

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA



**DISEÑO DE SUBSISTEMA DE APERTURA DE BARRIDO
LASER (RECEPTOR), PARA SISTEMA DE DETECCION DE
OBSTACULOS UTILIZANDO BARRIDO CON LASER**

T E S I S

que presenta para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

ISMAEL GERARDO RENDÓN LÓPEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. OLEG SERGIYENKO**

Mexicali, B. C.

Junio de 2009

ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Antecedentes.	3
1.3 Justificación	8
1.4 Objetivo	9
1.5 Metas	9
1.6 Metodología	9
2. Teoría de electro-óptica	11
2.1 Sistemas Electro-ópticos	12
2.2 Espectro Electromagnético	13
2.3. Ley del inverso del cuadrado de la distancia	16
2.4. Ley del coseno de Lambert	16
2.5 Fotodiodo	17
2.5.1 Modo fotovoltaico	17
2.5.2 Rango lineal	18
2.5.3 Frecuencia de respuesta	20
2.5.4 Modo fotoconductor	20
2.6 Lentes	21
2.6.1 Puntos y planos focales	21
2.6.2 Distancia focal	22
2.6.3 Planos y puntos principales	23
2.6.4 Reconocimiento de lentes	24
3. Diseño y Construcción del Prototipo	25
3.1 Introducción	
3.2 Triangulación para Obtención de Coordenadas 3D	26
3.2.1 Cálculo de la distancia d	27
3.2.2 Obtención de coordenadas tridimensionales (x,y,z)	29
3.3 Diseño mecánico del Sistema de Visión Técnico	30
3.3.1. Sistema de Barrido Láser	31
3.3.2. Sistema de Apertura de Barrido láser	34
3.3.3 Alineación óptica de los componentes.	36
3.4 Determinación del ángulo B	38
3.4.1 Señales de la apertura de barrido láser	38
3.4.1.1 Señal ZERO	38
3.4.1.2 Señal STOP	40
3.4.1.3 Señal de Referencia	42
3.4.2 Cálculo del ángulo B	42
3.5 Cálculo de ángulos emisión láser C y β .	43
3.6 Algoritmo de control y procesamiento	44
4. Resultados Experimentales	
4.1 Introducción	46

4.2 Determinación de error en señal ZERO	47
4.3 Patrón de Reflexión Angular	48
4.4 Atenuación de Reflexión	50
4.5 Inverso del cuadrado de la distancia	51
4.6 Variación en el ancho de pulso de la señal STOP	52
4.7 Medición de coordenadas bi – dimensionales (X,Y) Prueba 1	54
4.8 Medición de coordenadas bi – dimensionales (X,Y) Prueba 2	56
5. Conclusiones	58
6. Bibliografía	60
Apéndices	61
Apéndice A. Publicaciones	62

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1.1	Visión estéreo 6
1.2	Triangulación activa 7
2.1	Diagrama a bloques básico de un sistema electro-óptico 13
2.1	Trayectoria de la luz: a) Ondas de luz partiendo de la fuente; b) Rayos de luz; c) rayos de luz paralelos conforme se alejan de la fuente. 14
2.2	Espectro electromagnético. 15
2.3	a) Ley del inverso del cuadrado de la distancia. 17 b) y c) Ley del coseno de Lambert
2.4	Características típicas corriente-voltaje de un fotodiodo de unión. 18
2.5	Circuito equivalente de un fotodiodo de unión 18
2.6	Fotocorriente máxima para la no linealidad ≤ 1 %. 19
2.7	Circuito práctico para conectar un fotodiodo en modo fotovoltaico. 20
2.8	Características de una lente. 21
2.9	Foco imagen de la lente: a) Imagen real; b) Imagen virtual 22
2.10	Tipos de lentes 23
3.1.	Variables del sistema SVT: a) Vista superior, b) Vista lateral 27
3.2	Sistema de Visión Técnica 31
3.3	Sistema de barrido láser. a) Ensamble del sistema; b) Explosión de elementos 32
3.4	Sistema de barrido láser. a) Alineación de ejes; b) motor de barrido vertical 33
3.5	Respuesta espectral del fotodiodo NT55-338 35
3.6	Sistema de Apertura de escaneo láser 36
3.7	Alineación entre el sistema de barrido y la apertura. 37
3.8	Alineación de la apertura de escaneo láser. 38
3.9	Instalación de sensor óptico de barrera para la generación de la señal ZERO 39
3.10	Circuito para obtener señal de posición ZERO 39
3.11	Trayectoria óptica para la generación de señal STOP 40
3.12	Circuito acondicionador de señal de fotodiodo 41
3.13	Forma de onda obtenida a la salida del amplificador de transimpedancia 42
3.14	Señalización de Apertura de barrido láser 43
3.15	Diagrama de flujo del algoritmo general 45
4.1	Medición del período de la señal ZERO 47
4.2	xperimento del patrón de reflexión 49
4.3.	Patrón de Reflexión Angular 50
4.4	Diámetro de punto iluminado por láser 51
4.6	Respuesta del al variar la distancia apertura – obstáculo 52
4.7	Red de 16 puntos para medición en 2D 54
4.8	Medición de coordenadas 2D 16 puntos 55
4.9	Mediciones 2D de matriz 9 x 16 57

Índice de tablas

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
2.1 Regiones del espectro óptico	16
3.1 Características básicas del fotodiodo de silicio NT55-338 de Edmund Optics	34
4.1 Medición de error en período de señal ZERO	48
4.2 Variación ángulo B respecto ancho del pulso de la señal de referencia	53

Capítulo 1

Introducción

La navegación automática para objetos móviles, es un tema de actualidad y de investigación para la ciencia moderna, en especial para las áreas de automatización y opto electrónica. Existen actualmente diversos enfoques para la resolución de esta tarea, como lo es el uso de una parte sensible que siempre esta en contacto directo con una línea de trayectoria, la cual debe diseñarse previamente, lo que no permite explorar nuevas trayectorias en forma autónoma; el uso de un conjunto de cámaras CCD para la obtención de imágenes tridimensionales permite hacer exploraciones de escenarios y obtener información para poder navegar, solo que estos son sistemas muy complejos ya que conlleva un abundante procesamiento computacional por la gran cantidad de información obtenida del escenario frente al robot, que para la tarea de auto navegación muchas veces es innecesaria.

Actualmente se están desarrollando nuevas técnicas basadas en un reconocimiento de escenarios basado en sistemas de escaneo por láser, en donde el haz láser se hace incidir sobre toda la parte frontal y los haces reflejados son captados por sensores del tipo CCD en

su mayor parte, o por sensores puntuales que reaccionan a una frecuencia específica de iluminación.

En este trabajo, se hace la propuesta de un nuevo principio de visión que puede incorporarse en mecanismos móviles autónomos, como robots, los cuales pueden operar sobre espacios de terrenos complejos. Se propone el desarrollo de una nueva técnica de visión computarizada, en el que se resuelve un problema principal: la creación de un Sistema de Visión Técnica para el reconocimiento de imágenes de un escenario desconocido, con la finalidad de obtener información discreta tridimensional de posibles obstáculos que se encuentren en la trayectoria del mecanismo móvil, que podrán estar disponibles para un sistema de generación de imágenes y control de movimiento del robot móvil, basado en la información proporcionada por el sistema propuesto. Se describen los aspectos del principio de diseño y funcionamiento e interacción entre los distintos elementos que componen el sistema.

En capítulo 1, se hace la descripción matemática que sirve como base para realizar el procesamiento digital de la información generada por el sistema, también para la determinación de las mediciones angulares, distancias y coordenadas tridimensionales en el sistema propuesto.

1.1 Planteamiento del problema.

Los sistemas de medición por triangulación láser han demostrado ser eficientes en la medición de posición, dimensiones de objetos, contorno de superficie, deformaciones, vibraciones, detección y clasificación de objetos, así como para la medición de niveles de líquidos y diversos materiales a granel, pero lo hacen relativamente a cortas distancias. En este proyecto, se plantea la posibilidad de retomar este método para desarrollar un sistema de medición de objetos a grandes distancias, y en forma dinámica, como parte de un sistema de visión técnico - artificial para un robot móvil. La tarea se divide en dos subsistemas principales: sistema de barrido láser y sistema de Apertura de Barrido láser.

Específicamente, en esta tesis se verán los aspectos del diseño del subsistema de apertura de barrido LASER, formado por elementos electro-ópticos, el cual determinará mediante el conjunto de ángulos de incidencia del haz de LASER reflejados puntualmente por los obstáculos, y con la ayuda del ángulo de emisión láser, las coordenadas correspondientes a las dimensiones de los mismos, para poder formar mapas digitales de las escenas presentadas al robot, y que puedan ser procesadas más rápidamente para realizar el control de movimiento del mismo.

1.2 Antecedentes.

La percepción es la interpretación de sensaciones específicas de los sistemas sensoriales del olfato, sensorial somático, visual y auditivo. La visión es el sistema sensorial físico más importante para los seres humanos. Este nos brinda la capacidad de ver, es decir, tener la percepción del color, textura, forma y profundidad de los objetos que nos rodean [1].

La visión artificial es una rama de la inteligencia artificial que tiene como fin modelar matemáticamente los procesos de percepción visual en los seres vivos y generar programas que permitan simular estas capacidades visuales por computadora.

Considerando la capacidad visual de nuestros ojos y cerebro, los sistemas artificiales de hoy en día son totalmente primitivos. El rango de objetos que pueden manejar, la velocidad de interpretación y la susceptibilidad a problemas de iluminación, ambientales y variaciones menores, en textura y reflectancia de los objetos, son algunas de las limitaciones de la tecnología actual. Por otra parte, la visión artificial tiene claras ventajas en tareas repetitivas y a altas velocidades, por ejemplo, en la inspección ininterrumpida en una línea de ensamble.

Algunas comparaciones entre la visión humana y la artificial son las siguientes [2]:

- La visión humana es una actividad de procesamiento paralelo, mientras que la gran mayoría de sistemas de visión artificial usan procesamiento serial.

- La visión humana es tridimensional debido a la estereoscopia, que es la fusión de las imágenes tomadas por los dos ojos. Por otro lado, la mayoría de sistemas de visión artificiales aún realizan procesamiento en dos dimensiones.
- Los seres humanos interpretamos imágenes de color, mientras que muchos de los sistemas de visión artificial, trabajan todavía con imágenes en tonos de gris. Aunque actualmente se empiezan a utilizar sensores (por ejemplo infrarrojos), que pueden registrar longitudes de onda, que el ojo humano no percibe.
- La visión humana se basa en la percepción de la luz reflejada por un objeto. En cambio, en la visión artificial, se utilizan diversos métodos de iluminación artificial, por ejemplo con rayos láser, o con rayos X.

Existen múltiples aplicaciones de visión artificial, ya que permite extraer y analizar información espectral, espacial y temporal de los distintos objetos.

La información espectral incluye frecuencia (color) e intensidad. La información espacial se refiere a aspectos como forma y posición. La información temporal comprende aspectos estacionarios (presencia y/o ausencia) y dependientes del tiempo (eventos, movimientos, procesos).

Según el tipo de aplicación, serán el tipo de imagen que será necesario adquirir (imágenes por láser, de rayos X, infrarrojo, etc.) y el análisis que se aplicará. La mayoría de las aplicaciones de visión artificial se pueden clasificar por el tipo de tarea en inspección (medición, calibración, detección de fallas), verificación, reconocimiento, identificación y análisis de localización (posición, guía) [3].

En forma particular, para los sistemas de navegación automática de vehículos autónomos, la visión es particularmente crucial. Desafortunadamente, el ambiente atmosférico es muy cambiante y es un gran desafío para la automatización basada en visión artificial. La presencia de sol, o de cualquier otra fuente de luz fuerte, tiene repercusiones importantes en la calidad de video o fotografía, además de condiciones de niebla, la noche misma, y en si, condiciones cambiantes en el clima. El uso de cámaras de video y fotográficas convencionales son atractivos en este tipo de sistemas, debido a su facilidad de

uso, bajo mantenimiento y facilidad de integración al equipo existente. Pero las limitaciones empiezan en el momento de procesar la información que ha captado la cámara, ya que son necesarios algoritmos de procesamiento muy complejos y que requieren mucho tiempo y poder de análisis para lograr compensar los efectos causados por las condiciones en el ambiente, lo que repercute importantemente en el tiempo para toma de decisiones del sistema de control, implicando directamente la velocidad de movimiento.

Usualmente, la imagen obtenida por una cámara convencional representa la distribución de intensidades de una escena observada. En cambio, una imagen de rango de la misma escena representa las distancias de la cámara a los puntos de la escena. Una imagen de rango puede ser considerada como un mapa de profundidades $R(i,j)$, donde R es la medida de profundidad o rango de la escena y (i,j) son las coordenadas en el plano de formación de la imagen. La principal ventaja de las imágenes de rango es que en ellas se tiene explícitamente información de las características geométricas de las superficies medidas.

Las mediciones de rango se pueden realizar mediante diferentes técnicas. Técnicas de visión pasiva y activa para la adquisición de imágenes de rango. En la visión pasiva la luz que ilumina la escena es tomada del ambiente; en cambio, en las técnicas activas el sensor incorpora una fuente energía, como por ejemplo un haz de luz láser [4].

Entre los sistemas pasivos, podemos encontrar la visión estéreo, se hace la reconstrucción de escenas tridimensionales a partir de imágenes tomadas desde diferentes puntos de vista [5,6]. En procesos de inspección en los cuales se aplica la visión estéreo, generalmente se usan dos cámaras mas, también es posible usar una cámara tomando vistas en posiciones relativas diferentes de la cámara respecto de la superficie a medir. En general, las técnicas pasivas, como la visión estéreo son relativamente económicas comparadas con las activas, como la triangulación láser, pero los cálculos de los datos de profundidad de las escenas son mucho más complejos e implican altos costos computacionales. El problema principal de la visión estéreo consiste en determinar los puntos en las imágenes adquiridas desde los diferentes puntos de vista que corresponden a un punto en la escena 3D. Luego de

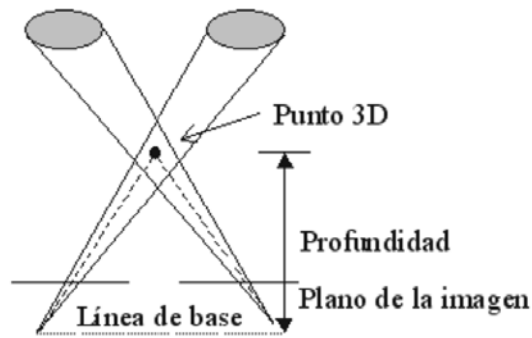


Figura 1.1 Visión estéreo

la obtención de puntos correspondientes entre las diferentes vistas se puede realizar el cálculo de la profundidad a partir de la geometría de la escena [] (Figura 1.1).

Un método común de visión estéreo, es el uso de múltiples cámaras CCD, con el fin de obtener datos de profundidad en tareas de dimensionamiento e inspección remotos en tiempo real [7,8]. Para la adquisición, este tipo de sistemas usa por lo general dos cámaras de video CCD, luego se aplica una etapa de preprocesamiento sobre las imágenes 2D y una etapa de reconstrucción para la obtención final de las dimensiones de los objetos.

Los sistemas activos de adquisición de datos de rango se dividen según dos enfoques principales: aquellos que aplican el principio de triangulación, y los que realizan el cálculo de profundidad a partir del tiempo de vuelo de la señal de la fuente de energía del sensor [9].

En las cámaras que aplican el principio de triangulación activa la escena es iluminada por un haz de luz en una dirección y la luz reflejada es captada por un sensor desde otra dirección. El ángulo de iluminación, el ángulo de visión y la línea de base entre la fuente de luz y el sensor son los parámetros de la triangulación (figura 1.2). Este método es ampliamente utilizado en conjunto con el uso de las cámaras CCD, tanto para la inspección industrial de piezas 3D [10,11], la inspección de edificios [12] como para la navegación automática [13].

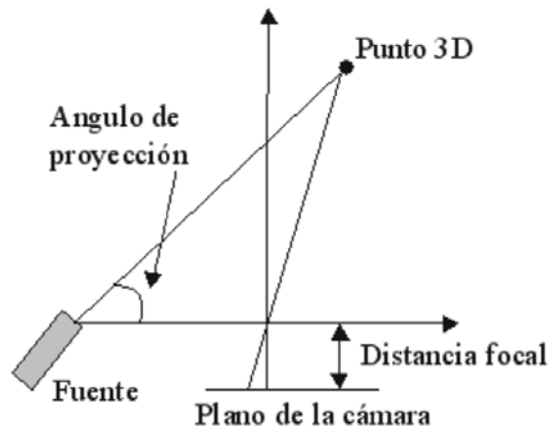


Figura 1.2 Triangulación activa

Un método alternativo de visión que no requiere tanto poder de procesamiento, es el uso de láser como medio de iluminación artificial, acompañado de uno o dos dispositivos sensibles a la luz emitida por el láser. El uso de estos elementos implica la medición de distancia hacia los objetos, mediante el principio de triangulación láser.

Se le llama triangulación láser debido a que se emplea un emisor láser de haz concentrado como fuente de luz artificial; el sensor se encuentra ubicado a una distancia conocida y fija desde el emisor láser, y el haz emitido y el haz reflejado por el objeto forman un triángulo. Como se conoce el ángulo de emisión, la distancia entre el emisor y el receptor y se puede conocer mediante un sistema electromecánico el ángulo de recepción del haz reflejado, entonces, se puede obtener mediante relaciones trigonométricas simples [14], la distancia del sistema de visión hasta el objeto. Lo anterior se aplica a una medición de un solo punto del objeto, no mostrando esto la forma y características espaciales del mismo.

Para obtener la forma del objeto, se debe realizar un barrido de emisión y recepción láser por toda la superficie del objeto en estudio, logrando con esto conseguir una imagen o matriz formada por coordenadas tridimensionales.

Tanto en las técnicas activas y pasivas, estudiadas en el mundo científico actualmente, la parte sensible del sistema de adquisición de datos, es al menos una cámara

CCD, que como se vio anteriormente, exige gran capacidad de cómputo para analizar y discriminar información innecesaria de escenarios desconocidos.

1.3 Justificación

Haciendo un análisis de las facilidades brindadas por la triangulación láser para la medición de distancias, es posible realizar el sistema de barrido y apertura láser en conjunto, para obtener matrices de coordenadas tridimensionales de objetos presentes en escenarios totalmente desconocidos, lo que brindará al de detección de obstáculos la facilidad de formar imágenes en tres dimensiones y analizarlas de manera más ágil, comparadas con los sistemas de visión artificial mediante cámaras, lo que resultará en la utilización de procesadores menos costosos.

Existen actualmente en el mercado sistemas similares, pero que son capaces de obtener imágenes de escenas estáticas a no más de unos cuantos metros, esto es, para la medición de forma y dimensiones de objetos solamente.

La motivación por realizar este sistema, radica en que no existe en el mercado actual, sistemas láser que sean capaces de realizar mediciones en tiempo real de escenas dinámicas, como es el caso de la visión artificial para sistemas de navegación automáticos.

El propósito de esta investigación, es realizar un sistema metrológico, que utilice la técnica de triangulación, que utiliza un láser como fuente de iluminación artificial, y como la parte sensible, una apertura de escaneo, cuya parte primordial es un fotodiodo simple. Esto nos permitirá obtener información espacial de obstáculos que estén presentes en un escenario desconocido, sin tantos requerimientos de procesamiento.

Se espera que el desarrollo de este subsistema tenga gran impacto en el desarrollo de aplicaciones industriales, automotrices, de seguridad, militares, y cualquier ámbito donde se necesite la navegación automática con poca o ninguna intervención humana.

1.4 Objetivo

Diseñar el subsistema de Apertura de barrido LASER (receptor), del Sistema de Detección de Obstáculos, llamado Sistema de Visión Técnico, con la finalidad de demostrar la funcionalidad de la técnica de triangulación propuesta para la determinación de las coordenadas tridimensionales de cada punto rastreado por el láser, formando con ellas un mapa digitalizado de coordenadas de la escena frontal del Sistema de Visión Técnico.

1.5 Metas

1. Estudio y análisis de lentes y filtros necesarios para el diseño del sistema óptico necesario para la recolección de rayos láser reflejados por posibles obstáculos.
2. Estudio, análisis y adecuación de sensores sensibles a la longitud de onda y potencia del emisor láser.
3. Diseño del sistema de control de la apertura de barrido láser, para la detección precisa de rayos láser reflejados en obstáculos.
4. Diseño del sistema de cálculo y almacenamiento de coordenadas tridimensionales en matrices de memoria, adecuándolas para su posterior procesamiento.
5. Evaluación experimental de la eficiencia del sistema.

1.6 Metodología

En el desarrollo del proyecto propuesto, se contempla hacer uso de herramientas para la manipulación de datos digitalmente, así como la adecuación de sensores, sistemas ópticos y elementos electromecánicos, e integrarlos para realizar el sistema de apertura de barrido láser.

Para lograr mejores resultados, se propone la siguiente metodología.

1. Realizar investigación de libros y artículos en revistas especializadas que muestren el sustento teórico firme de la funcionalidad de la técnica.
2. Recolectar información de diversos sensores existentes en el mercado que cumplan con nuestro objetivo, para hacer una comparación y encontrar el más adecuado a las necesidades del proyecto.
3. Realizar cálculos necesarios para la dimensión de la apertura necesaria para los rayos de luz, para poder determinar las dimensiones físicas y tipos de lentes, filtros y espejo necesarios.
4. Investigar que tipo de motor se adecua más a las necesidades en cuanto a velocidad, consumo de energía, y torque necesarios para el movimiento del lente.
5. Diseñar el circuito de control necesario para movimiento del motor y para la lectura de los sensores del sistema.
6. Probar experimentalmente el rendimiento y correcto funcionamiento de sistema.

Capítulo 2

Teoría de electro-óptica

Introducción

En este capítulo, se define el concepto de un sistema electro-óptico, los componentes y subsistemas que lo componen, además de dar una introducción los términos y definiciones técnicos necesarios.

El campo de la ingeniería electro-óptica, nace de la convergencia de dos áreas ampliamente estudiadas: ingeniería eléctrica y la ciencia óptica. La ingeniería eléctrica se ocupa principalmente de la optimización de la generación, almacenamiento, control y conversión de la energía eléctrica. En algunos casos, lo más importante es la energía necesaria para realizar un trabajo. En otros casos la información contenida en esa energía es lo que importa. La Óptica es la ciencia que estudia el comportamiento de la luz – su creación y propagación, los cambios que experimenta y los efectos que produce. La ciencia

óptica no se limita solamente a las regiones del espectro electromagnético visible. Muchos de los principios que se aplican a la luz visible, se aplican de igual manera a las regiones del espectro ultravioleta e infrarrojos.

La ingeniería electro-óptica se define como la rama de la ingeniería que se encarga de la optimización, almacenamiento, transmisión, control y conversión de la energía óptica, y en analogía con la ingeniería eléctrica, en algunos casos, la cantidad de la energía óptica es importante para efectuar un trabajo, mientras que en otros casos, la información es la cantidad importante y la energía óptica proporciona un camino para su transporte [15].

Para poder entender los métodos de tratamiento de la luz, es necesario hacer una referencia sobre su naturaleza y propiedades, esto es, su forma de propagación, velocidad, teorías relacionadas con su intensidad y cambios en su dirección de propagación.

De tal forma, en este capítulo se definen los términos y elementos relacionados con los sistemas electro-ópticos, medios ópticos y la óptica geométrica, para poder construir las bases necesarias que nos lleve a la comprensión del comportamiento de luz, y poder determinar los medios necesarios para su manipulación mediante lentes, filtros, y los dispositivos sensoriales indispensables para obtener información de la misma.

2.1 Sistemas Electro-ópticos

Un sistema electro-óptico, ya sea para sensado remoto o para comunicaciones, se compone básicamente de 6 subsistemas (figura 2.1). Primeramente es necesario contar con una fuente de radiación de energía, la cual se propaga por algún medio, que comúnmente es la atmósfera. Esa radiación es recolectada selectivamente mediante un subsistema óptico, en donde la radiación se hace incidir sobre algún detector. La salida del detector, que es una señal eléctrica, se amplifica y filtra por un circuito electrónico acondicionador de señal. Por último, el subsistema de salida o de despliegue provee una salida visual, gráfica o de audio (en sistemas de comunicación) o voltajes de control y de retroalimentación (sistemas de orientación). Estos sistemas pueden contener un proceso de transformación inverso para procesos multiplexados [3].

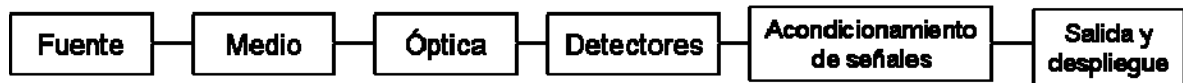


Figura 2.1 Diagrama a bloques básico de un sistema electro-óptico.

En el caso de sensado remoto, este se realiza mediante la caracterización de un objeto distante mediante la medición de las propiedades de radiación del objeto. Los atributos del objeto no pueden medirse directamente por el sensado remoto del flujo de radiación, pero se pueden inferir mediante la respuesta del sensor al flujo incidente en la apertura de entrada. Un objeto se puede caracterizar utilizando sistemas electro-ópticos en cinco dominios cercanos e independientes entre sí:

- Espacial: Posición, tamaño y forma
- Espectral: distribución de energía en función de la longitud de onda o frecuencia
- Temporal: variación de flujo en el tiempo
- Polarización: orientación del vector del campo eléctrico E
- Coherencia: fase de los elementos de radiación.

La caracterización de un objeto se puede realizar utilizando la energía que emite, que absorbe o que refleja. Esta última puede ser luz ambiental o una luz artificial como un láser.

2.2 Espectro Electromagnético

Existen teorías relacionadas con la transferencia de energía radiante desde un punto a otro en la que dicen que la energía radiante se propaga como un movimiento de ondas o como un haz fotones [16-17]. Nos bastará con mencionar que la luz que emite una fuente puntual de luz, viaja formando ondas esféricas (figura 2.1a) llamadas frente de onda, las cuales viajan en una dirección partiendo desde la fuente, a lo que se le conoce como rayos de luz (figura 2.1b) que van en una dirección específica y a medida que el frente de onda se

aleja de la fuente, su radio se incrementa, y podría percibirse ondas planas y paralelas, y los rayos de luz se consideran paralelos (figura 2.1c).

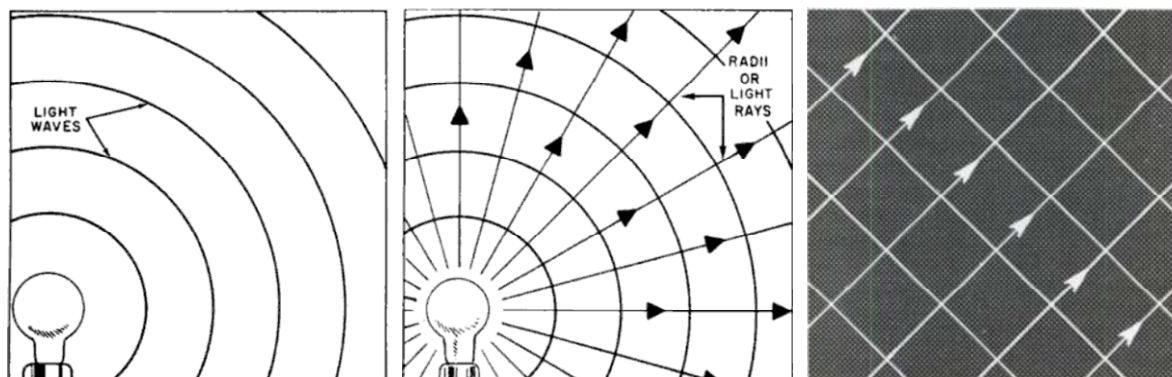


Figura 2.1 Trayectoria de la luz: a) Ondas de luz partiendo de la fuente; b) Rayos de luz; c) rayos de luz paralelos conforme se alejan de la fuente []

Podemos decir que la luz es toda radiación electromagnética capaz de ser percibida por nuestro sentido de la vista. El intervalo de frecuencias de las radiaciones que componen la luz solamente está delimitado por la capacidad del órgano de la visión.

La luz que nosotros percibimos será siempre formada por radiaciones correspondientes a grandes cantidades de frecuencias. El láser constituye la única radiación visible formada por radiaciones de la misma longitud de onda todas ellas. La luz, en un medio homogéneo, se propaga en línea recta. Cada una de las direcciones de propagación de la luz es un rayo luminoso. Un conjunto de rayos que parten de un punto es un haz. Si el punto de donde proceden los rayos está muy alejado se consideran paralelos.

El espectro electromagnético es un mapa que muestra la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas (figura 2.2). Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una un determinado objeto o sustancia [17]. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además

de permitir observar el espectro, permiten realizar medidas sobre éste, como la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación.

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

La longitud de onda se define como la distancia entre dos puntos consecutivos de una que tienen la misma fase, y se mide en micro metros [18](μm).

Una medida que relaciona a la longitud de onda, es el número de onda, que representa el número de ondas que pueden ocupar el espacio de 1cm de longitud en un instante, y se mide en cm^{-1} .

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad [2.1]$$

Donde c es la velocidad de la luz y ν es la frecuencia en Hertz (Hz).

El sensor utilizado para detectar las radiaciones ópticas, dependerán del rango de longitud de onda que se desee detectar del espectro [19] (tabla 2.1).

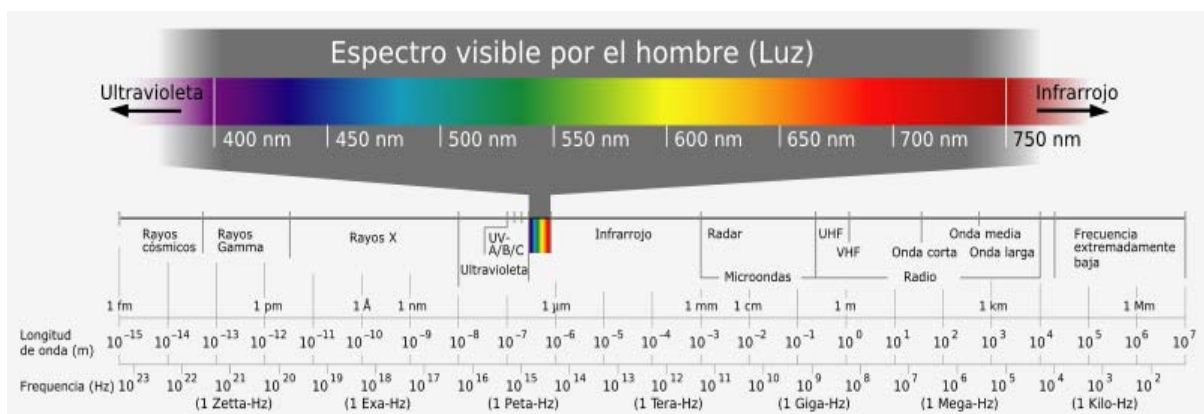


Figura 2.2 Espectro electromagnético.

Tabla 2.1 Regiones del espectro óptico

Ultravioleta (UV)	180 – 450 nm
Visible (VIS)	450 – 750 nm
Cercano al Infrarrojo (NIR)	750 – 1000 nm
Infrarrojo de onda corta (SWIR)	1 – 5 μm
Infrarrojo de longitud de onda intermedia	5 – 25 μm
Infrarrojo de longitud de onda grande	25 – 1000 μm

2.3. Ley del inverso del cuadrado de la distancia

Cuando se diseña o se trabaja con sistemas de procesamiento de imágenes, se debe tener presente las condicionantes físicas que posee la luz. La iluminancia sobre un punto de una superficie varía directamente proporcional a la intensidad luminosa de la fuente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y el punto. Si la superficie donde está situado el punto es normal a la dirección de luz (figura 2.2a), la iluminancia recibida está dada por la siguiente expresión.

$$E_v = \frac{I_v}{d^2} \quad [2.1]$$

Esta ley es aplicable solamente a fuentes de luz puntuales, y puede aplicarse para determinar la sensibilidad de los detectores de luz o de imágenes, dependiendo de la aplicación.

2.4. Ley del coseno de Lambert

Esta ley establece que el nivel de iluminancia sobre una superficie, varía proporcionalmente al coseno del ángulo de incidencia, que es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de la luz. Mientras más pequeño sea el ángulo

$$E_v = \frac{I_v}{d^2} \cos \theta \quad [2.2]$$

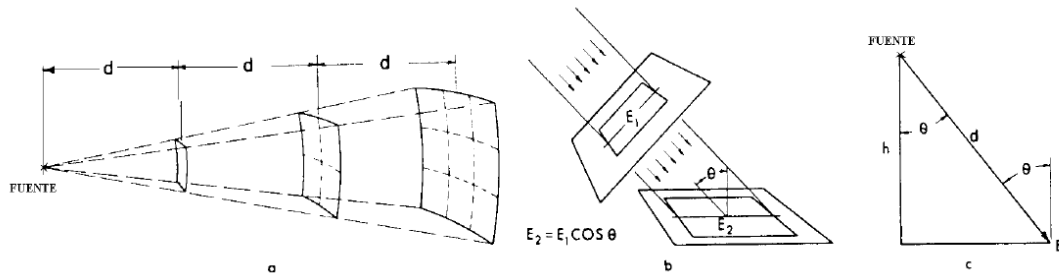


Figura 2.3 a) Ley del inverso del cuadrado de la distancia.
b) y c) Ley del coseno de Lambert.

2.5 Fotodiodo

El fotodiodo es un dispositivo electrónico que convierte señales ópticas en señales eléctricas. Por lo tanto, se puede utilizar el fotodiodo en muchos experimentos o aplicaciones como un detector de radiación.

Existen dos formas de operación de un fotodiodo que son: 1) Modo Fotovoltaico y 2) Modo Fotoconductor. La elección de uno de estos dos modos de operación dependerá del tipo de resultado que se desea obtener. A continuación se definen brevemente cada uno de estos modos.

2.5.1 Modo fotovoltaico

Un fotodiodo operado en un modo fotovoltaico es directamente conectado a una impedancia de carga sin usar una fuente de voltaje adicional [21]. Entonces el potencial sobre el fotodiodo solamente es dado por la generación de corriente en el mismo. En el cuarto cuadrante de la curva característica de un fotodiodo (figura 2.4) se puede observar el comportamiento en el modo fotovoltaico. Porque el ruido aumenta con el voltaje sobre el diodo, este modo tiene el mejor PER (Potencia Equivalente del Ruido) a bajas frecuencias comparado con el método fotoconductor en donde se aplica un voltaje relativamente grande sobre el diodo.

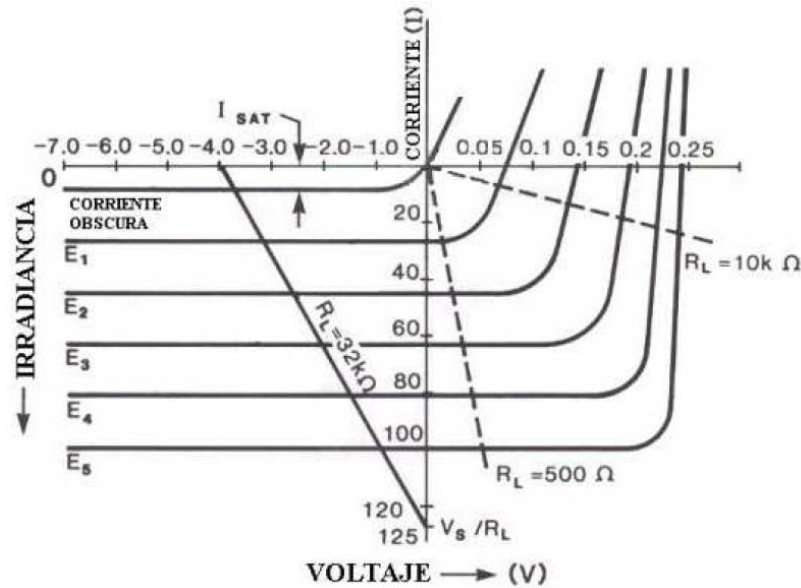


Figura 2.4 Características típicas corriente-voltaje de un fotodiodo de unión.

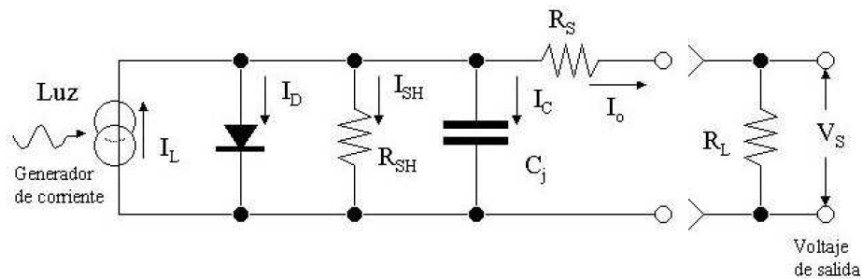


Figura 2.5 Circuito equivalente de un fotodiodo de unión.

2.5.2 Rango lineal

La foto-corriente se divide entre la trayectoria desviada interna y la resistencia de carga externa, R_L (Figura 2.5) La desviación interna depende del valor del voltaje de ruptura a través del diodo. Si el valor del voltaje sobre el fotodiodo es mucho mas pequeño que el voltaje ruptura, entonces la desviación de corriente interna es dominada por la corriente que pasa por el resistor R_{SH} siendo este muy grande respecto a R_L , de tal manera que la mayoría de la corriente generada va por R_L . El valor de la resistencia de carga es muy importante como esta mostrado por las líneas para dos resistores de carga en la Figura 2.4.

Si el voltaje sobre el diodo esta cerca del valor del voltaje de ruptura, entonces el valor de la corriente a través de R_L empieza a disminuir ya que hay una cantidad de corriente desviada por este diodo. Por otro lado, si el voltaje sobre el diodo es más grande que el voltaje de ruptura, la corriente interna es dominada por el diodo. El punto de trabajo (V/R) e (I_R) se puede encontrar en la dirección de la línea del correspondiente valor del resistor R_L . En la Figura 2.4 se puede ver que para un comportamiento lineal se necesitan resistencias de carga bajas. La respuesta se aleja más de ser lineal cuando la resistencia de carga es aumentada, hasta lograr un voltaje de circuito abierto aumenta logarítmicamente con el nivel de la luz.

Se puede determinar la máxima resistencia de carga para el 1% de linealidad de la Figura 2.6. Por ejemplo, si la señal de la luz produce una foto-corriente de 0.2 mA, entonces la resistencia de carga puede ser tan grande para un área activa del fotodiodo de 5 mm² de tal forma que el voltaje sea de 40 mV correspondiente con un valor resistencia de 200 W. La Figura 2.7 muestra un circuito que incluye un detector y un amplificador de transimpedancia formado por el amplificador operacional (OpAmp) y la resistencia R_F . Un amplificador de transimpedancia que tiene una impedancia de entrada muy baja, resuelve las restricciones de gran linealidad y permite voltajes de salida superiores [23]. Un potenciómetro variable conectado entre los pins 1 y 5 (con una leva de +15 V) puede anular el desbalance (offset), los voltajes y la corriente oscura.

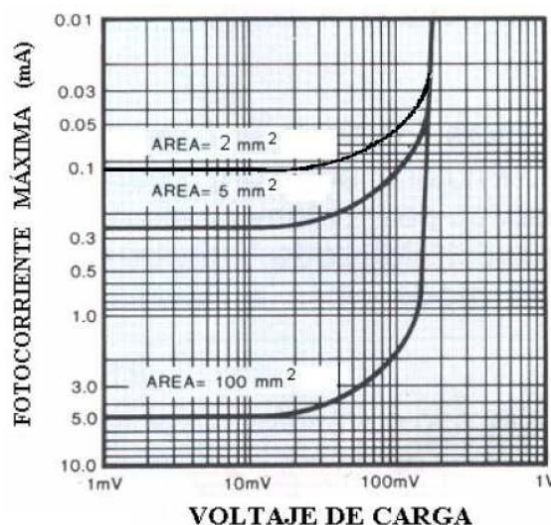


Figura 2.6 Fotocorriente máxima para la no linealidad $\leq 1\%$.

2.5.3 Frecuencia de respuesta

La capacitancia C_j que se ve en la Figura 2.2 forma una malla con R_S y R_L formando un circuito RC que deja pasar bajas frecuencias. Esta es proporcional al área de la unión, típicamente 100 pF/mm² para el modo fotovoltaico. Por esta razón, un fotodiodo con grandes áreas activas en el modo fotovoltaico tienen respuestas de alta frecuencia pobres. La frecuencia de corte depende de la resistencia de carga. La frecuencia máxima que deja pasar este circuito está típicamente entre 100 kHz y 1 MHz dependiente del valor de R_L .

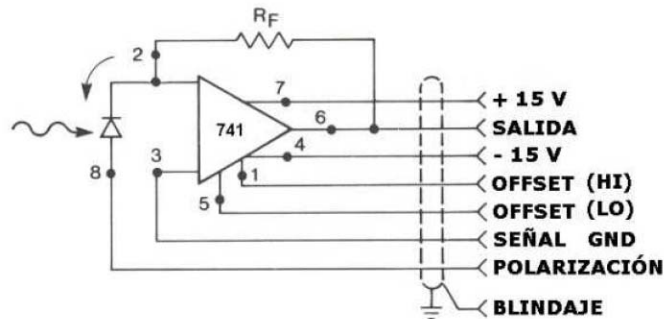


Figura 2.7 Circuito práctico para conectar un fotodiodo en modo fotovoltaico.

2.5.4 Modo fotoconductivo

En el modo fotoconductor se conecta el fotodiodo en serie con R_L , con polarización inversa [22]. El comportamiento de este modo se muestra en el tercer cuadrante de la Figura 2.4. En este modo se puede usar resistencias de carga R_L muy altas sin perder la linealidad. La capacitancia de la unión disminuye con la polarización dado que la zona de agotamiento es ampliada. Aquí el valor típico de la capacitancia es 10 pF/mm^2 que es 10 veces más pequeña que en el modo fotovoltaico. Debido a esto, la frecuencia de respuesta es aumentada, y en consecuencia el límite es el valor RC del circuito externo. La desventaja de este modo con respecto al modo fotovoltaico es que el PER es más grande. Para el uso de frecuencias por debajo de 1 kHz es preferible usar el modo fotovoltaico.

2.6 Lentes

Lente es todo cuerpo transparente, limitado por dos superficies, de las cuales al menos una, es una superficie curva [24].

En función de estas superficies se distingue entre lentes esféricas, que pueden ser cóncavas o convexas, lentes cilíndricas y lentes tóricas. Otra clasificación importante se hace al tener en cuenta la posición de los focos objeto e imagen de una lente, lo que determina las llamadas lentes convergentes o positivas y divergentes o negativas.

2.6.1 Puntos y planos focales

Un haz de rayos paralelos entre sí y paralelos al eje óptico de una lente, inciden sobre ella, y a su salida se dirigen a un punto del eje, que es el llamado foco imagen del sistema F' . Análogamente cuando el haz de rayos que emerge de la lente es paralelo al eje óptico, es porque proviene de un punto situado en dicho eje y denominado punto focal objeto F (Figura 2.8).

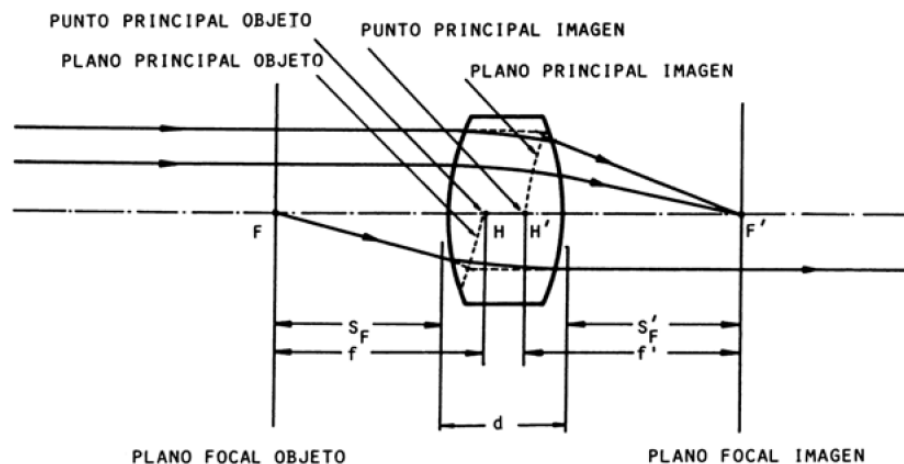


Figura 2.8 Características de una lente.

Relacionado con los focos, está el concepto de plano focal. Recibe el nombre de plano focal, aquel plano perpendicular al eje óptico que pasa por su correspondiente foco. Los Planos y los puntos focales se pueden mostrar en la figura 2.8. Cuando un haz de rayos incide paralelamente sobre una lente convergente, este haz sale de dicha lente y se reúne en un punto F' , llamado foco imagen de la lente. Se trata de una lente que da una

imagen real de dicho haz puesto que puede recogerse en una pantalla (figura 2.9a). Las lentes divergentes, en lugar de reunir el haz de rayos paralelos que incide sobre ellas, lo separan como si procediera de un punto F' , foco imagen del sistema, situado delante de dichas lentes (Figura 2.9b). Las lentes convergentes tienen focos reales, mientras que en las divergentes los focos son virtuales [25].

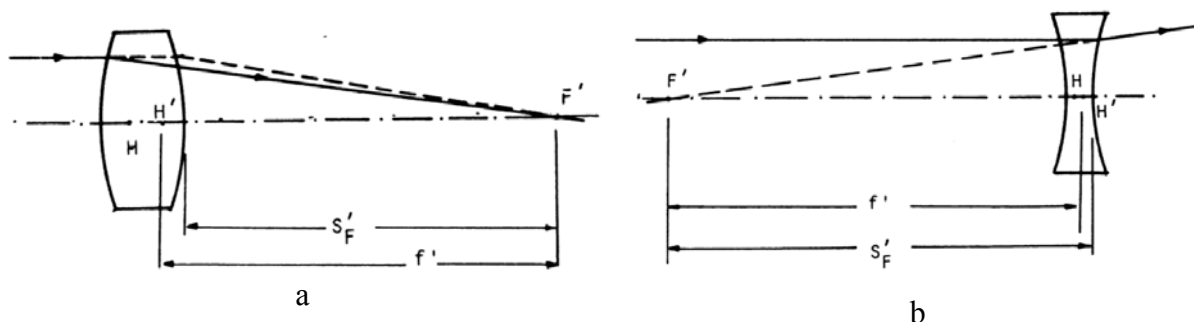


Figura 2.9 Foco imagen de la lente: a) Imagen real; b) Imagen virtual

2.6.2 Distancia focal

Hay dos tipos de distancias focales asociadas con cada lente o sistema de lentes. La más importante de las dos es la llamada distancia focal imagen, o simplemente distancia focal, que denotamos como f' , la cual determina, el aumento de la imagen. Esta f' , aparece normalmente en las fórmulas de lentes. Desafortunadamente, f' es la medida del foco imagen F' , referida al punto principal imagen (que se definirá a continuación) el cual está a veces en el interior de la lente, y por lo tanto el valor de f' , no puede ser medido fácilmente.

La otra distancia focal (Figura 2.8) es la distancia de los focos a los vértices de las superficies externas de una lente o sistema de lentes. Son los segmentos focales, objeto S_F , e imagen S_F' . Dichos segmentos son más fáciles de medir.

2.6.3 Planos y puntos principales

Cuando un rayo incide sobre una lente, se producen dos refracciones, una en cada superficie de la lente. Estas dos superficies, pueden sustituirse por dos planos, que dan lugar a un haz en la misma dirección que el rayo emergente del sistema. Estos planos estarán situados perpendiculares al eje de la lente. La posición de los planos principales, (Figura 2.8), se determina de la siguiente manera: Si tenemos una fuente situada en el foco

objeto de la lente, los rayos que emite dicha fuente, saldrán paralelos después de atravesar la lente. Si prolongamos el haz que incide y el que sale de la lente, cada rayo emergente cortará a su incidente en un punto. Todos estos puntos de corte darán lugar a una superficie que puede estar dentro o fuera de la lente. Esta superficie, que es un plano en la zona paraxial, se denomina plano principal objeto. Análogamente, si ahora incidimos con un haz paralelo, éste saldrá de la lente en dirección al foco imagen. Al prolongar de nuevo los rayos de dicho haz, se obtendrán los puntos de intersección que determinan el plano principal imagen.

Los planos principales pueden caer completamente fuera del sistema de lentes. Dependerá del tipo de lente, como puede verse en la figura 4.

Los planos principales, se caracterizan a su vez porque todo haz que incide sobre el plano principal objeto, sufre un aumento lateral igual a uno al salir por el plano principal imagen.

La intersección entre los planos principales objeto e imagen y el eje óptico de una lente, determina los llamados puntos principales objeto H e imagen H' respectivamente.

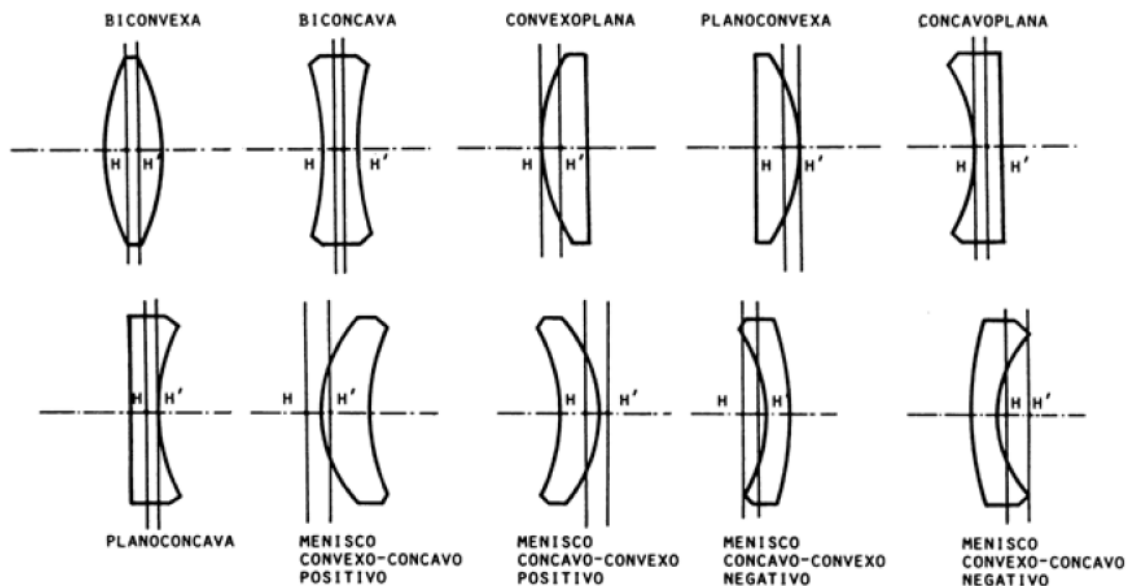


Figura 2.10 Tipos de lentes

2.6.4 Reconocimiento de lentes

A continuación se dan unas indicaciones que permite distinguir a simple vista, entre lentes convergentes y divergentes [26]:

1. Relación entre el espesor central y el espesor de borde. Una lente convergente es más gruesa en el centro que en los bordes; en cambio, una divergente es más delgada en el centro, y más gruesa en los bordes.
2. Observación de la imagen que nos da la lente. Las convergentes pueden formar imágenes más pequeñas, iguales o más grandes que el objeto, dependiendo de la posición del objeto respecto al foco; en el caso de las divergentes las imágenes que se tienen son siempre de menor tamaño, cuando se emplean objetos reales.
3. Producir movimientos verticales u horizontales a la lente, y observar el movimiento de la imagen. Si desplazamos una lente convergente, su imagen se moverá en sentido contrario; en cambio en las divergentes, lente e imagen sufren el desplazamiento en el mismo sentido.

Capítulo 3:

Diseño y Construcción del Prototipo

3.1 Introducción

El diseño del SVT, nace con la idea de dotar a un robot móvil de un sistema de detección de obstáculos, logrando con esto autonomía de navegación en ambientes completamente desconocidos. Este sistema deberá ser lo más simple posible, esto es, que estuviera compuesto con mecanismos y dispositivos comunes, de fácil localización, buscando con esto, diseñar un sistema que resultara de bajo costo; además, que el sistema de procesamiento de la información adquirida desde el medio de navegación del robot, no necesitara el empleo de microprocesadores complejos, ya que se busca ofrecer un sistema que brinde la descripción mínima necesaria del obstáculo para su evasión, basado principalmente en la detección de distancias hasta el mismo desde el robot móvil.

El principio utilizado en este diseño es el de la triangulación activa, ya que la escena es iluminada por un haz de luz en una dirección y la luz reflejada es captada por un sensor desde otra dirección. El ángulo de iluminación, el ángulo de visión y la línea base entre la fuente de luz y el sensor son los parámetros de la triangulación, por lo que la base matemática es la aplicación de relaciones trigonométricas simples, que no necesitan muchos recursos de cómputo para su procesamiento.

Para propósitos de la creación del prototipo, y de experimentación dentro de un ambiente controlado, se definen como dimensiones las más cercanas a un pasillo de cualquier edificio, en las que el escenario ideal sería 1 metro de alto, 2 metros de ancho y 10 metros de profundidad como máximo, esto partiendo desde la parte central del SVT. La distancia entre cada punto de emisión láser, será de 10 cm, lo que conlleva a tener en total 231 puntos por imagen del escenario.

Este capítulo describe el diseño y la construcción general del prototipo del SVT, la fundamentación matemática necesaria para la obtención de coordenadas en 3 dimensiones, así como su funcionamiento, enfocando sus líneas principalmente a la descripción del subsistema de apertura de barrido láser.

3.2 Triangulación para Obtención de Coordenadas 3D

El desarrollo de los escáner 3D han facilitado la creación de sistemas automáticos de navegación ya que son tecnologías que permiten encontrar las coordenadas (x , y y z) de cualquier punto sobre la superficie de un objeto utilizando el método de triangulación, sin requerir una matemática compleja para la determinación de escenarios.

El Sistema de Visión Técnico utiliza una fuente de energía láser y un detector de radiación puntual. Si se conoce el ángulo del eje de emisión del haz láser y la distancia a la que se encuentra el emisor del detector (línea base), mediante triangulación se puede deducir la distancia a la que se encuentra un determinado objeto dispersor de la luz.

Esta es una técnica de medida de distancias mediante la proyección de luz estructurada radiada por un láser sobre el área del escenario frontal al SVT.

Utilizando un sensor puntual, es necesario efectuar un barrido angular discreto del haz láser a lo largo del plano definido por la línea base y el eje de emisión, variando así el ángulo de emisión C . Además de una forma sincronizada, el detector puntual se debe desplazar angularmente hasta que se produce una detección de un haz reflejado sobre la superficie de algún obstáculo presente dentro del escenario planteado; en este momento, el detector se encuentra enfrenteado al punto de impacto, generándose en ese instante el ángulo de detección B , permitiendo calcular en ese momento la distancia y coordenadas espaciales empleando las fórmulas que se desarrollan a continuación.

3.2.1 Cálculo de la distancia d

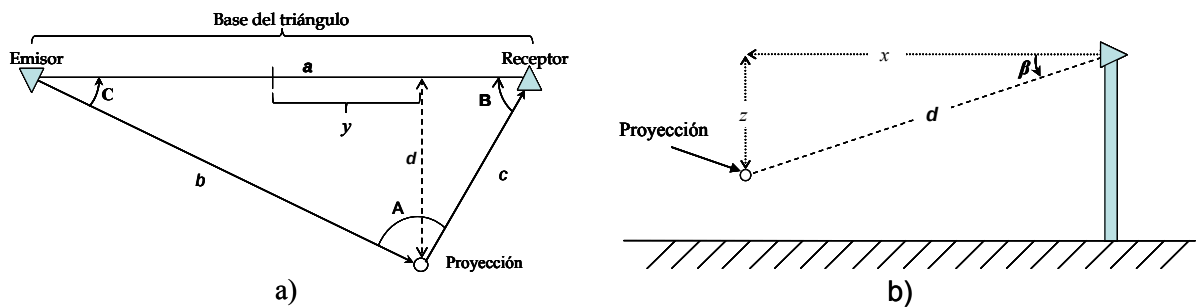


Figura 3.1. Variables del sistema SVT: a) Vista superior, b) Vista lateral.

Para poder encontrar las coordenadas en tres dimensiones de un punto proyectado por el láser en un obstáculo, primero se tiene que determinar la distancia desde el SVT hasta el punto iluminado en el objeto sobre la escena, mediante el análisis del triángulo abc (figura 3.1) que se forma entre el sistema emisor láser, el punto de proyección del láser en un objeto, la reflexión detectada por el sistema receptor láser y la distancia entre el receptor y el emisor (triángulo abc).

En el SVT, se tienen dos ángulos conocidos, el de emisión C , de recepción B y la longitud del segmento a que corresponde a la base del triángulo abc , que es la distancia comprendida entre el emisor y el receptor.

Basado en esto, tenemos la función desconocida $d(a,B,C)$, que es la distancia entre el eje principal (a) del SVT y el punto iluminado por el láser, y que esta solamente en función de las variables a , B y C . Por observación del triángulo abc , aplicamos la ley de los senos

$$\frac{a}{\text{sen}(A)} = \frac{b}{\text{sen}(B)} = \frac{c}{\text{sen}(C)} . \quad [3.1]$$

en donde la distancia d corresponde a la altura del triángulo formado por emisor-proyección-receptor (abd), por lo que se puede decir que:

$$\text{sen}(C) = \frac{d}{b} , \quad [3.2]$$

despejando b , se tiene:

$$b = \frac{d}{\text{sen}(C)} . \quad [3.3]$$

Entonces, análogamente

$$\text{sen}(B) = \frac{d}{c} , \quad [3.4]$$

despejando c , se tiene:

$$c = \frac{d}{\text{sen}(B)} . \quad [3.5]$$

Sustituyendo las ecuaciones [3.2] y [3.4] en [3.1], para eliminar las distancias b y c , resulta la siguiente igualdad:

$$\frac{d}{\text{sen}(C)\text{sen}(B)} = \frac{a}{\text{sen}(A)} ; \quad [3.6]$$

Pero como la suma de los ángulos internos de un triángulo es 180° , tenemos que

$$A = 180 - (B+C) , \quad [3.7]$$

igualdad que se sustituye en [3.6] lo que resulta en

$$\frac{d}{\text{sen}(C)\text{sen}(B)} = \frac{a}{\text{sen}(180 - (B + C))} , \quad [3.8]$$

despejando d de la ecuación [3.8], encontramos la ecuación para el cálculo de la distancia en función de a , B y C

$$d(a, B, C) = \frac{a \cdot \text{sen}(B) \cdot \text{sen}(C)}{\text{sen}(180 - (B + C))} \quad [3.9]$$

3.2.2 Obtención de coordenadas tridimensionales (x, y, z)

Del triángulo rectángulo formado por los segmentos abd , de la figura 3.1b, se puede destacar que

$$\tan(C) = \frac{d}{\frac{a}{2} + y} , \quad [3.10]$$

de donde se despeja y , quedando la siguiente relación

$$y = \frac{d}{\tan(C)} - \frac{a}{2} = d \frac{\cos(C)}{\text{sen}(C)} - \frac{a}{2} . \quad [3.11]$$

Si se sustituye [3.9] en [3.11] , se tiene:

$$y = \frac{a \cdot \text{sen}(B) \cdot \text{sen}(C)}{\text{sen}(180 - (B + C))} \cdot \frac{\cos(C)}{\text{sen}(C)} - \frac{a}{2} . \quad [3.12]$$

Al simplificar la ecuación anterior, se obtiene la función de la coordenada $y(a, B, C)$

$$y = a \left[\frac{\text{sen}(B) \cdot \cos(C)}{\text{sen}(180 - (B + C))} - \frac{1}{2} \right] \quad [3.13]$$

La coordenada x (figura 3.1b) corresponde a la componente paralela a la superficie de la distancia d , por lo que dependerá enormemente del ángulo de proyección vertical β . Considerando lo anterior se tiene que

$$\cos(\beta) = \frac{x}{d} \quad [3.14]$$

Al despejar x y sustituir la ecuación [3.9] en la ecuación anterior [3.14], encontramos el valor de

$$\cos(\beta) = \frac{x}{d} \quad [3.15]$$

Despejando x de la ecuación [3.15] se obtiene el valor final de la coordenada x

$$x = d \cdot \cos(\beta) . \quad [3.16]$$

Y si se sustituye d por [3.9] en la ecuación anterior [3.16], se tiene la ecuación de x en función de los ángulos B y C y de la longitud de la base a .

$$x = \frac{a \cdot \sin(B) \cdot \sin(C)}{\sin(180 - (B + C))} \cdot \cos(\beta) \quad [3.17]$$

De forma análoga, se puede encontrar la coordenada z , la cual es la componente perpendicular a la superficie, por lo que tenemos que

$$\sin(\beta) = \frac{z}{d} , \quad [3.18]$$

de donde se despeja z de la ecuación [3.18] para obtener

$$z = d \cdot \sin(\beta) , \quad [3.19]$$

y si se sustituye d por la función [3.9] en la relación anterior [3.19], entonces la función final para z resulta en:

$$z = \frac{a \cdot \sin(B) \cdot \sin(C)}{\sin(180 - (B + C))} \cdot \sin(\beta) \quad [3.20]$$

Como se puede ver, las relaciones para x , y y z están en función de los ángulos de emisión C y β , así como del ángulo de recepción B (Tabla 3.1).

3.3 Diseño mecánico del Sistema de Visión Técnico

La fase inicial del diseño mecánico del SVT, se elaboró utilizando la herramienta CAD de diseño mecánico en 3D SOLIDWORKS en su versión 2004, para proyectar el montaje mecánico de todos los elementos que conformarían al SVT. Esto se hizo con la finalidad de poder observar detalladamente la interacción de todos y cada uno de los elementos involucrados, lo que permitió hacer correcciones de cada una de las piezas diseñadas, basándose en las dimensiones especificadas por el fabricante de cada

componente utilizado, con la finalidad de obtener los planos con las dimensiones precisas de cada pieza para su manufactura.

El Sistema de Visión Técnico propuesto (Figura 3.2), se compone por un subsistema de Barrido Láser (emisor láser), el subsistema de Apertura de Escaneo Láser (receptor láser) y el subsistema de procesamiento y almacenamiento de datos.

El elemento central del SVT es la “barra base” en cuyo extremo izquierdo está montado el subsistema de barrido láser, mientras que en el extremo derecho se localiza la apertura de barrido láser y la distancia existente entre los ejes centrales de estos dos subsistemas es de 1 metro (longitud a). Cada subsistema deberá estar alineado con el eje central horizontal de la barra, y sus ejes verticales deberán mantenerse perpendiculares a la barra y completamente coincidentes, paralelos y alineados entre sí. Lo anterior es muy importante, para mantener la precisión de los datos recabados por el sistema.

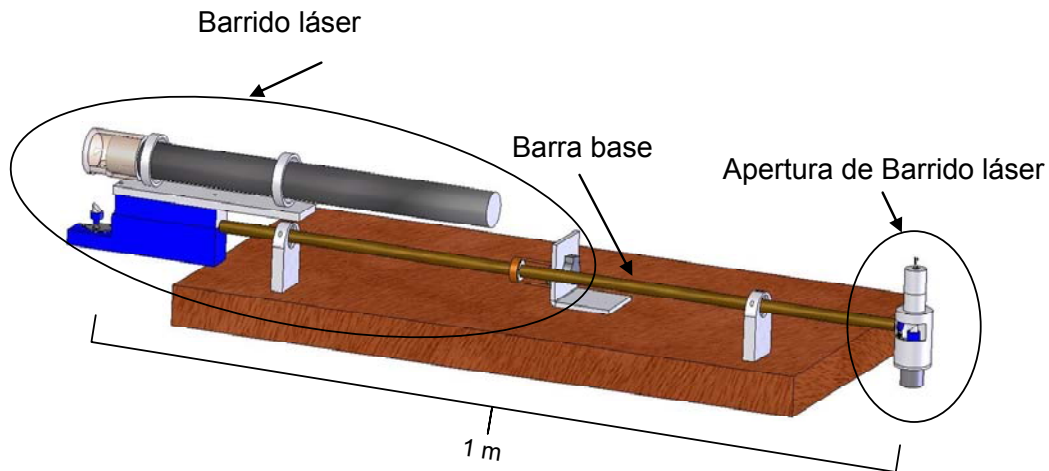


Figura 3.2 Sistema de Visión Técnica

3.3.1. Sistema de Barrido Láser

La función del sistema de barrido láser (emisor) es dirigir el haz de luz láser en dirección vertical y horizontal sobre la el escenario frontal del SVT, desde un mismo punto de referencia.

Para lograr la meta anterior y debido al peso y tamaño del láser utilizado, el diseño se fundamentó en la disposición de dos espejos, para mantener al láser sin movimiento; uno de ellos se mantiene fijo en el extremo del láser, redirigiendo el haz de luz sobre un segundo espejo que está montado sobre el eje de un motor de pasos que le brinda movimiento rotatorio, con la finalidad de realizar un barrido del haz de luz láser de manera horizontal (figura 3.3). El barrido vertical, lo hace un segundo motor, que da rotación vertical al SVT completo, y este está acoplado mecánicamente a la barra base del sistema.

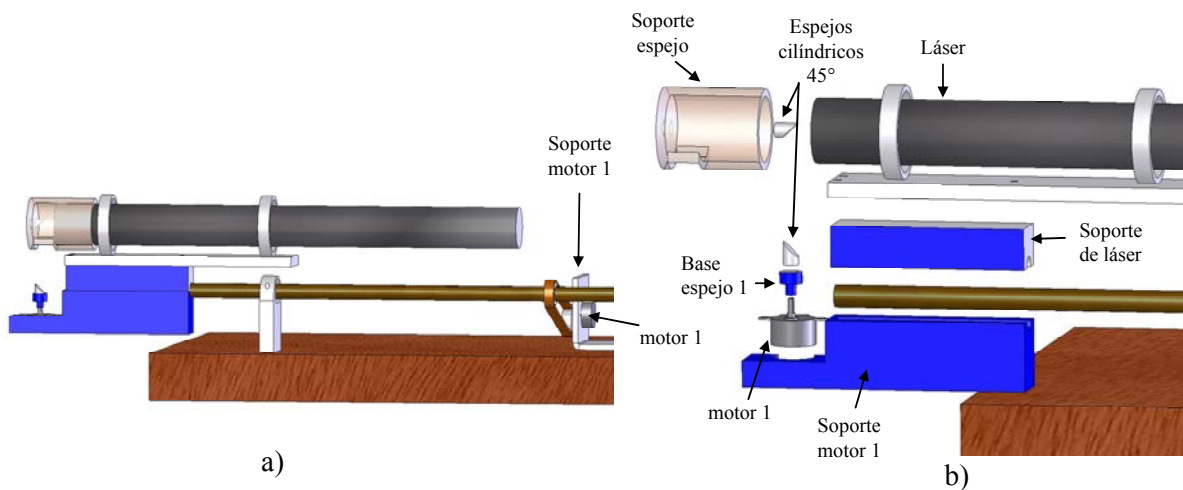


Figura 3.3 Sistema de barrido láser. a) Ensamblaje del sistema; b) Explosión de elementos.

Este sistema de barrido está conformado por un láser HeNe cuya frecuencia de emisión es de 632.8 nm, que corresponde al color rojo, una potencia de radiación de 20 mW, 2 espejos cilíndricos con corte de 45° que se utilizan para redireccionar el haz del láser, dos motores de pasos (motor1 y motor3) encargados de llevar a cabo el barrido horizontal del haz y el movimiento vertical del SVT respectivamente.

Es de vital importancia mantener una alineación precisa entre los componentes ópticos y electromecánicos, por lo que se diseñaron los soportes del láser y del motor 1 (figura 3.3b) para que realizaran las siguientes funciones:

- Soportar y mantener fijo al láser sobre la barra base.
- Soportar al motor de barrido horizontal.
- Fijar el subsistema de barrido láser a la barra base
- Alinear perpendicularmente el eje horizontal y el centro del espejo de barrido horizontal, con el eje horizontal de la barra base.

Debido a la posición del láser, y para evitar desplazamientos angulares que pudieran provocar errores en las mediciones, se creó un soporte que mantiene fijo a un espejo cilíndrico, y que está instalado sobre el extremo del láser (figura 3.4a), cuya labor es redireccionar el haz láser hacia el centro del espejo que está instalado sobre el motor 1 (cuyo centro está alineado con el eje horizontal de la barra), que realiza el barrido horizontal del haz láser hacia el escenario frontal del SVT.

El motor del barrido vertical (figura 3.4b), está sujeto a la base del SVT mediante un soporte en ángulo. La transmisión de rotación de este motor hacia la barra base, se realiza mediante un engrane que está fijo a su eje, y mediante una banda dentada, se une mecánicamente a otro engrane de mayor diámetro que está instalado concéntricamente sobre la barra base.

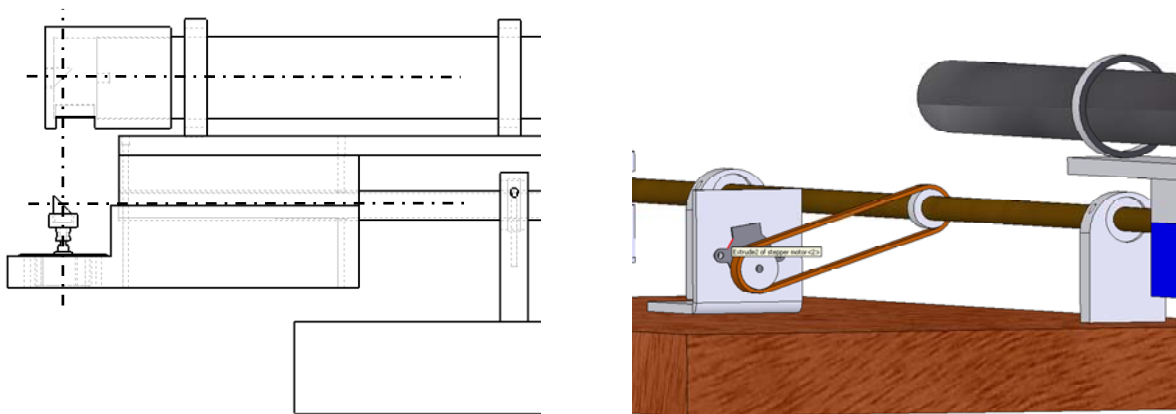


Figura 3.4 Sistema de barrido láser. a) Alineación de ejes; b) motor de barrido vertical.

3.3.2. Sistema de Apertura de Barrido láser

El sistema de Apertura de barrido láser se encuentra posicionado en el extremo derecho del SVT (figura 3.2), sobre la barra base. La función de este sistema, es hacer la detección del haz láser que es reflejado por un punto de la superficie de un obstáculo, que está siendo iluminado por el sistema de barrido láser, y obtener su ángulo de llegada (β).

Las especificaciones de diseño para la apertura, se basan principalmente en el tipo de radiación que deberá ser capaz de detectar y la velocidad de rastreo.

- Fotodetector con ancho de banda cercano al rojo, en concordancia a la radiación de luz emitida por el láser utilizado en el sistema de barrido láser
 $\Rightarrow \lambda = 625\text{-}740 \text{ nm}$
- Para obtener 1 imagen en un segundo (231 puntos por imagen), se requiere de un motor de DC con una velocidad mínima de:
 $\Rightarrow 231 \text{ rev/s} = 13860 \text{ rev/min}$
 $\Rightarrow 15000 \text{ rev/min.}$

Basándose en las especificaciones anteriores, se utiliza un fotodiodo del tipo p-i-n para la detección de haces reflejados, debido a que este tipo de detectores son rápidos, tienen un tiempo de subida de 1-10 ns, una eficiencia cuántica buena, y ruido bajo. El fotodiodo elegido es de Silicio – NT55-338 de Edmund Optics. Sus características más importantes se muestran en la tabla 3.1. Este fotodiodo es sensible a las radiaciones de color rojo (638.2 nm) como se muestra en la gráfica de respuesta espectral del fotodiodo mencionado (figura 3.5), la cual corresponde a la radiación emitida por el láser utilizado por el sistema de barrido.

Tabla 3.1 Características básicas del fotodiodo de silicio NT55-338 de Edmund Optics.

Tipo	Area (mm ²)	Responsividad (A/W)	Capacitancia (pF) a 0 V	Respuesta espectral
Alta velocidad	15	0.55	82 pF	350 – 1050 nm

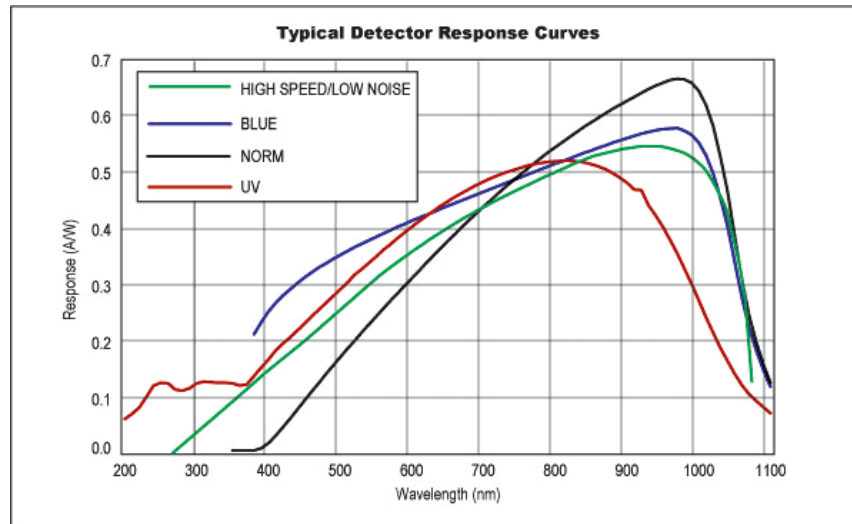


Figura 3.5 Respuesta espectral del fotodiodo NT55-338

Como la respuesta espectral del fotodiodo elegido es muy amplia, se seleccionó un filtro de interferencia pasa banda (NT43-081 de Edmund Optics), cuya frecuencia central es de 632 nm, especialmente diseñado para la frecuencia del láser HeNe utilizado, con la intención de filtrar señales de luz indeseables, y seleccionar solamente aquellas emitidas por el láser.

El sistema de apertura, cuenta con un lente objetivo del tipo biconvexo para colimar¹ los rayos provenientes desde un punto de reflexión encontrado, y que puedan pasar por el filtro de interferencia, eficientando también la respuesta del fotodetector.

Para poder rastrear el escenario propuesto se utiliza un motor de corriente directa, en cuyo eje está montado un espejo cilíndrico con un corte de 45°, que en conjunto realizan una búsqueda de puntos iluminados por el sistema de barrido láser. Cuando el plano del espejo queda alineado con la trayectoria de un haz reflejado por un punto iluminado por el láser, este espejo lo desvía² hacia el fotodetector, haciéndolo pasar por el lente y el filtro de interferencia.

¹ Es la obtención de rayos paralelos a partir de una fuente luminosa.

² En concordancia con las leyes de Snell

Un último elemento que conforma a la apertura es un sensor del tipo electro - óptico de barrera, que se emplea para la detección de cada giro completo del motor al pasar siempre por un mismo punto inicial, generando una señal de sincronía para el sistema completo.

Para poder instalar estos componentes, se realizó el diseño de la montura óptica (figura 3.6) que aloja a los distintos elementos electro – ópticos – mecánicos; su manufactura debe ser muy precisa y exacta, ya que este se encarga de mantener una alineación correcta en todos los dispositivos, esto es, hacer que el eje vertical central coincida con todos ellos, además de mantener con precisión la distancia focal entre el lente y el centro del espejo que se encargará de realizar la búsqueda del haz reflejado en los obstáculos; es de vital importancia para que el lente pueda colimar los rayos encontrados hacia el filtro y sobre todo hacia el fotodetector.

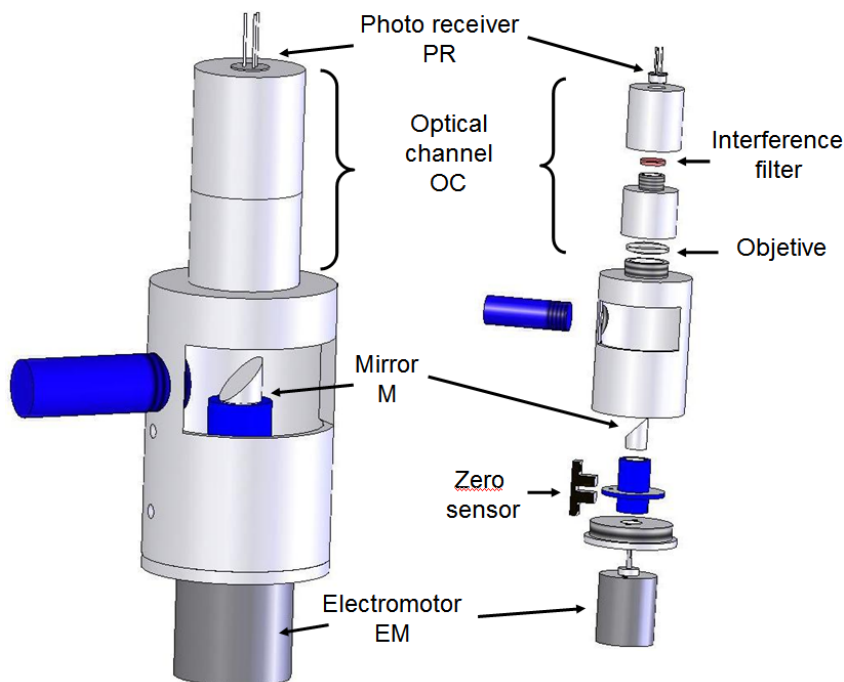


Figura 3.6 Sistema de Apertura de escaneo láser

3.3.3 Alineación óptica de los componentes.

Como ya se menciono anteriormente, es muy importante mantener alineados a todos los elementos que conforman al SVT, ya que una deficiencia en la alineación podría causar corrimientos inesperados en la emisión del haz láser, así como una detección ineficiente o simplemente la no – detección de rayos reflejados en el sistema de apertura de escaneo láser, que desencadenaría errores en los cálculos de coordenadas 3D.

Como la apertura de escaneo láser está empotrada sobre la barra base, su rotación vertical está gobernado por el motor de barrido vertical, logrando que el barrido vertical del haz láser quede en el mismo plano vertical que la apertura, lo que indica que los ejes verticales tanto de la apertura como de sistema de barrido láser, deben de ser paralelos entre sí, pero perpendiculares al eje horizontal definido por la barra base (figura 3.7).

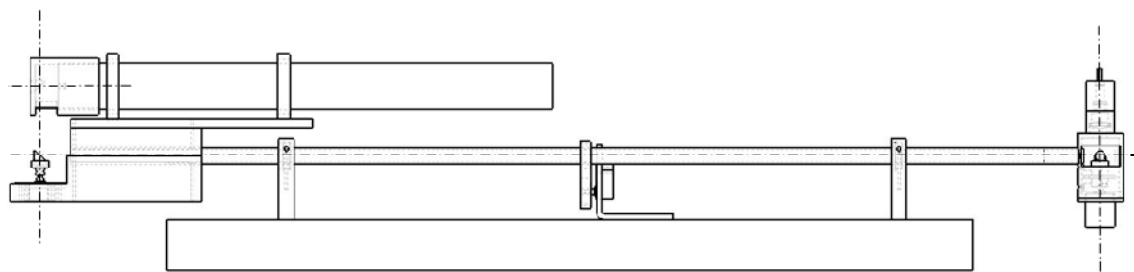


Figura 3.7 Alineación entre el sistema de barrido y la apertura.

Para el caso específico de la apertura de escaneo láser, el montaje del motor, espejo, lente, filtro y el sensor deben quedar alineados entre si sobre su eje central de forma vertical, de manera concéntrica y perpendicular al eje horizontal de la barra base. En tanto, el eje horizontal de la barra base, debe coincidir con el centro del espejo cilíndrico, de tal

forma, que no existan errores por desplazamientos angulares respecto a la barra base (figura 3.8).

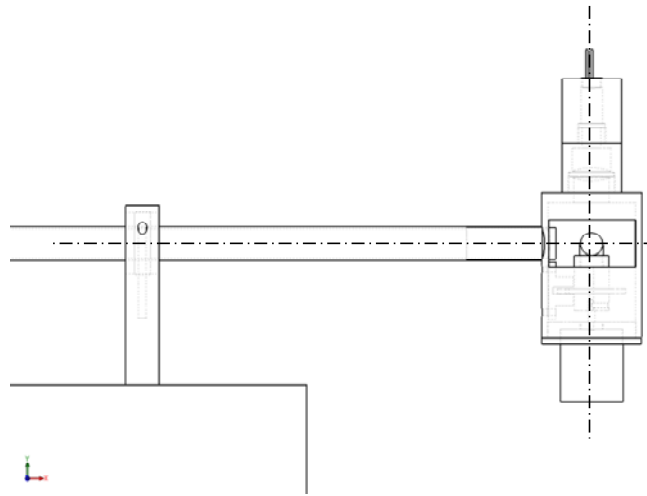


Figura 3.8 Alineación de la apertura de escaneo láser.

3.4 Determinación del ángulo B

3.4.1 Señales de la apertura de barrido láser

El ángulo B , es el ángulo de llegada de un haz láser reflejado hacia la apertura de barrido láser, con respecto a la barra base. Para el cálculo del mismo, es necesario generar y conocer tres señales. Primeramente, la señal ZERO, que determina el inicio de una revolución del espejo en su búsqueda de un haz reflejado; la señal STOP que determina cuando la apertura encontró un haz reflejado en un obstáculo y por último una señal de pulsos de referencia cuya frecuencia sea constante, que ayuda a encontrar la relación entre las señales ZERO y STOP para la determinación del ángulo B .

3.4.1.1 Señal ZERO

Esta señal es generada por un sensor óptico de barrera (figura 3.9), ubicado sobre el eje de giro vertical, cada vez que el sistema rotatorio del receptor da una revolución completa. El sensor es del tipo Emisor-Receptor, y el pulso ZERO se genera debido a que la luz (led infrarrojo) pasa del emisor al receptor a través de un orificio en el soporte del espejo de la apertura. Este sensor está instalado de tal forma que detecta el momento

cuando el plano del espejo de la apertura, esta frente al eje de la barra base, marcando a esta posición de inicio llamada ZERO.

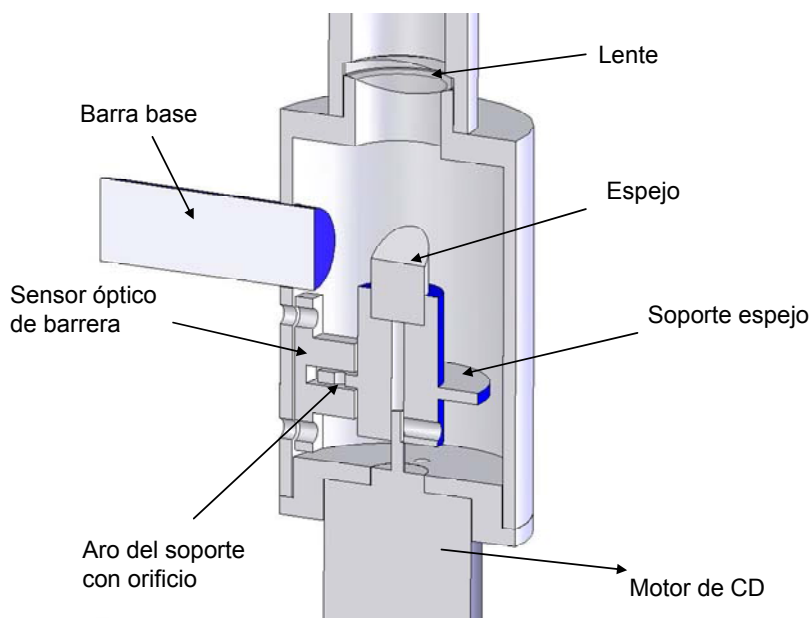


Figura 3.9 Instalación de sensor óptico de barrera para la generación de la señal ZERO.

Este pulso sirve de sincronía, ya que permite al sistema reconocer el inicio de cada vuelta en el espejo de recepción, así como determinar la velocidad de rotación del mismo.

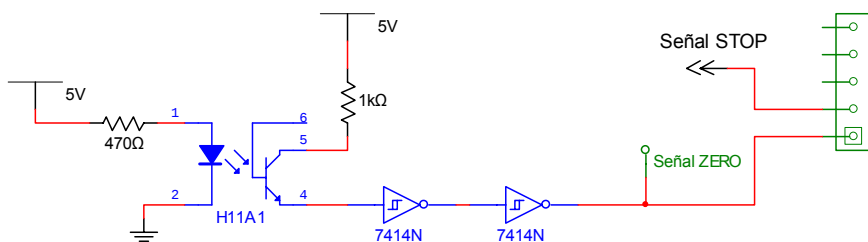


Figura 3.10. Circuito para obtener señal de posición ZERO.

Para obtener el pulso de posición ZERO, se elaboró el circuito de polarización para el sensor de posición H11A1 (figura 3.10), y obtener un pulso por cada giro del espejo al pasar por la posición ZERO, adecuando su señal a niveles de TTL debido a que se emplea como control y adquisición de datos el puerto paralelo del sistema de control.

3.4.1.2 Señal STOP

Para poder generar la señal STOP, se utiliza un fotodetector del tipo fotodiodo, el cual se describió anteriormente (sección 3.3.2). Esta señal electro - óptica se obtiene cuando la trayectoria de un haz del láser reflejado por la superficie de un obstáculo (punto S_{ij}), coincide con el plano del espejo de la apertura; en ese momento, el rayo encontrado es redireccionado por el espejo hacia el lente, colimando el rayo, el cual es recolectada por el filtro de interferencia para asegurar obtener solamente la luz reflejada del láser, y llegar directamente hasta el fotodetector, generando una señal de corriente que es proporcional a la intensidad de radiación de luz recibida (figura 3.11).

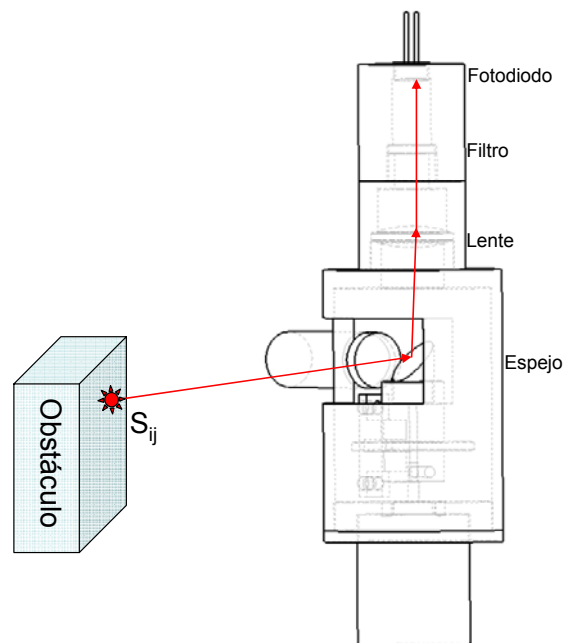


Figura 3.11 Trayectoria óptica para la generación de señal STOP.

Para la adecuación de la señal generada por el fotodiodo, se diseñó un circuito amplificador, que se compone de tres etapas principalmente; un amplificador de transimpedancia, para convertir la corriente inversa generada por el fotodiodo que es proporcional a la potencia de radiación luminosa recibida, un amplificador con ganancia de 100 para incrementar la amplitud de la señal recibida y una etapa de adecuación de la señal a niveles lógicos TTL.

El fotodiodo está configurado para trabajar en modo fotovoltaico, sin necesidad de aplicarle un voltaje de excitación externo, ya que la corriente de oscuridad está en función

de la magnitud del voltaje aplicado al fotodiodo, la operación fotovoltaica elimina la corriente de oscuridad como una fuente de ruido. En este caso, la relación de potencia equivalente de ruido NEP será más baja, permitiendo esto una mayor sensibilidad en la respuesta del fotodiodo que permite la detección de señales débiles [].

El amplificador de transimpedancia (Figura 3.12) proporciona una ganancia de 500 millones, y está dada por la siguiente relación:

$$V_D = I_{RD} R_F \quad [3.21]$$

Donde V_D es el voltaje de salida del amplificador de transimpedancia, I_{RD} es la corriente inversa generada por el fotodiodo y R_F es el valor de la resistencia de retroalimentación del amplificador. Como este es un amplificador con una ganancia muy alta, y por lo tanto una alta sensibilidad, el fotodiodo se cubrió con una malla metálica a manera de jaula de Faraday y el cable de conexión del detector al amplificador tiene un apantallado metálico, para reducir la interferencia por radiación electromagnética, que podría incrementar significativamente el ruido en la señal resultante.

La potencia de la señal óptica que recibe el fotodetector no es constante, debido al movimiento circular del espejo, como se puede apreciar en la parte superior de la figura 1, además que esta varía también en función de la distancia del obstáculo que se esté iluminando hacia la apertura, por lo que la señal de voltaje resultante en la salida del amplificador de transimpedancia tiende a tener una distribución gaussiana (figura 3.13), en la que tiempo de subida es menor que el tiempo de bajada de la señal, causado por capacitancias internas del fotodetector y del mismo amplificador de transimpedancia.

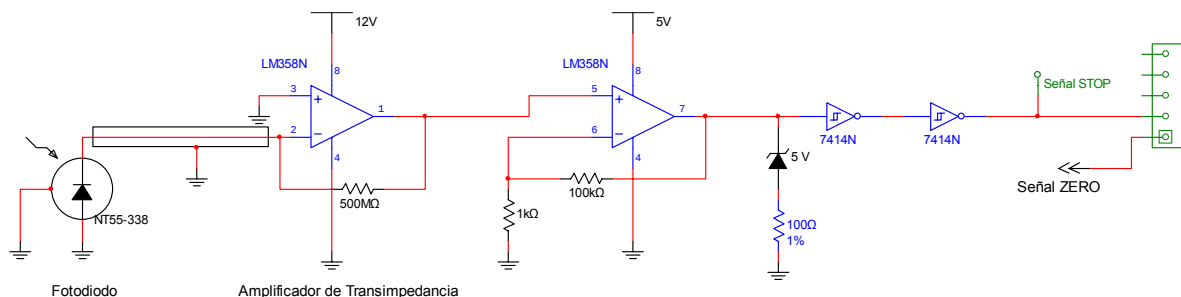


Figura 3.12 Circuito acondicionador de señal de fotodiodo.

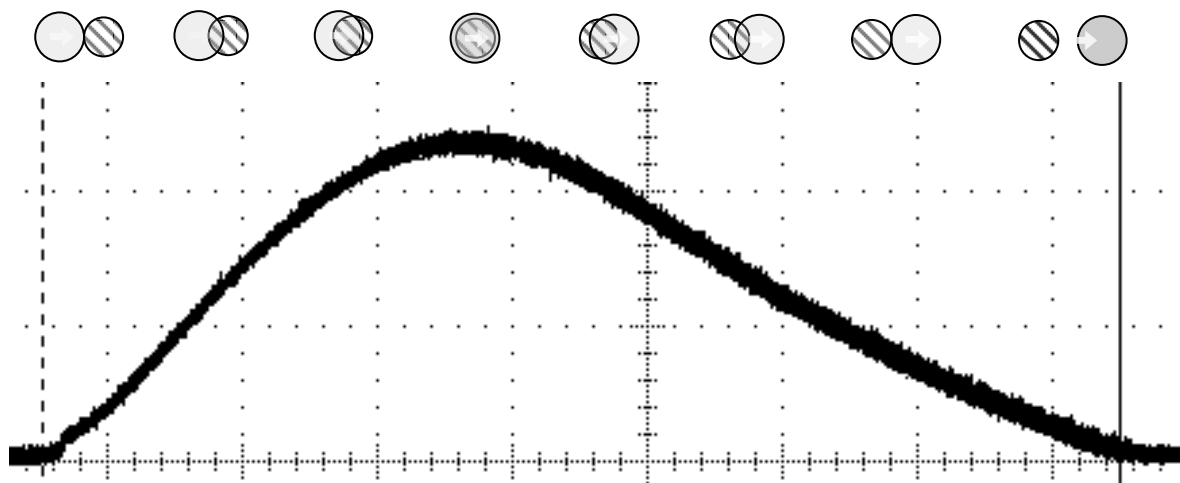


Figura 3.13 Forma de onda obtenida a la salida del amplificador de transimpedancia

La señal de voltaje resultante del amplificador de transimpedancia, se pasa por una etapa de amplificación en un factor de 100, para poder incrementar aún más la sensibilidad, y al final poder pasarla por un recortador de voltaje y unos inversores schmitt trigger para adecuar la señal al estándar TTL.

3.4.1.3 Señal de Referencia

La señal de referencia es una señal con una frecuencia constante, que sirve como base para la determinación del período de la señal ZERO, así como para obtener la relación entre la señal ZERO y la señal STOP, al momento de lograrse detectar una haz reflejado.

La frecuencia del pulso de la señal de referencia es 114.675 KHz, y es generada por el software de control, determinada específicamente por la tasa de muestro del algoritmo de control.

3.4.2 Cálculo del ángulo B

La determinación del ángulo de recepción, se basa en el conteo de los pulsos de la señal de referencia que ocurren desde el pulso ZERO y hasta que aparece el pulso de detección STOP. (figura 3.14).

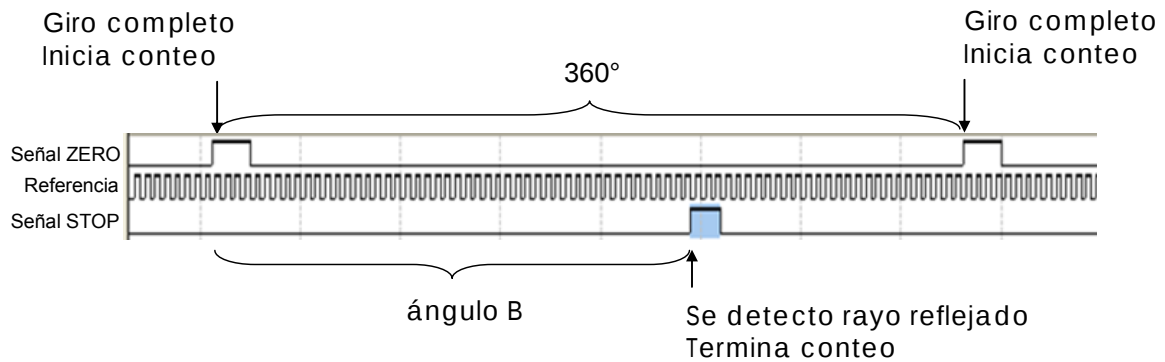


Figura 3.14 Señalización de Apertura de barrido láser

Como la frecuencia de la señal de referencia es de 114.675 KHz, y si el espejo gira a una velocidad de 10 revoluciones por segundo, el período por revolución sería de 100 ms. Tomando en cuenta que la el período de los pulsos de la señal de referencia es de 8.72 μ s, se puede determinar que una revolución del espejo equivaldría al conteo de 11467 pulsos de la señal de referencia.

En base a la relación anterior, el ángulo B se determina con la relación existente entre el número de pulsos de la señal de referencia ocurridos entre la señal ZERO y la señal STOP, y el número de pulsos existentes en una revolución del espejo.

El error máximo en el cálculo del ángulo B saldría de la relación existente de un pulso de referencia a un giro completo del espejo y sería de $\pm 0.03^\circ$.

3.5 Cálculo de ángulos emisión láser C y β .

El barrido de emisión láser funciona sincronizadamente con el funcionamiento de la apertura de barrido láser, y este trabaja más lento debido a que el haz láser debe mantenerse en el punto de proyección hasta que la apertura detecte el punto de reflexión sobre la superficie del obstáculo o al detectar el siguiente pulso de sincronía ZERO. Entonces, el sistema de emisión láser debe detener por un momento el barrido del láser por un período de tiempo para determinar la presencia o ausencia de una reflexión.

El sistema de emisión láser utiliza dos motores a pasos, por lo que el sistema de

control y procesamiento tiene la posibilidad de determinar y almacenar el ángulo de barrido en el eje horizontal (ángulo C) y vertical (ángulo β) en cualquier momento, siempre y cuando el movimiento se inicie desde un mismo punto de referencia. Además, mediante el sistema de control se puede especificar el número de puntos y la distancia entre ellos, del barrido del haz sobre un escenario, con la modificación de los parámetros control del barrido láser.

3.6 Algoritmo de control y procesamiento

El algoritmo de control se realizó en lenguaje C++, y se ejecuta sobre una computadora portátil IBM Pentium II. Las funciones del algoritmo son realizar el control del movimiento angular de los motores encargados del barrido horizontal y vertical del sistema de emisión láser, determinar los ángulos de emisión C y β , así como el de recepción B y por último, calcular y almacenar las coordenadas en tres dimensiones de los puntos de reflexión encontrados y así como el cálculo y almacenamiento de las coordenadas tridimensionales

El barrido de emisión del láser debe repetirse en cada escena. Entonces, para cada posición de emisión láser (figura 3., el sistema de control debe esperar a que se presente un pulso de sincronía ZERO. Al presentarse este, el sistema comienza el conteo de los pulsos de la señal de referencia, hasta que se detecta un pulso de detección de reflexión STOP, almacenando en ese momento la cantidad de pulsos de la señal de referencia, y esperando a que aparezca el pulso de sincronía ZERO para terminar el conteo de los pulsos de referencia, y posteriormente determinar los ángulos de emisión y recepción, para calcular las coordenadas y almacenar las coordenadas tridimensionales. Si no existe pulso de detección, el sistema de emisión cambia a la siguiente posición, repitiéndose el algoritmo para cada punto explorado.

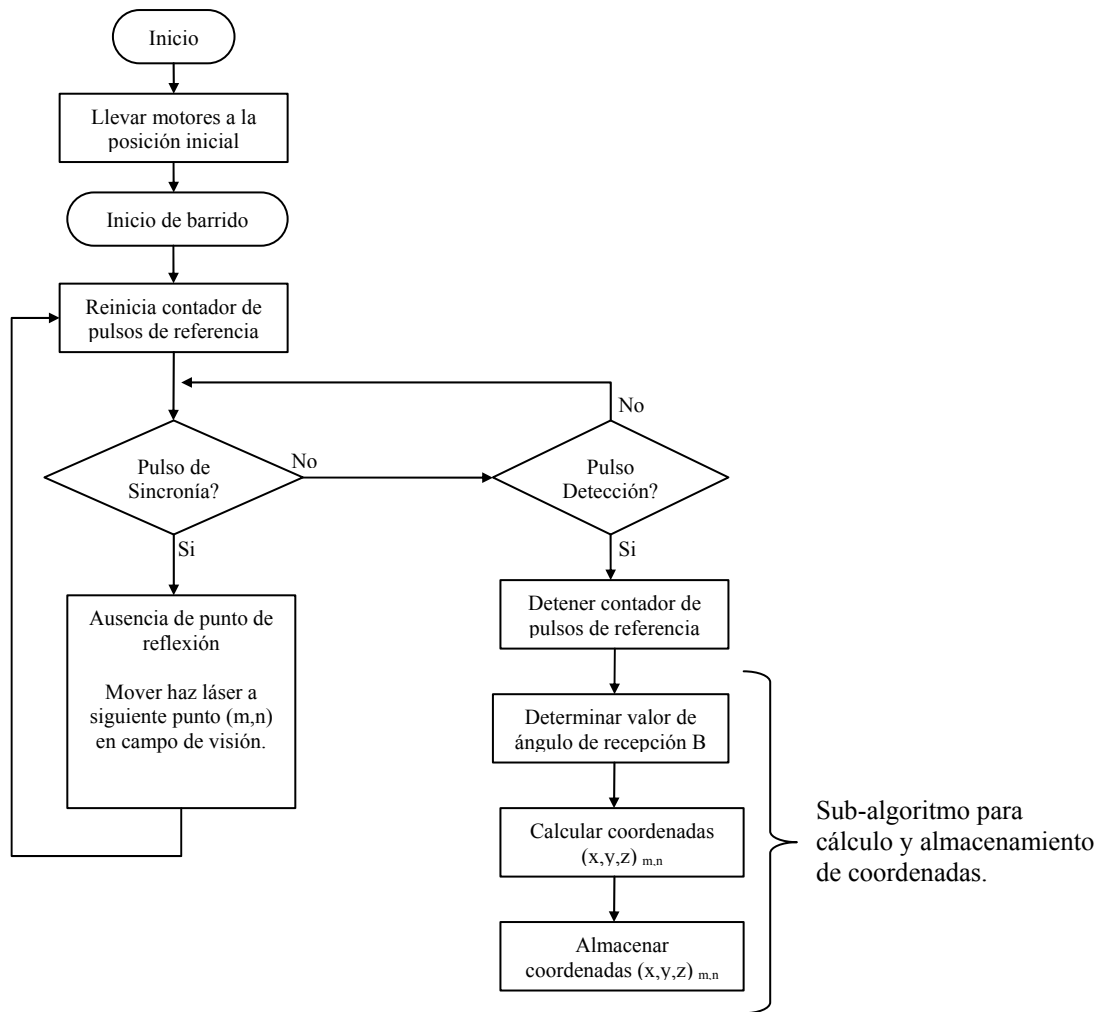


Figura 3.15 Diagrama de flujo del algoritmo general.

Capítulo 4

Resultados Experimentales

4.1 Introducción

En este capítulo se describen los experimentos realizados con el sistema de visión técnico con dos finalidades: determinar la eficiencia del sistema sensorial de la apertura de barrido láser y evaluar el funcionamiento del prototipo planteado, permitiendo identificar las limitaciones del sistema.

EN los experimentos realizados, primeramente se determina el error que pudiera generar el cambio de velocidad del motor de la apertura en el ancho del pulso de la señal ZERO. Después se evalúa la manera en que influye el ángulo del patrón de reflexión en la sensibilidad de la apertura óptica así como el cambio en la distancia del emisor láser, en la respuesta del sistema de apertura de barrido láser, determinando la potencia de luz recibida para cada caso, y que es capaz de detectar la apertura de barrido láser.

En base a los resultados con los experimentos planteados, se determina el rango de acción del SVT, y se define un nuevo escenario para realizar pruebas de medición de coordenadas bidimensionales, para evaluar la precisión del sistema y determinar los errores sistemáticos que pudieran presentarse.

4.2 Determinación de error en señal ZERO.

La relación del ancho del pulso de la señal ZERO y el tiempo que tarda una revolución del espejo, debería permanecer constante para cualquier velocidad de giro del espejo de la apertura de barrido láser.

Para poder establecer errores en esa relación, se realizaron 21 mediciones con el osciloscopio (figura 4.1) al tiempo que duraba en alto el pulso ZERO (T_1) y el tiempo que duraba en bajo (T_2), a diversas velocidades de rotación, obteniendo el período de la señal al sumar $T_1 + T_2$, y la relación que existe entre esos dos tiempos es

$$\frac{T_1}{T_2} = \delta \quad [4.1]$$

Analizando las mediciones realizadas, se encontraron las relaciones para una velocidad máxima y velocidad mínima (tabla 4.1), en la que la variación del período de una rotación del espejo va desde un 3.865 % hasta un 5.305 %, encontrando que el promedio de las mediciones realizadas es de 4.28 %, lo cual indica que la velocidad del espejo presenta pequeñas fluctuaciones, que podría causar error en el cálculo del ángulo de recepción.

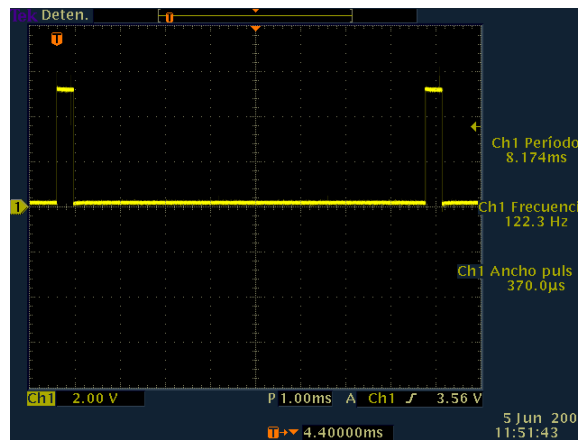


Figura 4.1 Medición del período de la señal ZERO.

Tabla 4.1 Medición de error en período de señal ZERO

Velocidad de rotación (rps)	Δ
3.09	0.053056027
201.5	0.038655373
Promedio	0.042757426

4.3 Patrón de Reflexión Angular

Con el diseño de este experimento, se trata de observar el comportamiento y la influencia en la respuesta de la apertura de barrido láser, al variar el ángulo de emisión sobre una superficie que presenta un patrón de reflexión lo más uniformemente posible, esto es, una superficie del tipo lambertiana.

Para este y todos los experimentos, se utilizaron obstáculos que reunieran las características lo más cercanas posibles a una superficie difusora ideal. En este caso se utilizo cartoncillo de color blanco para su construcción, ya que esta superficie presenta una reflexión dispersa circular uniforme.

Según la ley del coseno de Lambert, este indica que la intensidad de la luz reflejada en una superficie difusora perfecta, varía según el ángulo que forma el haz de luz incidente con la normal a la superficie [27]. Esto quiere decir que si hace incidir un haz de luz sobre la superficie con un ángulo de reflexión de 0 grados respecto a la normal, la reflexión resultante será la máxima, disminuyendo esta al ir variando el ángulo de incidencia.

Para poder llevar a cabo este experimento, se realiza una serie de mediciones de intensidad de luz de un punto iluminado sobre una superficie del obstáculo patrón construido con cartoncillo blanco, para simular lo más posible una superficie lambertiana ideal. Este obstáculo se coloca enfrente del Sistema de apertura de barrido láser a una distancia de 20 cm. La variable aquí sería solamente el ángulo de emisión, partiendo desde los noventa grados con respecto a la normal de la superficie del obstáculo, y disminuyéndolo en pasos de 5 grados hasta acercarse a los cero grados, que es donde se presenta la mayor reflexión (Figura 4.2).



Figura 4.2 Experimento del patrón de reflexión

Los resultados (figura 4.3) muestran que efectivamente, el cartoncillo es un material que permite la reflexión difusa, más no en forma ideal. Pero la prueba arroja que para un ángulo de incidencia de 0° respecto a la normal, el nivel de voltaje máximo generado por el fotodetector y su circuitería asociada, alcanza un nivel de 5.58 volts, disminuyendo gradualmente a medida que aumenta el ángulo de reflexión. Esta gráfica de resultados se puede observar la comparación de un patrón de reflexión idealmente esperada contra la que arrojo el experimento.

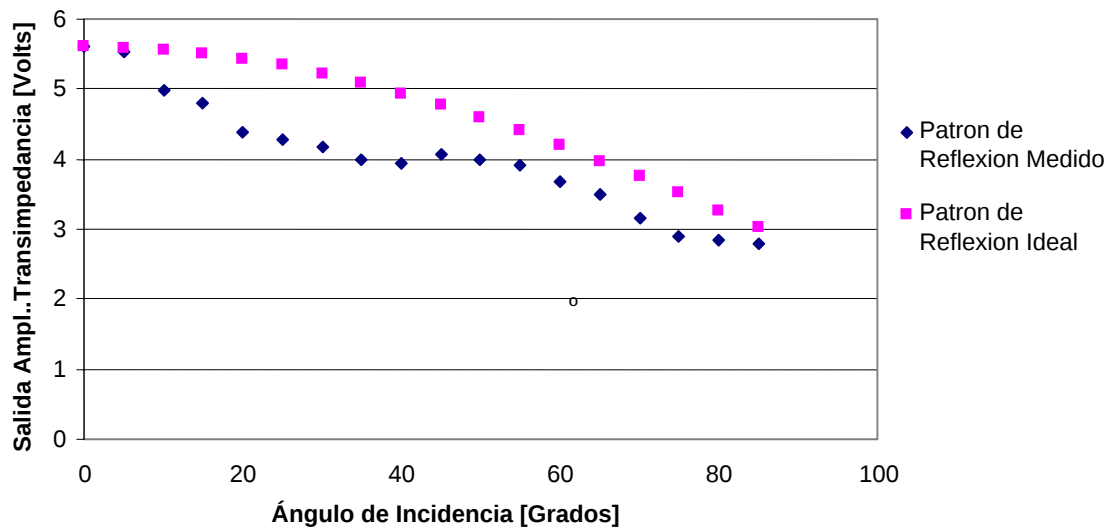


Figura 4.3. Patrón de Reflexión Angular.

4.4 Atenuación de Reflexión

Este experimento consistió en medir la intensidad de la luz reflejada, mientras se varia la distancia entre el emisor de luz láser y el obstáculo desde 1 metro hasta los 20 metros, manteniendo una distancia constante de 50 cm entre el receptor y el obstáculo, con los ángulos de incidencia y reflexión perpendiculares a la superficie del mismo.

Al incrementar la distancia, se incrementa también el diámetro del punto iluminado por el láser sobre la superficie (figura 4.4), siguiendo el patrón de distribución de energía Gaussiano, lo que indica que la radiación energética emitida por el láser se distribuye en un área mayor, reflejándose menor energía hacia la apertura, lo cual se puede observar en la figura 4.5., en la disminución del voltaje resultante del amplificadores de transimpedancia de 40 % en el rango de 0 a 20 m.

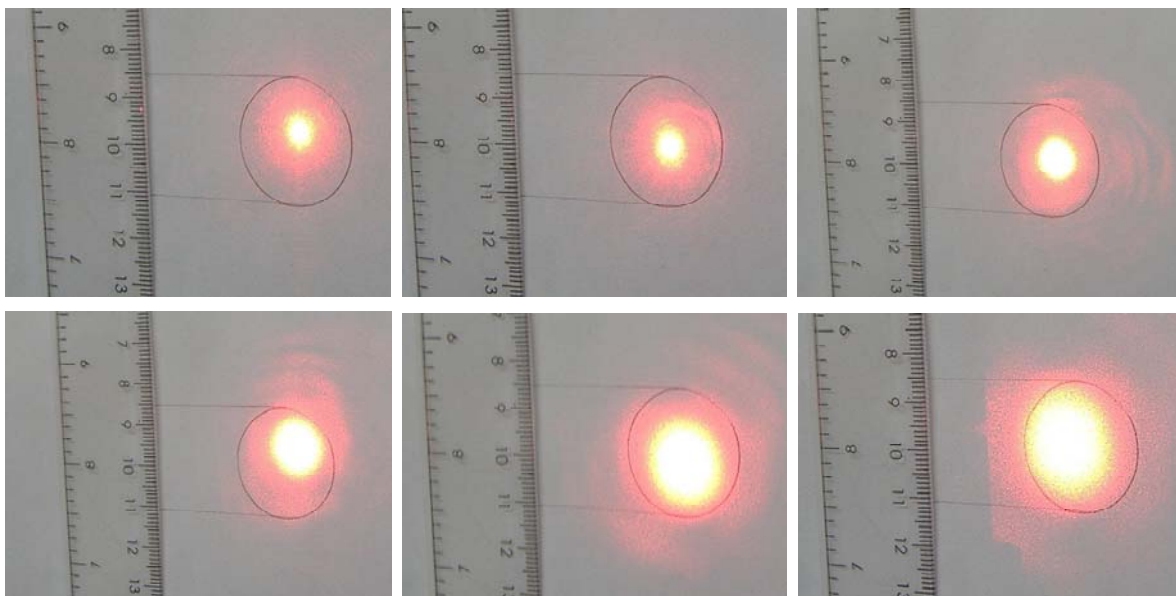


Figura 4.4 Diámetro de punto iluminado por láser.

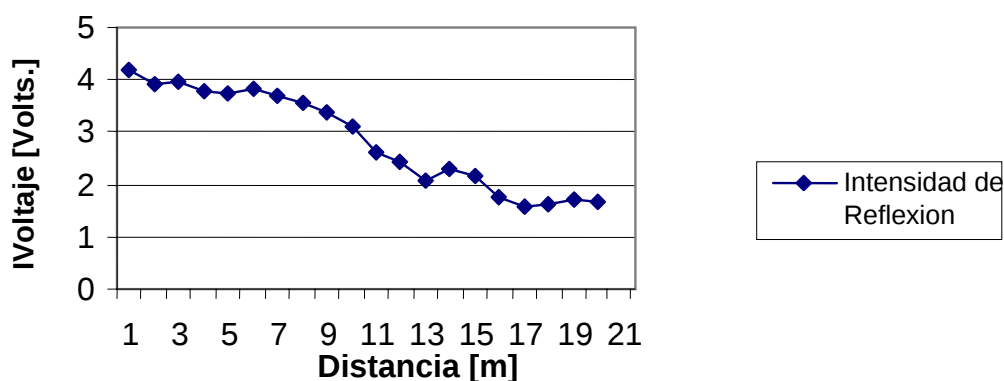


Figura 4.5 Atenuación de Reflexión vs. distancia láser - obstáculo.

4.5 Inverso del cuadrado de la distancia

Es importante conocer como se ve afectada la potencia del haz recibido por el foto detector, al ir aumentando la distancia entre la apertura y el obstáculo. Para esta prueba, se colocó el obstáculo de prueba frente a la apertura, y con el haz láser incidiendo sobre él con un ángulo de 0° con respecto a la normal de su superficie. Se buscó la distancia máxima a la cual la dejaba de saturarse la respuesta del amplificador de transimpedancia, y a partir de ese punto se aumenta la distancia de cada punto de medición cada 5 cm y registrándose el voltaje de salida del amplificador para cada uno de ellos.

Una vez hechas las mediciones, se determinó la potencia del haz reflejado y captado por el fotodiodo, aplicando la fórmula del amplificador de transimpedancia y del fotodiodo, encontrando la siguiente relación para la potencia de radiación recibida por el fotodiodo:

$$P_R = V_D / (R_F R) \quad [4.2]$$

V_D es el voltaje proporcional a la corriente inversa generada por el fotodiodo, R_F es el valor de la resistencia de retroalimentación de amplificador de transimpedancia y R corresponde a la sensibilidad del fotodiodo, expresada en Amperes/Watt.

Aplicando [4.2] a los voltajes medidos, obtenemos la curva de respuesta de distancia – potencia (Figura 4.6), la cual muestra la potencia recibida por el fotodetector para cada distancia (rombos), así como la línea de tendencia (línea continua), en la que se puede afirmar que la respuesta del fotodetector es sensible a la variación de la distancia, en un factor del inverso del cuadrado de la misma.

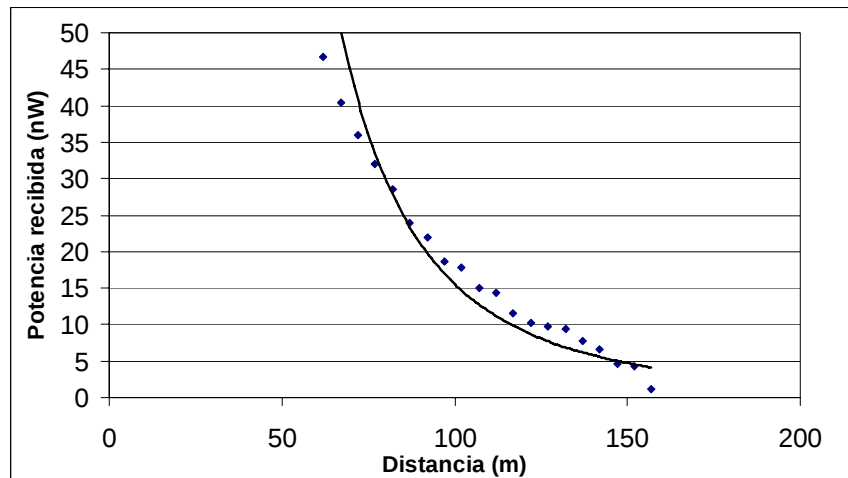


Figura 4.6 Respuesta del al variar la distancia apertura – obstáculo.

4.6 Variación en el ancho de pulso de la señal STOP

Un efecto que puede ser causa de error en los cálculos de las coordenadas x y y , sería la disminución del ancho del pulso de la señal STOP, debido a la atenuación de potencia de la radiación percibida por el fotodiodo, causado tanto por el ángulo de reflexión y el aumento en la distancia existente entre el obstáculo y la apertura (figura 4.x).

Esto se debe principalmente a que el algoritmo del software de control, realiza el cálculo del ángulo B con el conteo de los pulsos de referencia existentes entre el pulso de subida del pulso ZERO y el pulso de subida del pulso STOP. Esta condición permite que el software cuente más pulsos de la señal de referencia, lo que repercute directamente en la determinación del ángulo B , por consiguiente en el cálculo de las coordenadas x y y .

Se realizaron 3 mediciones de ángulo de llegada o detección pero a diferente distancia apertura – obstáculo, con el fin de aumentar o disminuir el ancho del pulso ZERO.

Si el períodos de la señal de referencia es de 8.72 ms, se puede encontrar la relación midiendo con el osciloscopio el tiempo de separación existente los flancos de subida de las señales ZERO y STOP.

Como el período de la señal de pulsos de referencia es de 8.72 μ s, entonces se puede determinar el número de pulsos existentes entre las señales STOP – ZERO, relacionando el tiempo existente entre los flancos de subida de las dos señales entre el período de la señal de referencia.

Como indican los resultados (tabla 4.2), la precisión del cálculo del ángulo B depende en gran medida del ancho del pulso STOP, afectando esto el cálculo de las coordenadas.

Tabla 4.2 Variación ángulo B respecto ancho del pulso de la señal de referencia

Medición	Tiempo STOP-ZERO	Pulsos de referencia	Ángulo B
1	20 ms	2293.6	68.8 °
2	22 ms	2522.9	75.7 °
3	26 ms	2981.7	89.5 °

Esta condición se presenta al aumentar la distancia apertura – obstáculo, así como el incremento del ángulo de reflexión, que es cuando se disminuye el ancho del pulso STOP.

Para corregir esto, sería necesario hacer modificaciones al software de control y/o el circuito acondicionador de la señal del fotodiodo, para que el sistema realizara las mediciones a partir del centro de cada señal.

4.7 Medición de coordenadas bi – dimensionales (X,Y) Prueba 1 .

Una vez que se pudo a prueba la respuesta del fotodetector de la apertura, se realizó la primera prueba de mediciones de coordenadas en dos dimensiones solamente, ya que el peso del láser, venció la fuerza del motor encargado del movimiento vertical, por lo que se no se pudo realizar el cálculo del ángulo de emisión vertical β .

Para poder realizar este experimento, se trazó una red de 16 puntos distribuidos en una cuadrícula con una distancia de 25 cm entre cada punto sobre una mesa de trabajo. (Figura 4.7)

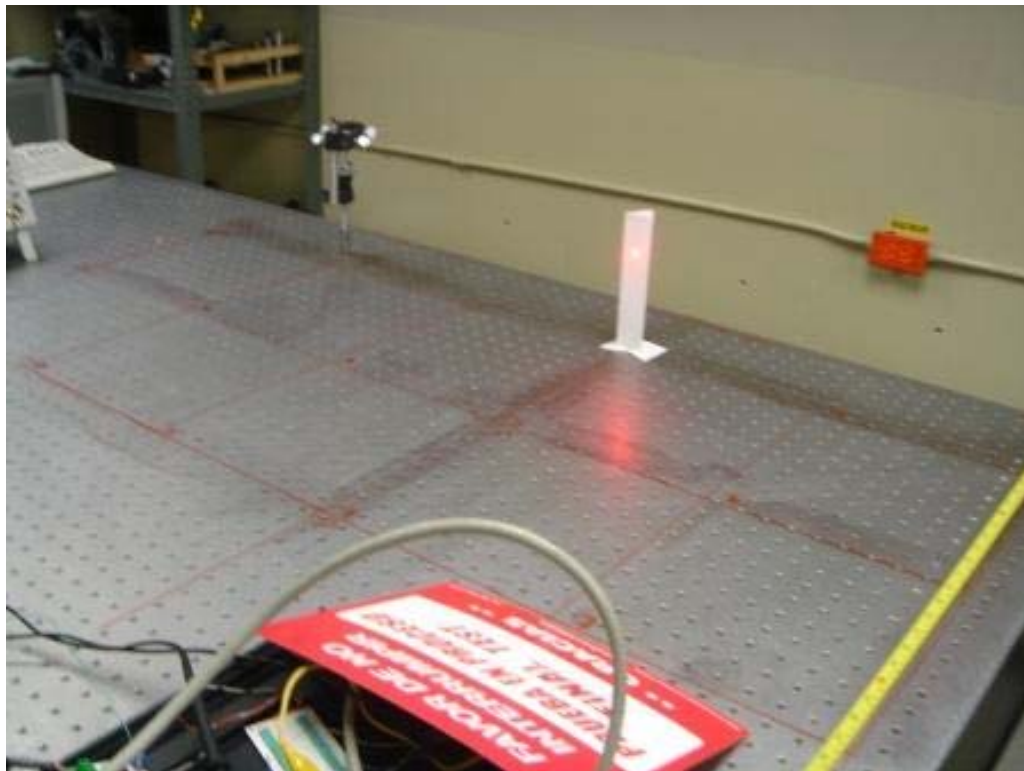


Figura 4.7 Red de 16 puntos para medición en 2D

Para realizar las mediciones, el haz láser se dirigía manualmente hacia cada punto de prueba, sobre el cual se colocó una figura de prueba hecha de cartoncillo color blanco.

El rango máximo de las mediciones fue de 1 m, debido a que la señal de recepción STOP se atenuaba a distancia mayores de 1.25 metros.

En la figura 4.8 se observa el esquema de la distribución de la cuadrícula con los valores teóricos de las coordenadas X y Y para cada punto (rombos) así como las mediciones realizadas por el SVT (cuadrados).

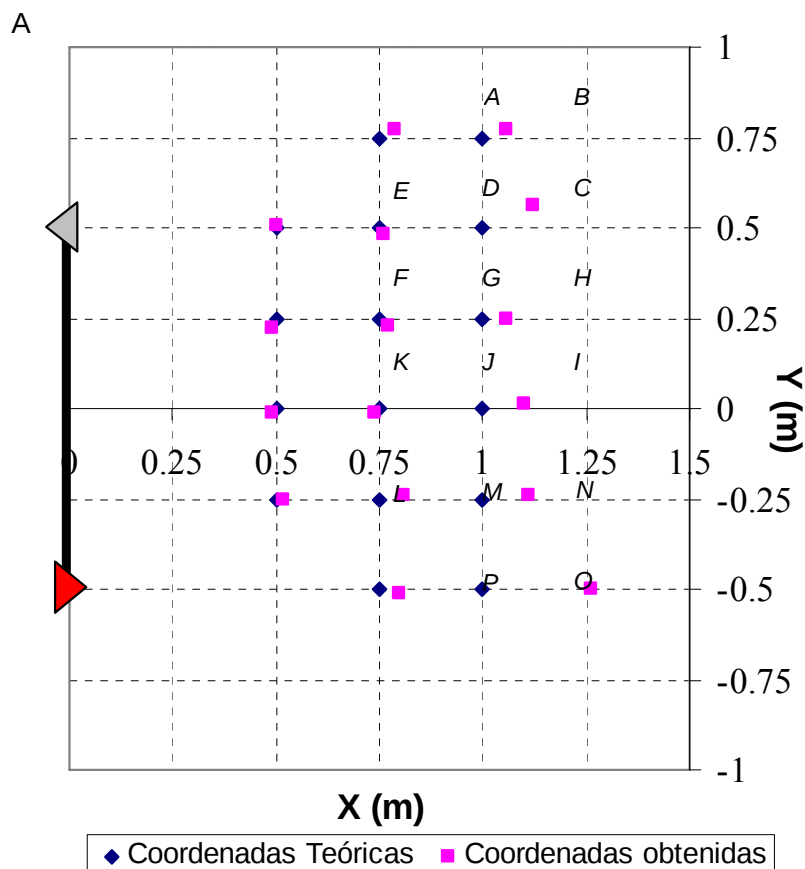


Figura 4.8 Medición de coordenadas 2D 16 puntos.

Con los resultados obtenidos, se ve claramente que las mediciones realizadas son las que se realizaron en los puntos que están frente a la parte frontal del sistema, mientras que las que se encuentran en los extremos pierden exactitud, lo cual se debe a la atenuación que sufre la potencia del haz reflejado debido a la distancia y al ángulo de reflexión.

4.8 Medición de coordenadas bi – dimensionales (X,Y) Prueba 2.

Para poder determinar aún más la eficiencia, precisión y rango de acción del sistema, se decidió realizar mediciones sobre una cuadrícula de mayor tamaño con mayor número de puntos de referencia. Para lograr esto, se fabricó una mesa de prueba de mayores dimensiones, sobre la que se trazó una cuadrícula de 9 x 16 cuadros de 20 x 20 cm cada uno, sobre la cual se distribuyeron un total de 46 puntos de prueba.

Se realizaron 2 tipos de mediciones. La primera fue realizar un conjunto de 10 mediciones para cada punto, utilizando el sistema de emisión láser, y la figura de prueba, con el fin de obtener un promedio del ángulo de recepción así como de las coordenadas medidas. La segunda parte consistió en poner una iluminación puntual sobre cada punto de prueba, la cual estaba apuntando siempre hacia la apertura de escaneo, calculando en forma manual el ángulo de emisión, mientras que el ángulo B era calculado por el sistema control, y calculando manualmente las coordenadas correspondientes a cada punto de prueba.

Los resultados obtenidos (figura 4.9) muestran la misma tendencia que en el primer experimento, al realizar las mediciones con el barrido del láser para cada punto. Al realizar las mediciones con una iluminación puntual, la precisión del sistema mejoró debido a que la fuente de luz estaba dirigida, pero sin embargo, en los puntos más distantes presentó la misma tendencia.

El principal problema de estas mediciones, podría ser una desalineación del eje vertical de la apertura óptica con respecto al eje vertical del sistema de barrido láser, provocado principalmente por deformación sufrida a la barra base debido al peso del láser.

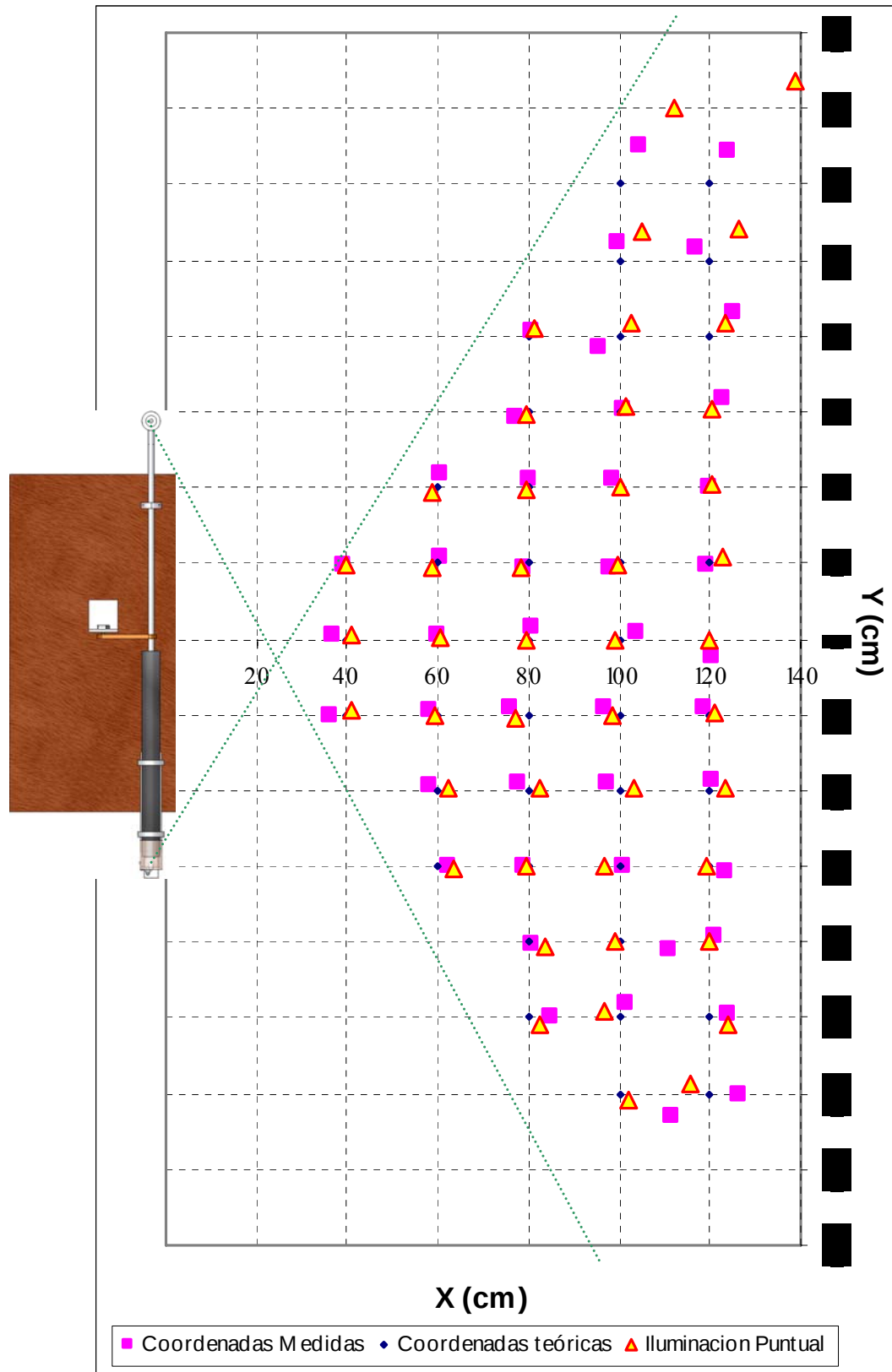


Figura 4.9 Mediciones 2D de matriz 9 x 16.

Capítulo 5

Conclusiones

El prototipo del Sistema de Visión Técnico presentado en este trabajo, demuestra que la técnica de triangulación propuesto para el cálculo de coordenadas en dos dimensiones, puede resolver dos problemas de navegación de un robot móvil: Dotar al robot de un sistema que le permitiría realizar una búsqueda y detección de obstáculos en el espacio frontal del robot y poder trazar una ruta para localizar una dirección a partir de la posición inicial del mismo.

Este sistema no requiere de nuevos elementos y dispositivos ya que se diseñó y construyó utilizando componentes básicos, que se consiguen fácilmente en el mercado, sin necesidad de la aplicación de redes neuronales o procesadores complejos para poder realizar detección de obstáculos.

Se diseñó y construyó un sistema de montura mecánica para todos los mecanismos del SVT, así como su parte principal, el subsistema de Apertura de Barrido láser, que es la

parte sensible para la detección de puntos de reflexión de luz láser emitida por el subsistema de emisión láser.

El diseño de la apertura de barrido láser se basa en la utilización de un fotodiodo como parte sensible, y un sistema electromecánico que brinda la facilidad a la apertura de realizar búsquedas en el espacio frontal de rayos reflejados por la superficie de algún obstáculo, que corresponden al rayo láser emitido por el SVT.

Las pruebas realizadas a la apertura de barrido láser, indican que es capaz de detectar haces reflejados con una potencia mínima de 1.12 nW a una distancia máxima de 157 cm, frente al obstáculo, a una tasa de búsqueda de un punto de reflexión de 10 revoluciones por segundo.

Las mediciones realizadas en 2 dimensiones, indican que el sistema puede realizar mediciones más precisas en la parte frontal central del escenario, en similitud a la visión humana.

Las recomendaciones para la mejora del prototipo propuesto son:

- Utilizar un láser modulado para lograr obtener mayor potencia de emisión, que incrementará el rango de detección de la apertura, además de ahorrar energía.
- Incrementar la sensibilidad de la apertura de escaneo y su velocidad de rastreo reemplazando el fotodetector utilizado por uno de mejores prestaciones.
- Realizar un diseño mecánico más ligero, para implementar el barrido vertical del SVT y obtener coordenadas 3D.

Trabajos Futuros.

- Diseñar un sistema de formación de imágenes con las coordenadas obtenidas por el SVT.
- Diseñar un sistema de control para un robot móvil, utilizando las coordenadas generadas por el SVT para autonavegación.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Benjamin T. Backus, Martin S. Banks, Raymond van Ee, and James A. Crowell. Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant perception. *Vision Research*, 39: 1143 - 1170, 1999.
- [2] Goshtasby, A. Ardeshir. 2-D and 3-D Image Registration: For Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications. Editorial: John Wiley & Sons, Incorporated. 2005.
- [3] Clair L. Wyatt. *Electro-optical System Design for Information Processing*. McGraw-Hill, 1991. ISBN 007072184X, 9780070721845 343 páginas.
- [4] Andrés Eleázar Jaramillo, Flavio Prieto y Pierre Boulanger. Inspection of 3D parts: a survey. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 27 No.3, DICIEMBRE DE 2007* (118-126).
- [5] Hartley, R., Zisserman, A., *Multiple view geometry in computer vision.*, Cambridge University Press, 2000.
- [6] Faugeras, O., *Three-Dimensional computer vision: A geometric viewpoint.*, The MIT Press, 1993.
- [7] Hata, S., Shimaf, D., Kaida, K., Relative stereo method for 3-D measurement in production lines., *Emerging Technologies and Factory Automation, Proceedings ETFA.03, IEEE Conference*, 2003.
- [8] Silva, L., Petraglia, A., Petraglia, M., Stereo vision system for real time inspection and 3D reconstruction., *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE .03)*, Vol. 1, 2003, pp. 607.611.
- [9] Hoover, A., *The space envelope representation for 3D scenes.*, Ph.D. Dissertation, Departament of Computer Science and Engineering, U. of South Florida, 1996.
- [10] Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P., Redarce, T., Inspection of 3D parts using high accuracy range data., *Proc. of SPIE conference on Electronic Imaging: Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII (EI.2000)*, Vol. 3966, 2000, pp. 82.93.
- [11] Prieto, F., Redarce, T., Boulanger, P., Lepage, R., Automated inspection system using range data., *Proceedings of the 2002 IEEE Intemational Conference on Robotics & Automation*, Washington D.C, USA, 2002, pp. 2557.2562.
- [12] Siefko Slob and Robert Hack. 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique. – in book “Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe”, Springer Berlin / Heidelberg, 2004, pp. 179-189

- [13] Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Andreas Nuchter and Joachim Hertzberg. A 3D LASER RANGE FINDER FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS, Robotics and Autonomous Systems, Volume 45, Issues 3-4, 31 December 2003, Pages 181-198, 11-14 Sept. 2005, Volume: 1, pp. I- 425-8
- [14] João Guilherme D. M. França, Mário A. Gazziro, Alessandro N. Ide, José H. Saito. A 3D SCANNING SYSTEM BASED ON LASER TRIANGULATION AND VARIABLE FIELD OF VIEW, Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on
- [15] Rosencher, Emmanuel. Optoelectronics. Editorial: Cambridge University Press. 2002.
- [16] Eugene Hecht. Optics. Addison-Wesley Pub. Co., 1987 ISBN 020111609X, 676 páginas
- [17] Miles V. Klein Optics. Wiley, 1986. ISBN 0471872970, 9780471872979, 672 páginas.
- [18] Max Born, Emil Wolf, A. B. Bhatia. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press, 1999 ISBN 0521642221, 9780521642224 952 páginas
- [19] R. M. Marston. Circuitos de optoelectrónica Publicado por Díaz de Santos, 2000. ISBN 8432980609, 9788432980602. 276 páginas.
- [20] Victoriano López Rodríguez, Ma del Mar Montoya Lirola. Física para informática. Publicado por Editorial Ramón Areces, 2001 ISBN 848004411X, 9788480044110 447 páginas.
- [21] R.J. Keyes , “Optical and Infrared Detectors”, (Springer, Berlin, 1980).
- [22] J.Singh , “Optoelectronics An Introduction to Materials and Devices”, Mc Graw - Hill, ISBN: 0-07-057650-5 1996.
- [23] J.Martínez Castillo, “Diseño de amplificadores de transimpedancia de bajo ruido para sistemas de comunicación vía fibra óptica”, (INAOE, Puebla, 1995).
- [24] Fred A. Carson. Basic optics and optical instruments: Revised Edition. Courier Dover Publications, 1997 ISBN 0486222918, 9780486222912. 352 páginas
- [25] Adelina Felipe César Albarrán. Manual de óptica geométrica: Teoría y cuestiones Universitat de València, 1998 ISBN 8437034981, 9788437034980 220 páginas
- [26] Optical Society of America Staff. Handbook of Optics, Volume IV McGraw-Hill Professional. 2000

- [27] Rieke, George. Detection of Light : From the Ultraviolet to the Submillimeter. Editorial Cambridge University Press Fecha: 2002

Apéndices

Apéndice A. Publicaciones

Mobile transport object control by technical vision means.

Valentyn Tyrsa, Oleg Sergiyenko, Larisa Burtseva, and Miguel Bravo-Zanoguera,
srgnk@iing.mx1.uabc.mx, mbravo@info.rec.uabc.mx
Engineering Institute and Engineering Faculty of Autonomous University of Baja California,
Luis Devia and Ismael Rendón
lfdevia7@gmail.com, rendonig@yahoo.com.mx
Vera Tyrsa
vera-tyrsa@yandex.ru
Kharkov National Automobile and Highway University, Ukraine,

Abstract

The technical vision principle of a mobile robot for working in a complex landscape or on a cross-country terrain is presented. Issues of principle design, functioning and interaction of units and elements of the system are described. The mathematical tools for processing the signal detection, and also for determination of distances and angular measures are examined. The important parameters are analytically determined: expected accuracy, functioning speed, range of action, and power requirements; concluding with the exploration of possible areas of practical use for this automatic navigation system.

1. Introduction

The research for automatic navigation of mobile robot (MR) has received constant attention. The DARPA [1] in USA this year hosts the 3rd Competition of "robomobiles", searching for an acceptable final solution. Even though, there are available various basic approaches dealing with this problem. To mention some: direct contact sensors beforehand a set course line (magnetic discrete, induction continuous or simply visible); adaptation of CCD-cameras for imitation of human binocular sight, etc. In the direction of travel there are obstacles, and no systems has a universal attribute allowing itself to recognize any mobile object, in an unfamiliar environment without a preliminary "preparation". The need of practical decision making in this area has arisen since the times of landing for the Moon of the MR. And since that time, related major systems have been constructed [2]- [9]. Fully

autonomous mobile object control, without participation of a human, is an actual option for many practical problems: management of car in road traffic, transport carriages at the industrial sites, for the research of Solar system planets by the mobile radio engineering devices delivered to these planets. Apart from the advanced scientific explorations devices, technical vision systems are adapted to everyday tasks: for example, for navigation of the road-building machine during operation of its work process; or as a component of a car system "cruise control ". For a successful automatic navigation on terrain of mobile transport objects, it is necessary: to receive the information about the surface on which moves MR; to find out on it obstacles, to classify them (the elementary types - a ledge or a hollow); to measure distances up to them and to estimate their sizes. In the present work the description of the optoelectronic system for carrying out these functions, is described.

We are considering MR navigation in a future development. After positioning on an unknown landscape and the automatic check of serviceability of all systems passed, a MR should "view" some space around by the technical vision system (TVS) and start its movement into a safe direction from the standpoint direction. After a small path, MR has once again "to search through" the space in its route for safety purposes. If MR is assigned to return to the initial point, then after some ($< 50\%$) power resources are spent, it should locate the direction towards the initial point and move in this direction, using TVS. Thus, to execute MR navigation, two technical problems need to be investigated: 1) TVS technical design and simulation, and 2) mathematical formalism for data processing creation.

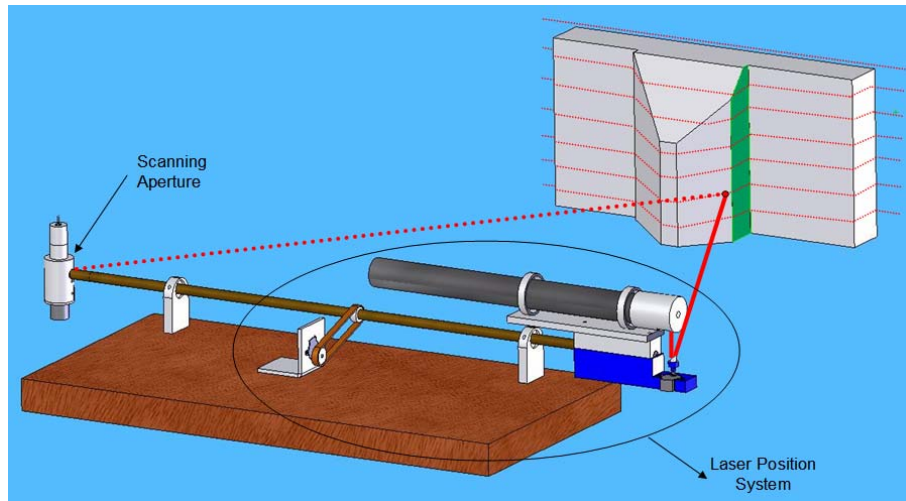
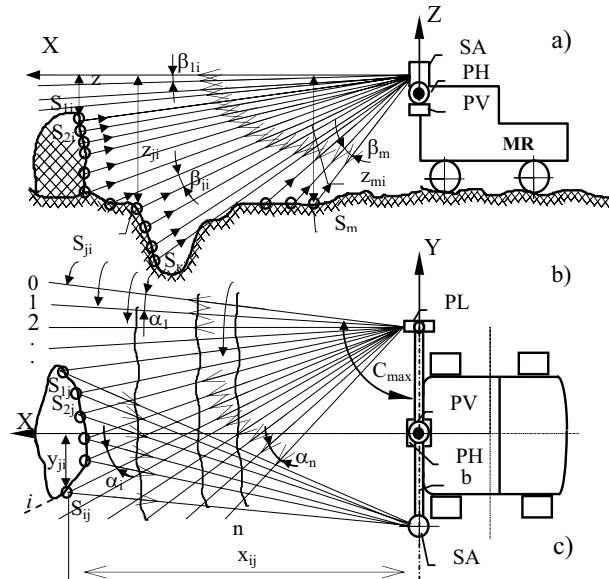


Fig 1. a-b) Top and side view of projected and reflected rays. c) System prototype.

2. System function description.

On Fig.1, the basic elements and position of TVS on MR are shown. The TVS is composed by a laser angle-distance-measuring system located in the upper front part of MR. TVS contains a rather high-power laser with a collimator. The laser and the collimator are installed in the laser positioning system (PL) (fig.2, fig.1c). PL has its step drive, which on a command from the onboard computer can turn PL in a horizontal plane at each of the angle pitch position. PL is on one end of a horizontal bar "b". On the other end of the bar a scanning aperture (SA) is located, shown separately on fig.3. The SA axle is perpendicular to a bar and plane XOY. The bar b is coupled in the middle part to a positioning system, containing horizontal (PH) and vertical (PV) step drives (fig.1).

TVS works as follows. By the command from the computer the bar is actuated so that the SA rotation axis becomes perpendicular to plane XOY of TVS reference system.

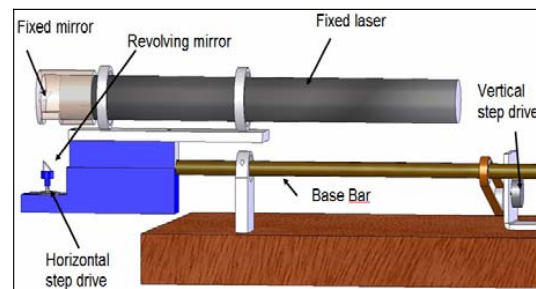


Fig 2. Prototype Laser emitter front view.

PL puts the laser with the collimator in an extreme right position. The axis of the collimator (with the help of PV-step drive) then takes the extreme top position (above the horizon). The laser and the SA are switched on. SA is rotated by the motor EM. At each SA turn, a laser ray should hit an obstacle (if any), then reflected back (point S_{ij}) returning to mirror M (fig.3). At the moment when

three objects, the point of reflection S_{ij} , the perpendicular to mirror M and the vertical axis of SA , hit their common plane, perpendicular to plane XOY while SA is rotating, an optical signal, having traveled a path “ S_{ij} - mirror M - objective O - optical channel OC - photoreceiver PR ”, makes an electrical stop signal. A start signal is previously formed by SA by means of a zero-sensor (installed on a bar b axis).

Filling in a time interval $t_{B1} = B_1/\omega$, (where: B_1 - angle between the bar axis (zero-sensor direction) and direction $SA - S_{ij}$ (fig.3); ω - SA rotation rate) with pulses of reference frequency f_0 , we shall receive a code $N_{B1} = t_{B1} \cdot f_0$. Rotation of SA cycle time $T_{2\pi1} = 2\pi/\omega$, is simultaneously filled with same impulses of frequency f_0 . The code $N_{2\pi1} = T_{2\pi1} \cdot f_0$ is formed. The angle $B_1 = 2\pi \cdot N_{B1} / N_{2\pi1}$ is stored.

When mirror SA has passed by the path towards point S_{ij} , the laser is switched off to save power. The electric pulse goes to PL , the step-drive turns the laser with the collimator on an angle α_1 along horizon (fig.1b). By approach of SA mirror M to the MR ‘view sector’ the laser is switched on. If the laser ray in its new position hits an obstacle, a new point of reflection is formed and the measurement is repeated. If the laser ray does not hit an obstacle, no reflection will be, and a new point will not be formed. In this case, as well as in case when a point of reflection exists, the formation of a code N_{B2} begins with the signal of zero-sensor start pulse.

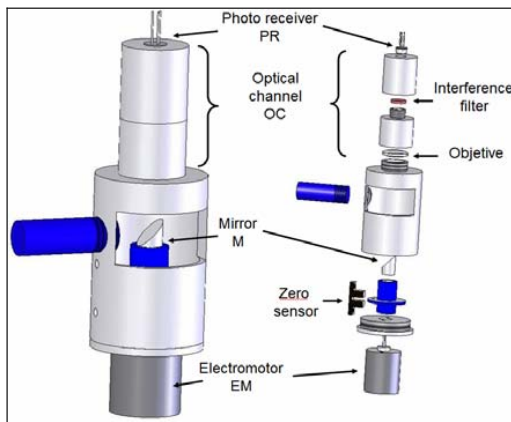


Fig 3. Scanning aperture parts

As soon as this code reaches some pre-determined value overlapping a range of possible code values corresponding to an operative sector, the counter, where codes N_{Bi} are formed, is started on zero, and the laser is switched off. PL step-drive turns the laser on an angle α_2 . Cycles with measurements of angles on reflection points, if these are formed by obstacles,

or single cycles of scanning, when the obstacle is not present, are repeated in the same order. Values of angles B_i , in a cycle where reflection points took place, are stored. When the system PL stands in an extreme position n , stipulated by a minimum distance and a maximum angle of view, the bar positioning system step drive turns it round a horizontal axes by an angle β_1 (fig.1,a). The cycles with measurements of angles B_i are recurred. Angles α_i are fulfilled in the back order from a position n up to a position 0.

After some position of a plane, where the laser ray moves in the plan from the right to the left or reverse, all fixed laser rays hit a surface under research, making points of reflection S_{ij} . If in this case, laser emission power and distance to points of reflection as well as sensitivity of the photoreceiver are sufficient for formation of stop pulses, empty cycles of SA scanning will not exist. The measurement cycles are repeated until the plane, formed by a horizontal axes of a bar b and the last point S_{ij} , deviates from a plane XOY by

angle $\sum_{j=1}^m \beta_j$. As mentioned above, data on angles B_{ij}

measured will be accumulated in computer memory. One of these angles is shown on Fig.4. A related

angle $C_{ij} = C_{\max} - \sum_{i=1}^i \alpha_i$, where $C_{\max}$ is an initial angle of PL position. Angles C_{ij} , as well as angles $\sum_{j=1}^i \beta_j$, are fixed in memory simultaneously

with the measured angles B_{ij} during each cycle.

Using the sine theorem as well as the relation between the sides and the height in a triangle represented on Fig.4.

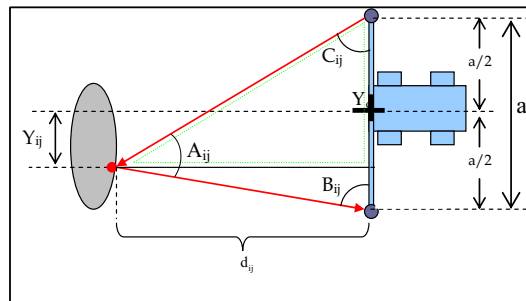


Fig 4. Distance Measurement through triangulation. (Top view)

It is possible to find the formula for calculating sloping distances d_{ij} from basis b up to points highlighted by the laser

$$d_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (1)$$

Where a - is basic distance between rotation axes of PL and SA. It is accurately enough pre-measured.

Using value of angles B_{ij} , C_{ij} , $\sum_{j=1}^j \beta_j$, and basis a ,

it is possible to calculate the Cartesian coordinates by each of the laser-highlighted points, in reference system OXYZ TVS by the following formulas

$$x_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (2)$$

$$y_{ij} = a \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad \text{at}$$

$$B_{ij} \leq 90^\circ, \text{ (rotation to right side)} \quad (3)$$

$$y_{ij} = -a \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad \text{at}$$

$$B_{ij} > 90^\circ, \text{ (rotation to left side)} \quad (4)$$

$$z_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \sin \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}. \quad (5)$$

Thus, the onboard computer with the help of TVS provides digital map-description of the terrain in a MR sector of view in real time. If in a direction of observation any obstacles shaped as a dredging or as a big item above a surface (in these places points S_{ij} are lumped), MR, with the help of vertical step drive

PV, turns TVS by an angle $\sum_{i=1}^n \alpha_i$ To the left or to

the right depending on a position of obstacles in relation with axis OX, and "searches" a new sector.

3. TVS operation velocity

The amount of fixed points in the sector of view MP is $k = m \cdot n$. The completeness of information received as well as speed of TVS at a given speed of the SA and the computer depends on it.

The mirror SA is rotated by the electric motor. As the result of angle measurement $B_i = 2\pi \cdot N_{Bi} / N_{2\pi}$ does not depend on the developing system electromotor rotating rate as those it is possible to use a high-speed DC electromotor or asynchronous AC motor of high frequency.

In case shown on Fig. 4, one measurement is carried out during each one turn of the mirror. If the motor rotates at a velocity v (rev/sec), the frequency of a measurement of directions (angles) towards

highlighted points in a sector of view is then the same

It is supposed, that step frequency of pitches of all step drives TVS and speed of the onboard computer exceed frequency of angles measurement in TVS. The computer recognizes a terrain region and determines a route in real time by B_{ij} angle measurements.

4. Reviewed space map accuracy

This criterion we shall understand as determination errors for coordinates X, Y, Z of points on surface under search. The fact, those errors in measurement of angles are the main source of errors and should be taken into account. Mean square error (MSE) of a single measurement of angle B_{ij} with the help of SA has been experimentally proved to equal 10...14 angular seconds. Step-drive pitch comparing error is 3...5 angular seconds. Let's

accept, however, that MSE of angles B_{ij} , C_{ij} , $\sum_{j=1}^j \beta_j$ is $\sigma_s = 15''$.

To find MSE in determining coordinates X, Y, Z of points of reflection, the method of moments [8] is based on the fact that dependence of function

$$\psi = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_i)$$

On arguments x_i near mathematical expectation of function is close to a linear one, and the distribution of values of arguments is subject to the normal distribution. The expectation and MSE of "nearly linear" functions (6) can approximately by expressed by formulas

$$M(\psi) = \varphi(M_1, M_2, \dots, M_i), \quad (6)$$

$$\sigma_\psi^2 = \sum_{i=1}^i \left(\frac{d\varphi}{dx_i} \right)_M^2 \sigma_{xi}^2, \quad (7)$$

In the case considered; the expressions (2), (3), (4) and (5) correspond to the formula (6). However calculation for each coordinate determined by the formulas (2), (3), (4), (5) MSE under the formula (6) is bulky enough. An approach for calculating MSE of coordinates X, Y, Z is therefore used.

It is possible to consider, that

$$dB_{ij} = \sin \sigma'_B \approx \sigma'_B / \rho', \quad (8)$$

Here dB is an arc strapping angle σ_y , expressed in radians, $\rho'' = 206265''$. On the other hand

$$\sigma_d / d_{ij} = dB / a, \quad (9)$$

Here σ_a - MSE in determining distance d_{ij} . Substituting value dB from (8) in to (9) and taking into account MSE of an angle C , we have:

$$\sigma_d = \frac{\sqrt{2} \cdot d_{ij}^2}{a \rho''} \sigma_B'', \quad (10)$$

The dependence σ_d from d_{ij} is represented in the table.

Table 1. Variations of SD between tracked points

d, m	1	2	...	50	100
σ_d, mm	0,10	0,41	...	257,11	1028,43

From expressions (1), (2) and (1), (5) it is seen, that they differ only by factors $\cos \sum_{j=1}^j \beta_j$ and

$\sin \sum_{j=1}^j \beta_j$. These factors do not exceed 1. Therefore,

MSE in determining coordinates of points on axis X and Z does not exceed values σ_d , that is $\sigma_x \approx \sigma_z < \sigma_d$.

MSE in determining coordinates Y_{ij} can be calculated, basing on (8):

$$\sigma_y = \sqrt{2} \cdot dB \approx \sqrt{2} \cdot d_{ij} \cdot \frac{\sigma_B''}{\rho''}$$

Value σ_y is linearly changed from 0.1 mm for $d_{ij} = 1m$, up to 10mm on a distance 100m from centre of coordinates.

5. TVS operation range

This TVS parameter is in general limited by laser power and PR of SA sensitivity (threshold of perceptibility).

The laser light stream P_L , reaching an obstacle, is reflected. Consider that it diffusionally is dispersed with constant density I, uniformly distributed inside a solid angle Ω_S , i.e.

$$I = \frac{P_L}{\Omega_S}, \quad (11)$$

Solid angle of a dispersing spot $\Omega_S = 4\pi \sin^2(i_p/2)$ [5,6]. Here $i_p = 180^\circ$ is a plane angle of dispersion.

Light stream returning to mirror SA and hitting PR,

$$P_m = I\Omega_m. \quad (12)$$

It is known [5,6], that

$$\Omega_m = \frac{S_m}{d_{ij}^2}, \quad (13)$$

a solid angle with its top a spot of reflection, and with its opening being on a mirror of SA, of total area S_m , when perpendicular is to a mirror, the spot of reflection and rotation axis SA are in the same plane. Thus,

$$d_{ij}^2 = \frac{S_m}{\Omega_m}, \quad (14)$$

Using (11), (12), (13) and (14), we have:

$$d_{ij} = \left(\frac{k \cdot S_m}{(s/n)\Omega_S} \cdot \frac{P_L}{P_p} \right)^{0,5},$$

$$P_L = \frac{(s/n)\Omega_S}{kS_m} P_p d_{ij}^2.$$

Where $k \ll 1$, is the factor taking into account losses of emission energy for reflection and signal passage through the optical channel SA. Is included in it the signal-to-noise relation (s/n), instead of a light stream P_m the value of threshold sensitivity of the photoreceiver is substituted instead of $P_p \geq P_m$. At $k = 0,2$; $S_m = 5 \times 10^{-4} m^2$; $\Omega_S = 6,28$ sr; $s/p = 5$; $P_p = 10^{-8}$ Watt and $d_{ij} = 20m$

$$P_L = \frac{5 \cdot 6,28 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{0,2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 1,26 \text{ Watt}$$

For $d_{ij} = 100m$ $P_L = 31,5$ W.

6. Task simulation.

For the first prototype design we can assume the dimensions of the tracked scene would be of 2 m of wide and 1 m of height, with a maximum distance of 10 m from the TVS to the scene.

6.1 Distance between highlighted points.

We have established a value of mesh of 10 cm of side and 10 cm of height approximately between the points projected on a flat surface up to 10 m of distance of the TVS. The distance between points projected on a surface is not a constant value because the angle between each point always is the same. Therefore in the measurement that the projection a point moves away of the perpendicular projection to the surface, the distance becomes greater. This relation is demonstrated in the table 2. The distance up to a surface is considered 10 meters from the TVS. The angle between each two points depends of minimal stepper motor angle, is important to consider too that this angle is composed by a set of steps of motor. In this one case the number of steps for each spot projection is 6, in order to obtain a mesh of approximately 10 cm vertically and horizontally. Therefore the dimension of the mesh of points to a distance of 10 m, is wide: 1.895 m and height: 0.9432 m.

Table 2, shows the variation of the distance between each tracked point, when being increasing the step of the vertical step drive, showing to us also the variation of the angle α_i .

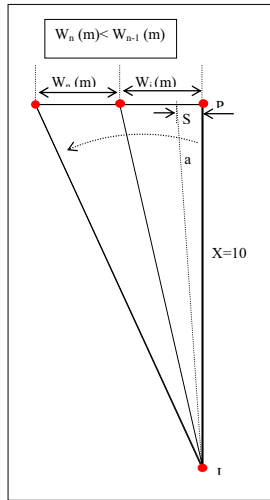
A fundamental aspect is that by each one complete turn of the EM it is necessary to scan a complete scene. It is required to have a sweeping of 21 points of wide by 11 of height, having 231 points

3. TVS represents the realization of an idea of a computer vision in the form of a analogue-digital model of space in front of the robot. This model can be easily transformed by computer means into an image, suitable for a human-operator to percept.

5. Simulation of processes of the proposed TVS shows that it is completely possible to produce this system with the current level of technology in industrial form.

Table 2. Variations of distance between tracked points

N	θ deg	W_n (m)
1	0,54	0,09425
2	1,08	0,09427
3	1,62	0,09430
4	2,16	0,09435
5	2,7	0,09442
6	3,24	0,09450
7	3,78	0,09460
8	4,32	0,09472
9	4,86	0,09486
10	5,4	0,09501
11	5,94	0,09518
12	6,48	0,09536
13	7,02	0,09557
14	7,56	0,09579
15	8,1	0,09603



6.2 Maximum angle B_i error.

The reference frequency f_0 , as well as the speed of turn of the motor, is determinants to find the expected maximum error in the calculation of the B_i angle. With this speed of turn of the SA of 13860 rpm and with a signal pulses of reference frequency $f_0 = 1$ MHz, the maximum error for the calculation of the B_i angle, would be of $\pm 0.0832^\circ$, and is given by the following relation:

$$Error/f_o = \frac{360(Motorspeed)}{60f_o}$$

motor speed must be in rpm and f_0 in Hz.

7. Conclusions

1. The proposed TVS completely solves a two-fold problem of MR navigation: it allows to search space in front of the robot and to locate a direction to a robot's initial position. SA gives a possibility to observe points located above and under the horizon in a range $\approx 45^\circ$ without a measuring instrument being sighted on the observed scene.

2. The offered TVS do not require new elements and devices and can be designed on the basis of items currently in full-scale production. No neurons or superfast computers are required to identify sample in a front of MR.

8. References

- [1] www.darpa.mil/ato/programs/TMR/index.html.
- [2] Nishide, K., Hanawa, M., Kondo, T., "Automatic position findings of vehicle by means of laser", Robotics and Automation Proceedings. April, 1986 IEEE International Conference on, Vol.3 p. 1343 – 1348.
- [3] Fuchs, E. "Multidimensional laser scanning system to test new concepts in underwater imaging", Oceans '04. MTS/IEEE Techno-Ocean '04, Vol. 3, p. 1224 – 1228. November, 2004.
- [4] Bor-Tow Chen; Wen-Shiou Lou; Chia-Chen Chen; Hsien-Chang Lin, "A 3D scanning system based on low-occlusion approach", 3-D Digital Imaging and Modeling, 1999. Proceedings. Second International Conference on, 1999, p. 506 – 515.
- [5] Goto, Y., Stentz, A., "Mobile Robot Navigation: The CMU System," IEEE Expert, Vol. 2, No. 4, Winter, 1987.
- [6] McTamane, L.S., "Mobile Robots: Real-Time Intelligent Control," IEEE Expert, Vol. 2, No. 4, Winter, 1987.
- [7] Hebert, M., Krotkov, E., "3D Measurements from Imaging Laser Radars," Image and Vision Computing, Vol. 10, No. 3, April, 1992.
- [8] Douglas C. Montgomery, George C. Runger, "Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería", McGRAW-HILL, México, 1996, 910 p.
- [9] Claire L. Wyatt. Electro-optical system design. ISBN 0-07-072184. McGraw-Hill: New York-London-Mexico, 1991, - 343p.

SCANNING VISION SYSTEM FOR MOBILE VEHICLE NAVIGATION

Oleg Sergiyenko¹, Larisa Burtseva¹, Miguel Bravo¹, Ismael G. Rendón², Vera Tyrsa³

¹ Engineering Institute of Autonomous University of Baja California

Blvd. Benito Juárez, s/n, 21280, Mexicali, Baja California, Mexico

Phone: 01(52-686)-5664150, Fax: 01(52-686)-5664150, e-mail: srgnk@iing.mx, uabc.mx

² Technological University of Hermosillo (UTH)

83299, Industrial Park, Hermosillo, Sonora, Mexico

³ Kharkov National Automobile and Highway University,

Petrovsky-st., 25, 61003, Kharkov, Ukraine, e-mail: vera-tyrsa@yandex.ru

Abstract- The new design creation of Technical vision system for any automatic mobile object is offered. The new technical means for “technical vision system” realization are proposed. The mathematical apparatus for processing the digital information inside system, and also for determination of distances and angular measures in offered system are resulted. Conclusions under clause reflect questions of possible areas of practical use of the developed automatic navigation system.

Keywords: navigation, laser scanning, artificial vision.

TASK INTRODUCTION

For successful automatic navigation [1-7] of mobile transport object on terrain it is necessary to have an opportunity: to receive the information about a surface on which moves Mobile Robot (MR); to find out on it obstacles, to classify them (the elementary types - a ledge or a hollow); to measure distances up to them and to estimate their sizes.

Thus, to execute MR navigation, the solution of two technical problems is necessary: 1) TVS technical design and simulation, and 2) mathematical formalism for data processing creation [8,9]. That is made in the present work.

SYSTEM FUNCTION DESCRIPTION.

TVS represents laser –angle – distance - measuring system located in the upper forward part of MR (fig. 1). TVS contains a rather high-power laser with a collimator. The laser and the collimator are installed in own laser positioning system (PL) (fig.2a, fig.1b). PL is on one end of a horizontal bar b and has its step drive, which on a command from the onboard computer can turn PL in a horizontal plane at each for one angle pitch.

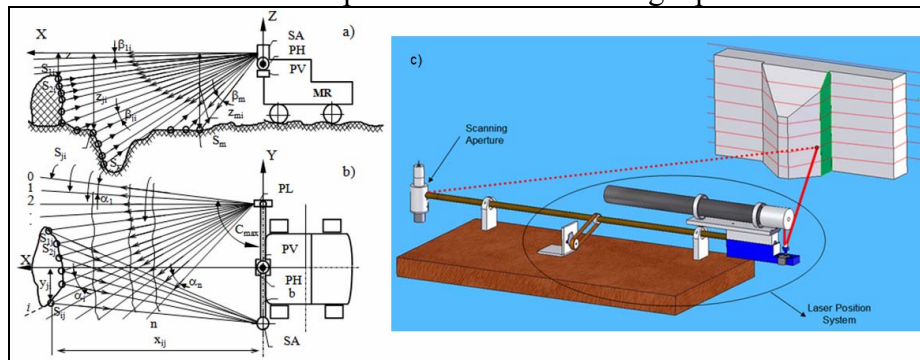


Fig. 1. Basic elements and position of TVS on Mobile Robot.

On the other end of the bar is located a scanning aperture (SA), fig. 2b. The SA axle is perpendicular to a bar and plane XOY. The bar b is installed by its middle part in its own positioning system, containing horizontal (PH) and vertical (PV) step drives (fig. 1a).

TVS works as follows. By the command from the computer the bar is installed so that the SA rotation axis stands in such way that the rotation axis SA becomes perpendicular to plane XOY of TVS reference system. PL puts the collimated laser in an extreme right position. The axis of the collimator then takes extreme top position (above the horizon). The laser and the SA are switched on. SA is rotated by the electromotor EM. At each SA turn a laser ray should it hit an obstacle, is reflected with it (point S_{ij}) and returns to mirror M (fig. 2b). At the moment when three objects: the point of reflection S_{ij} , the perpendicular to mirror M and the vertical axis of SA - hit their common plane, perpendicular to plane XOY while SA is rotating, an optical signal, having traveled a path "S_{ij} - mirror M - objective O - optical channel OC - photoreceiver PR", makes an electrical stop signal. A start signal is formed by SA by means of a zero-sensor (installed on a bar b axis).

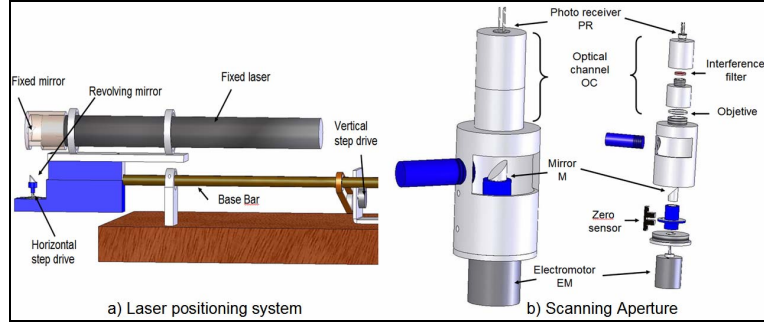


Fig 2. TVS components.

In the figure 3, the laser triangulation technique is shown. For this, it is necessary to know some angles. A related angle $C_{ij} = C_{\max} - \sum_{i=1}^i \alpha_i$, where $C_{\max}$ – is an initial angle of PL position and α_i is a horizontal step angle of PL position. The arrival angle $B_{ij} = 2\pi \cdot N_{Bij} / N_{2\pi l}$ where N_{Bij} and $N_{2\pi l}$ are the related codes with the arrival time of the reflected ray S_{ij} and the time of a complete turn of the SA, respectively. Another important angle is a summatory of vertical step drive angle β_{mi} .

For each scanning point, these angles are obtained, which are stored on the onboard computer memory to be processed. Using the theorem of sinus as well as trigonometric relations for a triangle represented on fig.3, it is possible to find the formula for calculating sloping distances d_{ij} from basis b up to points highlighted by the laser:

$$d_{ij} = a[(\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}) / (\sin(180^\circ - [B_{ij} + C_{ij}]))] \quad (1)$$

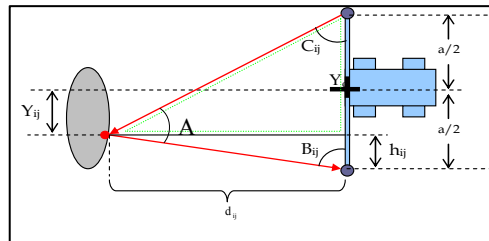


Fig. 3. Laser triangulation technique.

Where a - is constant distance between rotation axes of PL and SA. Using value of angles B_{ij} , C_{ij} , $\sum_{j=1}^j \beta_j$, and basis a , it is possible to calculate the cartesian coordinates by each of the laser-highlighted points, in reference system OXYZ TVS by the following formulas:

$$x_{ij} = a \cdot \{(\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cos \sum_{j=1}^j \beta_j) / (\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})])\} \quad (2)$$

$$y_{ij} = -a \cdot [(1/2) + [(\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}) / (\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})])]] \quad (3)$$

$$z_{ij} = a \cdot [(\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \sin \sum_{j=1}^j \beta_j) / (\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})])]] \quad (4)$$

Thus, the onboard computer with the help of TVS provides digital map-description of the terrain in a MR sector of view in an actual time scale.

CONCLUSIONS

1. The offered TVS completely solve a two-fold problem of MR navigation: it allows to search space in front of the robot and to locate a direction to a robot's initial position.
2. No neuronous superfast computers are required to identify sample in a front of MR.
3. TVS represents the realization of an idea of a computer vision in the form of a analogue-digital model of space in front of the robot. This model can be easily transformed by computer means into an image, suitable for a human-operator to percept.
4. TVS and CCD can mutually complement each other.
5. Simulation of some processes inside proposed TVS shows that it completely possible to produce this system on the modern level of technology in industrial form.

REFERENCES

47. www.darpa.mil/ato/programs/TMR/index.html.
48. Nishide, K., Hanawa, M., Kondo, T., "Automatic position findings of vehicle by means of laser", Robotics and Automation. Proceedings. April, 1986 IEEE International Conference on, Vol.3 p. 1343 – 1348.
49. Fuchs, E. "Multidimensional laser scanning system to test new concepts in underwater imaging", Oceans '04. MTS/IEEE Techno-Ocean '04, Vol. 3, p. 1224 – 1228. November, 2004.
50. Bor-Tow Chen; Wen-Shiou Lou; Chia-Chen Chen; Hsien-Chang Lin, "A 3D scanning system based on low-occlusion approach", 3-D Digital Imaging and Modeling, 1999. Proceedings. Second International Conference on, 1999, p. 506 – 515.
51. Goto, Y., Stentz, A., "Mobile Robot Navigation: The CMU System," IEEE Expert, Vol. 2, No. 4, Winter, 1987.
52. McTamane, L.S., "Mobile Robots: Real-Time Intelligent Control," IEEE Expert, Vol. 2, No. 4, Winter, 1987.
53. Hebert, M., Krotkov, E., "3D Measurements from Imaging Laser Radars," Image and Vision Computing, Vol. 10, No. 3, April, 1992.
54. Douglas C. Montgomery, George C. Runger, "Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería", McGRAW-HILL, México, 1996, 910 p.
55. Claire L. Wyatt. Electro-optical system design. ISBN 0-07-072184. McGraw-Hill: New York-London-Mexico, 1991, - 343p.

Possible Practical Applications of Precise Optical Scanning

O. Sergiyenko
Engineering Institute,
Autonomous University of Baja
California,
Calle de la Normal S/N, col.
Insurgentes, Mexicali, Baja
California, México.
e-mail:
srgnk@iing.mx1.uabc.mx

M. Rivas López
Universidad Politécnica de
Baja California, México.

I. Rendón López
Departamento de Electrónica
y Automatización
Universidad Tecnológica de
Hermosillo, Sonora, México

V. Tyrsa
Universidad Politécnica de Baja
California, México

L. Burtseva
Engineering Institute,
Autonomous University of
Baja California,
Calle de la Normal S/N,
col. Insurgentes, Mexicali,
Baja California, México.

D. Hernández Balbuena
Engineering Institute,
Autonomous University of
Baja California,
Calle de la Normal S/N,
col. Insurgentes, Mexicali,
Baja California, México.

Abstract— During the last years many approaches for contact-free measurement techniques for object surfaces and approaches for 3d object recognition have been proposed; but often they still require complex and expensive equipment. Not least due to the rapidly increasing number of efficient 3d hard- and software system components, alternative low cost solutions are in great demand. We propose such a low-cost system for 3d data acquisition and fast surface registration by digitized points Cartesian coordinates matrix keeping. There is presented two examples of practical application of the passive optical scanning aperture under proposition. □

Key word— Passive scanning, health monitoring, robot navigation, laser, uncertainty

I. INTRODUCTION

The optical scanning is very common method for fast, safe and cheap information obtaining. This kind of information collection has many practical applications because of a lot of experience and strong theoretical backgrounds. But on the other hands, some of the optical fundamentals put rigorous limits for universal optical scanners. In this paper we'll present a new passive optical scanning method and equipment which permits a multifunctional use with simple according to certain practical task by basic working parameters changing.

A. Large civil structures health Monitoring

Civil infrastructures include various units and systems such as buildings, bridges, dams of hydroelectric plants, offshore platforms, transportation systems and communication systems. Significant amount of expenditures and long time periods are necessary for a society to build up its infrastructure systems; indeed, any advanced society has already put enormous effort toward this goal. The continued performance of these infrastructure units and systems is vital to our human and economic activities. Even a short-term malfunction affects the society tremendously [1, 2].

The built environment supported by infrastructures is an advantage if they are well maintained and properly operated. However, if they are degraded by improper maintenance, they can be a big debt to the society. To prevent this, it is absolutely necessary to develop maintenance technology for inspection, monitoring, repair, rebuilding and even financial planning. Structural health monitoring is one of the important components in the maintenance technology for civil infrastructures, and until now, some methods of structural monitoring have been used successfully and newly proposed methods offer the possibility of extending applications and improving efficiency.

Damage in a structure generally causes a local increase in flexibility, which depends on the extent of the damage. Currents methods of damage detection include visual inspections, classical non destructive techniques (NDT) and

vibration/modal-based methods [1-3]. The majority of NDT techniques are based on regular ground inspections which are time consuming and thus expensive. Typical NDT methods for damage evaluation include: sonic, ultrasonic, acoustic-ultrasonic, acoustic emissions, pulse-echo, x-ray imaging, ground penetrating radar (GPR), and dye penetrate for crack determination [4].

Global Positioning System (GPS) technology and the use of Pseudo-Satellites has been widely used for monitoring the deformation of civil structures, but cannot be used when the signals are completely blocked by obstacles, natural and man-made, in addition to the high cost of receivers and pseudo satellites [5].

Recent advances in the development of new techniques it involves the use of embedded smart sensor and actuator technology for reduce the need for visual inspection to assess structural integrity and mitigate potential risk in large civil structures such as highways, bridges and buildings. These sensors and actuators are typically made up of a variety of materials including piezoelectric, shape memory alloy, magneto-astrictive, electro-rheological and magneto-rheological fluids and fiber optic sensors. These materials can typically be embedded into the host matrix material of the structure to either excite or measure its state [6, 7].

Today's bridges and roads do not have "intelligence" built in, so they cannot take advantage of the benefits of the advancing technologies available for structural health monitoring. They are also in a poor state of repair due to inadequate maintenance, excess loading (relative to their original design and expected usage), and adverse environmental conditions (salt, acid rain, etc.).

In this paper, the design and the potential of the passive optical scanning aperture in deformation monitoring of civil structures are discussed. It is based on an optical exploration of luminous reference points previously fixed to the civil structure, measuring its coordinates periodically to determine, based on a historical information data base, the damage level of the structure. The most important technical part of this innovation and its operation principle and general design are shown in section 2.

B. Vision system for mobile robot navigation.

Position determination for a mobile robot and the ability to measure surfaces and objects in 3D is an important part of autonomous navigation and obstacle detection, quarry mapping, landfill surveying, and hazardous environment surveying. In many cases, dead reckoning is insufficient because it leads to large inaccuracies over time. Beacon and landmark-based estimators require the emplacement of beacons and the presence of natural or man-made structure respectively in the environment [8]. A significant number

use landmark recognition, either extracting relevant natural features (corners, objects, etc.) using a camera or identifying prelocated beacons using both a camera and an optical scanner. Because image processing consumes long time and positioning accuracy, cannot satisfy the autonomous navigation in many cases. Major drawbacks of beacon-based navigation are that the beacons must be placed within range and must be appropriately configured in the robot work space.

The **GPS** based navigation for autonomous land vehicles has the capabilities to determine the locations of vehicles basing on satellites. Although commercial DGPS (Differential **GPS**) service increases the accuracy to several meters, it is still not sufficient for autonomous driving. It is well known that with the different type of **GPS** implementations we can obtain position fixes with errors of the order of 2cm to 100m. Nevertheless this accuracy cannot be guarantee all the time in most working environment where partial satellite occlusion and multipath effects can prevent normal **GPS** receiver operation [10]. Environmental sensors, such as 3D scanning laser rangefinder, ultrasonic environmental sensors, are also used.

Given the current state-of-the art [13-15] we believe that a 3-D laser scanner would be the best choice for building 3-D maps. However, 3-D scanners are expensive for most mobile robot applications and many are not fast enough for map building in real time on a fast-moving vehicle, due to the relatively slow vertical scan. A cost-effective alternative for 3-D mapping is to mount a 2-D laser scanner on the front-top of a mobile robot. During motion the fanning beam of the scanner sweeps over the terrain in front of the robot, effectively creating a 3-D map.

Triangulation-based laser range finders and light-stripping techniques are well-known since more than twenty years. Beside other active techniques – like structured light, coded light, time of flight, etc. – laser range scanners are commonly used for contact-less measuring of surfaces and 3d scenes in a wide range of applications. Most commercial laser scan systems use a camera and a laser beam or laser plane. The surface recovery is based on triangulation, i.e. the intersection of the illuminating laser beam and the rays projected back to the camera [12]. Expensive high-precision actuators are often used for rotating/translating the laser plane or for rotating/translating the object.

We have designed scanning vision system that overcomes these limitations and provides a system that will meet the existing demand for more advanced mobile vehicle navigation. It has been developed for visual inspection tasks in both indoor and outdoor environments. The offered Passive Optical Scanning system, that along with a Laser Positioning System, allows to obtain three dimensional information of possible obstacles in front of a robot mobile and it can takes decisions and makes tasks of automatic navigation. The POS system does not require new elements and

devices and can be designed on the basis of items currently in full-scale production.

This paper focuses on some of the design and applications issues of the passive optical scanning aperture in detail. The paper considers potential applications.

II. PROBLEM STATEMENT

The base to solve the tasks of navigation and civil structures monitoring, is the creation of the passive optical scanning system (POS) (fig. 1). The POS must be fixed, and is compound of a fixed assembly to support and to align the electro-optical elements of the system. A double convex lens, a interference filter, and a micro rod of 45 degrees cylindrical mirror are used like optical elements. The mirror is mounted on the shaft of a DC motor that causes that it turns the mirror on his vertical axis. It has two sensors, an opto-switch to indicate the starting point of the turn of the mirror (START signal) and photodiode to detect light emission points (STOP signal).

The main task of the POS is to make a search in the horizontal plane of light emission points S_{ij} that they are within its field of view. These emission points can be fixed previously on a study surface or to be reflection points of light on a surface. The POS works in the following way: The mirror turns at constant speed and whenever it passes over an initial reference point, a START signal is generated, beginning the count pulses of a reference signal with high frequency and constant f_0 , until the moment when the scanning plane will coincide with emitting point S_{ij} . In this case the scanning plane we mean the plane formed by two intersected straight lines: motor rotation axis and the gravitational force line projection to the plane of mirror. When the point S_{ij} belong to this imaginable plane can be formed the STOP pulse. Only at this short moment when the check point S_{ij} coincides with the scanning plane exist the physical possibility to transmit a certain part of a light energy emitted by point S_{ij} . When that happens, the ray caught by the mirror is reflected with same angle with which it arrived, towards the double convex lens. And it passes through the interference filter until arriving to the photo detector, generating a STOP signal. In another case, if during a complete turn of the mirror an emitted ray of light was not detected, then the counter of f_0 pulses it will be reset.

$$B_i = 2\pi \cdot N_{Bi} / N_{2\pi l} \quad (1)$$

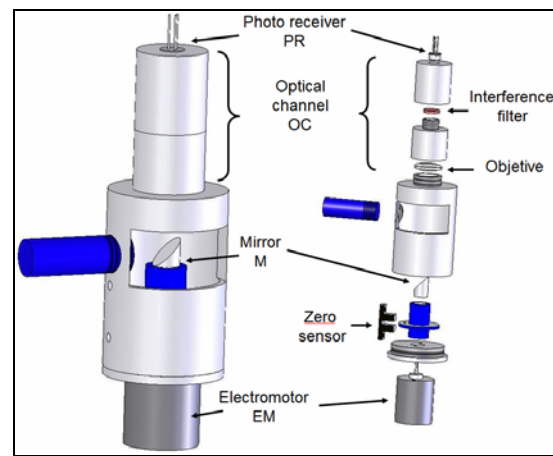
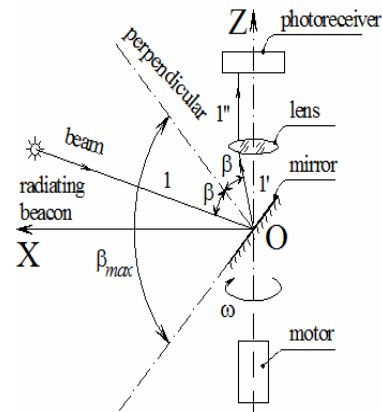


Fig. 1. In this process we can find the horizontal coincidence angle B_i between START signal and STOP signal.

N_{Bi} it corresponds to the number of f_0 pulses between START-STOP signals, and $N_{2\pi l}$ it is the number of f_0 pulses in a complete turn of the mirror. These codes depend on the motor speed rotation (ω) and f_0 frequency [16].

III. THE MONITORING OF CIVIL STRUCTURES

One of the possible applications of the POS is the health of civil structures engineering monitoring. As example we can see the bridge of figure 2. It is necessary to install Radiating Beacons (RB) on the surface of the structure with the same height h_i . The distance l_i between each RB is measured during the installation. In order to measure the horizontal and vertical displacements of each RB, two POS are installed, one POS to measure horizontal angles (HPOS)

with vertical axis rotation and other POS to measure elevation angles (VPOS) with Horizontal axis rotation.

Then the following expression is valid for each RB_i when deformation does not exist,

$$\frac{H-h}{l_i} = \tan(\frac{\pi}{2} - \beta_i) \quad (2)$$

When there is deformation with magnitude Δh_i in the position of point RB_i , the measured angle by the pos $\Delta \beta_i$ will change in magnitude $\Delta \beta_i$ and the expression (2) would be in the following form,

$$\frac{H - h \pm \Delta h}{l_i} = \tan(\frac{\pi}{2} - \beta_i \pm \Delta\beta_i) \quad (3)$$

Therefore:

$$\Delta h_i = (H - h) - l_i \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta_i \pm \Delta\beta_i\right) \quad (4)$$

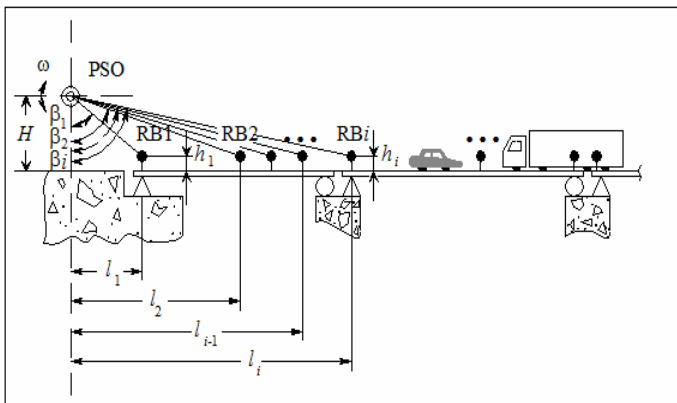


Fig. 2 Horizontal POS placement for bridge monitoring.

In this case, the system does not to be affected by the vibrations of the structure. The rotation velocity of the POS it's fixed based on the natural vibration frequency of the monitoring structure and on the distance "POS – structure", to be able to observe abnormal distortions.

Fig.3 shows the placement of two vertical POSs for the arch dam monitoring of a hydroelectric power station. The POSs measure in pairs the horizontal angles α_{1i} and α_{2i} between the base line AB and the RB_i. The length of the base line D and the Cartesian coordinates of the POS are previously determined by known geodetic methods.

The angles $\angle RB_i$ are calculated with the following equation.

$$\angle \text{RB}_i = 180^\circ - (\alpha_{1i} + \alpha_{2i}) \quad (5)$$

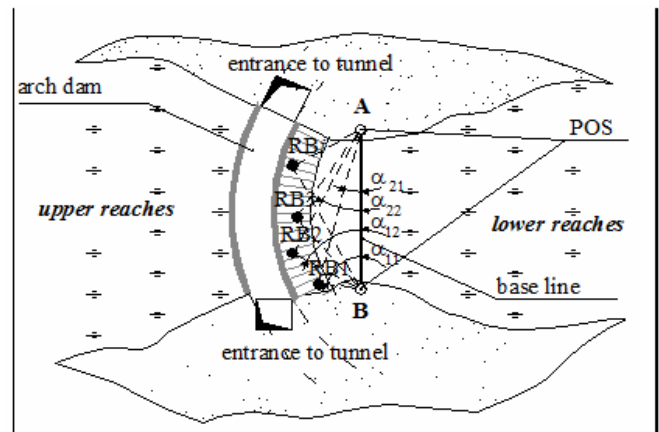


Fig.3. Placement of two vertical POSs for arch dam monitoring.

According to the sine theorem we find the triangles sides with vertex A, B, RB_i and the x_i , y_i Cartesian coordinates of the points RB_i. If there are changes in RB_i coordinates, then changes in angles α_{1i} and α_{2i} would be registered, which would indicate dam deformation.

In a similar manner is installed the POS system for tunnel monitoring. In extended tunnels several functionally connected POS can be placed along its axis.

IV. SCANNING VISION SYSTEM.

The Scanning Vision system is another application of a POS. In this manner, only is necessary installing one POS with a scanning laser position system (LPS).

Figure 4 shows a simple diagram of a triangulation scanner. The laser beam—reflected from a mirror in the LPS — is projected on the object. The diffusely reflected light is collected by the POS, if laser spots are projected.

The laser positioning circuitry controls the C_{ij} angle and $\Sigma\beta_i$ elevation angle are known. The angle B_{ij} is determined in the POS measurements. The triangulation distance, the a distance between the POS mirror and the LPS mirror, is also known.

As Figure 4 shows, since all geometric parameters are known, the x, y, z coordinates of the point on the object can be computed in a trigonometric form. If a single laser dot is projected, the system measures the coordinates of just one point of the object [16]. When a laser discrete stripe is projected, all points along the stripe are digitized. The basic triangulation scheme can be enhanced to improve the optical quality and depth of field by simple variation of “motor step size/steps quantity”. It’s easy to provide by software.

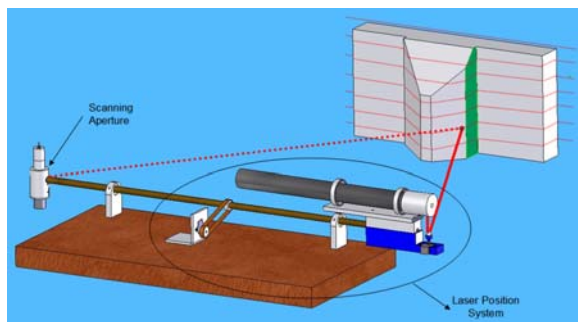


Fig 4. POS and LPS placement for automatic navigation task.

REFERENCES

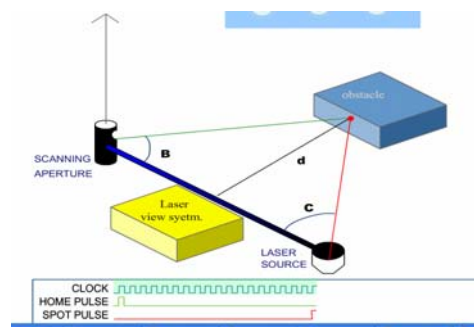
- [1] George James, Randy Mayes, Thomas Came, and Garth Reese. 6-11 Nov 1994, *Damage detection and Health Monitoring of operational structures*. Experimental Structural Dynamics Department. Sandia National Laboratories.
- [2] Conference: American Society of Mechanical Engineers' winter annual meeting, Chicago, IL (United States), Technical report, 10p.
- [3] Scott W. Doebling, Charles R. Farrar, Michael B. Prime, Daniel W. Shevitz. 1996. *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. Report LA-12767-MS, Los Alamos National Laboratory, University of California. Los Alamos, NM, 136p.

If we'll place the fast-operation POS on the autonomous mobile object, such as robot, vehicle, transportation carriage or any military techniques, we can use it like an artificial technical vision system for an automatic navigation task solution.

V. CONCLUSIONS

The offered system has the next advantages over other 3D triangulation scanners:

- It not requires expensive no telescope tubes for scanning ray positioning neither megapixel sensors matrix;
- Uncertainty of angles measurement depend only on well known technical parameters, and can be preliminary fixed according to certain task requirements;



Precise Optical Scanning for practical multi-applications

O. Sergiyenko¹, V. Tyrsa³, D. Hernandez-Balbuena¹, M. Rivas López³, I. Rendón López², L. Devia Cruz¹

¹Engineering Institute, Autonomous University of Baja California, ²Technologic University of Hermosillo,

³Polytechnic University of Baja California, México. *srgnk@iing.mx, uabc.mx*

Abstract- At last decade many approaches for non-contact measurement techniques for object surfaces and approaches for 3D object recognition have been proposed; but often they still require complex and expensive equipment. Not least due to the rapidly increasing number of efficient 3D hardware and software system components, alternative low cost solutions are in great demand. We propose such a low-cost system for 3D data acquisition and fast surface registration by digitized points Cartesian coordinates matrix keeping. There is presented two examples of practical application of the passive optical scanning aperture under proposition.

I. INTRODUCTION

A very common method for fast, safe and cheap information obtaining, is optical scanning. This kind of information collection has many practical applications because of a lot of experience and strong theoretical backgrounds. But on the other hands, some of the optical fundamentals put rigorous limits for universal optical scanners. In this paper we will present a new passive optical scanning method and equipment which permits a multifunctional use with simple according to certain practical task by basic working parameters changing.

A. Civil structures health Monitoring

Large civil infrastructures include various units and systems such as buildings, bridges, dams of hydroelectric plants, offshore platforms, transportation systems and communication systems. Significant amount of expenditures and long time periods are necessary for a society to build up its infrastructure systems; indeed, any advanced society has already put enormous effort toward this goal. The continued performance of these infrastructure units and systems is vital to our human and economic activities. Even a short-term malfunction affects the society tremendously [1, 2].

The built environment supported by infrastructures is an advantage if they are well maintained and properly operated. However, if they are degraded by improper maintenance, they can be a big debt to the society. To prevent this, it is absolutely necessary to develop maintenance technology for inspection, monitoring, repair, rebuilding and even financial planning. Structural health monitoring is one of the important components in the maintenance technology for civil infrastructures, and until now, some methods of structural monitoring have been used successfully and newly proposed

methods offer the possibility of extending applications and improving efficiency.

Damage in a structure generally causes a local increase in flexibility, which depends on the extent of the damage. Currents methods of damage detection include visual inspections, classical non destructive techniques (NDT) and vibration/modal-based methods [1-3]. The majority of NDT techniques are based on regular ground inspections which are time consuming and thus expensive. Typical NDT methods for damage evaluation include: sonic, ultrasonic, acoustic-ultrasonic, acoustic emissions, pulse-echo, x-ray imaging, ground penetrating radar (GPR), and dye penetrant for crack determination [4].

Global Positioning System (GPS) technology and the use of Pseudo-Satellites has been widely used for monitoring the deformation of civil structures, but cannot be used when the signals are completely blocked by obstacles, natural and man-made, in addition to the high cost of receivers and pseudo satellites [5].

Recent advances in the development of new techniques it involves the use of embedded smart sensor and actuator technology for reduce the need for visual inspection to assess structural integrity and mitigate potential risk in large civil structures such as highways, bridges and buildings. These sensors and actuators are typically made up of a variety of materials including piezoelectric, shape memory alloy, magneto-strictive, electro-rheological and magneto-rheological fluids and fiber optic sensors. These materials can typically be embedded into the host matrix material of the structure to either excite or measure its state [6, 7].

Today's bridges and roads do not have "intelligence" built in, so they cannot take advantage of the benefits of the advancing technologies available for structural health monitoring. They are also in a poor state of repair due to inadequate maintenance, excess loading (relative to their original design and expected usage), and adverse environmental conditions (salt, acid rain, etc.).

In this paper, the design and the potential of the passive optical scanning aperture in deformation monitoring of civil structures are discussed. It is based on an optical exploration of luminous reference points previously fixed to the civil structure, measuring its coordinates periodically to determine, based on a historical information data base, the damage level of the structure. The most important technical part of this innovation and its operation principle and general design are shown in section 2.

B. Machine vision system for robot navigation

Position determination for a mobile robot and the ability to measure surfaces and objects in 3D is an important part of autonomous navigation and obstacle detection, quarry mapping, landfill surveying, and hazardous environment surveying. In many cases, dead reckoning is insufficient because it leads to large inaccuracies over time. Beacon- and landmark-based estimators require the emplacement of beacons and the presence of natural or man-made structure respectively in the environment [8]. A significant number use landmark recognition, either extracting relevant natural features (corners, objects, etc.) using a camera or identifying prelocated beacons using both a camera and an optical scanner. Because image processing consumes long time and positioning accuracy, cannot satisfy the autonomous navigation in many cases. Major drawbacks of beacon-based navigation are that the beacons must be placed within range and must be appropriately configured in the robot work space.

The GPS based navigation for autonomous land vehicles has the capabilities to determine the locations of vehicles basing on satellites. Although commercial DGPS (Differential GPS) service increases the accuracy to several meters, it is still not sufficient for autonomous driving. It is well known that with the different type of GPS implementations we can obtain position fixes with errors of the order of 2cm to 100m. Nevertheless this accuracy cannot be guarantee all the time in most working environment where partial satellite occlusion and multipath effects can prevent normal GPS receiver operation [10]. Environmental sensors, such as 3D scanning laser rangefinder, ultrasonic environmental sensors, are also used.

Given the current state-of-the art [13-15] we believe that a 3-D laser scanner would be the best choice for building 3-D maps. However, 3-D scanners are expensive for most mobile robot applications and many are not fast enough for map building in real time on a fast-moving vehicle, due to the relatively slow vertical scan. A cost-effective alternative for 3-D mapping is to mount a 2-D laser scanner on the front-top of a mobile robot. During motion the fanning beam of the scanner sweeps over the terrain in front of the robot, effectively creating a 3-D map.

Triangulation-based laser range finders and light-striping techniques are well-known since more than twenty years. Beside other active techniques – like structured light, coded light, time of flight, etc. – laser range scanners are commonly used for contact-less measuring of surfaces and 3d scenes in a wide range of applications. Most commercial laser scan systems use a camera and a laser beam or laser plane. The surface recovery is based on triangulation, i.e. the intersection of the illuminating laser beam and the rays projected back to the camera [12]. Expensive high-precision actuators are often used for rotating/translating the laser plane or for rotating/translating the object.

We have designed scanning vision system that overcomes these limitations and provides a system that will meet the existing demand for more advanced mobile vehicle

navigation. It has been developed for visual inspection tasks in both indoor and outdoor environments. The offered Passive Optical Scanning system, that along with a Laser Positioning System, allows to obtain three dimensional information of possible obstacles in front of a robot mobile and it can takes decisions and makes tasks of automatic navigation. The POS system does not require new elements and devices and can be designed on the basis of items currently in full-scale production.

This paper focuses on some of the design and applications issues of the passive optical scanning aperture in detail. The paper considers potential applications.

II. PROBLEM STATEMENT

The base to solve the tasks of navigation and civil structures monitoring, is the creation of the passive optical scanning system (POS) (Fig. 1). The POS must be fixed, and is compound of a fixed assembly to support and to align the electro-optical elements of the system. A double convex lens, a interference filter, and a micro rod of 45 degrees cylindrical mirror are used like optical elements. The mirror is mounted on the shaft of a DC motor that causes that it turns the mirror on his vertical axis. It has two sensors, an opto-switch to indicate the starting point of the turn of the mirror (START signal) and photodiode to detect light emission points (STOP signal).

The main task of the POS is to make a search in the horizontal plane of light emission points S_{ij} that they are within its field of view. These emission points can be fixed previously on a study surface or to be reflection points of light on a surface. The POS works in the following way: The mirror turns at constant speed and whenever it it passes over an initial reference point, a START signal is generated, beginning the count pulses of a reference signal with high frequency and constant f_o , until the moment when the scanning plane will coincide with emitting point S_{ij} . In this case the scanning plane we mean the plane formed by two intersected straight lines: motor rotation axis and the gravitational force line projection to the plane of mirror. When the point S_{ij} belong to this imaginable plane can be formed the STOP pulse. Only at this short moment when the check point S_{ij} coincides with the scanning plane exist the physical possibility to transmit a certain part of a light energy emitted by point S_{ij} . When that happens, the ray caught by the mirror is reflected with same angle with which it arrived, towards the double convex lens. And it passes through the interference filter until arriving to the photo detector, generating a STOP signal. In another case, if during a complete turn of the mirror an emitted ray of light was not detected, then the counter of f_o pulses it will be reset.

In this process we can find the horizontal coincidence angle B_i between START signal and STOP signal,

$$B_i = 2\pi \cdot N_{Bi} / N_{2\pi l} \quad (1)$$

N_{Bi} it corresponds to the number of f_o pulses between START-STOP signals, and $N_{2\pi l}$ it is the number of f_o pulses in a complete turn of the mirror. These codes depend on the motor speed rotation (ω) and f_o frequency [16].

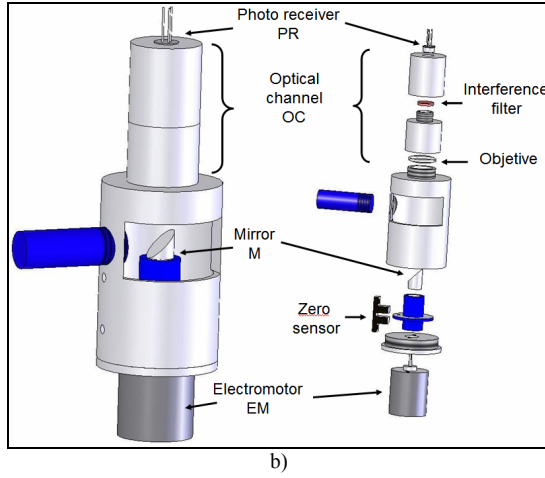
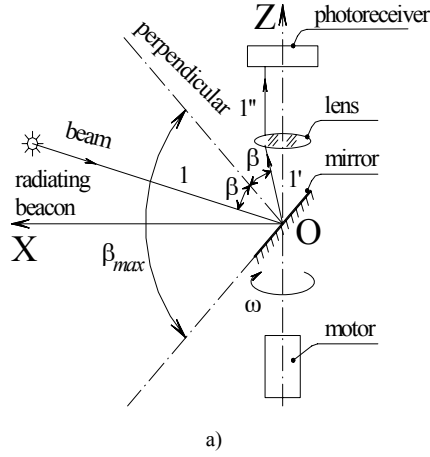


Fig. 1. Passive scanning aperture. a) functioning principle, b) general design.

III. MONITORING OF CIVIL STRUCTURESFUL

One of the possible applications of the POS is the health of civil structures engineering monitoring. As example we can

see the bridge of Figure 2. It is necessary to install Radiating Beacons (RB) on the surface of the structure with the same height h_i . The distance l_i between each RB is measured during the installation. In order to measure the horizontal and vertical displacements of each RB, two POS are installed, one POS to measure horizontal angles (HPOS) with vertical axis rotation and other POS to measure elevation angles (VPOS) with Horizontal axis rotation.

Then the following expression is valid for each RB_i when deformation does not exist,

$$\frac{H-h}{l_i} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta_i\right) \quad (2)$$

When there is deformation with magnitude Δh_i in the position of point RB_i , the measured angle by the pos $\Delta\beta_i$ will change in magnitude $\Delta\beta_i$ and the expression (2) would be in the following form,

$$\frac{H-h \pm \Delta h}{l_i} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta_i \pm \Delta\beta_i\right) \quad (3)$$

Therefore:

$$\Delta h_i = (H-h) - l_i \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta_i \pm \Delta\beta_i\right) \quad (4)$$

In this case, the system does not to be affected by the vibrations of the structure. The rotation velocity of the POS it's fixed based on the natural vibration frequency of the monitoring structure and on the distance "POS – structure", to be able to observe abnormal distortions.

Fig.3 shows the placement of two vertical POSs for the arch dam monitoring of a hydroelectric power station. The POSs measure in pairs the horizontal angles α_{1i} and α_{2i} between the base line AB and the RB_i . The length of the base line D and the Cartesian coordinates of the POS are previously determined by known geodetic methods.

The angles $\angle RB_i$ are calculated with the following equation.

$$\angle RB_i = 180^\circ - (\alpha_{1i} + \alpha_{2i}) \quad (5)$$

According the sine theorem we find the triangles sides with vertex A, B, RB_i and the x_i , y_i Cartesian coordinates of the

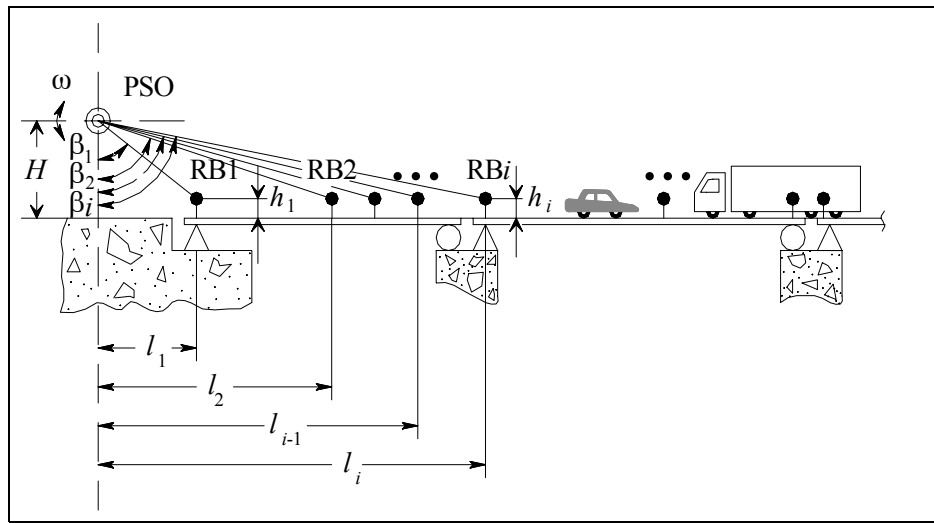


Fig. 2. Horizontal POS placement for bridge monitoring.

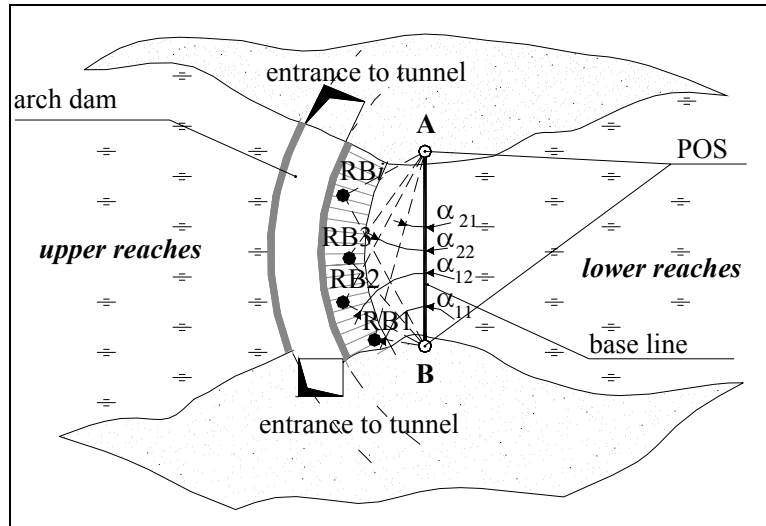


Fig.3. Placement of two vertical POSs for arch dam monitoring.

points RB_i . If there are changes in RB_i coordinates, then changes in angles α_{1i} and α_{2i} would be registered, which would indicate dam deformation.

In a similar manner is installed the POS system for tunnel monitoring. In extended tunnels several functionally connected POS can be placed along its axis.

IV. SCANNING VISION SYSTEM

The Scanning Vision system is another application of a POS. In this manner, only is necessary installing one POS with a scanning laser position system (LPS).

Figure 4 shows a simple diagram of a triangulation scanner. The laser beam—reflected from a mirror in the LPS—is projected on the object. The diffusely reflected light is collected by the POS, if laser spots are projected.

The laser positioning circuitry controls the C_{ij} angle and $\Sigma\beta_i$ elevation angle are known. The angle B_{ij} is determined in the POS measurements. The triangulation distance, the a distance between the POS mirror and the LPS mirror, is also known.

As Figure 4 shows, since all geometric parameters are known, the x, y, z coordinates of the point on the object can be computed in a trigonometric form. If a single laser dot is

projected, the system measures the coordinates of just one point of the object [16]. When a laser discrete stripe is projected, all points along the stripe are digitized. The basic triangulation scheme can be enhanced to improve the optical quality and depth of field by simple variation of “motor step size/steps quantity”. It’s easy to provide by software.

If we’ll place the fast-operation POS on the autonomous mobile object, such as robot, vehicle, transportation carriage or any military techniques, we can use it like an artificial technical vision system for an automatic navigation task solution.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

Practical working capacity of the given method has been checked out on a scanning aperture prototype, with preliminary experimentations. This experimentation was made using a movable light source, varying its position on a table with grid-scale, in which was situated a network with 45 designated points (See figure 5). The points were chosen according to the detection pattern of the system within a maximum range of 1 m. The separation distance between each point is of 20 cm in coordinate X and Y, with an error of

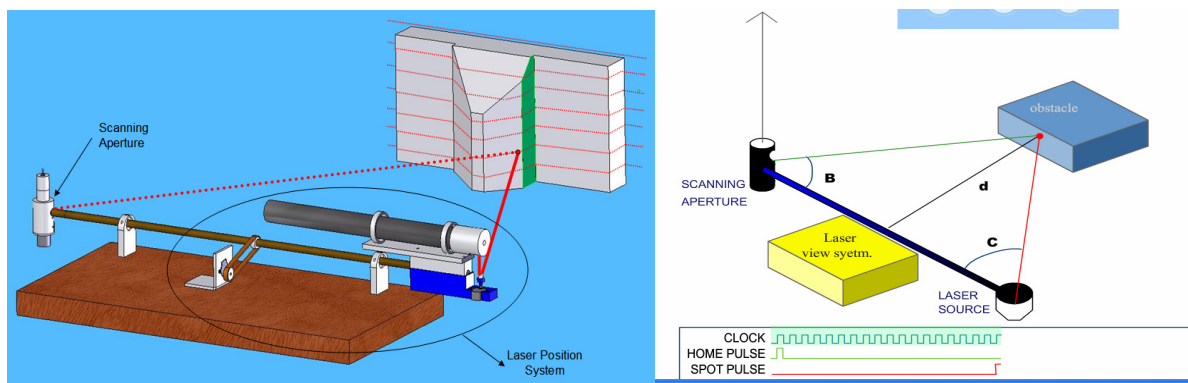


Fig 4. POS and LPS placement for automatic navigation task.

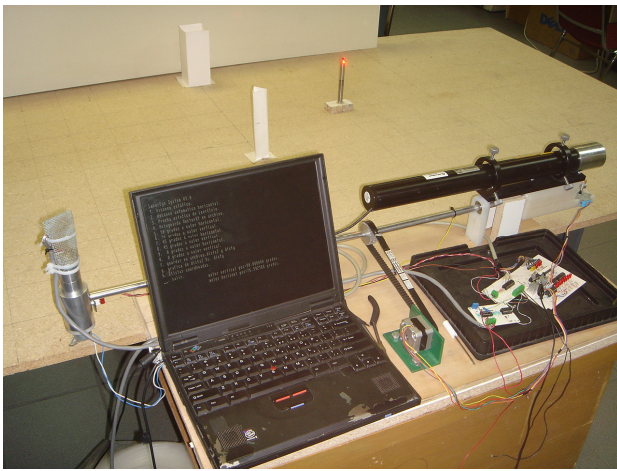
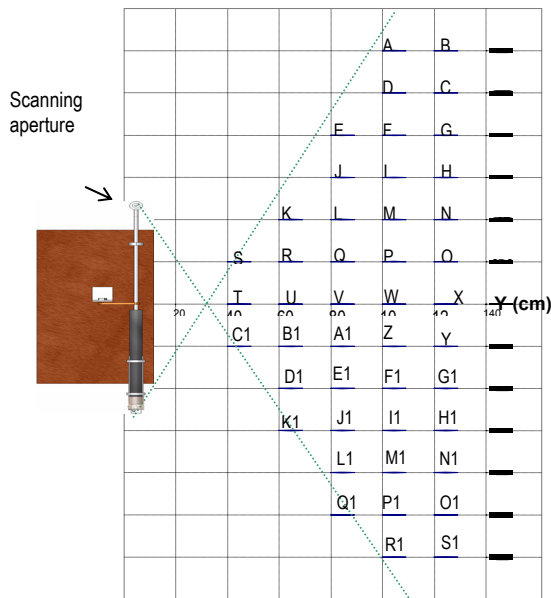


Fig.5. EBs' and POS positioning on the experimental table with grid-scale.

± 0.1 cm. The light source used in the experiment, is a regular incandescent automobile lamp of 12 volts DC. Also the prototype gives the possibility to highlight same points with laser ray by 20mW laser (JDS Uniphase, model 1136P). The lamp was located in each point of the network, where 10 optical scannings were made. An average of the reception angle for each point was obtained (see table 1). Additionally, the value of the emission angle (angle C) for each point in test was obtained using trigonometrical formalism in [16, p.342].

Using the value of angle C, the final coordinates X and Y that describe the experimental position of each point, were obtained. Each point coordinate value has an measurement error. This error must due to many causes, but mainly due to the errors in reflection angle measurement at optical aperture.

Principle known causes of error are detected:

- Instability of motor speed in optical aperture.
- Electrical signal center shifting caused by low operating velocity.
- Improper calibration of reference instrument.

All these causes are been taking to account in the present process of a second prototype design.

Table 1. Experimental results.

Test Point	Theoretical Value				Measured Value				Relative Error [%] (offset)
	X (m)	Y (m)	B (°)	C (°)	X(m)	Y(m)	B (°)	C (°)	
A	100	120	124.99	30.47	111.94	140.3	128.89	30.47	3.12
B	120	120	120.26	35.22	139.01	146.93	124.89	35.22	3.85
C	120	100	112.62	38.66	126.53	108.16	114.69	38.66	1.83
D	100	100	116.57	33.69	104.91	107.37	118.67	33.69	1.81
E	80	80	110.56	31.61	81.2	81.949	111.48	31.61	0.83
F	100	80	106.70	37.57	102.73	83.555	108.09	37.57	1.30
G	120	80	104.04	42.71	123.21	83.475	105.2	42.71	1.12
H	120	60	94.76	47.49	120.52	60.481	94.97	47.49	0.22
I	100	60	95.71	42.27	101.36	61.499	96.472	42.27	0.80
J	80	60	97.13	36.03	79.405	59.182	96.596	36.03	0.54
K	60	40	80.54	33.69	58.935	38.403	78.868	33.69	2.07
L	80	40	82.87	41.63	79.567	39.513	82.492	41.63	0.46
M	100	40	84.29	48.01	100.17	40.157	84.388	48.01	0.12
N	120	40	85.24	53.13	120.67	40.499	85.498	53.13	0.31
O	120	20	75.96	59.74	122.59	21.509	76.916	59.74	1.25
P	100	20	73.30	55.01	99.755	19.829	73.172	55.01	0.18
Q	80	20	69.44	48.81	78.538	18.721	68.284	48.81	1.67
R	60	20	63.43	40.60	58.791	18.59	61.886	40.60	2.44
S	40	20	53.13	29.74	39.652	19.391	52.334	29.74	1.50
T	40	0	38.66	38.66	41.083	1.3538	40.182	38.66	3.94
U	60	0	50.19	50.19	60.67	0.5579	50.822	50.19	1.25
V	80	0	57.99	57.99	79.392	-0.3799	57.602	57.99	0.68
W	100	0	63.43	63.43	99.259	-0.3703	63.094	63.43	0.54
X	120	0	67.38	67.38	119.63	-0.1522	67.256	67.38	0.18
Y	120	-20	59.74	75.96	121.09	-19.729	60.064	75.96	0.54
Z	100	-20	55.01	73.30	98.417	-20.475	54.394	73.30	1.12
A1	80	-20	48.81	69.44	77.312	-21.008	47.434	69.44	2.83
B1	60	-20	40.60	63.43	59.276	-20.362	40.112	63.43	1.21
C1	40	-20	29.74	53.13	41.172	-19.121	30.78	53.13	3.48
D1	60	-40	33.69	80.54	62.278	-39.62	34.796	80.54	3.28
E1	80	-40	41.63	82.87	82.325	-39.709	42.542	82.87	2.18
F1	100	-40	48.01	84.29	103.12	-39.688	48.986	84.29	2.03
G1	120	-40	53.13	85.24	123.5	-39.708	54.006	85.24	1.65
H1	120	-60	47.49	94.76	119.04	-59.92	47.282	94.76	0.44
I1	100	-60	42.27	95.71	96.858	-59.686	41.446	95.71	1.96
J1	80	-60	36.03	97.13	79.77	-59.971	35.956	97.13	0.20
K1	60	-60	28.61	99.46	63.354	-60.559	29.814	99.46	4.21
L1	80	-80	31.61	110.56	83.619	-81.357	32.48	110.56	2.76
M1	100	-80	37.57	106.70	98.923	-79.677	37.338	106.70	0.61
N1	120	-80	42.71	104.04	119.63	-79.908	42.642	104.04	0.16
O1	120	-100	38.66	112.62	123.77	-101.57	39.234	112.62	1.49
P1	100	-100	33.69	116.57	96.833	-98.416	33.122	116.57	1.69
Q1	80	-100	28.07	122.01	82.59	-101.62	28.578	122.01	1.80
R1	100	-120	30.47	124.99	102.2	-121.54	30.786	124.99	1.05
S1	120	-120	35.22	120.26	115.43	-117.33	34.598	120.26	1.76

Basing in data analysis is possible to determine a zone in the Table 1 where the obtained data is more accurate. It is

shown on a Fig.6. All the experiments were carried out not less at 95% confidence level. But in the Fig.5 are presented real points and measured points, and it is evident that appears two zones of different accuracy in this measurement. Most exact data was obtained in frontal zone, where the experimental data's have an error less than in the zones nearby edge. Thus, the zone of more accurate measurement from the system can be known.

In general behavior of uncertainty repeats graphic on figure 6 in [17, p.1765], however accuracy nearby edge is advanced. Also accuracy in a central part of angle of view is 2-7 times better in a different checked points respect to [17] for example.

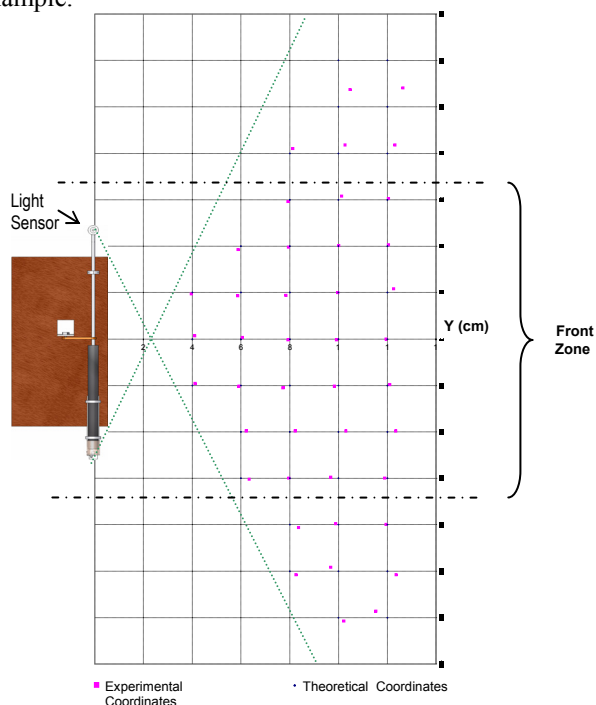


Fig.6. Measured coordinates points positioning on the grid-scale.

VI. CONCLUSIONS

The offered system has the next advantages over other 3D triangulation scanners:

- It not requires expensive no telescope tubes for scanning ray positioning neither megapixel sensors matrix;
- Uncertainty of angles measurement depend only on well known technical parameters, and can be preliminary fixed according to certain task requirements.

REFERENCES

- [1] George James, Randy Mayes, Thomas Came, and Garth Reese. 6-11 Nov 1994, *Damage detection and Health Monitoring of operational structures*. Experimental Structural Dynamics Department. Sandia National Laboratories. Conference: American Society of Mechanical Engineers' winter annual meeting, Chicago, IL (United States), Technical report, 10p.
- [2] Scott W. Doebling, Charles R. Farrar, Michael B. Prime, Daniel W. Shevitz. 1996. *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. Report LA-12767-MS*, Los Alamos National Laboratory, University of California. Los Alamos, NM, 136p.
- [3] L. Mallet, B. C. Lee, W. J. Staszewski and F. Scarpa. 2004. *Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection*. Smart Material and Structures. Vol.13, p. 261-269.
- [4] Sohn H. et al., 2004. *Review of Structural Health Monitoring Literature from 1996 - 2001. Report LA-13976-MS*, Los Alamos National Laboratory, University of California. Los Alamos, New Mexico.
- [5] Liwen Dai, Jinling Wang, Chris Rizos, Shaowei Han. January, 2002. *Pseudo-Satellite Applications in deformation Monitoring*. GPS Solutions journal. SpringerLink, Volume 5, Number 3, p. 80-87.
- [6] Darryll J. Pines and Philip A. Lovell, 1998. *Conceptual framework of a remote wireless health monitoring system for large civil structures*. Department of Aerospace Engineering, University of Maryland, College Park, MD, USA. Smart Material and Structures journal. 7 p.627-636. Printed in the UK.
- [7] R. C. Tennyson, A. A. Mufti, S. Rizkalla, G. Tadros and B. Benmokrane. 2001. *Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors*. ISIS Canada, A Network of Centres of Excellence, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada. Smart Material and Structures. 10 p.560-573.
- [8] John Hancock, Dirk Langer, Martial Hebert, Ryan Sullivan, Darin Ingimarson, Eric Hoffman, Markus Mettenleiter, Christoph Froehlich. May 1998. *Active Laser Radar For High-Performance Measurements*. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation Leuven, Belgium. P. 1465-1470.
- [9] J. Inigo Thomas, John Oliensis. 1993 *Automatic Position Estimation of a Mobile Robot*. Proceedings of Ninth Conference on Artificial Intelligence for Applications, Orlando, FL, USA, p.438-444.
- [10] Lei Wang, Takashi Emura, and Takashi Ushiwata October 1-3, 2000. *Automatic Guidance of a Vehicle Based on DGPS and a 3D Map*. 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, Dearborn (MI), USA, p.131-136.
- [11] Jose Guivant, Eduardo Nebot, Stefan Baiker. April 2000. *High Accuracy Navigation Using Laser Range Sensors in Outdoor Applications*. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, V.4 San Francisco, CA, p. 3817-3822.
- [12] Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck, and Friedrich M. Wahl. 2006. *Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach*. DAGM, LNCS 4174, p. 718-728, 2006, Springer Berlin Heidelberg.
- [13] A. Wehr, U. Lohr. 1999. *Airborne laser scanning - an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54, Elsevier, p.68-82
- [14] Kenichi Nishide, Moritomo Hanawa and Toshio Kondo. 1986. *Automatic Position Findings of Vehicle By Means of Laser*. IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings, p. 1343-1348.
- [15] Cang Ye and Johann Borenstein. May, 2002. *Characterization of a 2-D Laser Scanner for Mobile Robot Obstacle Negotiation*. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, DC, USA, p.2512-2518.
- [16] Tyrsa V.Ye., Sergiyenko O.Yu., Tyrsa V.V., Bravo M., Devia L., Rendon I., July 20-23, 2006. *Mobile Robot navigation by Laser Scanning Means - 3rd International "Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications CITSA - 2006"*, Volume I, Orlando, Florida, USA, p. 340-345
- [17] D.S. Pierce, T.S. Ng, B.R. Morrison (1992). *A Novel Laser Triangulation Technique for High Precision Distance Measurement*, Proceeding of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol.2, October 1992, Houston USA, pp. 1762-1769