asimismo, cuando una persona presenta una discapacidad visual agravante, es recomendable el uso de herramientas, esto con el propósito de apoyar su autonomía, e independencia. Por esa razón, la principal herramienta que utilizan es el bastón guía, cabe destacar que existen diferentes colores de bastones guías para diferenciar que tan agravante es la discapacidad visual.

El bastón guía es utilizado para desplazarse a diferentes lugares, esta herramienta tiene las características de brindar información del entorno a través del tacto con la superficie, ofrece una protección ante ciertos obstáculos que se presenten al

desplazarse y es distintivo ante cualquier otro bastón, como lo llegan a utilizar las personas con una edad avanzada o mayor, [Salazar and Mesa \[2019\]](#).

Otras herramientas que se han desarrollado para apoyar con la autonomía, son integraciones electrónicas en bastones guías blancos. Algunos de ellos se desarrollan con sensores ultrasónicos; es utilizado para encontrar obstáculos en el camino por el rango de mapeo que maneja, [Gwirc et al. \[1998\]](#). Igualmente, junto a este sensor se integran módulos de alerta auditiva o vibratoria para prevenir sobre la cercanía de objetos en el camino, de esta forma, se facilitan los trayectos. De igual manera, se han desarrollado integraciones al bastón guía blanco con el sistema de GPS (Global Positioning System) para guiar a la persona hacia los sitios, de igual forma con este sistema es posible tener un monitoreo de la persona por si llegará a perderse.

Por otro lado, se han creado sistemas que utilizan algoritmos de visión artificial y se integran en bastones guías blancos. La visión artificial otorga una visión por máquina para la simulación de un proceso, en este caso el desplazamiento de una persona. Estos sistemas realizan una lectura de una imagen para su interpretación, apoyando en la orientación de su camino, reconocimiento de diferentes objetos que encuentre sobre el camino o la tarea de movilidad del día, [Salazar and Mesa \[2019\]](#).

## 2.2. Visión de Máquina

La visión es uno de los sentidos que los seres vivos utilizan para el reconocimiento o localización de diferentes cosas que rodean su entorno, tanto para percibir la cercanía de objetos, la textura, detectar el movimiento de diferentes fenómenos, o para dirigirse a algún lugar, estas y muchas más actividades facilitan el uso de la visión. Ahora, la visión de máquina tiene un aporte en los procesos de manufactura, donde con distintas características y herramientas puede obtener la captura de imágenes para su interpretación o descripción, [Toquica \[2020\]](#). Asimismo, la visión de máquina aborda diferentes aplicaciones o tareas que tengan la necesidad de crear sistemas de visión, que pueden facilitar el esfuerzo de verificar un camino o un objeto que tenga deformaciones, recrear una pieza, visualizar algo o con el apoyo de visión de las personas hacia diversos objetivos, [Batchelor \[2012\]](#), [Hornberg \[2006\]](#).

### 2.2.1. Visión Artificial

Aborda sistemas opto-mecánicos-electrónicos que se enfocan en la detección por medio de modelos para el procesamiento de datos para actividades, funciones u objetivos útiles. El estudio de la visión artificial resulta una herramienta para obtener información del como se observa nuestro entorno, sea para la mejora de la información de distintas actividades o para el análisis de objetos, o piezas para la industria manufacturera, [Batchelor \[2012\]](#), [García \[2012\]](#), [SER and VICIOS \[2006\]](#), [Mínguez \[2021\]](#).

### 2.2.2. Visión Artificial: Aplicaciones

La visión artificial abarca diversos campos en los que tiene ventaja en el reconocimiento y adquisición de información. Algunos de estos campos incluyen:

- Seguridad. Relacionado tanto en hogares, empresas, locales o sitios de servicio donde el reconocimiento de personas sea clave para salvaguardar el lugar donde se instale una integración de cámara con visión artificial.

- Industria. Llegar a la automatización de procesos en donde las piezas deban ser verificadas bajo un régimen o una pieza muestra para asegurar la calidad de la misma.
- Comercio. Analizar códigos de barra y QR, para obtener la información sobre diferentes documentos, por ejemplo artículos.
- Educación. Se emplean programas para el reconocimiento de figuras, sean dibujados, en un mueble o el reconocimiento de forma general para el aprendizaje del ser humano.

Ahora, de una forma más específica la visión artificial se puede utilizar en reconocimiento de imágenes a través de una cámara sea de video o por medio de fotografías, siendo el modo en que se utiliza en este trabajo, [Mínguez \[2021\]](#).



## 2.3. Sistema de Escaneo

Un sistema de escaneo es un conjunto de dispositivos y técnicas que permiten conocer características de un objeto, figura, entre otras, a través de diferentes tipos de escaneo donde se podrán conocer entre otros, altura, o profundidad, [Gambboa Caicedo et al. \[2018\]](#), [Biswas and Robinson \[2008\]](#).

### 2.3.1. Sistema de Escaneo Láser

La integración de un láser en un sistema de escaneo permite utilizar técnicas de medición mapeando un área donde la reflexión del láser será la principal fuente de detalle ante un objeto de análisis, [Liang et al. \[2016\]](#).

### 2.3.2. Sistema de Escaneo Láser: Aplicaciones

Los sistemas láser, se utilizan en diferentes campos donde su objetivo es tener una ventaja ante una tarea o actividad con su uso, aunque el costo del mismo es elevado en diferentes casos por la integración de los componentes al objetivo que se construye, [Chen et al. \[2023\]](#).

Las aplicaciones de los sistemas de escaneo láser se concentran en las siguientes industrias:

- Industria de la transformación.
- Automotriz.
- Alimenticia.
- Industria de la salud.

Además en los sectores anteriores mencionados, el escaneo láser a evolucionado a través de los años siendo una de las herramientas utilizadas en técnicas de escaneo en dos y tres dimensiones, sea para analizar sitios para una reconstrucción por computadora, mapear piezas para encontrar diferentes ambigüedades en ella, entre otras tareas en donde el escáner láser supera otras técnicas de análisis brindando precisión y seguridad en su uso, [Múnera et al. \[2010\]](#), [Biere Arenas and Egusquiza Ortega \[2010\]](#).

## 2.4. Perfilometría Láser

Es un sistema de sensores que recopilan información sobre la profundidad, altura de una superficie a través de una línea láser, la ventaja de mapear un objeto, superficie a través de una línea láser es que brinda mayor información sobre la que un láser de punto puede llegar a ofrecer. De igual forma, se pueden realizar análisis de dos y tres dimensiones con estos sistemas, [Olsen and Adams \[1970\]](#), [Li et al. \[2015\]](#).

En la Figura 2.1 se observa una representación de un sistema de perfilometría láser, la luz que emite el láser reflecta sobre un objeto, y se utiliza un componente que visualice la reflexión para conocer la profundidad que tiene el objeto, dependiendo de la aplicación se manipula la información. En la subsección 2.4.1 se hablará sobre las aplicaciones de este sistema.

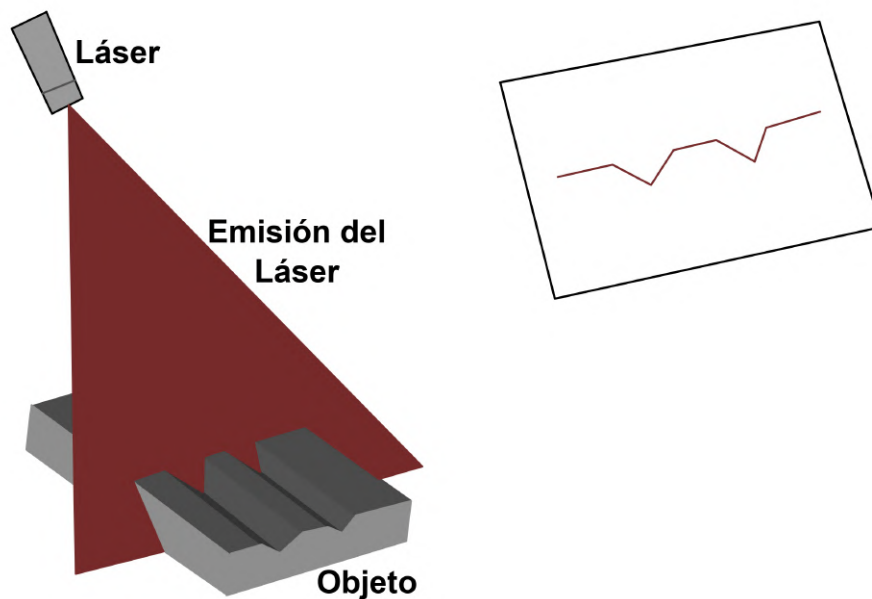


FIGURA 2.1: Representación de perfilómetro láser, en la parte derecha se encuentra la construcción del la profundidad del objeto a partir de la reflexión de la emisión del láser.

### 2.4.1. Perfilometría Láser: Aplicaciones

Existen diferentes aplicaciones donde se abordan los sistemas de perfilometría láser, en modelado de 3D, inspección en conveyors, entre otros más, a continuación

se explicarán algunos otros ejemplos de aplicaciones.

Un ejemplo de aplicación es el análisis de una superficie para conocer el daño que existe en una carretera o camino de diferentes materiales, conociendo una superficie nominal y las áreas que sean inferior a la superficie nominal son clasificadas como un área dañada o de peligro, [Ferenčík et al. \[2019\]](#). También, se ha utilizado en un mapeo de caminos forestales para comparar y cuantificar los daños que existen en el mismo, escaneando de forma manual y con el sistema los daños realizando la comparativa de velocidad de escaneo y obtención de datos en cada caso, [Mylonas et al. \[2019\]](#). Por otro lado, existen las aplicaciones de modelado en 3D e inspección en conveyors, los conveyors son bandas transportadoras que normalmente son utilizadas en la industria para analizar objetos, los sistemas constan de un barrido con el láser sobre el objetivo para conocer sus dimensiones, profundidades y características que sean requeridas o necesarias, en la actualidad existen sistemas de perfilometría de proyección de franjas que tienen similitud con los sistemas de perfilometría láser con la lectura de la línea láser, cuando se maneja un solo eje, en este caso una sola franja en toda la imagen a procesar o analizar, [Juarez-Salazar et al. \[2023\]](#), [Hu et al. \[2020\]](#), [Zhu et al. \[2022\]](#).

Por último, lo mencionado anteriormente solo es otra forma de realizar un análisis pero en este caso con emisión de franjas emitidas por proyectores, esto causa una gran diferencia respecto a los perfilómetros láser que tienen la similitud de utilizar diferentes longitudes de onda de la luz en un láser para sus aplicaciones. Cabe destacar que la perfilometría es manejada por métodos de triangulación, en este trabajo se ha utilizado la triangulación, será explicado en el capítulo 3 con el proyecto que se ha desarrollado.

# Capítulo 3

## Procedimiento de Investigación

### 3.1. Primer Acercamiento, Sistema de Perfilometría Láser

Inicialmente se tiene como objetivo medir la distancia desde una cámara hacia una superficie, para ello, se utiliza un láser que emite una luz en punto siendo el objetivo o visualizar por la cámara. La cámara a utilizar, permite cambiar el ajuste del lente focal, siendo conveniente para el análisis requerido, por otro lado, el láser que se utiliza emite la luz en forma de punto, creando una nube de puntos siendo lo que verá la cámara. También, para mantener los componentes en un solo sitio, se diseñan piezas en el software SolidWorks® y se fabrican mediante impresión 3D, en la presente sección se observan los diseños de las piezas que se han utilizado, y por último, el programa que ayudará a manejar toda la matemática, y la adquisición de los datos al igual que la retroalimentación.

#### 3.1.1. Fabricación de Soporte

El entorno de programación para fabricar las bases donde se coloca la cámara y el láser, es el software SolidWorks®, que permite dibujar en tres dimensiones piezas a medida que los usuarios necesiten. Primero, se diseño una pieza donde se posiciona la cámara y enseguida el láser como se muestra en la Figura 3.1, por lo tanto, al colocar los componentes en la pieza diseñada como se muestra en la



### 3.1.2. Metodología para Detección de la Luz en Punto del Láser

Como resultado de la subsección anterior, se aborda el método que se utilizó para obtener la distancia donde incide la luz del láser en la superficie y genera la reflexión que observa la cámara, para ello, es necesario conocer lo siguiente:

- El centro de la nube de datos que genera un láser de 600 nm al incidir sobre una superficie, genera mucha información en un área en cuestión, entonces, se busca el centro de la nube de puntos, conociendo la posición del centro, que es donde realmente está generando la reflexión el láser.
- Por consiguiente, tomando en cuenta que se trabaja con algo físico se debe considerar la distancia entre el láser y la cámara, el ángulo entre sí y el ángulo de visión que tiene la cámara, esta información es necesaria para el cálculo de la distancia y que este representada en centímetros.

Por último, con la información anterior recopilada, es posible ir al siguiente paso, que sería programar la captura de información de la cámara, posteriormente calcular el centro de la nube de puntos que emite el láser en la reflexión de la superficie, y con los datos del diseño, se tiene la información necesaria para calcular la distancia de la cámara hacia la superficie, entonces, se utiliza el software de LabVIEW™, para programar el sistema de ecuaciones y calcular la distancia que se desea conocer.

### 3.1.3. Cálculo del Centro de la Información de los Datos

Para obtener los datos sobre la reflexión de la emisión del láser es necesaria la información de la imagen, que puede obtenerse a través de LabVIEW™ del apartado de IMAQ-Vision and Motion como se observa en la Figura 3.3, siendo funciones dedicadas a la conexión con cámaras desde el entorno de programación y la cámara conectada por USB (Universal Serial Bus) a la computadora portátil. Entonces, con la conexión en LabVIEW™ y el uso de Vision and Motion, podemos capturar los datos sobre la imagen, pero, al ser una imagen a color es difícil distinguir donde se encuentra la información del haz de luz del láser, por lo tanto, es necesario aplicar

un filtro en blanco y negro a la imagen, de esta forma se buscará la intensidad del láser, siendo una escala de blancos.

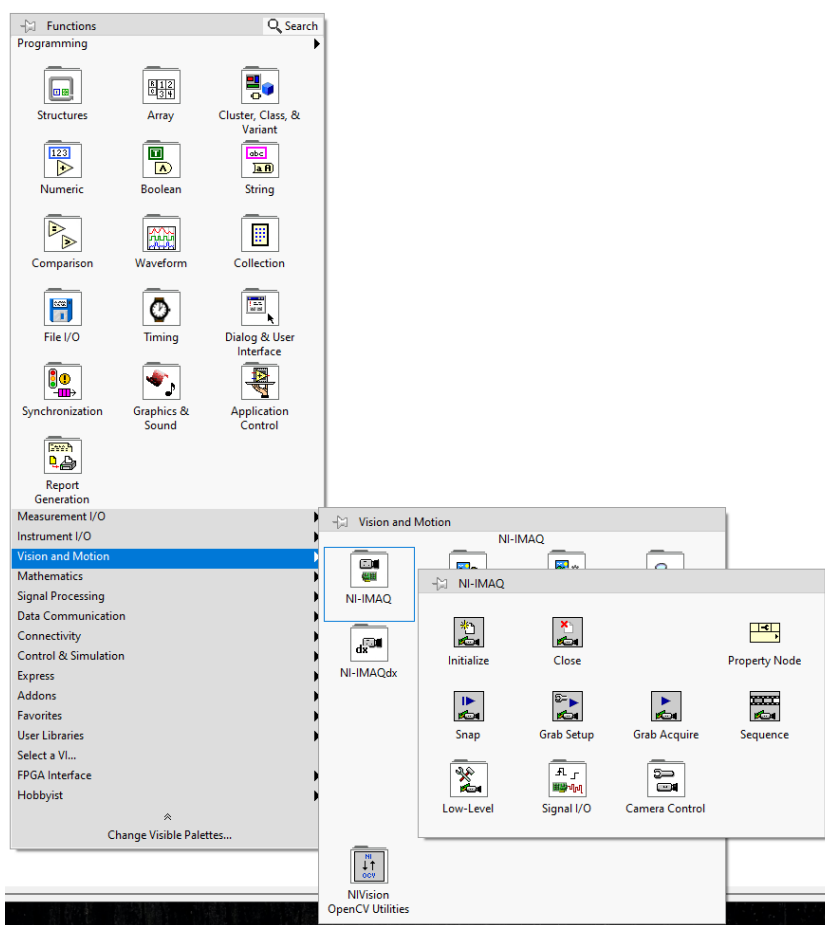


FIGURA 3.3: Carpetas donde se encuentran las funciones a utilizar en LabVIEW™ para la conexión con la cámara.

Con la imagen en blanco y negro o escala de grises, es posible acotar la información para que solamente permita la captura de datos que sea de una alta intensidad, como es la del haz de luz del láser, por lo tanto, existe una función en LabVIEW™ con el nombre de IMAQ Threshold, permite manejar la escala de grises, desde un cero, siendo el color negro, hasta 255 que sería el color blanco, que también es cercano a la intensidad del haz de luz del láser. Por lo tanto, el límite que se maneja es cercano de 255, siendo el haz de luz del láser.

Teniendo lo anterior delimitado, la información debe transformarse en datos que puedan ser manipulados, por lo tanto, se utiliza la función IMAQ ImageTo Array, los datos ahora son capturados en un arreglo para su manipulación.

Como resultado, con el límite de la escala del color blanco, tenemos un arreglo con ceros y números cercanos al límite de 255, que se trata del haz de luz del láser que

observa la cámara, por lo tanto, se puede trabajar con la ecuación 3.1 y 3.2, para calcular el centro de la nube de puntos que tenemos en el arreglo del programa.

$$\mu_i = \frac{\sum_0^j \widehat{X}(i, j)}{P_i}, i = 1, 2, 3, \dots, h \quad (3.1)$$

$$\mu_j = \frac{\sum_0^i \widehat{X}(i, j)}{P_j}, j = 1, 2, 3, \dots, w \quad (3.2)$$

Dónde:

- $\mu_i$  y  $\mu_j$  son el centro vertical y horizontal de los datos de la luz de emisión del láser en la imagen respectivamente.
- $\widehat{X}$  es la matriz de datos de la imagen.
- $P_i$  y  $P_j$  son el valor vertical (i) y horizontal (j) en la resolución de la imagen.
- $h$  es el valor total de la resolución vertical de la imagen.
- $w$  es el valor total de la resolución horizontal de la imagen.

En la Figura 3.4 se muestra la programación para las ecuaciones 3.1 y 3.2, creando un SubVI que es manejado como un programa interno al programa principal, para no saturar la programación principal, por esa razón, se explicará el programa de izquierda a derecha, en primer lugar, el arreglo de los datos que son capturados por la cámara con los filtros previamente mencionados en esta subsección ingresan al SubVI, posteriormente se evalúa cada dato, si es mayor o igual al rango mínimo del Threshold, se obtiene la información de la posición del dato, de manera similar con todo el arreglo de los datos.

Por consiguiente, se aplican las ecuaciones 3.1 y 3.2, de esta forma, se obtienen dos datos respecto al centro, tanto horizontal, como vertical de la información. Al tener una pérdida de señal con la información que recopila la cámara afectará la recolección de información para la variable  $\widehat{X}$  afectando las ecuaciones 3.1 y 3.2, anulando ambas por la falta de información de la imagen.

Finalmente, se utiliza la información de la ecuación 3.1, porque la nube de puntos del haz de luz del láser es similar a un círculo, entonces la información de ambas ecuaciones resulta ser la misma.



Asimismo, se puede mostrar al usuario donde se encuentra en la imagen la reflexión en la superficie, se crean dos líneas, una horizontal y la otra vertical, para dar seguimiento de la reflexión en la superficie. Por esa razón, en el programa principal se encuentra una sección igual que la Figura 3.5, donde se captura la información de los cálculos de las ecuaciones 3.1 y 3.2 para crear una línea y mostrarlo al usuario.

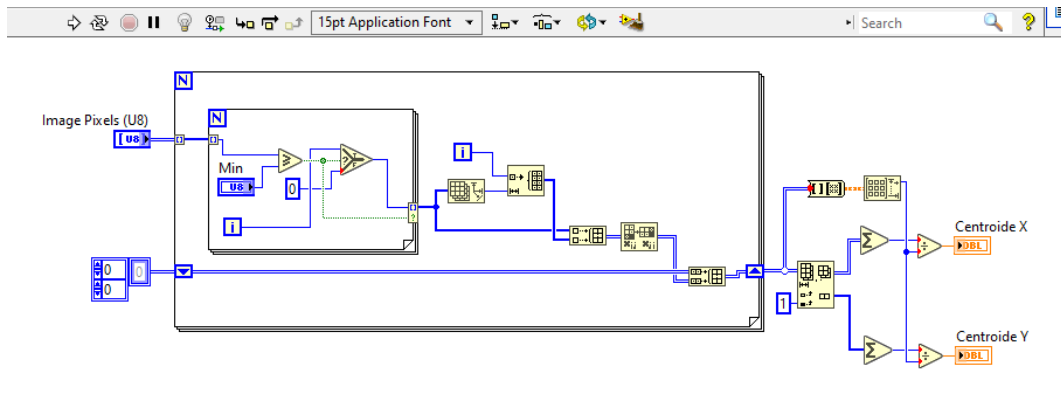


FIGURA 3.4: Programación en LabVIEW™ de las ecuaciones 3.2 y 3.3.

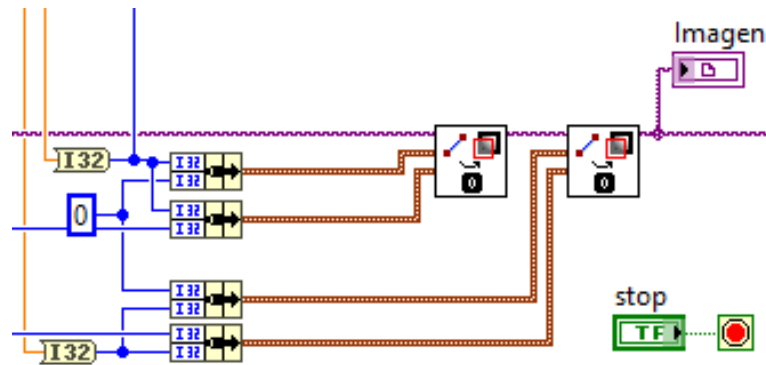


FIGURA 3.5: Programación en LabVIEW™ que muestra el diagrama a bloques sobre la creación de la línea horizontal y vertical.

### 3.1.4. Desarrollo de Ecuaciones de Triangulación

Posteriormente, con la información del centro de la nube de puntos o de información de la imagen, se prosigue a utilizar la ley de senos y cosenos (3.3), para calcular la distancia de la reflexión en la superficie hacia la cámara.

$$\frac{a}{\sin(A)} = \frac{b}{\sin(B)} = \frac{c}{\sin(C)} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, se realiza un despeje respecto a  $c$  identificándolo como la distancia a calcular, entonces,  $c$  es despejada de la ecuación 3.3. Ahora, con los datos por medio del diseño de colocación de la cámara y el láser se tienen ciertas variables, que serán explicadas a continuación con la ecuación 3.4.

$$c = \frac{b * \sin(C)}{\sin(B)} \quad (3.4)$$

Dónde:

- $c$  es la distancia desde la reflexión en la superficie hacia la cámara.
- $b$  es la distancia que existe entre la cámara y el láser.
- $B$  es el ángulo de la intersección del lado  $c$  y el lado  $a$ .

Por lo tanto, de las variables de la ecuación 3.4, por diseño se conoce  $b$ . Ahora, es necesario conocer  $C$ , por consiguiente si nos dirigimos a la Figura 3.6, observamos que  $C$ , es  $C_i$  que es un ángulo donde el AOV (Angle Of View) de la cámara interviene y depende de la reflexión del haz de luz del láser que detecta la cámara, con la suma de  $C_o$  que es un ángulo que se adquiere por el diseño del sistema. Además, el AOV de la cámara se mantiene constante, porque se utilizó una cámara que lo permite.

Por esa razón, para obtener  $C$  se utiliza la ecuación 3.5, en donde, se conoce  $\mu_j$ , AOV de la cámara,  $w$  y  $C_o$ .

$$\angle C = \frac{\mu_j * AOV}{w} + C_o \quad (3.5)$$

Dónde:

- $\mu_j$  se obtiene por la ecuación 3.2.
- AOV es el ángulo de visión de la cámara.
- $w$  es el ancho de la resolución horizontal de la imagen.
- $C_o$  es un ángulo de la cámara respecto al bastón guía, este dato se obtiene por el diseño del sistema.

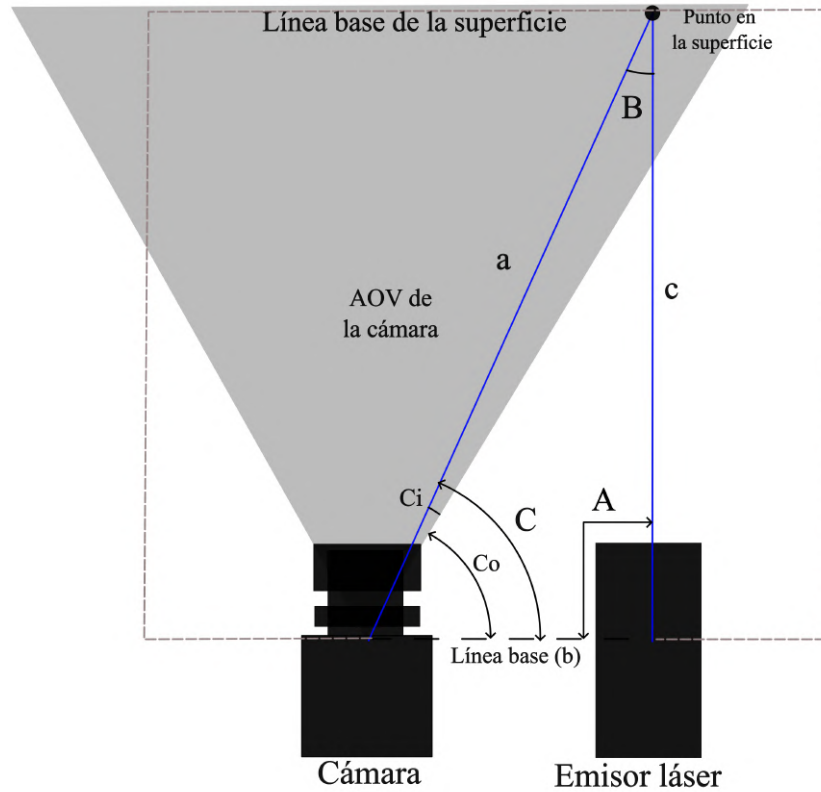


FIGURA 3.6: Principio de funcionamiento de detección de láser de punto.

Además, para obtener el ángulo B se utiliza la ecuación (3.6), donde se respeta la regla dónde dicta que todos los ángulos internos deben ser igual a 180 grados, por diseño se conoce que el ángulo A es de 90 grados, como resultado se cuenta con todos los datos de las variables necesarias para calcular c en la ecuación 3.4.

$$\angle B = 180^\circ - (\angle A + \angle C) \quad (3.6)$$

Ahora, por el lado de la programación en LabVIEW™, se utilizan las ecuaciones 3.1, 3.5, y 3.6, donde explicando de izquierda a derecha seccionando en 3 partes la Figura 3.7, la primera sección donde se encuentra una suma es la ecuación 3.5, posteriormente en la parte central declaramos la distancia b, el ángulo A y obtenemos el ángulo B igual que en la ecuación 3.6, y finalmente aplicamos los datos para obtener la distancia c de la misma forma como en la ecuación 3.1.

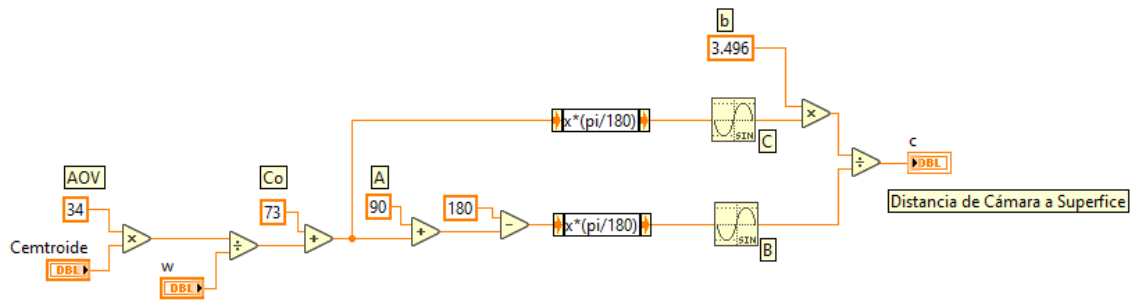


FIGURA 3.7: Ecuaciones 3.4 y 3.5 en LabVIEW™.

Por último, se cuenta con la información de la distancia de la reflexión en la superficie hacia la cámara, por lo tanto, en la subsección 3.1.5 se presenta el programa que visualiza la persona que utiliza el sistema.

### 3.1.5. Cálculo de Distancia y Centroide

Con los cálculos previos, se presenta el primer programa en LabVIEW™ como se muestra en la Figura 3.8, que brinda al usuario la distancia en centímetros, y el centroide de la información del haz de luz del láser, que es la posición donde se encuentra en la imagen, al igual, se crean líneas de color rojo que ayudan a identificar la posición de la lectura.



FIGURA 3.8: Programa que muestra el pixel del centroide de la información y el resultado del calculo de la distancia de la reflexión del láser, en el lado izquierdo lo que observa la cámara y dos líneas que interceptan la ubicación la reflexión del láser.

Ahora, con lo realizado en esta sección se emigra a utilizar un láser que emite un haz de luz en forma de línea, y modificar la separación entre el láser y la cámara para calcular de la distancia  $c$ . En la sección 3.2 se abordarán las modificaciones en el programa para obtener la distancia de la línea que emite el láser.

## 3.2. Segundo Acercamiento, Sistema de Perfilometría Láser

A diferencia de la lectura de un haz de luz en punto de un láser, para un haz de luz en línea, los datos a capturar son un conjunto de una nube de puntos que se extiende por la superficie de forma horizontal.

En esta sección, se presentaran los cambios en las ecuaciones, las piezas diseñadas para el primer prototipo con los componentes que de igual forma, se han diseñado en SolidWorks® y se modifica el programa de la sección anterior para adaptarlo a los cambios ya mencionados.

### 3.2.1. Fabricación de Bases de Soporte

Primeramente, se diseñan las piezas en SolidWorks® para su impresión en físico, para colocar la cámara y el láser de línea, para ello, tendrán en la distancia de separación una diferencia respecto al diseño en la sección anterior, por lo tanto, se observa la diferencia en la Figura 3.2 con respecto al diseño de la Figura 3.9, dónde se colocará la cámara del lado izquierdo, y del lado opuesto se colocará el láser, y existe una mayor distancia de separación entre ambos componentes.

Como resultado, se integran los componentes a la pieza diseñada, y como se observa en la Figura 3.10, es el ambiente en el cual se estará trabajando para obtener las diferentes distancias sobre la línea.

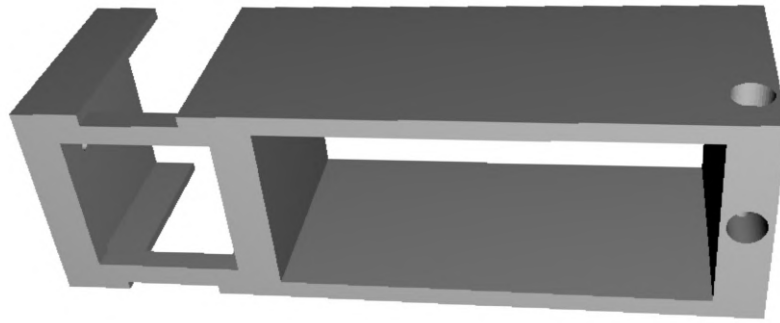


FIGURA 3.9: Diseño de encapsulado de cámara y láser, con una distancia mayor entre cada componente.

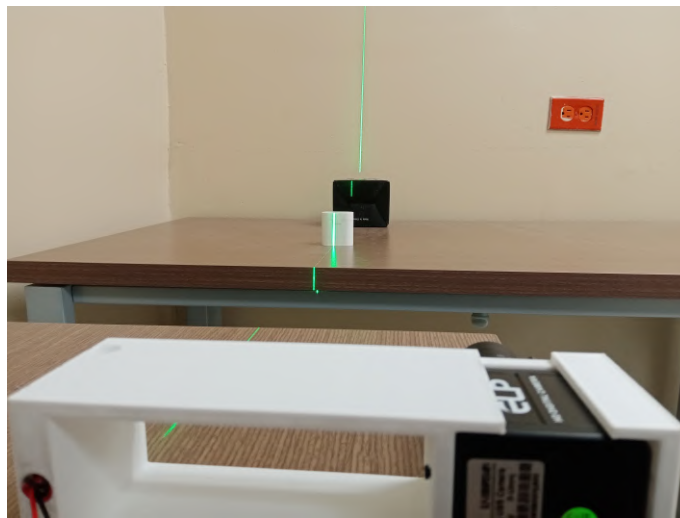


FIGURA 3.10: Configuración de cámara y láser de línea para pruebas de primer acercamiento.

Finalmente, con el diseño y el ambiente donde se trabaja, se pasa a la siguiente sección que es la metodología para obtener la distancia  $c$ .

### 3.2.2. Metodología para Detección del Láser de Luz en Línea

La metodología es muy similar al de la sección 3.1.2, pero con ciertas modificaciones, para esta subsección, es necesario conocer lo siguiente:

- La distancia que existe entre la cámara y el láser, al tener una mayor distancia a comparación de la sección 3.1.4, intervendrá en el cálculo final.



representan la luz del láser, mientras que las líneas rojas el cálculo de centroide y su posición en cada columna.

Por consiguiente, en el entorno de programación, se utiliza la ecuación 3.2 de forma que obtenga el centro de la información del láser por cada columna donde se encuentre. Como se observa en la Figura 3.12 a diferencia de la Figura 3.4, se extrae la información de la imagen, y por cada columna se buscan datos diferentes a cero para calcular al final el centro de la posición en cada una de las columnas, de esta forma, se obtiene un vector con los datos de las posiciones de la reflexión en la superficie del haz del láser.

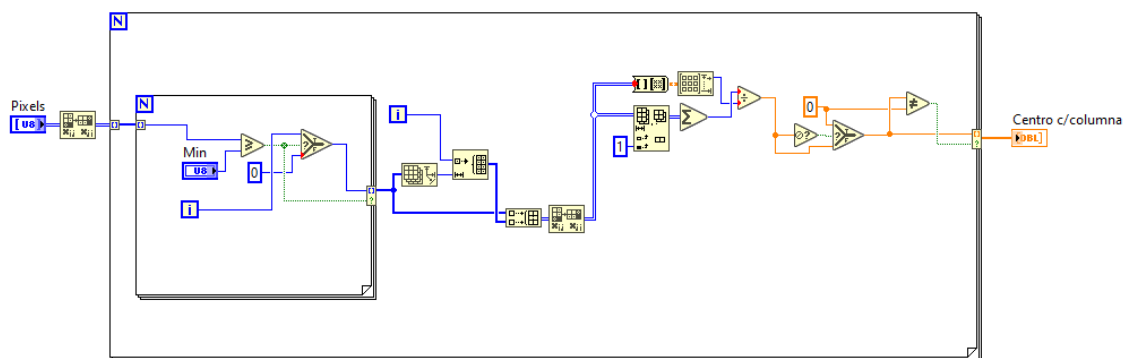


FIGURA 3.12: Diseño de posicionamiento de la cámara para bastón guía.

En consecuencia, al tener este vector es posible, calcular sus distancias, se debe considerar el cambio en la separación de la distancia entre la cámara y el láser, su configuración es similar al de la Figura 3.6, entonces, los cálculos que previamente se hicieron en la sección 3.1.4 se mantienen, a diferencia de lo mencionado a inicio de esta subsección.

Por lo tanto, se obtendrá una distancia  $c$  para cada columna pixel donde se encuentra la línea láser y se deberá de repetir para cada centroide el cálculo de su distancia, como resultado el programa se verá modificado como se observa en la Figura 3.13, donde se extrae el centroide de cada columna y se obtiene su distancia  $c$ , al final tendremos el vector de distancias  $c$ , la longitud del vector dependerá del ancho de la imagen.



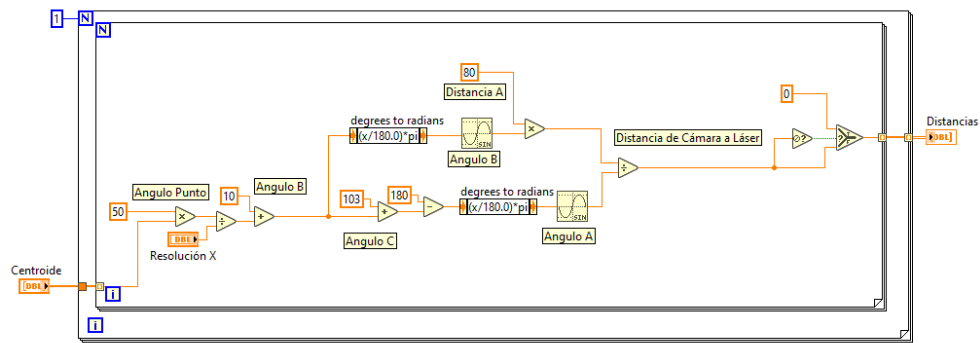


FIGURA 3.13: Cálculo de distancia del vector de centros de la imagen.

### 3.2.4. Cálculo de Distancia de la Línea del Haz de Luz del Láser con Cambios en la Densidad de Información

Para finalizar esta sección, el programa que se utilizó para las pruebas del sistema es el que se presenta en la Figura 3.14, explicando cada parte de la figura, se cuenta con la vista de la línea de la reflexión del láser, para este caso se encuentra particionada porque tiene un objeto sobre la línea del haz de luz del láser. Por consiguiente en la parte derecha se creo un menú donde se puede iniciar el programa, reiniciarlo si fuera necesario y apagarlo, en la parte inferior del menú se visualiza el rango del Threshold que al inicio de este capítulo fue mencionado su uso, y en la parte superior del menú se cuenta con tres botones para modificar la densidad de información de las distancias que se observan en la parte inferior del programa.



FIGURA 3.14: Programa que calcula la distancia en centímetros de la reflexión del láser de línea, que tiene opciones sobre la densidad de información a conocer, y un apartado para controlar el funcionamiento del programa.

Finalmente, se integran la cámara y el láser al bastón guía. En la siguiente sección 3.3 y última de este capítulo conocerá más acerca de ello.

### 3.3. Tercer Acercamiento, Perfilómetro en Bastón Guía

En esta sección se presenta el diseño de las piezas para integrar los componentes en el bastón, así como el programa implementado para la medición por perfilometría y retroalimentación háptica.

#### 3.3.1. Fabricación de Piezas de Soporte

Se han diseñado piezas para integrar en el bastón de forma individual cada componente que se ha estado manejando.

La colocación de cada uno de los componentes en el bastón guía se muestra en la Figura 3.15 y en la Figura 3.16, donde, la cámara estará cerca del agarre del bastón, y el láser se posiciona cerca de la parte final del bastón guía, para este diseño el láser se encuentra a 15 cm respecto al suelo, siendo una distancia de seguridad para que no se dañe el componente.

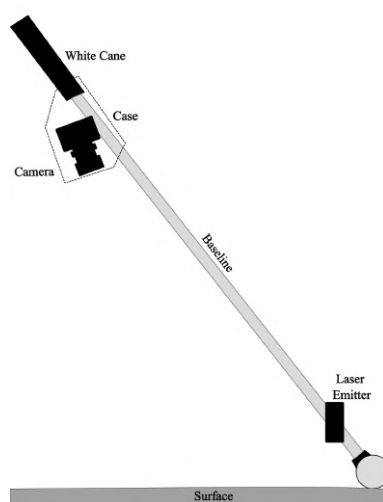


FIGURA 3.15: Representación de los componentes, tanto la posición y la inclinación de la cámara y el láser en el bastón guía.



FIGURA 3.16: Prototipo final con la colocación de los componentes en el bastón guía.

El diseño del encapsulado de la cámara, consta de dos piezas como se muestra en la Figura 3.17, donde se toma en cuenta el ancho del bastón guía y la inclinación de la cámara para que este observando la superficie en donde se generará la reflexión en línea del haz de la luz del láser, ambas piezas cuentan con barrenos donde se colocaran tornillos para unir las piezas en el bastón.

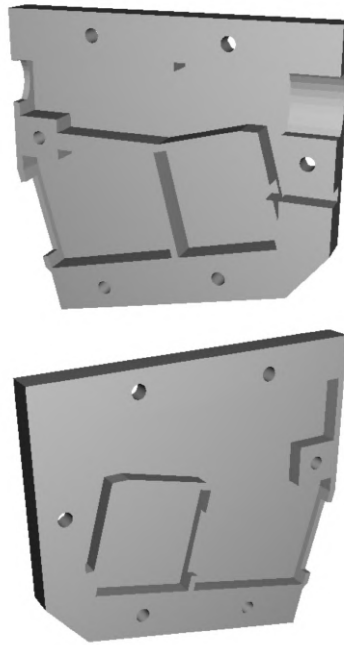


FIGURA 3.17: Diseño en dos partes sobre la pieza de encapsulado de la cámara tomando en cuenta la inclinación que tendrá en el bastón guía para observar la reflexión del láser en la superficie.

Se diseña el encapsulado del láser como se muestra en la Figura 3.18, de igual forma, tomando en cuenta el ancho del bastón en la parte inferior, y considerando la inclinación que deberá tener el láser para que la reflexión incida con la superficie.

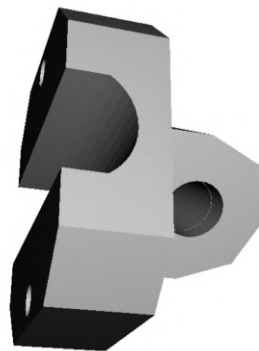


FIGURA 3.18: Diseño de posicionamiento de láser para bastón guía.

Por último, con todos los componentes integrados con sus diseños en el bastón guía se desarrolla el programa para realizar la función de perfilometría 2D sobre el bastón guía.

### 3.3.2. Metodología para Detección del Láser de Luz en Línea en el Bastón Guía

Debido a que los componentes se integran a un bastón guía, el principio de funcionamiento cambia por completo, como se observa en la Figura 3.19, la distancia  $b$ , y los ángulos  $A$  y  $C$ , se deben de calcular de nuevo. A partir de estos cambios, la distancia entre la cámara y el láser es mucho mayor, aunque en la figura se vea una escala mucho menor, se considera que se encuentran en extremos del bastón guía como se muestra en la Figura 3.15.

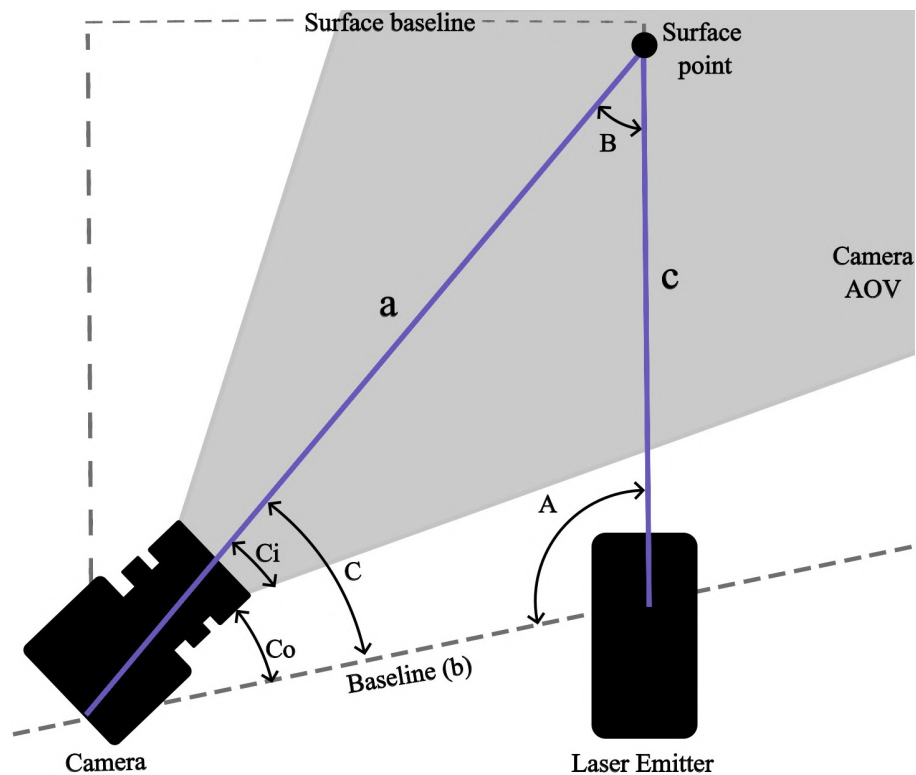


FIGURA 3.19: Principio de funcionamiento de detección de láser de línea.

Por estas razones, se usan las ecuaciones 3.2, 3.4, 3.5 pero tomando en cuenta las modificaciones previamente mencionadas, esto se verá en la subsección 3.3.3.

### 3.3.3. Cálculo de Distancias de la Línea del Haz de Luz Láser en el Bastón Guía

Para calcular los centros de la línea del láser que consta de una nube de puntos, se utilizará la programación de la Figura 3.12 que esta construida a partir de la ecuación 3.2.

Por consiguiente, con el cálculo del centro de cada una de las columnas, se obtiene un vector donde se encuentran los centros de los datos de la reflexión en la superficie. Ahora, retomando la ecuación 3.4, es necesario tener la distancia  $b$ , que es la distancia que existe entre la cámara y el láser, pero en este caso, integrados al bastón guía. También, es necesario calcular el ángulo  $C$ , entonces se usa la ecuación 3.5, para el cálculo del centro en cada columna de la información de la imagen, y se observa de la Figura 3.19 que los ángulos  $C_o$  y  $C_i$  cambian por la inclinación que tiene la cámara para permitir que observe la superficie donde este la reflexión del láser. Con la información anterior, es posible calcular los ángulos de  $C$ , y solamente de la ecuación 3.4 hace falta el ángulo de  $B$ , utilizando la ecuación 3.6, se puede observar que solamente faltaría el ángulo  $A$  el cual se obtiene por el diseño del sistema.

Por lo tanto, ya se tienen los datos necesarios para obtener el cálculo de las distancias de  $c$ , las cuales se verán en un vector, siendo del tamaño del ancho de la imagen. En la siguiente subsección se hablará sobre el programa que podrá visualizar un desarrollador y que brindará una retroalimentación háptica al usuario que utilice el sistema.

### 3.3.4. Cálculo de Distancia para un Láser de Línea Integrado en un Bastón Guía

A diferencia de las subsecciones donde se explica sobre el funcionamiento del programa, para este caso, se mostrará la etapa final del programa en el diagrama a bloques, la programación interna que el usuario no mira cuando se usa un sistema o programa, y por otra parte, la programación que es lo visual que observa el usuario y le brinda información, para este trabajo otorga información de la distancia, la imagen de aquello que observa la cámara y el nivel de intensidad de retroalimentación háptica que recibe el usuario. Igualmente en la continuación de esta subsección se explicará el funcionamiento de cada etapa.

La Figura 3.21 muestra el diagrama a bloques del programa, conteniendo todos los procesos para su funcionamiento. Desde la parte superior hacia la parte inferior, se tiene la etapa en la parte izquierda sobre la conexión de la cámara hacia el programa, posteriormente pasa por la función IMAQ-Threshold, y a continuación por la función IMAQ-ImageToArray, para ingresar a una función donde se obtiene

el centro de cada una de las columnas en la información de la imagen, su símbolo se observa en la Figura 3.20, y de manera interna contiene lo que se muestra en la Figura 3.12.

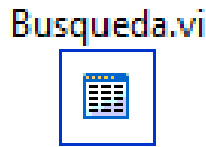


FIGURA 3.20: SubVI que contiene el proceso de la ecuación 3.2.

Por consiguiente, los datos del vector de los centros, ingresan a otra función que fue diseñada para obtener la distancia de la superficie hacia la cámara, la cual contiene las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6, de igual forma la programación vista en la Figura 3.13. Hasta este punto tenemos el vector de distancias de la información de la imagen.

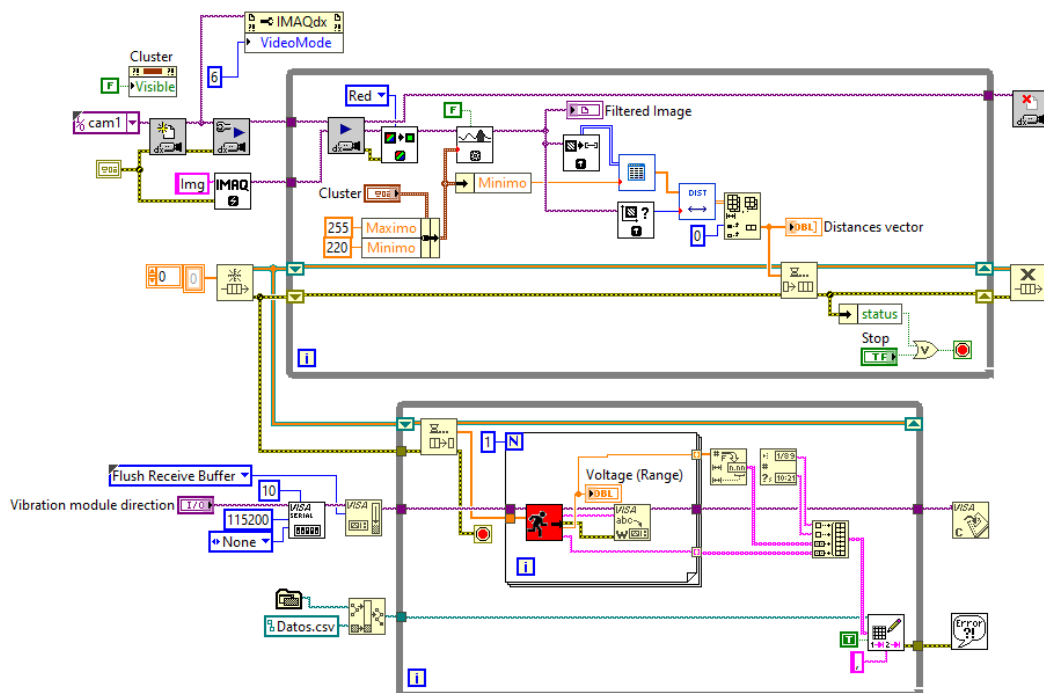


FIGURA 3.21: Diseño de programa productor/consumidor para adquirir los datos de lo que ve la cámara, calcular las distancias, mandar y conectar al Arduino Nano para enviar la información en voltaje.

Además de integrar al bastón los componentes, se elige la manera en la cual poder avisarle al usuario sobre las anomalías en la superficie, para ello, se elige la retroalimentación háptica, esta será explicada en la subsección 3.3.5 y de igual forma se proseguirá con la explicación del diagrama a bloques.

### 3.3.5. Retroalimentación Háptica

En la subsección 3.3.4 se explico la parte superior del programa que se encuentra en la Figura 3.21, en esta subsección se explicará la parte inferior que se refiere a la conexión con un módulo de retroalimentación háptica.

Para ello, se utilizará un programa desarrollado en LabVIEW™, y un programa desarrollado para un Arduino Nano, con comunicación entre ellos, el módulo PWM de arduino permitirá implementar la retroalimentación háptica esperada.

Explicado lo anterior, a partir de la Figura 3.21, en la parte izquierda se realiza la conexión entre Arduino® y LabVIEW™, esto con el fin de intercambiar información. Los datos son ingresados a una función, como se muestra en la Figura 3.22, su proceso interno se muestra en la Figura 3.23.



FIGURA 3.22: SubVI que contiene el proceso de conversión de las distancias a voltajes.

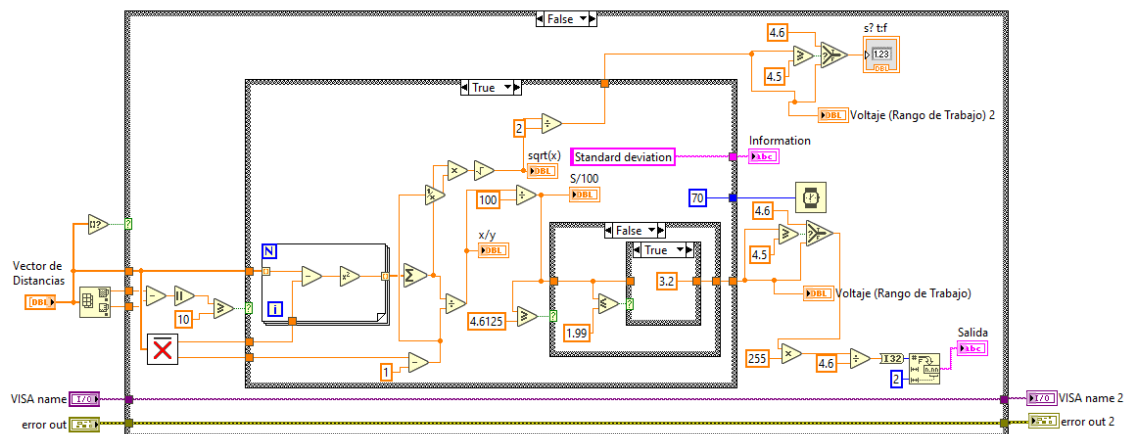


FIGURA 3.23: Programa que transforma los datos del vector de distancias desde un rango de voltaje de 3.2 voltios, con una distancia mínima de 15 cm, hasta 4.6 voltios con la distancia máxima de 40 cm o más.

Explicando la programación en la Figura 3.23, se toma la información del vector de distancias y por un lado se evalúa que sea mayor a 10 cm, y por otra parte, ingresa una función con el símbolo de la Figura 3.24, donde el proceso interno se



encuentra en la Figura 3.25, en el cual se calcula la media de los datos del vector de las distancias calculadas.



FIGURA 3.24: SubVI que contiene el proceso del cálculo de la media de los datos.

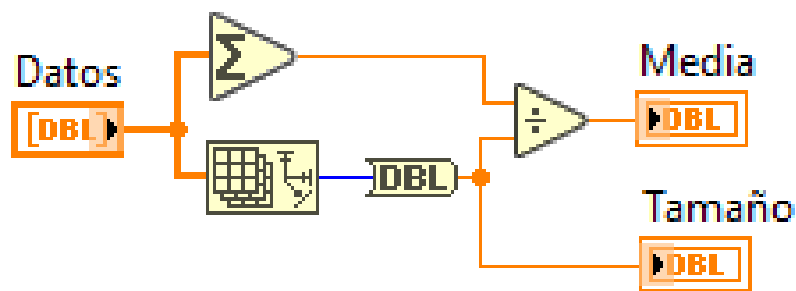


FIGURA 3.25: Programa con el caso True, de la desviación estándar.

Por lo tanto, en la Figura 3.23, la lógica utilizada para comprender el programa se puede ver en la Figura 3.27, donde se encuentra un diagrama de flujo que explica el mismo proceso que el programa de la Figura 3.23, en esta figura, se aplica la ecuación de la desviación estándar si la diferencia entre el dato de la distancia mínimo y máximo es mayor a 10 cm, con un retardo en el envío de la información de 1.2 s, sino es así, se utiliza el caso de la Figura 3.26, donde se normaliza la media de los datos en un rango de 3.3 voltios a 4.6 voltios, este es la referencia del voltaje de intensidad que será enviado a la retroalimentación háptica.

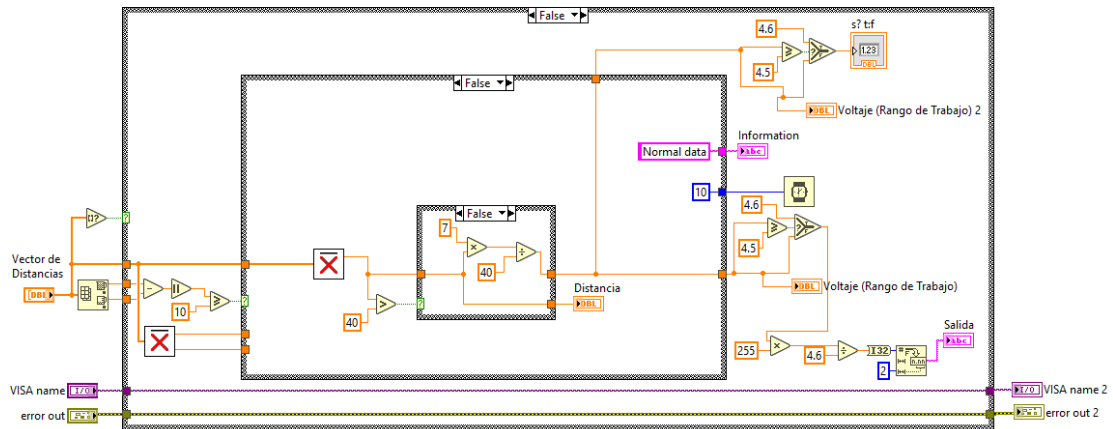


FIGURA 3.26: Programa con el caso False, cuando la diferencia del dato máximo y mínimo no es mayor a 10 cm.

Por consiguiente, independientemente del caso, se obtiene un valor de voltaje, el cual se aplica la ecuación 3.7, con ello esta información se envía al programa en Arduino® que se encuentra en el Apéndice A en Anexo 1, con la conexión entre el Arduino Nano y el la retroalimentación háptica hacia el módulo ARD-385, el usuario puede recibir información sobre el entorno en el que se encuentra.

$$ValueRange = \frac{(V)(255)}{4.6} \quad (3.7)$$

Donde:

- *ValueRange* es una variable declarada por el programador para referirse a la conversión de voltaje hacia un rango de 0 a 255.
- *V* es el valor del voltaje.

La constante de 255, hace referencia al valor máximo que puede recibir el Arduino Nano, cabe destacar que el Arduino Nano maneja unos pines donde se trabaja con PWM (Pulse Width Modulation), y el rango que recibe es desde 0 hasta el 255. Mientras tanto la constante de 4.6 es el valor máximo que esta trabajando la retroalimentación háptica, por ello, se integra a la ecuación 3.7.

Por último, dando seguimiento a la explicación de la Figura 3.21 en su parte inferior, una vez calculado su voltaje este es transformado de un valor double a string, la razón de esto, es porque se guardaran los datos de los voltajes que esta

calculando durante el uso del sistema en un archivo de nombre: Datos.csv, para tener un seguimiento de su comportamiento, esto se verá con mayor profundidad en el capítulo 4.

### 3.3.6. Método de Retroalimentación

Se ha creado un diagrama de flujo que se observa en la Figura 3.27 donde, con la lectura de información de la superficie, se calculan las distancias que es lo que se abordó en la subsección 3.3.4 *Cálculo de Distancia para un Láser de Línea Integrado en un Bastón Guía*.

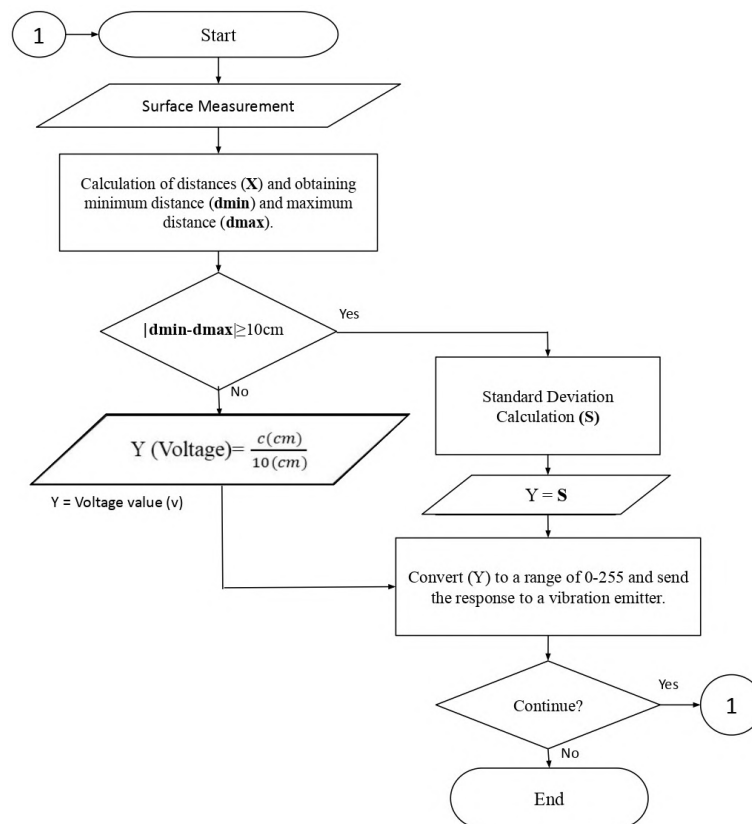


FIGURA 3.27: Diagrama de flujo con el proceso de lectura de distancia y notificación al usuario.

Por ello, del vector de información se busca el valor máximo y mínimo, si el resultado es menor a 10 cm se divide cada valor del vector de distancias entre 10, si es el caso contrario, se calcula la desviación estándar del vector de las distancias. Ahora, independientemente del caso que se elija, el resultado pasa a convertirse en un rango de 0 a 255, para ello se utiliza la ecuación 3.7, siendo lo mismo en la

etapa final del programa de la Figura 3.23 y por último se cuestiona si continuar en repetir el programa o finalizarlo.

Por último, toda la interpretación se trabaja de forma interna en el programa de LabVIEW™, en la subsección 3.3.7 se explica la última parte del programa desarrollado.

### 3.3.7. Programa Final

Por último, en este capítulo, en esta subsección se observan en la Figura 3.28 la parte del programa con la que interactúa el usuario que utilice el sistema, se observan los datos de distancias y la salida de voltaje hacia el Arduino Nano para la retroalimentación háptica, además de una sección que muestra la reflexión de la luz láser detectada por la cámara, al igual que un medidor de voltaje para verificar la intensidad con la que trabaja la retroalimentación háptica.



FIGURA 3.28: Programa final, donde el desarrollador observa el funcionamiento del sistema.

Para finalizar, en el capítulo 4 se abordarán las pruebas realizadas con el sistema inicial y final, mostrando datos y gráficas para validar los resultados.

# Capítulo 4

## Análisis de Resultados

### 4.1. Análisis de Detección

Es importante destacar que al analizar los resultados, se debe tener en cuenta la técnica de Hoover, la cual implica mover el bastón guía de izquierda a derecha y viceversa, realizando pequeñas elevaciones y descensos para explorar la superficie adecuadamente. Esta técnica es fundamental para obtener datos precisos y evaluar correctamente los resultados obtenidos.

Por otro lado, se ha establecido una resolución de (600, 800) píxeles en la imagen, para una adquisición de datos y que la pérdida de datos por los segundos de cálculo sea baja, para tener un análisis de las superficies más confiables.

#### 4.1.1. Resultados con el Uso del Láser que Genera un Haz de Luz en Punto.

Primeramente, con el acercamiento a utilizar los componentes que son la cámara y el láser que genera la luz de láser en punto como se muestra en la Figura 3.1, se realizó una prueba comparando la distancia calculada contra la distancia real, medida con diferentes dispositivos de medida mecánicos y electrónicos. Los resultados se observan en la Tabla 4.1.

Datos de Mediciones de Distancias.				
Distancia real	Medidor láser	Medición del programa con el láser de punto	Error del medidor láser	Error de medición del programa con el láser de punto
15.0 cm	15.4 cm	15.0 cm	0.4 cm	0.0 cm
20.0 cm	21.0 cm	22.0 cm	1.0 cm	2.0 cm
25.0 cm	24.6 cm	26.0 cm	0.4 cm	1.0 cm
30.0 cm	30.0 cm	31.0 cm	0.0 cm	1.0 cm
35.0 cm	34.6 cm	35.0 cm	0.4 cm	0.0 cm
40.0 cm	40.0 cm	40.0 cm	0.0 cm	0.0 cm
45.0 cm	45.0 cm	44.0 cm	0.0 cm	1.0 cm
50.0 cm	50.1 cm	49.0 cm	0.1 cm	1.0 cm
55.0 cm	55.1 cm	54.0 cm	0.1 cm	1.0 cm
60.0 cm	60.1 cm	59.0 cm	0.1 cm	1.0 cm
65.0 cm	NA	66.0 cm	NA	1.0 cm
70.0 cm	NA	69.0 cm	NA	1.0 cm

TABLA 4.1: Comparación de mediciones con el programa que utiliza el láser de punto.

Los números mostrados en la Tabla 4.1, con la comparación de errores, muestran que el sistema desarrollado es consistente respecto a la medición de la distancia desde la reflexión de la superficie hasta la cámara.

#### 4.1.2. Resultados con el Uso del Láser que Genera un Haz de Luz en Línea.

Ahora, con los resultados previos, se paso a utilizar un láser que genera un haz de luz en línea, para ello se contemplaron diferentes escenarios donde obtener la distancia calculada respecto a la real.

En el primer escenario que se encuentra en la Figura 4.1 se utilizan dos objetos, siendo el valor más alejado la superficie. Por consiguiente, se ha tabulado la información obtenida para estas tres mediciones, y la comparación respecto a medidores electrónicos y mecánicos, sus resultados se muestran en la Tabla 4.2.

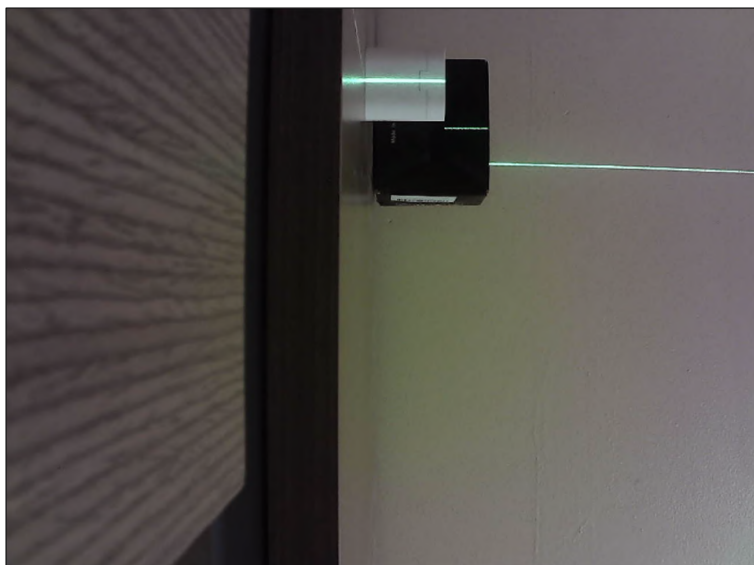


FIGURA 4.1: Primer escenario, con dos objetos.

Distancia real	Medidor láser	Medición con el programa con un láser de línea	Error de medidor láser	Error de medición de programa con un láser de línea
108.00 cm	108.80 cm	111.86 cm	0.80 cm	3.86 cm
87.00 cm	87.30 cm	86.98 cm	0.30 cm	0.02 cm
70.00 cm	69.90 cm	70.42 cm	0.10 cm	0.42 cm

TABLA 4.2: Comparación de mediciones con el primer escenario.

Como se observa en la Tabla 4.2, a distancias grandes el error aumenta, pero las medidas cercanas calculadas tienen una precisión muy cercana al valor real.

Por consiguiente, el segundo escenario es utilizado solamente un obstáculo, obteniendo dos medidas tanto de la superficie, como del mismo obstáculo, como se observa en la Tabla 4.3, y en la Figura 4.2 se observa el escenario donde se realizó la prueba, también, se compara lo calculado con las mediciones electrónicas y mecánicas.

Distancia real	Medidor láser	Medición con el programa con un láser de línea	Error de medidor láser	Error de medición de programa con un láser de línea
108.00 cm	108.80 cm	109.43 cm	0.80 cm	1.43 cm
87.00 cm	87.30 cm	88.04 cm	0.30 cm	0.04 cm

TABLA 4.3: Comparación de mediciones con el segundo escenario.

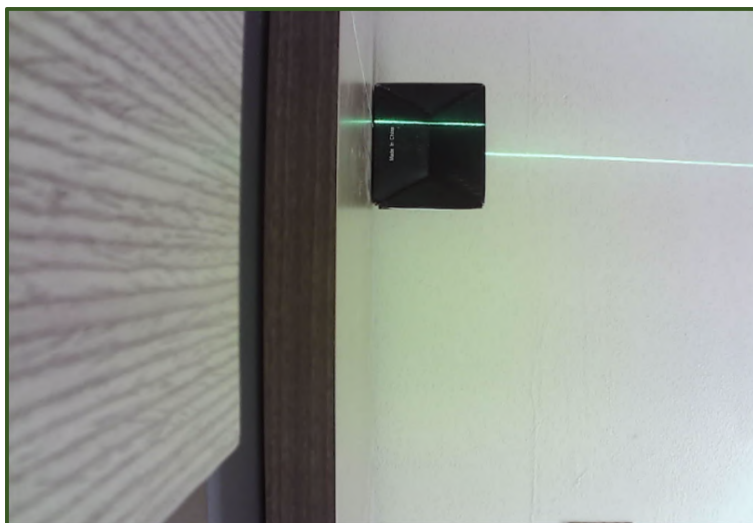


FIGURA 4.2: Segundo escenario, con un solo objeto.

En la Tabla 4.3, podemos observar que el margen de error disminuye al respecto, al igual se cuenta con un objeto menos que en el anterior escenario de la Figura 4.1.

Por lo tanto, con los resultados que se obtuvieron, el calculo de distancia pierde su precisión cuando se anexan obstáculos a la escena, y por otra parte, se observo durante las pruebas que el láser tenia una inclinación, la cual, puede influir en la precisión de los cálculos de las distancias. Por ello, para las últimas pruebas que se han realizado en la subsección 4.1.3 se han tenido en cuenta la verificación de la línea del láser, y el AOV de la cámara, asegurando que no intervenga algún parámetro interno en el cálculo de las distancias.

### **4.1.3. Resultados del Uso del Láser de Línea y la Cámara, Integrado en el Bastón Guía.**

Ahora, los resultados son obtenidos en los distintos escenarios que se encuentran en la Figura 4.3, el primer escenario es una superficie con boquillas entre losetas, que conlleva un desnivel de la loseta, el segundo escenario es con una superficie con un obstáculo por donde caminará la persona que utilice el sistema, el tercer escenario es la misma superficie, pero en esta ocasión tiene dos obstáculos en su camino. El cuarto escenario, es una superficie plana en donde se encuentran dos obstáculos en el camino, de igual forma el quinto escenario su diferencia es que



contiene solamente un obstáculo. El sexto escenario es una superficie pedregosa; todos los escenarios tienen el objetivo de analizar el comportamiento del sistema.


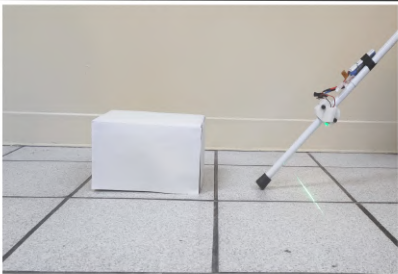

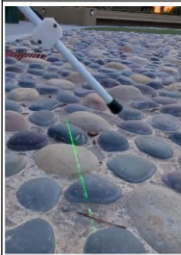


Primer Escenario	Segundo Escenario	Tercer Escenario
		
Superficie con boquillas de loseta.	Superficie con boquilla de loseta con un obstáculo.	Superficie con boquilla de loseta con dos obstáculos.
Sexto Escenario	Quinto Escenario	Cuarto Escenario
		
Superficie pedregosa	Superficie plana con un obstáculo	Superficie plana con dos obstáculos

FIGURA 4.3: Conjunto de escenarios en donde se realizaron las pruebas y la adquisición de los datos obtenidos.

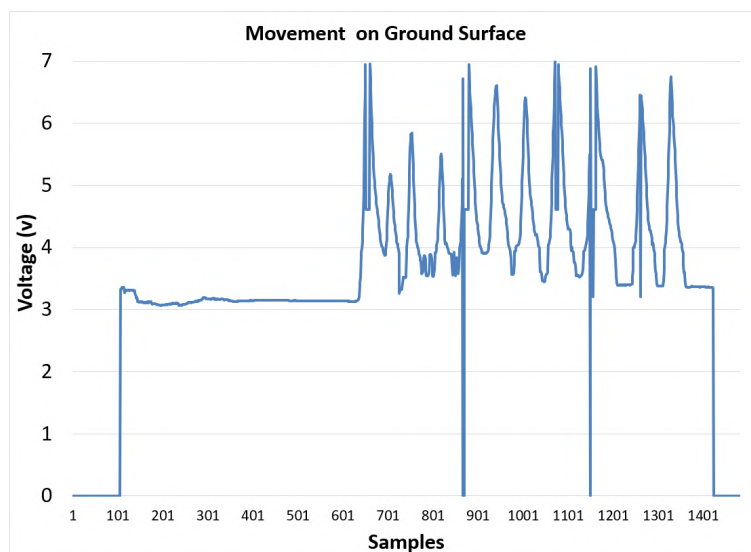


FIGURA 4.4: Gráfica de datos que el sistema otorga en uso.

Los resultados de la Figura 4.4 , son obtenidos con el primer escenario de la Figura 4.3. Es una superficie con losetas que tiene cuencos en la separación de cada loseta, la persona que utiliza el prototipo esta de forma estática unos segundos en

donde tiene una respuesta de voltaje en retroalimentación háptica de 3.2 voltios, y posteriormente empieza a caminar sobre la superficie con la técnica de Hoover hasta llegar a una pared y regresara a su punto inicial, el rango de voltaje en el movimiento es mayor a 3.2 voltios hasta llegar a un aproximado de 4 voltios, dependiendo de la profundidad de la superficie, a mayor sea, el voltaje aumenta para avisar sobre el peligro que se enfrenta. En la Figura 4.4 se observan espigas de voltaje que son por el movimientos de la técnica de Hoover.

En la Figura 4.5 se observan dos clasificaciones que se realizan tanto con el segundo y tercer escenario de la Figura 4.3, en el cuadrado verde es referencia al comportamiento que sucede en la Figura 4.1, mientras, el cuadrado rojo es el comportamiento cuando una persona se encuentra con un obstáculo, y pasa por encima del mismo cambiando la profundidad de la superficie, en este caso, se observan caídas abruptas del voltaje que son ocasionadas por el cambio repentino de profundidad en la superficie. Ahora, lo mas relevante en la Figura 4.5 es el comportamiento cuando existe un obstáculo en la superficie, esto ocasiona que el voltaje baje al nominal de 3.2 voltios, transfiriendo a la persona una retroalimentación háptica con pausas de 1.2 s para darle aviso del cambio en la superficie.

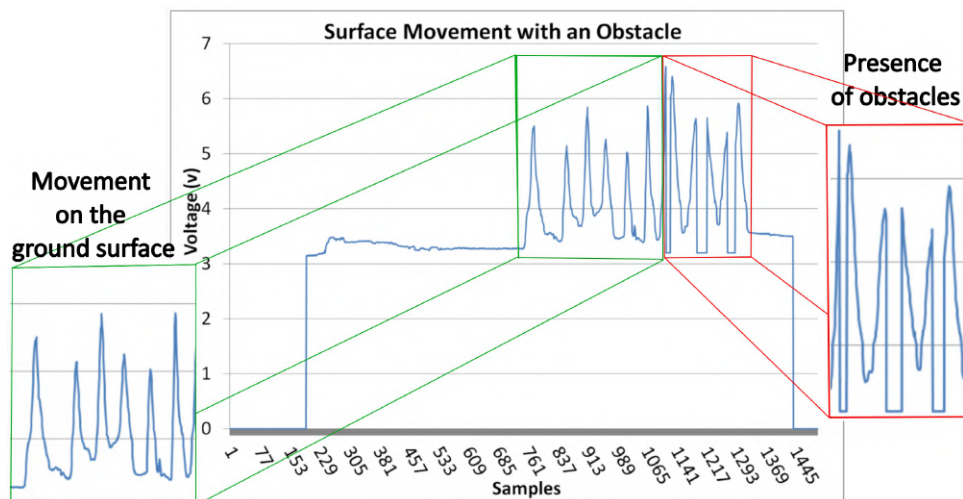


FIGURA 4.5: Gráfica de datos que el sistema brinda mientras se camina en el primer escenario y se encuentra con un obstáculo.

Por consiguiente, los resultados de la Figura 4.6 son en los escenarios cuatro y cinco que se encuentran en la Figura 4.3, se ha propuesto un comportamiento controlado, la persona se encontraba de forma estática frente a los dos escenarios y caminaba un par de pasos al llegar a ellos y pasaba con el sistema sobre cada uno, por otro lado, realizar movimientos controlados fue una forma de verificar el

programa y su respuesta, realizando esta prueba con mayor pausa para determinar la sensación de la persona al utilizar el sistema.

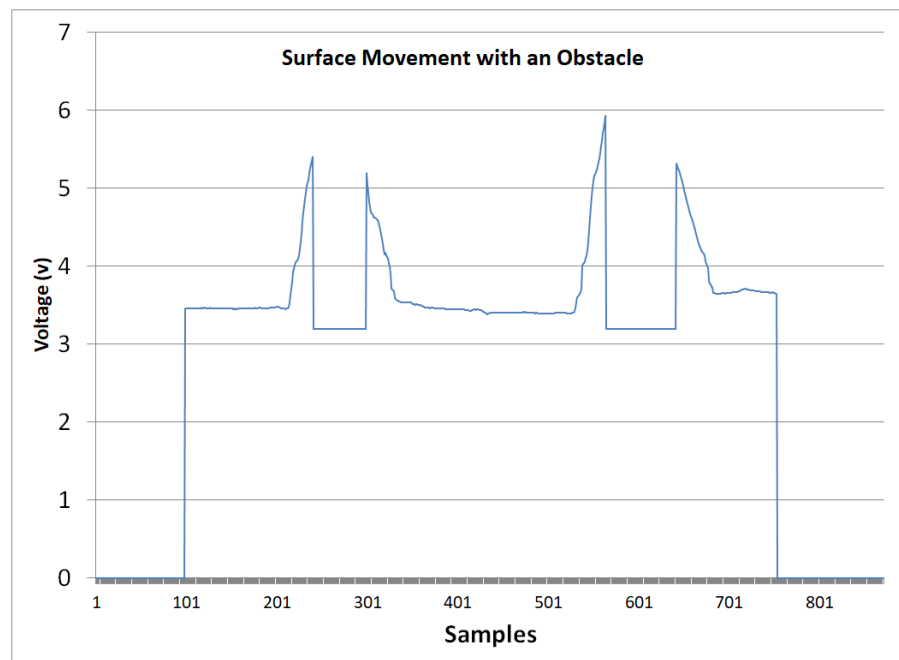


FIGURA 4.6: Gráfica de datos que el sistema otorga mientras se camina sobre el segundo escenario y se encuentra con un obstáculo.

En la Figura 4.7 se observan dos cuadrados de color rojo, que hacen referencia al resultado de pasar por el sexto escenario de la Figura 4.3. La gráfica que se encuentra en la Figura 4.7 tiene un comportamiento inusual a las Figuras 4.6, 4.5, 4.4, la razón es que con este escenario era necesario caminar un poco hasta llegar a él. Al llegar al escenario, el comportamiento del sistema se centra en los recuadros rojos, aquí podemos tener aún más marcadas espigas de voltaje pero están en un voltaje superior al nominal que es de 3.2 voltios, esto es porque la superficie presenta muchas irregularidades, entonces, el sistema aumenta su voltaje para dar a entender que es difícil estar en ese lugar. Al salir del escenario el comportamiento del sistema regresa a una normalidad de análisis de superficie continua.

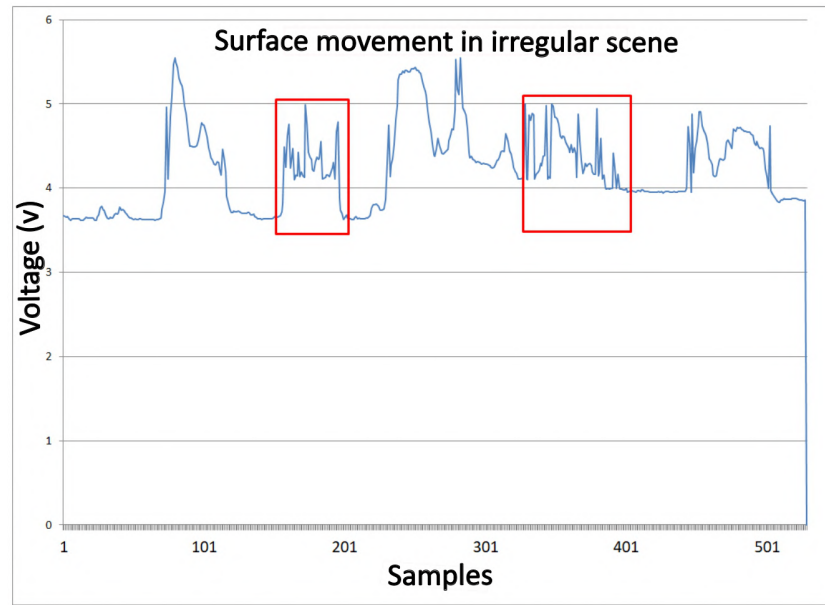


FIGURA 4.7: Datos que el sistema brinda mientras se camina en una superficie completamente irregular.

Por último, para poner a prueba el análisis de detección de la profundidad de la superficie sea con diferentes obstáculos o con una superficie completamente irregular, se utilizó el programa final mostrado en el capítulo 3, del cual se ha extraído la Figura 4.8 que es el programa en funcionamiento para así verificar aquello que observa el sistema, analiza y posteriormente brinda en voltaje transformado a una retroalimentación háptica que es lo que recibe la persona que utiliza el prototipo.



FIGURA 4.8: Programa que se observa en el cuadro negro lo que ve la cámara sobre la reflexión del láser en la superficie, en el lado derecho un vector en centímetros sobre las distancias que se calculan y un rango de voltaje siendo lo que entrega a la retroalimentación háptica para brindar el aviso al usuario.

La Figura 4.8 es el programa que se ha utilizado en la etapa final donde se realizaron las pruebas finales en este capítulo. Por otro lado, en la Figura 4.8 en la parte derecha se tiene un breve vector de las distancias en centímetros que está calculando el programa, y por último, tenemos en la parte inferior la conexión hacia el módulo de retroalimentación háptica que como ya se ha comentado funciona para brindar una respuesta a la persona mientras se encuentra utilizando el sistema. Finalmente, con todos los análisis realizados, se establecen las conclusiones en el capítulo 5.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Se ha trabajado en la presente tesis un desarrollo de método de visión artificial por medio de perfilometría láser, utilizando la ley de senos y cosenos, obteniendo ecuaciones de triangulación y procesando la información a través de un software. A continuación, se dará mención sobre el programa utilizado:

El programa que desarrolla el método de visión artificial utiliza la ley de senos y cosenos, para obtener la distancia desde un bastón guía a través de una cámara que observa la reflexión de una láser en la superficie.

Sin embargo, utilizar la ley de senos y cosenos fue definido desde el inicio, una de las variables desconocidas se calculaba con la regla de los ángulos internos de un triángulo, los cuales deben ser igual a 180 grados, otra de las variables se calculaba con la información de la cámara y los datos que se adquirirían con la imagen, al buscar el centro de cada una de las columnas de la imagen, cabe mencionar que esta búsqueda se realizaba con un proceso que se presentó en el capítulo 3, lo que realizaba era calcular el centro de cada columna en una imagen de 1024 x 768 píxeles, teniendo una nube de puntos que se crea por el láser.

Cabe destacar que el nivel de precisión que se llegó a obtener para advertir sobre las irregularidades en la superficie es de  $\pm 2$  cm sobre cada medición desde los 15 hasta 40 cm, aunque el margen de error aumenta en profundidades que sean mayor a los 40 cm. Para el objetivo que es conocer las irregularidades, profundidades de la superficie, no afecta en su respuesta, en las pruebas presentadas en el capítulo 4 se ha comentado que al llegar a irregularidades constantes el sistema advierte de forma correcta sobre el peligro que existe en la superficie, aumenta la intensidad

de retroalimentación háptica, o si la profundidad es cercana al límite comentado, de igual forma, su intensidad de retroalimentación háptica aumenta. Por otro lado, en los resultados se realizó un análisis de las tablas presentadas, verificando rigurosamente los cálculos de las variables por diseño para disminuir el error de mediciones obtenidas.

El método desarrollado no solo logró obtener buenos resultados como se mencionó anteriormente, también se caracterizó para las superficies irregulares, la retroalimentación háptica se configuró con un retraso de 1.2 s, para el usuario estos son pequeñas pausas de aviso, y para las superficies con profundidad, la retroalimentación háptica aumentaba a la par que la profundidad tenía un grado de peligro mayor, aunque como se mencionó al llegar a una profundidad superior a los 40 cm el sistema se entorpece. Por otro lado, se llegaron a diseñar diferentes encapsulados, hasta llegar al encapsulado final, tomando en cuenta el diseño del prototipo y el correcto ensamble al bastón guía, los ángulos de inclinación necesarios para que la cámara observara de manera correcta toda la línea por completo, y que de esta forma, le permitiera analizar la superficie que se propusiera a evaluar.

Sin embargo, a pesar de los logros y los cálculos obtenidos, el sistema puede mejorarse. Se evaluó el sistema, primeramente, el sistema realiza una evaluación de la luz del láser, en este caso se realiza en una sola dimensión sin considerar que la línea se extiende en el rango horizontal; es considerado un mismo triángulo en cualquier fracción de la línea del láser, pero siendo una lente convexa de una cámara, los triángulos que se crean por cada distancia son diferentes. Para ello, como estudio a futuro, se analizarán las ecuaciones que propone [Real-Moreno et al. \[2022\]](#), en donde se consideran más variables para calcular una segunda dimensión, corrigiendo las mediciones de la línea considerando el tipo de lente que tiene la cámara, también con las ecuaciones se podrá llegar a una evaluación a tres dimensiones escalando a un análisis de perfilometría de una a tres dimensiones, de esta forma, se tendrá mayor información sobre lo que se evaluó con el sistema.

Por otra parte, se ha comentado durante la búsqueda del centro de información de la línea, se lleva a cabo un análisis columna por columna. Esto implica que el sistema realiza diversas tareas para obtener las posiciones de la imagen. Debido a la naturaleza detallada de este proceso, se requiere un número considerable de cálculos para lograr resultados precisos, como propuesta de mejora y trabajo a futuro de lo anterior mencionado, se propone trabajar con momento de imágenes,

eligiendo una resolución de imagen óptima y particionando la información en secciones donde no se pierda ningún dato de la imagen, y agilizando el procesamiento de los centros de la emisión de línea del láser.

Por último, se ha propuesto para trabajo a futuro, realizar un cambio en la longitud de onda del láser, porque, durante las pruebas se han tenido pérdidas de visión del láser ante la luz del ambiente, se investigará una longitud del láser donde no sea dañino ante el ojo humano, que sea posible verlo a través de la cámara y que de esta forma tampoco se pierda su visión durante una luz ambiental o que la pérdida no sea significativa, mejorando el escaneo de la superficie.



# Apéndice A

## Anexo I: Código para Funcionamiento de Módulo de Vibración

```
int VIB=3; //Declaración de pin de salida al módulo de vi-
bración.
int dato; //Variable sobre la información de LabVIEW.

void setup()
{
  Serial.begin(115200); //Declaración de velocidad de lectura.
  pinMode(VIB, OUTPUT); //Declaración de pin como salida.
}

void loop()
{
  if(Serial.available()) //Verifica si la información esta disponible a leer.
  {
    dato = Serial.parseInt(); //Dato es igual al del monitor serial.
    analogWrite(VIB,dato); //Escribir la información en el pin 3.
  }
}
```

```
delay(25);           //Retardo de 25ms  
{
```

## Apéndice B

### Anexo II: Artículo de Congreso.

# Method of Artificial Vision in Guide Cane for Visually Impaired People.

Leonardo D. Medina-Madrazo<sup>a</sup>, Julio C. Rodríguez-Quiñonez<sup>a\*</sup>, Oscar Real-Moreno<sup>a</sup>,  
Dayanna Ortiz-Villaseñor<sup>a</sup>, Wendy Flores-Fuentes<sup>a</sup>, Oleg Sergiyenko<sup>b</sup>, Moises J. Castro-Toscano<sup>a</sup>,  
Paolo Mercorelli<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

<sup>b</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

<sup>c</sup>Institute for Production Technology and Systems - IPTS Leuphana University of Lueneburg

medinal1@uabc.edu.mx, \*julio.rodriguez81@uabc.edu.mx

**Abstract**—Artificial vision methods have been developed to solve different problems or limitations that people with visual disabilities present through applications designed to have greater autonomy. These systems are characterized by giving different kinds of feedback to the user, integrating the system with sensors or cameras that help to know the proximity or existence of an obstacle that obstructs their path. This paper presents an artificial vision method through triangulation with a camera that observes a laser beam reflection in the ground to calculate the surface's height or depth and to offer a haptic response that changes in frequency and amplitude depending on the surface type. In the implementation of the experiment, it has been verified that the system's response is close to the measurement with other measuring devices, warning about irregularity on the surfaces.

**Index Terms**—Visually impairment, Artificial vision, Triangulation, Camera, Laser profilometry

## I. INTRODUCTION

Visual impairment goes from partial to total vision loss; depending on the vision loss degree, it produces misleading information about the unfamiliar environment, whether the proximity of an obstacle or confirming the distance of an object [1] [2] [3].

Several tools have been developed to increase day-to-day autonomy of visually impaired people [4] [5]. For example, guide canes are auxiliary devices to help blind people and provide information about their surroundings a step ahead. However, the guide cane does not incorporate any implementation that notifies about anomalies surface.

On the other hand, computers allow perceiving reality through sensors that work with optical principles [6]. Some systems would enable this, such as two dimensions (2D), which perceive images as a plane, or three dimensions (3D), which perceive volume objects. For example, a vision sensor can be integrated into a camera to detect the presence of different objects or orientations around things. Then, depending on the information from the analyzed element, such as shape, brightness, or darkness, the system send different kinds of responses [7] [8].

Recent researches use a white cane electronic system to improve the independence of visually impaired people [9]. Sidratul Salat et al. [10] proposes a system that automat-

ically detects obstacles in the environment with ultrasonic sensors—offering audio feedback to users with a buzzer and headphones. However, using headphones restricts the audible sense, making it difficult to entirely perceive what is happening in the environment.

Similarly to Salat et al. [10], Ferdaus Ahmed et al. [11] propose a system that detects environmental obstacles, suggesting the possibility of using a hearing aid to know the response. Unfortunately, using ultrasonic sensors in the system makes it difficult to map the surface, reducing the precision of the area through which a person with a visual impairment walks.

In the same way, Satal et al. [10], C. R. Bryan [12] proposes a system with ultrasonic sensors to detect obstacles at a proximity of one meter away, receiving a sound through a buzzer as a response to the user so that he knows more about his environment. However, this system has limitations due to the sound of timbre, which could mean the loss of sound by the environment.

Also, S. Soares et al. [13] suggested a system that considers the user height and a calibration process to help detecting obstacles in different scenarios, by eliminating the use of the white cane and creating a new device that does not depend on leaning on the ground. Despite this, the device demands taking a course to know how to calibrate it, something additional that a person with a visually impaired will learn.

On the other hand, Messaoudi et al. [14] presented a system with different navigations modes and elements to detect objects and obstacles. However, this system is not ergonomic because of the weight, since some elements are on the upper part of the guide cane.

Finally, T. Tanabe et al. [15] developed a system that supports the learning and training through the white cane using vibrations on the touch of the surface. However, the system is guaranteed to reduce the time it takes to learn to use the guide cane, but it does not have any attachments to help provide additional information about the surface.

Therefore, this paper proposes a system that integrates laser profilometry with a vibration module on a guide cane to analyze a surface and give different frequency feedback to a person about anomalies in the surface. This system

allows more information about the mapping area that usually detects with the only use of the guide cane, also warning with different vibration frequencies about homogeneous and non-homogeneous surfaces, allowing to obtain autonomy and security for visually impaired people.

Some advantages of the proposed system are:

- Laser profilometry allows for obtaining more information about an observed surface.
- The response through vibration allows a visually impaired person to use their sense of hearing for other tasks, allowing full use of it to perceive what is happening in their environment.
- It will bring more security to the visually impaired when walking over different surfaces.

The rest of the document is organized as follows; section II is the methodology, which will explain mathematically the system's operation. Section III is the experimentation, presenting the technical data of the system elements, results, and analysis of tests. Finally, section IV describes the observations on the results obtained in the experimentation, and section V is the conclusion, where the functionality of the system, its results, and its findings are reflected.

## II. METHODOLOGY

This paper presents an integration of 2D profilometry into a white cane to obtain information about surface anomalies through the response at different vibration frequencies to help a visually impaired person with anomalies on the ground.

The system is equipped with an 8MP varifocal camera and a 530nm laser pointed to the ground surface. The camera and the laser light emitter are integrated into the guide cane with a known distance between them (baseline). It is worth noting that the laser is positioned above of the cane endpoint to avoid any damage and facilitate its use by individuals with visual impairments who utilize the Hoover technique, which involves making circular movements and touching the surface to navigate, see Fig.1.

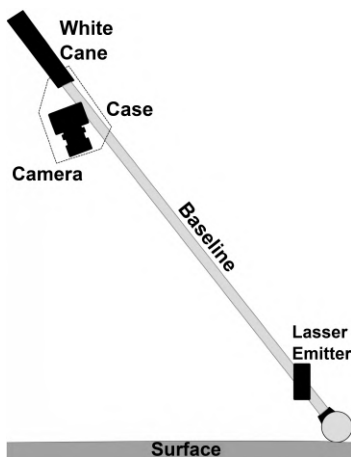


Fig. 1. Visual representation of guide cane and components that are integrated.

### A. Triangulation Operation

The camera and the laser are located on the guide cane, separated by a distance ( $b$ ), creating a triangle by the angle of the camera ( $\angle C$ ) that visualizes the reflection created on the ground by the laser beam ( $a$ ). The angle of the laser ( $\angle A$ ) directed to the ground that emits a beam ( $c$ ), then the distances  $a$  and  $c$  intersect at a point on the surface, creating angle  $B$ . ( $\angle B$ ), (See Fig.2). The  $\angle C_o$  will be explained later in this section.

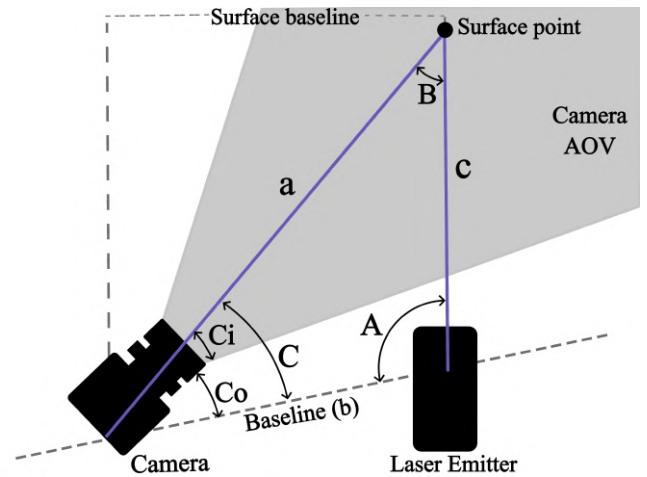


Fig. 2. Representation of the operation of the components of the 2D profilometry system.

In summary, profilometry is based on the sine and cosine law. Eq. 1 is used to obtain the distance between the laser emitter and the ground ( $c$ ).

$$c = \frac{b * \sin(\angle C)}{\sin(\angle B)} \quad (1)$$

Where:

- $b$  is the distance of camera to laser emitter.
- $\angle C$  is the angle from the white cane to the camera position to visualize the laser's reflection beam.
- $\angle B$  is the intersection of sides  $c$  and  $a$ .

First, to calculate the  $\angle C$  is necessary to consider  $\angle C_i$  because it is an angle where the AOV of the camera intervenes and depends on the laser reflection detected by the camera. The camera's angle concerning the guide cane ( $\angle C_o$ ) is given by the design of the system.

Now,  $\angle C$  is calculated as (2):

$$\angle C = \frac{\mu_j * AOV}{w} + C_o \quad (2)$$

Where:

- $\mu_j$  is the position vector of the centroids in each column of the laser beam in the image that the camera observes (3)(See Fig.3).
- AOV is Angle of View of the camera.
- $w$  is the width of the image.

The observed image by the camera is subjected to a filter to limit the illumination, searching for the highest illumination values, which are the laser beam. Contrary to low illumination values, they are set to zero because they are the surface, other external illumination, or other phenomena that are not of interest.

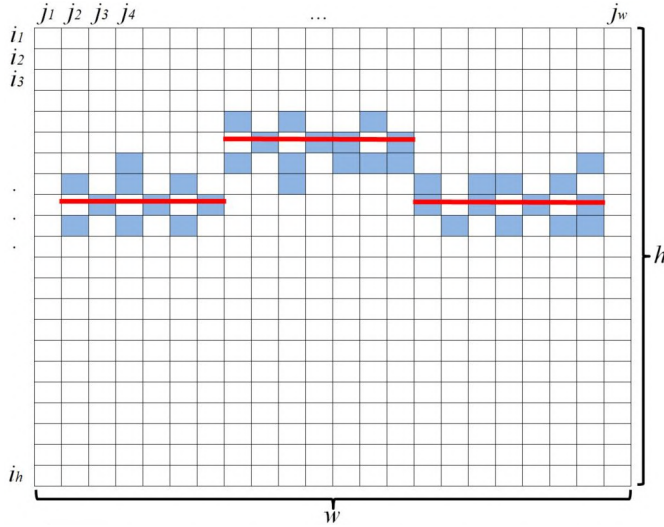


Fig. 3. Representation of the image with a filter, which is what the camera observes. The blue squares represent the laser beam, and the red lines represent the centroid of the position of the columns.

Therefore,  $\mu_j$  is calculated as (3):

$$\mu_j = \frac{\sum_0^i \hat{X}(i, j)}{P_j}, j = 1, 2, 3, \dots, w \quad (3)$$

Where:

- $j$  is the column of the image.
- $i$  is the row of the image.
- $\hat{X}$  is the filtered image that the camera observes.
- $P_j$  is the quantity of samples (blue boxes) in each column of the filtered image.

Consequently, it would remain to calculate  $\angle B$  by subtracting the internal angles of the triangle (4).

Unlike the calculations made before, the camera's distance towards the laser ( $b$ ) and the angle that the laser ( $\angle A$ ) has in the direction of the ground are known by the system's design (See Fig.1).

Finally, the distance  $c$  will turn out to be a vector of distances for each column where the camera observes the reflection of the laser beam, substituting each variable in Eq. 1.

### B. Data Interpretation

The distance arrangement ( $c$ ) is sent to a conversion process (See Fig.4) to send the information to a user through vibrations. Also, the information is transferred to a vibration module that is controlled by PWM pulses.

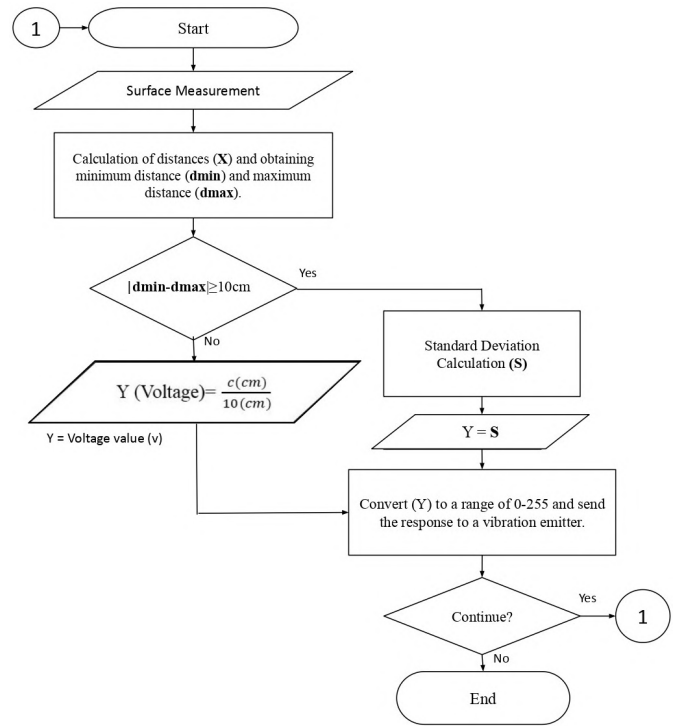


Fig. 4. Flowchart with the process to go from distances to vibration and user notification.

As shown in Fig. 4, the measurement of the surface is calculated, obtaining an arrangement of distances of the surface to be analyzed. Next, the minimum and maximum values are sought and evaluated if they have a difference of ten centimeters or more. If the evaluation is true from these results, it is required to extract the distance array to calculate its standard deviation. On the other hand, each distance value in the array is divided by ten because they are two-digit values. Then, the conversion is performed from one-digit values to integer or decimal ones. Regardless of whether the results are true or false, the value will continue to be converted between a range of zero to two hundred and fifty-five, which will be the value that the vibration module receive as input. Finally, it is evaluated whether to repeat or terminate the last step, which is the procedure of verifying the data to notify the user.

## III. EXPERIMENTATION

The experimentation is carried out in three different stages with ten people, integrating obstacles that people will go through, sending a vibratory response with an intensity and frequency that depends on the surface. The responses sent by the system are very similar, so voltage-sample graphs explain the system's behavior in each scenario.

The stages to be studied are irregular surfaces, either in a very noticeable way, with few anomalies, or a place with almost no anomalies. The following subsections will explain the scenarios more precisely.

A. First stage.

In the first instance, an area with some grooves on the flat surface is chosen, interfering with the reading of the surface and causing the handling of the white cane not to be fluent (See Fig.5).



Fig. 5. First Stage. Grooves on Flat Surfaces

Secondly, the spikes on the graph (See Fig.6) refer to the movement made when walking on the surface. Indeed, the tension obtained by the system is transformed into a vibration emitted to the person using the system (See Fig.4).

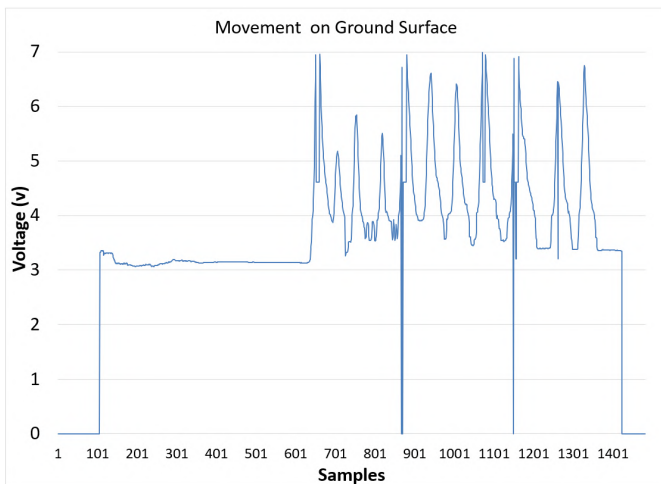


Fig. 6. Data that the system delivered while walking on the first stage.

B. First stage with one and two obstacles.

In this subsection, the area of subsection A is chosen, but up to two objects are placed on the surface to evaluate the system's response (See Fig.7 and Fig.8).

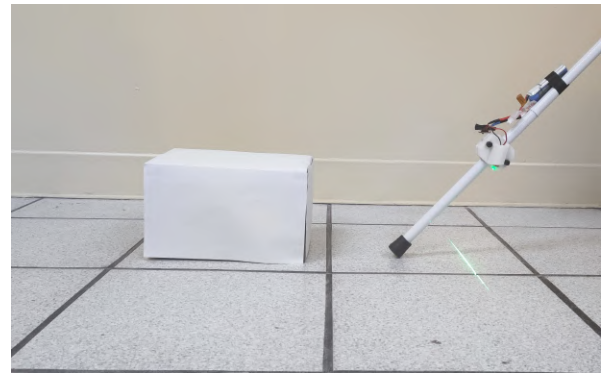


Fig. 7. Image of the first stage with an obstacle on the ground surface.



Fig. 8. Image of the first stage with two obstacles on the ground surface.

Subsequently, the data capture is interpreted (See Fig.9), and the green box refers to a normal movement on the ground surface that the person has. The moment the person passes through the obstacle, there is a sudden drop of tension, as seen in the red box.

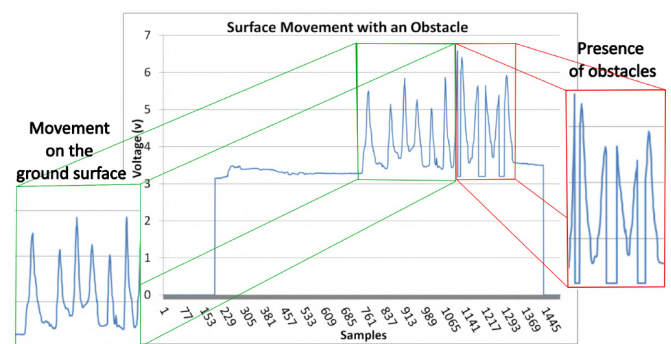


Fig. 9. Graphic data that the system delivered while walking on the first stage with an obstacle.

When the system is being used with no obstacle or irregularities on the surface, the emitting laser's line remains continuous. Still, when it passes over an obstacle (See Fig.10), a line is created above the line corresponding to the ground surface reading.



Fig. 10. The image that shows what the camera sees when passing through an obstacle is the line seen above, and it has different filters to focus on the reflection that the laser beam hits the ground and the obstacle.

### C. Second stage with one and two obstacles.

Now, in the same way as the previous subsection. Tests were carried out by adding obstacles to the surface (See Fig.11 and Fig.12). In this case, the surface is polished and has no irregularities or significant damage.



Fig. 11. Image with an obstacle on plane surface.



Fig. 12. Image with two obstacles on plane surface.

After, the data are captured in a graph (See Fig.13) that represents the movement with the approach of the step over the obstacles.

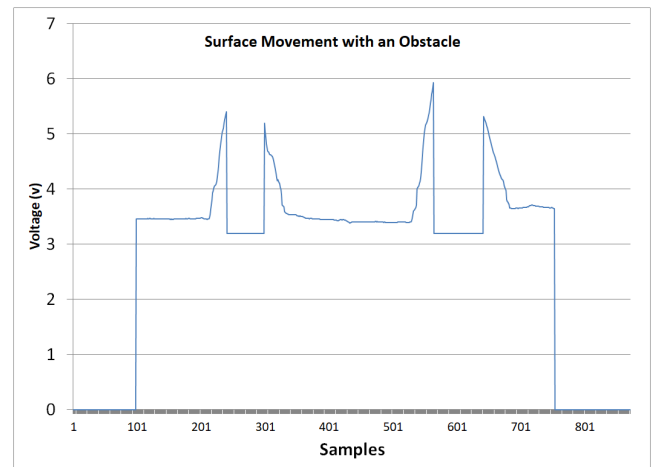


Fig. 13. Graphic data that the system delivered while walking on the second stage with an obstacle.

### D. Third stage.

Unlike the previous stages, in this scenario the area is irregular, with few flat areas making it difficult to walk on it (See Fig.14).



Fig. 14. Fourth Stage. Uneven Surface

The test persons walked towards the stage, stepped on it, and returned to a starting point outside the stage to be analyzed.

The data outside the red boxes on the graph (See Fig.15) are surface changes independent of the scenario. These surface changes can be a ramp or a flat surface with irregularities, depending on the walking, and how the person uses the guide cane is how the data is presented.



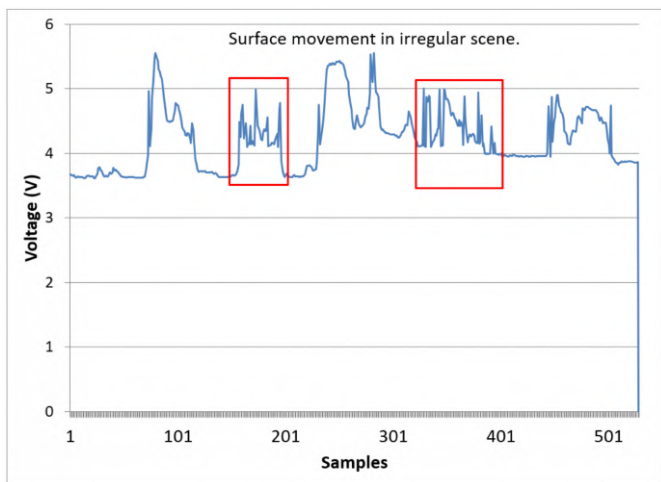


Fig. 15. Data that the system delivered while walking on the uneven surface. Also, in the graph, they are marked with red boxes that refer to when walking in the irregular stage.

#### IV. OBSERVATIONS

Through a qualitative analysis, people have mentioned that improving the system's ergonomics can guarantee prolonged use. On the other hand, the results obtained through the experimentation revealed a loss of signal due to sunlight. Therefore, it is proposed to change the laser illumination from 530nm to 930nm, reaching a range of light invisible to the human eye but visible to the system used. Furthermore, the system works in a height range from 15 to 40 centimeters, providing the expected response characterized by obstacles on a surface that responds efficiently. Regardless of how quickly the system is used and the obstacle faced, the system recognizes its obstacle. It delivers a response that warns the person if they will have difficulties or if it is impossible to pass through the received vibration.

#### V. CONCLUSION

This paper presents a 2D profilometry system with haptic feedback implemented into a white cane; therefore, the experimental results showed a maximum precision of one centimeter on surfaces without obstacles or deformations in the ground. Due to the previously mentioned accuracy, the readings were reliable for monitoring obstacles that presented both natural and artificial deformations. In addition, a qualitative analysis was carried out, the 90 percent of the people who used the cane with the integration of the profilometry system affirmed that they perceived a constant vibration at all times when using the cane. Furthermore, the frequency variations were conspicuous in most scenarios.

#### VI. ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by the Universidad Autónoma de Baja California, México, Research Organization Registry (ROR) institucional 3996069, <https://ror.org/05xwcq167>, and CONACYT, Mexico.

#### REFERENCES

- [1] Web ONCE, Características de la Discapacidad Visual y Ceguera, 2020. [Online], Available: <https://www.once.es/dejanos-ayudarte/la-discapacidad-visual>
- [2] Hisham E. Bilal-Salih and Kazunori Takeda and Hideyuki Kobayashi and Toshibumi Kakizawa and Masayuki Kawamoto and Keiichi Zempo, "Use of Auditory Cues and Other Strategies as Sources of Spatial Information for People with Visual Impairment When Navigating Unfamiliar Environments", MDPI, 2022. [Online], Available: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/6/3151>
- [3] Ahmed, Sara S., et al. "Assistive Technology for the Visually Impaired Using Computer Vision and Image Processing." International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics. Springer, Cham, 2023.
- [4] Web ONCE, Autonomía Personal de Personas con Discapacidad, 2018. [Online], Available: <https://www.once.es/servicios-sociales/autonomia-personal>
- [5] Bineeth Kuriakose, Raju Shresthaand and Frode Eika Sandnes. Tools and Technologies for Blind and Visually Impaired Navigation Support: A Review, 2022. [Online] <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1783>
- [6] J. Cock, El Método de la Triangulación Aplicado en un Escáner Láser, para objetos tridimensionales, 2020.
- [7] Keyence, ¿Qué son los Sensores de Visión?, 2022. [Online], Available: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/vision/info/>
- [8] J. F. i Collado, "New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners", Tesis Doctoral, Departament d'Electrònica, Informàtica i Automàtica, Universitat de Girona, Girona, 2004.
- [9] Ahmed Alejandro Cardona Mesa, Ruben Dario Vasquez Salazar. Dispositivos de Asistencia para la Movilidad en Personas con Discapacidad Visual: Una Revisión Bibliográfica, Revista Politécnica, Medellín, Colombia . 2019, doi: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n28a10>
- [10] Salat, Sidratul and Ashfak Habib, Mohammad, Smart Electronic Cane for the Assistance of Visually Impaired People, IEE, 2019. [Online], Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9019932>
- [11] F. Ahmed, Z. Tasnim, M. Rana and M. M. Khan, "Development of Low Cost Smart Cane with GPS," 2022 IEEE World AI IoT Congress (AIoT), 2022, pp. 715-724, doi: 10.1109/AIoT54504.2022.9817322.
- [12] Collantes Rodríguez Bryan Damián, "Diseño de un Prototipo de un Bastón Inteligente con Sensores para Personas con Discapacidad Visual y Física en la Carrera de Ingeniería en Computación y Redes.", Universidad Estatal del Sur de Manabí, Manabí, Ecuador. 2020.
- [13] Soares, J. M. S., Guerra, C. S. D., da Silva, M. M., Chaves, L. S., Sampaio, A. L., and Al-Alam, W. G. Smart Cane: Laser guide as an inclusion tool for the visually impaired. Proceedings of the XX Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems, 2021. [Online] Available: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3472301.3484330>
- [14] Mohameed Dhiaeddine Messaoudi and Bob-Antoine J. Menelas and Hamid Mcheick, Autonomous Smart White Cane Navigation System for Indoor Usage, Univerisity of Quebec at Chicoutimi, 2020. [Online] Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/8/3/37>
- [15] T. Tanabe, K. Nunokawa, K. Doi and S. Ino, "Training System for White Cane Technique Using Illusory Pulling Cues Induced by Asymmetric Vibrations," in IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 30, pp. 305-313, 2022, doi: 10.1109/TNSRE.2022.3148770.

# Referencias

- Ahmed, F., Tasnim, Z., Rana, M., and Khan, M. M. (2022). Development of low cost smart cane with gps. In *2022 IEEE World AI IoT Congress (AIIoT)*, pages 715–724. IEEE.
- Bashshur, R., DeVries, C., Bosman, J., and Dunn, M. (2023). A review of the published literature in global population-based studies of childhood blindness and vision impairment. *Ophthalmic Epidemiology*, pages 1–8.
- Batchelor, B. G. (2012). *Machine vision handbook*. Springer.
- Biere Arenas, R. M. and Egusquiza Ortega, A. (2010). Herramienta para el diagnóstico de la accesibilidad en entornos de patrimonio histórico, en base a escaneado láser y realidad virtual: Acc3de 1.0. *ACE: architecture, city and environment*, 5(13):61–90.
- Biswas, P. and Robinson, P. (2008). A new screen scanning system based on clustering screen objects. *Journal of Assistive Technologies*, 2(3):24–31.
- Bourne, R., Steinmetz, J. D., Flaxman, S., Briant, P. S., Taylor, H. R., Resnikoff, S., Casson, R. J., Abdoli, A., Abu-Gharbieh, E., Afshin, A., et al. (2021). Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the global burden of disease study. *The Lancet global health*, 9(2):e130–e143.
- Cabrerizo, E. (2000). El braille, mucho más que un sistema de lectura para los ciegos. *El Braille, mucho más que un sistema de lectura para ciegos*.
- Chen, F., Zhang, K., Jiang, H., Shen, Z., and Chen, L. (2023). Thickness evaluations for thin coatings using laser scanning thermography. *NDT & E International*, page 102817.

- Davies, E. R. (2012). *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Academic Press.
- De Kleijn-De Vrankrijker, M. W. (2003). The long way from the international classification of impairments, disabilities and handicaps (icidh) to the international classification of functioning, disability and health (icf). *Disability and Rehabilitation*, 25(11-12):561–564.
- Duh, E. (2008). *Diabetic retinopathy*. Springer Science & Business Media.
- Ferenčík, M., Kardoš, M., Allman, M., and Slatkovská, Z. (2019). Detection of forest road damage using mobile laser profilometry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166:105010.
- Flaxman, S. R., Bourne, R. R., Resnikoff, S., Ackland, P., Braithwaite, T., Cicinelli, M. V., Das, A., Jonas, J. B., Keeffe, J., Kempen, J. H., et al. (2017). Global causes of blindness and distance vision impairment 1990–2020: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 5(12):e1221–e1234.
- Gamboa Caicedo, C. E. et al. (2018). Sistema de escaneo tridimensional multi-propósito.
- García, E. (2012). Visión artificial. *FUOC Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya*.
- Giudice, N. A. and Legge, G. E. (2008). Blind navigation and the role of technology. *The engineering handbook of smart technology for aging, disability, and independence*, pages 479–500.
- Gómez, C. H. and Carrillo, L. G. D. (2017). Degeneración macular relacionada con la edad. *Acta Médica Grupo Ángeles*, 15(4):312–313.
- Gwirc, S., Ferdeghini, F., Comastri, A., and Lupi, D. (1998). Sensores ultrasónicos: respuesta a distintas formas de onda de emisión. *Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica e Informática (CITEI) Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)*.
- Hernández Posada, Á. (2004). Las personas con discapacidad: su calidad de vida y la de su entorno. *Aquichan*, 4(1):60–65.
- Hollins, M. (2022). *Understanding blindness: An integrative approach*. Routledge.

- Hornberg, A. (2006). *Handbook of machine vision*. John Wiley & Sons.
- Hu, Y., Chen, Q., Feng, S., and Zuo, C. (2020). Microscopic fringe projection profilometry: A review. *Optics and lasers in engineering*, 135:106192.
- INEGI, C. (2014). Discapacidad en México. *Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx>*.
- Institute, N. E. (1975). *Diabetic retinopathy*. US Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service . . . .
- Juarez-Salazar, R., Rodriguez-Reveles, G. A., Esquivel-Hernandez, S., and Diaz-Ramirez, V. H. (2023). Three-dimensional spatial point computation in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 164:107482.
- Li, D., Celestin, A., and Mansouri, A. (2015). Corrosion surface analysis using 3d profilometry.
- Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., et al. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115:63–77.
- Méndez Galván, J. F. and Olguín Bernal, H. (2011). Oncocercosis: ¿ la próxima enfermedad eliminable en México? *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 68(2):130–137.
- Mínguez, T. D. (2021). *Visión artificial: aplicaciones prácticas con OpenCV-Python*. Marcombo.
- Mundial, B. et al. (2011). Informe mundial sobre la discapacidad 2011.
- Múnera, E. M., Salazar, J. F. R., and Bedoya, J. W. B. (2010). Construcción de un modelo digital 3d de piezas precolombinas utilizando escaneo láser. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 7(1):197–206.
- Mylonas, P., Bull, T., Moazzez, R., Joiner, A., and Bartlett, D. (2019). Detection threshold of non-contacting laser profilometry and influence of thermal variation on characterisation of early surface form and textural changes in natural human enamel. *Dental Materials*, 35(7):e140–e152.

- Olsen, W. S. and Adams, R. M. (1970). A laser profilometer. *Journal of Geophysical Research*, 75(12):2185–2187.
- Organization, W. H. (2019). World report on vision. isbn: 9789241516570.
- Organization, W. H. et al. (1993). International classification of impairments, disabilities, and handicaps. *Weekly Epidemiological Record= Relevé épidémiologique hebdomadaire*, 68(15):101–103.
- Real-Moreno, O., Rodríguez-Quiñonez, J. C., Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Castro-Toscano, M. J., Miranda-Vega, J. E., Mercorelli, P., Valdez-Rodríguez, J. A., Trujillo-Hernández, G., and Sanchez-Castro, J. J. (2022). A quadrant approach of camera calibration method for depth estimation using a stereo vision system. In *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1–6. IEEE.
- Salat, S. and Habib, M. A. (2019). Smart electronic cane for the assistance of visually impaired people. In *2019 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, pages 1–4. IEEE.
- Salazar, R. D. V. and Mesa, A. A. C. (2019). Dispositivos de asistencia para la movilidad en personas con discapacidad visual: una revisión bibliográfica. *Revista Politécnica*, 15(28):107–116.
- Sankaridurg, P. and Holden, B. (2014). Practical applications to modify and control the development of ametropia. *Eye*, 28(2):134–141.
- SER, C. Y. and VICIOS, A. (2006). Visión artificial.
- Shaw, E. and Patel, B. C. (2022). Complicated cataract. In *StatPearls [Internet]*. StatPearls Publishing.
- Soares, J. M. S., Guerra, C. S. D., da Silva, M. M., Chaves, L. S., Sampaio, A. L., and Al-Alam, W. G. (2021). Smart cane: Laser guide as an inclusion tool for the visually impaired. In *Proceedings of the XX Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–10.
- Sorrentino, S. A. and Remmert, L. (2020). *Manual Mosby de cuidados básicos de enfermería*. Elsevier.
- Toquica, H. (2020). Estado de arte: Visión de máquina y técnicas de inteligencia artificial para la detección de infracciones de tránsito por alta velocidad.

- Vadillo, R. C. (2021). Las inclusiones “razonables” en materia de discapacidad en México: política de educación inclusiva. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (México)*, 51(1):91–117.
- Verdaguer, T. J. (2010). Degeneración macular relacionada a la edad. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 21(6):949–955.
- Zhu, K., He, X., Gao, Y., Hao, R., Wei, Z., Long, B., Mu, Z., and Wang, J. (2022). Invalid point removal method based on error energy function in fringe projection profilometry. *Results in Physics*, 41:105904.