

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA



Diseño de un distanciómetro por enfocamiento electrónico

T E S I S

**que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA**

Javier Rivera Castillo

**DIRECTOR DE TESIS:
Valentin Tyrsa**

MEXICALI, B. C.

ENERO DE 2006

Resumen. En este trabajo se presentan las bases que sustentan la propuesta de un instrumento para medir distancias basado en encontrar, por medio de un barrido de la lente, el punto de máxima energía que incide sobre un fotorreceptor y, en función de esto, calcular la distancia al objeto. Dicho instrumento formaría parte de un sistema de visión técnica (SVT) como auxiliar en la correcta navegación de robots móviles.

Summary. This work deals with the fundamentals of a proposal of an instrument to measure distances based on the finding, by means of a scanning lens, of the maximum energy impinging on a fotoreceptor and, with this information, calculate the distance to the objetc. Such an instrument would be part of a thechnical vision system (TVS) and would be an auxiliar in the correct navigation of mobile robots.

A la memoria de mi padre

Agradecimientos:

A mi madre que nos mantuvo en la lucha por sobrevivir.

A mis hermanos por todo su cariño

A mi actual familia:

Ade

Jesús

Ro

Al pequeño Javier

¿Que seria de la vida sin un faro guía?

Mi mas sincero agradecimiento y admiración a mi director de tesis Dr. Valentin Tyrsa

ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. Introducción.	2
1.1. Antecedentes.	2
1.2. Planteamiento del problema.	4
1.3. Hipótesis.	5
1.4. Objetivo.	7
1.5. Justificación.	7
1.6. Métodos actuales para medir distancias.	8
1.6.1 Distanciómetros electrónicos de láser pulsado.	11
1.6.2 Distanciómetros electrónicos de corrimiento de fase.	11
1.6.3 Distanciómetros electrónicos por triangulación.	11
1.6.4 Cámaras de autoenfoco.	12
1.6.4.1 Cámaras de autoenfoco activo.	12
1.6.4.2 Cámaras de autoenfoco pasivo.	12
1.7. Organización de la tesis.	13
2. Teoría básica.	15
2.1. Funcionamiento del ojo humano.	15
2.1.1. Conversión del panorama 3D en el ojo humano y en la cámara CCD.	17
2.1.2. Medición de longitudes por medio de los ojos humanos.	20
2.1.3. Comparación entre los sistemas de medición del ojo.	22
2.2. Ecuación de la lente delgada.	25
2.3. Detección del foco.	27
2.3.1. Sistema estereoscópico.	27
2.3.2. Estructura a partir del movimiento.	27
2.3.3. Por medio de cintas de luz.	27
2.3.4. Profundidad por enfocamiento.	28
2.3.5. Profundidad por desenfocamiento.	30

3. Propuesta.	32
3.1. Distanciómetro monocular de enfoque.	32
3.2. Análisis para un solo canal.	32
3.2.1. Formación de la señal óptica.	32
3.2.2. Amplitud y frecuencia de barrido.	37
3.2.2.1 Definición de la amplitud del barrido.	37
3.2.2.2 La frecuencia de barrido y los parámetros de tiempo de las señales eléctricas.	40
3.3. Teoría del procesamiento digital de la señal.	43
3.3.1. Elección del punto de fijación de la señal.	43
3.3.2. Modelo discreto de fijación de la señal.	44
3.3.3. Esquema funcional del procesamiento de la señal.	51
3.3.4. Cálculo de la distancia con iluminación solar.	53
3.4. Estimación de la incertidumbre.	56
3.4.1. Incertidumbre.	56
3.4.2. Distribución de probabilidad uniforme o rectangular.	57
3.4.3. Incertidumbre esperada.	60
4. Resultados.	62
4.1. Planeación del experimento.	62
4.2. Programa para calcular las distancias.	63
4.3. Mecanismo.	65
4.4. Circuito electrónico.	69
4.5. Configuración final del experimento.	70
4.6. Análisis de los resultados.	73
4.6.1. Gráficas.	73
4.6.2. Cálculo de medias y media de medias.	74
4.6.3. Cálculo de varianzas.	76
4.6.4. Análisis de los datos.	76
4.6.5. Comparación entre incertidumbres.	78
4.7. Fuentes de error.	80

4.7.1. Error por simplificación de la fórmula.	80
4.7.2. Errores por los lentes.	80
4.7.3. Errores por alineación del sistema óptico.	83
4.7.4. Errores por el mecanismo de posicionamiento.	84
4.7.5. Errores de medición.	84
4.7.6. Errores por procesamiento de datos.	84
4.7.7. Errores por cifras significativas.	84
4.8. Puesta a punto y calibración.	85
4.8.1. Puesta a punto del distanciómetro.	85
4.8.2. Calibración del distanciómetro.	86
5. Conclusiones.	87
5.1 Posibles mejoras al sistema.	87
5.1.1. Velocidad de muestreo.	88
5.2 Propuestas de proyectos a futuro.	90

Apéndices.

- A. Resultados.
- B. Características del fotorreceptor.
- C. Diagrama del circuito amplificador.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura. 1.1. Procesamiento de la información en un robot inteligente.	3
Figura. 1.2. Robot móvil descubriendo obstáculos.	4
Figura. 1.3. Lente simple.	5
Figura. 1.4. Diagrama a bloques del medidor de distancia propuesto.	6
Figura. 2.1. Sección esquemática del ojo.	17
Figura. 2.2. Procedimiento de elaboración tridimensional de la información En el analizador visual.	18
Figura. 2.3. Proceso 2D de cuantización del paisaje en una cámara CCD.	20
Figura. 2.4. Diagrama de rayos para localizar la imagen formada por la lente Delgada.	21
Figura. 2.5. Ilustración gráfica de la relación de la sensibilidad DMF y DB En el ojo del hombre.	23
Figura. 2.6. Formación de la imagen y profundidad por desenfoque.	31
Figura. 3.1 Señal esperada a la salida del amplificador.	33
Figura. 3.2. Principio de funcionamiento del SVT-3D.	39
Figura. 3.3. Diagrama del procesamiento de la señal.	44
Figura. 3.4. Discretización de una señal continua.	46
Figura. 3.5. Los elementos importantes del esquema del procesamiento de Las señales ópticas.	53
Figura. 4.1. Gráfica de “D” contra “d” para un intervalo de “D” de 90 a 100 m.	63
Figura. 4.2. Gráfica de “D” contra “d” para un intervalo de “D” de 1 a 2 m.	64
Figura. 4.3. Mecanismo para el desplazamiento micrométrico y aro para sujetar La lente.	67
Figura. 4.4. Vista lateral del mecanismo anterior.	67
Figura. 4.5. Dos vistas del fotorreceptor y el amplificador.	68
Figura. 4.6. Mismo mecanismo con el fotorreceptor montado.	69
Figura. 4.7. Montaje final después de las mejoras.	71
Figura. 4.8. Otra vista del arreglo para el experimento final.	71
Figura. 4.9. Mecanismo para movimientos micrométricos, lente y fotosensor.	72
Figura. 4.10. Fuente de luz.	72
Figura. 4.11. Aberraciones debidas a la lente.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 2.1. Cálculo de los valores necesarios para la medición de la distancia Por medio del ojo humano.	25
Tabla 4.1. Resultados para “D” entre 90 y 100 m.	64
Tabla 4.2. Resultados para “D” entre 1 y 2 m.	65
Tabla 4.3. Datos del 22 de sep. de 2002 y gráfica correspondiente.	73
Tabla 4.4. Promedios para las diferentes situaciones y su respectiva desviación estándar.	75
Tabla 4.5. Promedios y desviaciones de los resultados finales.	77
Tabla 4.6. Cálculo de “d” para una lente de $f=75$ mm.	85

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Actualmente la mayoría de las industrias hacen uso de la automatización como una parte de la estrategia para mantenerse en un nivel competitivo. Así, es posible, encontrar líneas de producción totalmente automatizadas. Sin embargo, en el nivel superior de esta rama, tenemos la robótica, en cuya cúspide se encuentran los robots inteligentes (RI) que facilitan el trabajo del hombre haciendo tareas, algunas veces repetitivas, otras veces peligrosas y en otras ocasiones, tareas imposibles para los seres humanos. El rasgo característico de los robots es que, teniendo el intelecto artificial (la computadora), reciben y procesan la información de manera similar a como lo hace el ser humano. En la Fig. 1.1 se muestra, de manera sencilla, como la información sobre los parámetros que definen el estado del espacio ambiental se convierten en señales eléctricas por medio de sensores. Estas señales eléctricas se convierten a señales binarias por medio de los convertidores analógicos a digital (A-D) y, de esta manera, son ingresadas a la computadora del sistema automático. Después de ser procesadas por la computadora mediante programas especiales, se generan las acciones de control para los mecanismos del robot.

Sin embargo, en algunas ocasiones, es necesario tener un robot autónomo. En estos casos se hace imprescindible equiparlos con un sistema de navegación que les permita desplazarse y evitar los obstáculos con toda facilidad. La navegación de los robots autónomos es un problema común en el desarrollo de robots móviles [1]. El trabajo de la presente tesis va encaminado, precisamente, a facilitar el movimiento de los robots autónomos por medio de un sistema de visión técnica en tercera dimensión (SVT-3D) basado en lo que llamaremos un distanciómetro por enfoque electrónico. A continuación presentamos el funcionamiento, a bloques de un robot autónomo auxiliándonos de la Fig. 1.2, en donde se muestra la posición del robot móvil, con una velocidad V , enfrente de un

obstáculo que él descubre por medio de los sensores de posición y distancias propuestos y esto permite que el mismo tome acciones al respecto. Las distancias D_s las determina el distanciómetro instalado y, por medio de éstas se calculan las distancias D_k , sobre el eje X desde el robot hasta los objetos. [2]

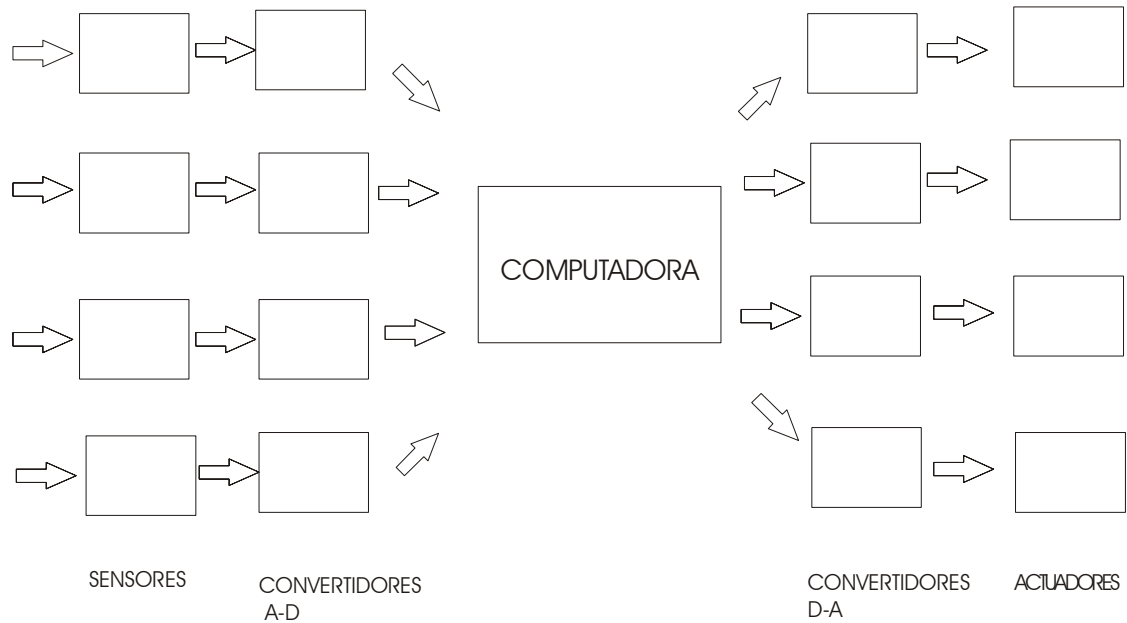


Fig. 1.1. Procesamiento de la información en un robot inteligente.

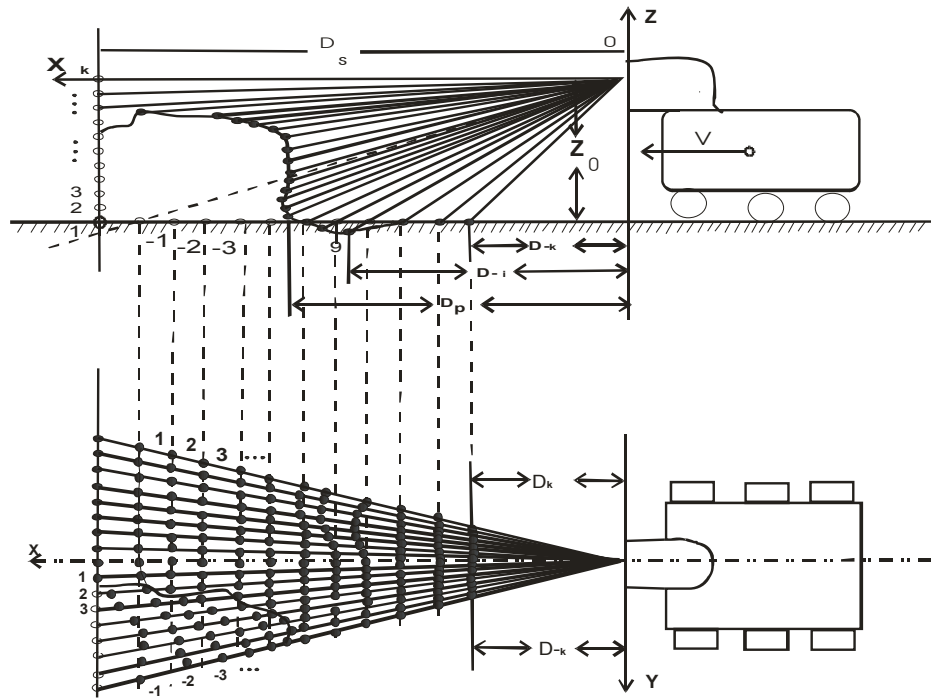


Fig. 1.2. Robot móvil descubriendo obstáculos.

1.2. Planteamiento del problema

Hasta finales del siglo XX la ciencia ha creado sensores para la recepción de, prácticamente todas las magnitudes conocidas, excepto los sensores de las percepciones humanas, como el sentido del gusto (dulce, amargo, etc.). Sin embargo, aún no tenemos un sistema tridimensional (3D) para el sistema de visión técnica (SVT) para la recepción, por ejemplo, del panorama enfrente del robot móvil (RM). Las investigaciones para la creación del SVT-3D se llevan a cabo actualmente en muchas universidades del mundo pero no existe todavía el sistema de visión 3D para la computadora que se asemeje a la vista del ser humano. Esta falta de investigaciones y publicaciones científicas es lo que ha motivado el inicio de una serie de conferencias sobre sistemas de visión por computadora (ICVS). [3, 5]

Como fundamento del proyecto del sistema de visión técnica SVT-3D propuesto empleamos el funcionamiento del ojo humano. Examinando la construcción del ojo y la estructura del SVT-3D mostraremos que el subsistema principal del SVT-3D es el distanciómetro focal. [4]

1.3. Hipótesis

El principio básico de este trabajo está fundamentado en la bien conocida ecuación de una lente delgada (ecuación 1), la cual relaciona la distancia de la lente al objeto (D), la distancia de la lente a la imagen (d) y la distancia focal de la lente (f). En la Fig. 1.3 se muestra una lente delgada, el objeto y la imagen del mismo, los cuales se relacionan por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D} + \frac{1}{d} \quad (1)$$

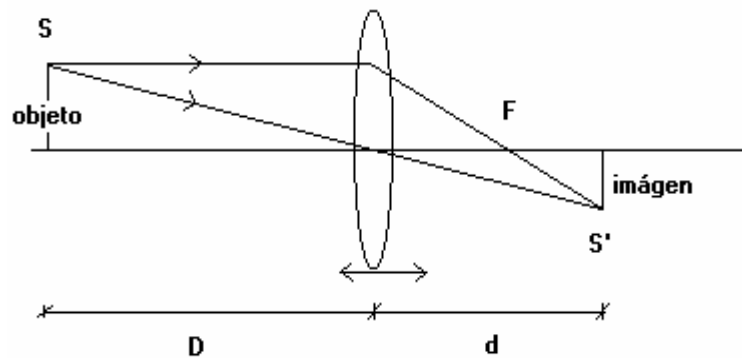


Fig. 1.3 Lente simple

El dispositivo propuesto se puede representar a bloques de la manera como se muestra en la Fig. 1.4. Se puede ver del diagrama a bloques que las partes importantes de este instrumento son la detección del foco y el sistema de control para mover la lente.

En este diagrama la lente es movida por medio de un motor de pasos, hasta que el detector determine que la imagen está en foco. Esto se logra enfocando la imagen de un objeto blanco o negro y encontrando el centro de energía de la señal de salida del detector de foco, según el caso. La distancia “ d ” se puede medir por medio de los pulsos aplicados al motor de pasos o por medio de un micrómetro y, como la lente tiene una distancia focal fija “ f ”, esto nos permite calcular la distancia al objeto “ D ”.

La hipótesis principal de este trabajo es que, implementando el sistema que se muestra en la figura 1.4, tendremos como señal de salida del detector de foco algo similar a una campana de Gauss y, al hacer una serie de mediciones sucesivas, podremos aplicar los principios de la estadística clásica empleada en metrología y reducir la incertidumbre asociada. El funcionamiento se explica de la siguiente manera: la luz del objeto (u) incide sobre la lente deslizante y esto forma la imagen (v) cuya intensidad (I) es medida por el detector de foco y convertida a señal eléctrica para ser procesada por la computadora, la cual controla también el movimiento del mecanismo deslizante.

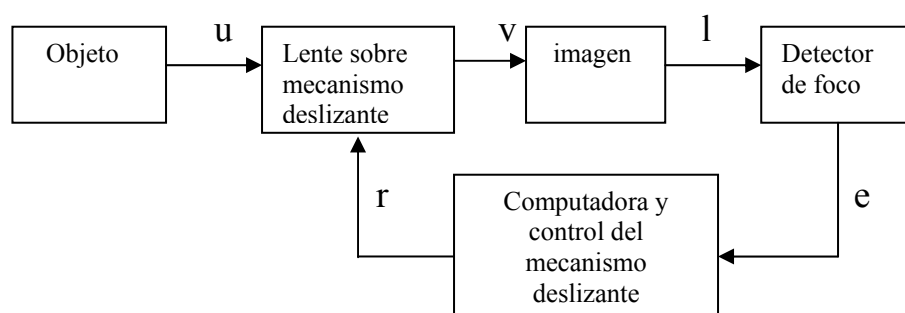


Fig. 1.4 Diagrama a bloques del medidor de distancia propuesto.

1.4. Objetivo

El objetivo de la tesis es: la investigación de los principios de construcción y los parámetros generales del distanciómetro por enfocamiento para el sistema de visión técnica en tercera dimensión (SVT-3D).

1.5. Justificación

La vista del ser humano es una maravilla de la naturaleza; no solo nos permite ver el entorno, sino que también nos permite ver en tercera dimensión. Esto quiere decir que la vista puede hacer una estimación de las distancias a los diferentes objetos que componen el panorama. Esta función la lleva a cabo, básicamente, por medio de dos técnicas: la fisiológica y la psicológica. Dentro de la primera tenemos la acomodación del cristalino, la convergencia, el paralaje binocular y el paralaje por movimiento monocular. Dentro de la Segunda tenemos el tamaño de la imagen retinal, la perspectiva lineal, el gradiente de textura, la superposición, la perspectiva aérea y la de tiras de luz y sombras.

Los sistemas de visión técnicos para tercera dimensión (SVT-3D), es decir, los desarrollados por el hombre, adolecen todavía de algunas fallas y distan mucho de emular el sistema de visión humano. Entre las técnicas más empleadas encontramos, cada una con sus ventajas y desventajas, las siguientes:

- a) Por sombreado
- b) Por textura
- c) Sistemas estereoscópicos
- d) Sistemas por movimiento
- e) Por tiras de luz
- f) Por enfocamiento
- g) Por desenfocamiento

El presente trabajo pretende aportar un método más para la estimación de las distancias a los diferentes objetos en el panorama basándose en la técnica de acomodación del cristalino del sistema de visión humano.

1.6. Métodos actuales para medir distancias.

A través de la historia de la humanidad han existido diferentes métodos para medir las distancias, algunos de mayor exactitud que otros. A continuación se enlistan algunos de éstos en orden creciente de exactitud [6]:

- a) A pasos. Es la manera más rápida y fácil para medir distancias. Sobre el campo se pueden obtener precisiones de $1/100$ y una persona experimentada puede obtener precisiones de hasta $1/200$. Los pasos se pueden contar por medio de registradores operados manualmente o por podómetros atados a alguna pierna. Cuando se miden terrenos con inclinación se deben hacer correcciones sobre la medida. Los principiantes deben, antes de empezar a medir, estandarizar sus pasos caminando sobre superficies niveladas y de distancias conocidas.
- b) Por medio de odómetro. La distancia también puede medirse contando el número de revoluciones que da una rueda y sabiendo el diámetro de la misma como es el caso de los odómetros. Existen odómetros, como en el caso del que se emplea en los automóviles, que alcanzan una resolución de 0,1 millas o kilómetros. Existen odómetros especiales que alcanzan una resolución de hasta 0,01 o 0,002 millas o kilómetros.
- c) Por medios topográficos, es decir por medio de tránsito y estadal. Este método se usa extensivamente, sobre todo, en levantamientos topográficos. La precisión de este método depende del instrumento, el observador, las condiciones atmosféricas y la longitud de la mira. Se pueden obtener por este método precisiones de $1/300$ hasta $1/1000$.

- d) Por cinta métrica. Este método implica la medición directa de la distancia por medio de una cinta que puede ser desde 1 m hasta 300 m de largo. Las graduaciones de la misma pueden llegar hasta los milímetros. La precisión de las distancias medidas por este método dependen del grado de refinamiento con el cual se lleven a cabo. Cuando se llevan a cabo mediciones con cinta con extrema precaución para eliminar o, al menos, minimizar todas las posibles fuentes de error, se pueden obtener precisiones de hasta 1/1 000 000. Cuando se mide sobre terrenos planos se pueden obtener por este método precisiones de 1/3000 hasta 1/5000.
- e) Por distanciómetros electrónicos. Este método, logrado gracias a los avances de la tecnología, nos permite tener mediciones de alta exactitud de una manera sumamente sencilla. Su principio de funcionamiento esta basado en la constante física que es la velocidad de la luz u otras ondas electromagnéticas en el vacío.

Los distanciómetros electrónicos incluyen los instrumentos basados en sistemas electro-ópticos (ondas de luz) y electromagnéticos (microondas). De los primeros existen, básicamente, tres tipos: por medio de láser pulsado; por medio de corrimiento de fase y por triangulación.

El principio básico de los equipos electro-ópticos es la determinación indirecta del tiempo requerido por un rayo de luz en recorrer la distancia entre los dos puntos. El instrumento en un punto emite un rayo de luz modulado hacia un reflector pasivo colocado en el otro punto. El reflector que actúa como espejo, refleja el pulso de luz hacia el equipo, en donde se hace una comparación de fase entre los pulsos emitidos y los reflejados. Para la determinación de la fase de los pulsos emitidos, generalmente y debido al ruido existente, es necesario calcular el centro de energía del pulso por medio de la siguiente fórmula:

$$\xi = \frac{\sum_{a \leq k \leq b} k[f(k)]}{\sum_{a \leq k \leq b} [f(k)]} \quad (2)$$

En donde ξ es la abcisa del centro de energía del pulso emitido y $k = 1, 2, 3, \dots, n$.

La velocidad de la luz es la base para la determinación de la distancia como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3)$$

en donde λ es la longitud de onda de la luz emitida

c es la velocidad de la luz en el vacío y

ν es la frecuencia de la luz emitida

En estos equipos se requiere una línea de vista clara y el máximo rango para los primeros equipos es de 3 a 5 km de día y de 25 a 30 km de noche, dependiendo de las condiciones atmosféricas. Cuando se requiere un alcance mayor se aumenta la superficie reflejante para aumentar la señal. Esto se logra por medio de prismas reflejantes. Encontramos, por ejemplo, que un mismo equipo que tiene un alcance máximo de 9 km con un prisma, alcanza 11 km con tres prismas, 13 km con siete prismas y 14 km con 11 prismas.

Los equipos electromagnéticos emplean la transmisión de microondas de alta frecuencia. Un instrumento de éstos típico consiste de dos equipos intercambiables, uno en cada extremo de la línea que se va a medir. Uno de los equipos envía una señal de microondas, la cual recibe el otro equipo y la retransmite al primero, el cual mide el tiempo que esto requirió. La distancia se calcula en función de la velocidad de las ondas de radio. Sin embargo, no se requiere la visibilidad entre los dos equipos y, por lo tanto, se pueden hacer mediciones bajo condiciones climáticas desfavorables, como, por ejemplo, cuando hay neblina.

1.6.1 Distanciómetros electrónicos de láser pulsado

Estos instrumentos funcionan por medio de un diodo láser infra rojo que emite una radiación pulsada de 904 nm, la cual, de ser reflejada por una superficie gris, permite medir

distancias hasta 600 m. Si la reflectividad del blanco es muy buena, se pueden medir distancias hasta de 1 km. Para distancias por debajo de los 100 m se pueden tener resoluciones de 0,1 m. Para distancias de 100 a 999 m tenemos una resolución de 1 m. La exactitud es de alrededor de 1 m para el rango completo. Se pueden tener velocidades de hasta 15 000 mediciones por segundo.

Existen también en el mercado distanciómetros de rayos láser, infra rojos generalmente, que no requieren prismas reflejantes, sino que su luz es reflejada por cualquier superficie que refleje entre el 4 y el 100% de la luz recibida. La frecuencia más común del láser es de 904 nm y, aunque la energía de pico es alta, la duración de los pulsos es muy corta, de tal manera que la energía promedio es baja y no es suficiente para lastimar la vista. Sin embargo existen también equipos en los que la potencia del láser puede dañar la vista incluso a varios metros de distancia. Estos equipos se emplean para medir distancias de hasta 20 km con una exactitud de ± 5 m.

1.6.2 Distanciómetros electrónicos de corrimiento de fase

Estos instrumentos funcionan bajo el principio de modulación de un rayo láser y el corrimiento de fase asociado a la distancia. El corrimiento de fase se incrementa linealmente con la distancia. Existe el tipo reflex convencional y el de reflejo difuso. La distancia máxima es de 30 m para el de reflejo difuso y de 100 m para el reflex. La velocidad puede llegar a ser de hasta 312 000 mediciones por segundo. La exactitud anda en los 2 mm para los más exactos y 5 cm para los modelos de alta velocidad y baratos.

1.6.3. Distanciómetros electrónicos por triangulación

Estos instrumentos están basados en la triangulación de las distancias midiendo el ángulo de reflexión. Un rayo láser pulsado se envía a la superficie hasta la cual se quiere medir la distancia y la luz reflejada por esa superficie es colimada por un sistema óptico y recolectada por uno o más detectores montados a distancias fijas del láser. El sistema óptico crea imágenes de la mancha del láser sobre las superficies de los detectores y, por medio de esto, se determina la dirección de la luz reflejada. La distancia a la mancha del

láser se obtiene por medio de cálculos geométricos. La exactitud puede llegar a ser, en algunos modelos, de hasta 0,01 % del rango y la velocidad de hasta 500 000 mediciones por segundo.

1.6.4 Cámaras de autoenfoque

En las cámaras fotográficas de autoenfoque lo que tenemos en realidad es una pequeña computadora que activa un motor para mover el lente hacia adentro y hacia fuera hasta obtener la imagen más nítida posible. Básicamente existen dos tipos: activos y pasivos.

1.6.4.1 Cámaras de autenfoque activo

En 1986 Polaroid sacó al mercado una cámara fotográfica que empleaba una especie de sonar para hacer rebotar una onda de sonido de frecuencia ultra alta en el sujeto y escuchar el eco. Con esta información la cámara calculaba el tiempo que le tomaba a la onda de ultrasonido reflejada para llegar a la cámara y ajustaba la posición de la lente de acuerdo a esto. El empleo del ultrasonido tuvo sus desventajas como, por ejemplo, cuando se trataba de tomar fotos través de una ventana el vidrio reflejaba las ondas. Actualmente las cámaras emplean sistemas infra rojos en lugar de ultrasonido para evitar estos problemas. Estos sistemas funcionan bien cuando se toman fotos a una distancia menor a 20 m del sujeto y emplean varios métodos:

- a) triangulación
- b) cantidad de luz reflejada
- c) tiempo

1.6.4.2 Cámaras de autoenfoque pasivo

En las cámaras que emplean sistemas de autoenfoque pasivo la distancia al sujeto se determina por medio de un análisis computacional de la imagen. Generalmente este sistema lo emplean cámaras del tipo “single-lens reflex” o (SLR). Un sensor típico de estas cámaras es un CCD que proporciona información de la imagen a la computadora y ésta aplica algoritmos para determinar el contraste de los elementos de la foto. La CCD es generalmente una del tipo lineal de 100 o 200 píxeles La luz de la imagen llega a la CCD y

la computadora mide los valores de intensidad en cada píxel. Cuando la escena está fuera de foco, la diferencia de intensidad en píxeles contiguos es baja. Entonces la computadora mueve la lente y mide de nuevo la intensidad en los píxeles contiguos y ve si la diferencia en intensidad entre píxeles contiguos mejora o empeora. De esta manera la computadora busca hasta encontrar la máxima diferencia entre píxeles contiguos, lo que corresponde a una imagen enfocada. El sistema de autoenfoque pasivo requiere de escenas con luz y buen contraste, así como de detalles que provean de buen contraste. Con este sistema no existe limitación con respecto a la distancia al sujeto y funciona bien a través de ventanas ya que el sistema ve lo mismo que uno ve.

1.7. Organización de la tesis

Como pudimos ver, este capítulo es una introducción al tema de la tesis en donde, se hace el planteamiento del problema seguido por la correspondiente hipótesis, el objetivo que se persigue y la justificación. También se incluyó una sección en donde se plasman los antecedentes del problema y algunos métodos que se emplean, o se han empleado, para medir distancias.

En el capítulo 2 se plasma la teoría básica necesaria empezando por el funcionamiento del ojo humano y se hace una comparación entre el mismo y la cámara ccd. Así mismo se analiza el sistema que tiene el ojo humano para enfocar ya que es la base de nuestro trabajo. Después se hace un sencillo análisis de la ecuación de la lente delgada seguido de los diferentes métodos que se emplean actualmente para detectar cuando una imagen está en foco sobre los cuales se ha investigado bastante y, aunque las investigaciones al respecto siguen, ya se tienen muchas aplicaciones de estos métodos.

Aunque el presente trabajo pretende aportar algo a los sistemas de visión para robots autónomos, está enfocado sobre el funcionamiento del distanciómetro que es la base de dicho sistema de visión. Por eso en el capítulo 3 se presenta la propuesta desglosando la información para un solo canal. Aquí se presenta el análisis que se hace para la formación de la señal que esperamos encontrar y el procesamiento digital que debe llevar. También en este capítulo se presentan los valores de incertidumbre que esperamos en el sistema.

Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 4 empezando por un sencillo programa que se diseñó inicialmente en matlab para determinar los diferentes valores de las distancias entre la lente y la imagen a partir de las distancias entre la lente y el objeto. A partir de esa información se pudo diseñar y construir el mecanismo que se presenta en ese mismo capítulo y que sirvió para hacer la serie de mediciones requeridas. También se incluye un análisis de los resultados y la comparación entre las incertidumbre teóricas y las obtenidas así como de las posibles fuentes de error.

En el capítulo 5 y último se presentan las conclusiones a las que se llegaron y se hacen propuestas para futuros proyectos de investigación siguiendo sobre este mismo tema.

Capítulo 2

Teoría básica

2.1 Funcionamiento del ojo humano

El ojo humano funciona de manera similar al funcionamiento de una cámara fotográfica, es decir, el ojo normalmente enfoca la luz y produce una imagen nítida sobre la retina. Sin embargo, los mecanismos mediante los cuales el ojo controla la cantidad de luz admitida y los ajustes para producir imágenes enfocadas correctamente son mucho más complejos, intrincados y efectivos que los correspondientes a una cámara fotográfica avanzada. La Fig. 2.1 presenta las partes esenciales del ojo. El funcionamiento del mismo es como sigue: la luz entra a través de una membrana transparente llamada córnea, detrás de la cual hay un líquido claro llamado humor acuoso y pasa por la lente llamado cristalino el cual, en conjunto con la córnea, enfoca la luz hacia la parte posterior del ojo, llamada retina. La mayor parte de la refracción ocurre en la superficie exterior del ojo, donde la córnea está cubierta por una película de lágrimas. Hasta cierto punto, ocurre poca refracción en el cristalino, ya que el humor acuoso en contacto con la lente tiene un índice de refracción promedio cercano al de la lente. El iris, el cual es la parte de color del ojo, es un diafragma muscular que controla el tamaño de la pupila y, por lo tanto, regula la cantidad de luz que entra al ojo. En condiciones de baja luz la pupila se dilata y en condiciones de mucha luz, ésta se contrae. El intervalo del número f del ojo es, aproximadamente, de $f/2,8$ a $f/16$.

La retina está compuesta por millones de receptores sensibles llamados bastoncillos y conos, los cuales, cuando son estimulados por la luz, envían impulsos al cerebro a través del nervio óptico, donde se perciben como imágenes.

El ojo enfoca a un objeto determinado mediante la variación de la forma del cristalino plegable mediante un proceso llamado adaptación. Un importante componente en la adaptación es el músculo ciliar, el cual está situado en un círculo alrededor del anillo de

la lente. Unos filamentos delgados llamados zónulas van de este músculo al borde de la lente. Cuando el ojo enfoca un objeto distante, el músculo ciliar se relaja, tensando las zónulas que unen al músculo con el extremo de la lente. La fuerza de las zónulas ocasiona que el lente se aplane y aumente su longitud focal. Para una distancia infinita al objeto, la longitud focal del ojo es igual a la distancia fija entre la lente y la retina, es decir, aproximadamente, 1,7 cm. El ojo enfoca objetos cercanos tensando el músculo ciliar, el cual relaja a las zónulas y éstas hacen que la lente se abulte un poco y que su longitud focal disminuya permitiendo así que la imagen se enfoque sobre la retina. Todos estos ajustes ocurren tan rápidamente que no nos damos cuenta del cambio. En dicho aspecto incluso la cámara electrónica más sofisticada es un juguete comparada en el ojo humano.

La adaptación es limitada debido a que los objetos que están muy cercanos al ojo producen imágenes borrosas. El punto cercano representa la distancia más cercana a la cual la lente del ojo adaptado puede enfocar luz sobre la retina. Tal distancia, por lo común, aumenta con la edad y tiene un valor promedio de 25 cm. Por lo regular, a la edad de 10 años el punto cercano del ojo es de aproximadamente 18 cm. Este aumenta a los 25 cm a los 20 años, a 50 cm a los 40 años y a 500 cm o más a la edad de 60 años. El punto alejado del ojo representa la distancia más larga para la cual la lente del ojo relajado puede enfocar luz sobre la retina. Una persona con visión normal puede ver objetos muy distantes, como la luna y, por ello, tiene un punto lejano cercano al infinito.

Sólo tres tipos de células sensibles al color están presentes en la retina: conos rojos, verdes y azules, llamados así por los picos de los rangos de color a los que responden. Si los conos rojo y verde son estimulados simultáneamente (como sería el caso de luz amarilla incidiendo sobre ellos), el cerebro los interpreta como luz amarilla [7, 8].

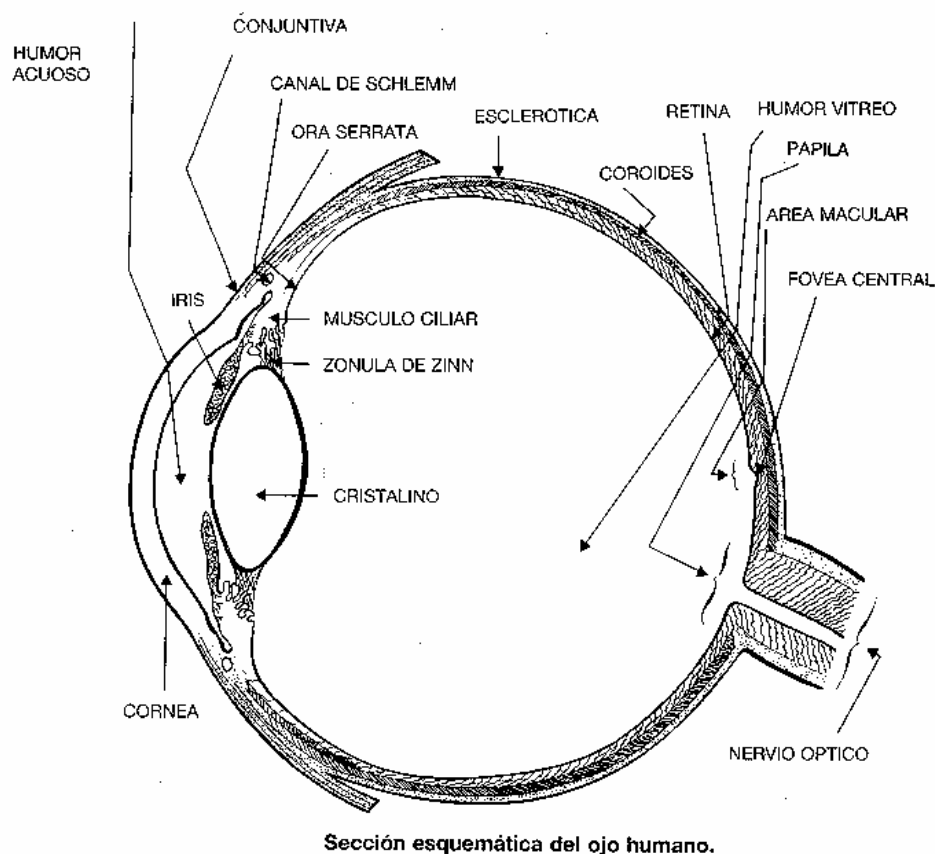


Fig. 2.1. Sección esquemática del ojo humano.

2.1.1 Conversión del panorama 3D en el ojo humano y en la Cámara CCD.

Como vimos en la sección anterior, el ojo humano funciona de manera similar a una cámara fotográfica en donde el panorama en tres dimensiones (panorama 3D) delante de los ojos se proyecta como una imagen esférica al fondo del ojo (la retina) la cual está compuesta por, aproximadamente, 120 millones de receptores llamados bastones y 7 millones receptores llamados conos. Estos son los elementos que poseen la sensibilidad a los tonos blanco– negro y los tonos de colores correspondientemente.

Por medio de estos sensores vivos la imagen se divide en $1,27 \cdot 10^8$ fragmentos (puntos) que, en forma de señales eléctricas, ingresan a la memoria operativa del hombre.

Al mismo tiempo, el analizador visual del hombre determina la distancia hasta cada uno de los puntos. Aquí ocurre el proceso de la recepción, discretización y transformación numérica de la información 3D, como se muestra en la Fig. 2.2.

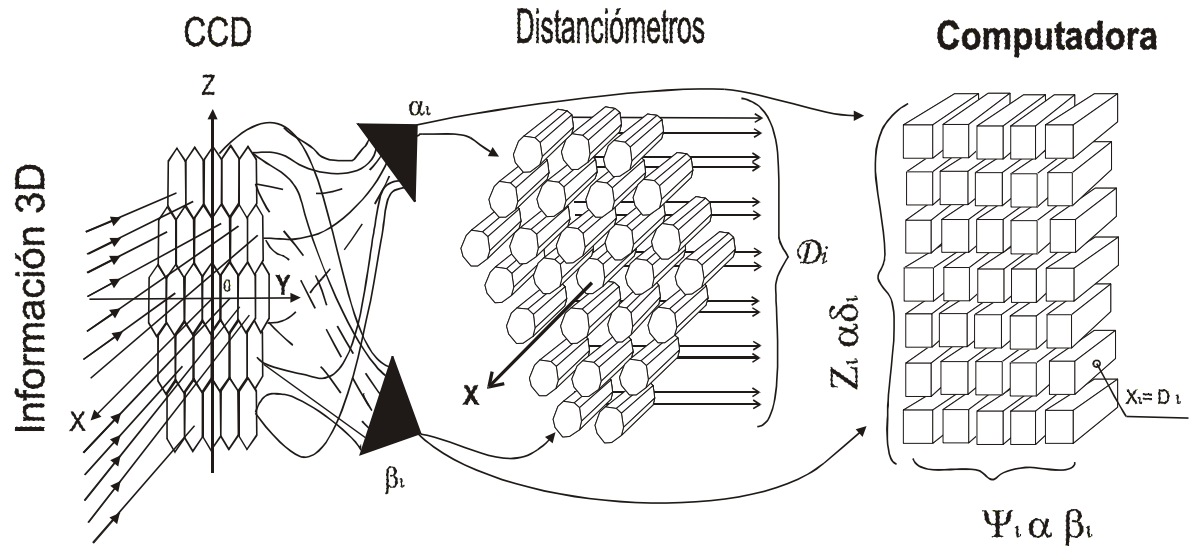


Fig. 2.2. Procedimiento de la elaboración tridimensional de la información en el analizador visual.

La vista de cada ojo tiene un campo asimétrico que, al trazarlos en el plano perpendicular del eje longitudinal del ojo y medirlo en grados, tiene una forma de óvalo incorrecto, ya que se dilata en 102° en la horizontal a los dos lados del eje longitudinal, dando un total de 204 en la horizontal. Por la vertical, el tamaño del óvalo es de 60° hacia arriba y 70° hacia abajo, dando un total es 130° . El campo de la vista binocular tiene una amplitud por la horizontal de 150° y por la vertical de 130° [9]. Uno de los posibles recursos técnicos de la transformación del panorama 3D en el modelo 2D en el presente es la cámara CCD o CCDC, por sus siglas en inglés. Los principales productores de CCD en el mundo son USA, Japón, Inglaterra y Alemania.

Consideraremos el parecido y la diferencia de las CCD con el ojo humano. Las CCD sencillas usan la óptica, que funciona en el área paraxial, donde los ángulos α_i de la deflexión de los rayos del objetivo con respecto al eje longitudinal, tienen cantidades tan

pequeñas, que al expresarlas en radianes, son casi igual a sus senos y sus tangentes, es decir, $\text{sen} \alpha_i \approx \tan \alpha_i \approx \alpha_i$. Si, por ejemplo, el ángulo de la vista de la CCD $2\alpha_{\max} = 10^\circ$, entonces el ángulo $\alpha_{\max}$ se distingue del valor de los senos y de la tangente en la cuarta posición después del punto decimal, entonces se distingue menos del 0.5%. Esta circunstancia simplifica el procesamiento de la información.

En la Fig. 2.3 se presentan los elementos importantes de una CCD. Detrás del objetivo, en el plano de la imagen se ubica la rejilla, que consiste de $2j \times 2k$ de fotorreceptores (FR), cuyas entradas perciben la irradiación de los elementos del panorama. Las rejillas de las CCD que se emplean con más frecuencias contienen $1K \times 1K$ elementos. Para los procesos de alta velocidad, las CCD tienen 128×128 de los FR. En pocos casos se usan rejillas de $4K \times 4K \approx 1,68 \cdot 10^7$ píxeles (FR), cantidad que se aproxima al número de fotorreceptores en el ojo humano. El tamaño del píxel es de 7 a 20 μm . A la rejilla del FR corresponde el ángulo sólido de la vista Ω_v , el cual se recorta en el panorama por la pirámide $OPRST$. El objetivo de la CCD se ubica dentro del sistema rectángulo de Decart de las coordenados, cuyo eje OX coincide con el eje óptico del objetivo. La rejilla, junto con el FR se ubica dentro del sistema condicional rectángulo de Decart de las coordenados $O'X'Y'Z'$.

El punto A (X_A, Y_A, Z_A) en la sección $PRST$ del ángulo sólido Ω_v se representa inequívocamente por el punto A' (X'_A, Y'_A, Z'_A) en el sistema de las coordenados $O'X'Y'Z'$. Al cambiar las coordenadas Y'_A, Z'_A en el sistema de las coordenados $O'X'Y'Z'$ por los números j, k de los FR y al poner $\alpha_A = mj, \beta_A = mk$, obtenemos:

$$X_A = D_A; \quad (2.1)$$

$$Y_A = mj \cdot D_A, \quad Z_A = mk \cdot D_A. \quad (2.2)$$

Aquí $m = \text{tg } \alpha_A / j = \text{tg } \beta_A / k$, o, por causa de par axial del sistema, $m = \alpha_A / j_A = \beta_A / k_A$, donde m es el coeficiente escalar. Entonces, el uso de la CCD con la rejilla de los FR

permite quantizar el ángulo sólido delante de SVT por $2j \times 2k$ cuantos. El problema consiste ahora en la medición de las longitudes.

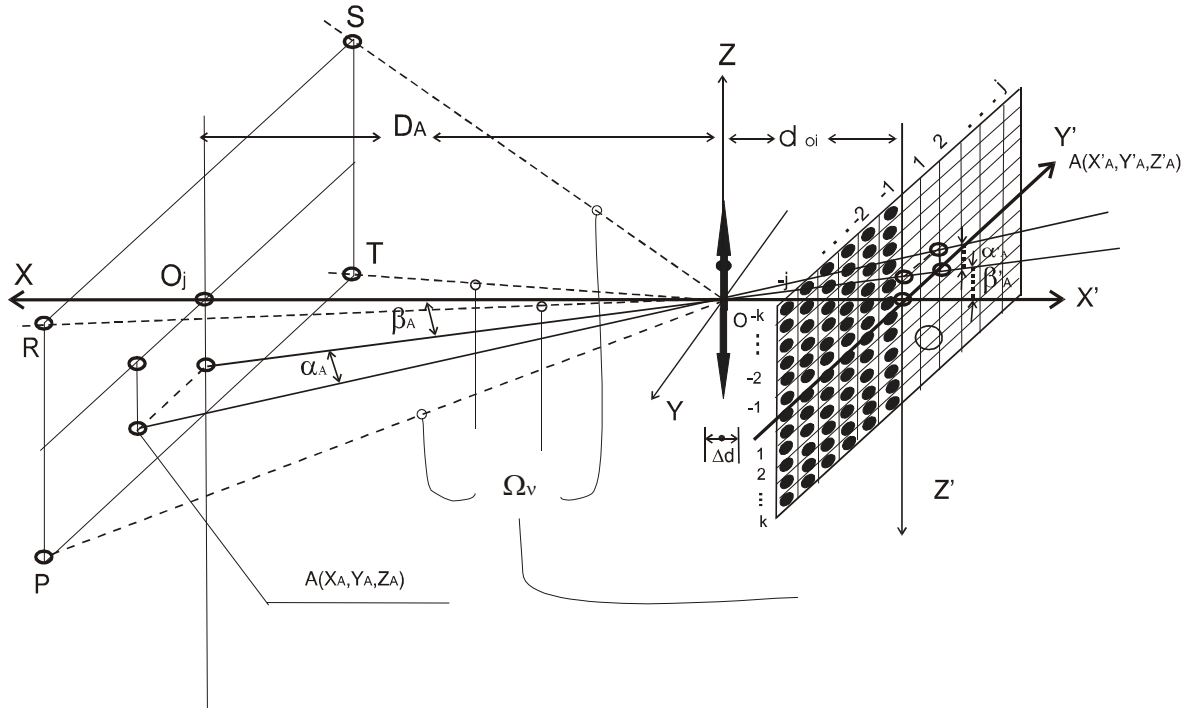


Fig. 2.3. Proceso 2D de cuantización del paisaje en una cámara CCD.

2.1.2 Medición de longitudes por medio de los ojos humanos.

Una de las funciones del ojo es la acomodación, por medio de la cual el cristalino enfoca la imagen en la retina. El cristalino parece una lente biconvexa, cuya ecuación es:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}, \quad (2.3)$$

donde d y D son las distancias, por el eje de la lente, desde su centro hasta la imagen, y desde su centro hasta el objeto representado respectivamente (Fig. 2.4).

De la expresión (2.3) tenemos:

$$D = f \frac{d}{d - f}, \quad (2.4)$$

$$d = f \frac{D}{D - f}. \quad (2.5)$$

Entonces, si conocemos d y la distancia focal f podemos calcular D .

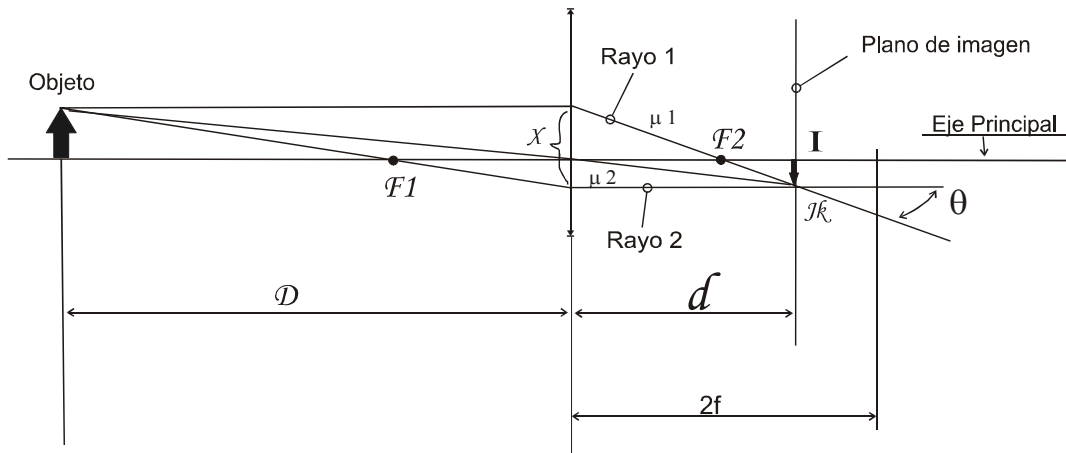


Fig. 2.4. Diagrama de rayos para localizar la imagen formada por la lente delgada

El reenfoque de la lente cambia la longitud de d y por su magnitud se busca D . El diapasón ($d - f$) se puede graduar en unidades de longitud, como lo hecho por ejemplo en la banda del objetivo de la cámara fotográfica. En éste caso el aparato de enfoque se convierte en un distanciómetro monocular enfocado (DME).

Cuando el hombre pone su mirada en alguna dirección, toda la distancia D , a lo largo de la cual se ubica el panorama considerado, se verifica por el enfoque, es decir, el enfoque de la imagen es equivalente al barrido del trozo d y por éste al barrido de la longitud D .

Si el hombre concentra su atención en algún objeto del panorama, entonces en este objeto coinciden los ejes de los dos ojos. Por la magnitud de la base B entre los centros de

los giros de los ojos y el ángulo de la vuelta de los ejes α respectivamente de la base, se define la distancia D hasta el objeto por la formula:

$$D = \frac{1}{2} B \cdot \operatorname{tg} \alpha . \quad (2.6)$$

Esta fórmula es correcta cuando el objeto considerado está sobre la perpendicular, orientado el objeto hacia el centro de la base B entre las pupilas de los ejes. Si el objeto está fuera de la perpendicular, la simetría se distorsiona y la formula (2.6) se cambia, pero esto no cambia la esencia del caso. En el caso considerado con los dos ojos se trata del medidor binocular de la distancia (MBD).

2.1.3 Comparación entre los sistemas de medición del ojo.

En el sistema de la vista funcionan dos sistemas de medición de la distancia. Para escoger con objetividad uno de ellos para la realización tecnológica, compararemos un sistema con otro por medio del criterio de sensibilidad, que se usa para valorar los elementos y dispositivos de la automatización. Es sabido, que la sensibilidad es una derivada de la función, que acopla las magnitudes de entrada y de salida. Denotaremos pues la sensibilidad del método binocular por K_α , y monocular por K_f . De las expresiones (2.6) y (2.4) respectivamente sigue:

$$K_\alpha = \frac{\partial D}{\partial \alpha} = B / (2 \cos^2 \alpha), \quad (2.7)$$

$$K_f = \frac{\partial D}{\partial d} = f^2 / (d - f)^2. \quad (2.8)$$

Pondremos $B = 75 \text{ mm}$, $f = 30 \text{ mm}$, que corresponde, aproximadamente, a los parámetros del analizador humano de la vista. Con las magnitudes concretas de la distancia D , encontraremos para estas distancias la proporción:

$$K_{\alpha} / K_f = B (d - f)^2 / (2 f^2 \cos^2 \alpha). \quad (2.10)$$

Calculando K_{α} / K_f definiremos la magnitud d de (2.5), y el ángulo α por la formula $\alpha = \arctg(2B/D)$. Los datos de los cálculos se muestran en la tabla 1 y la curva $K_{\alpha} / K_f = F(D)$ se presenta en la Fig. 2.5. De estos datos se ve claramente que, al comenzar desde una distancia $D = 1 \text{ m}$ y mayores, la sensibilidad del método binocular de la medición es 25 ... 24 veces más alta que la sensibilidad del método binocular. Cuando la distancia de la vista disminuye, aproximadamente desde $D \leq 0,3 \text{ m}$, la curva K_{α} / K_f comienza un aumento abrupto. Con $D = f$ el modelo considerado no funciona, en la expresión (2-5) $d \rightarrow \infty$.

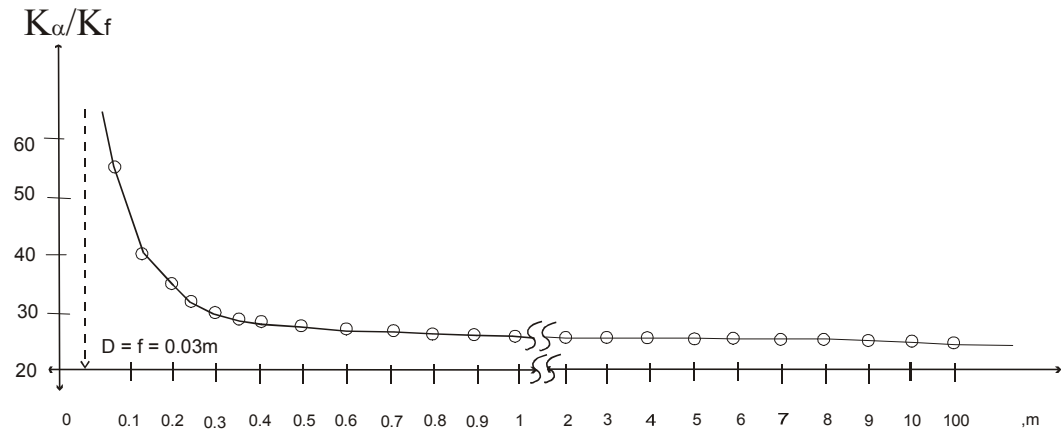


Fig. 2.5. Ilustración gráfica de la relación de la sensibilidad DMF y DB en el ojo del hombre.

De modo experimental está establecido, que la longitud óptima de la vista es la distancia $D \approx 0,3 \text{ m}$. Nuestro análisis lo comprueba. En él se muestra que la distancia $D \approx$

0,3 m es un punto óptimo: en las distancias $D > 0,3$ m la vista sigue empeorando ya que de modo natural se disminuye el ángulo de la vista, por el cual nosotros vemos los objetos lejanos. Es decir, disminuye el criterio objetivo de la calidad de la vista. Con las distancias $D = 0,3$ m crece bruscamente la proporción K_α / K_f , que está asociado con el aumento rápido del ángulo α entre la base y la dirección hacia el objeto. Éste lleva a la incomodidad de los ojos. Es decir, ahora disminuye el criterio del comfort.

A pesar de que la sensibilidad del método binocular de la medición de la distancia es en 24...25 veces más alta que el método monocular, el método binocular funciona en dependencia del monocular. En el analizador humano de la vista, la indicación viene del aparato mental basado en la información creada por la vista monocular de cada uno de los ojos.

Al realizar el método binocular de la medición en el SVT es necesario que: 1) los ejes largos de los monoculares, de los cuales se formó el sistema binocular, la base entre los centros de giro de los monoculares, y el objeto considerado se ubiquen en el mismo plano; 2) los ejes de ambos monoculares enfoquen a un punto común del objeto considerado. Entonces, por las magnitudes de la base y de los ángulos entre la base y los ejes de los monoculares, como ya se marcó antes, se puede definir la distancia hasta el objeto. El punto en la superficie del objetivo debe ser marcado y reconocido por el sistema de la indicación. Éste significa que es difícil de realizar el medidor binocular de la distancia (MBD) que funcione de modo automático. Por esto las investigaciones siguientes se dedican al distanciómetro monocular de enfoque (DME), que al ser multicanal, da la información sobre las distancias para todo el panorama, sin la indicación preliminar.

D (mm)	$d_o = fD/(D-f)$	$\alpha^\circ = \arctg(2D/B)$	$K_\alpha = B/(2\cos^2 \alpha)$	$K_f = f^2/(d_o - f)^2$	K_α / K_f
100	42.85	69.44	304.2	5.44	55.87
150	37.5	75.96	637.5	16	39.84
200	35.29	79.38	1104.2	32.16	34.33
250	34.09	81.47	1704	53.78	31.69
300	33.33	82.88	2438	81	30.09
350	32.81	83.88	3304	113.98	28.99
400	32.43	84.64	4304	152.16	28.28
500	31.92	85.71	6704	245.42	27.314
600	31.58	86.42	9638	360.98	26.7
700	31.34	86.93	13100	498.99	26.25
800	31.17	87.32	17101	658.59	25.97
900	31.03	87.61	21636	841.79	25.7
1000	30.93	87.67	27000	1000	25.54
2000	30.46	88.93	107000	4300	24.75
3000	30.3	89.27	240000	9800	24.49
4000	30.23	89.45	430000	18000	24.37
5000	30.18	89.56	670000	27000	24.29
6000	30.15	89.62	960000	40000	24.28
7000	30.13	89.67	1300000	54000	24.21
8000	30.11	89.73	1700000	71000	24.18
9000	30.1	89.78	2200000	89000	24.16
10000	30.09	89.79	2700000	110000	24.14
100000	30.01	89.98	270000000	11000000	24.01

Tabla 2.1. Cálculo de los valores necesarios para la medición de la distancia por medio del ojo humano

2.2 Ecuación de la lente delgada

Como vimos en el capítulo anterior, el trabajo se basa en la ecuación de la lente delgada, la cual, es una simplificación de la ecuación del fabricante de lentes

La ecuación de la lente delgada se deriva de la Ley de Snell aplicada a un rayo refractado por una superficie que divide a los medios 1 y 2, es decir:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.11)$$

en donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios 1 y 2 y θ_1 y θ_2 son los ángulos que forman los rayos incidente y reflejado con el eje.

Después de algunas manipulaciones matemáticas tenemos que la fórmula se convierte en:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (2.12)$$

en donde p es la distancia de la superficie entre los dos medios al objeto, q es la distancia de la superficie entre los dos medios a la imagen y R es el radio de curvatura de la superficie.

Como una lente está formada por dos superficies refractantes, la imagen virtual producto de la primera refracción será el objeto para llevar a cabo la Segunda refracción y, como la lente está rodeada de aire, podemos considerar a $n_1 = 1$. Entonces la imagen 1 formada por la superficie 1 satisface la ecuación:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{n-1}{R_1} \quad (2.13)$$

en donde p_1 es la distancia de la superficie entre los dos medios al objeto, q_1 es la distancia de la superficie entre los dos medios a la imagen y R es el radio de curvatura de la superficie.

Y la imagen 2 satisface la ecuación:

$$\frac{n}{p_2} + \frac{1}{q_1} = \frac{1-n}{R_2} \quad (2.14)$$

Después de algunas manipulaciones matemáticas llegamos a lo que se conoce como la ecuación del fabricante de lentes:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.15)$$

en donde f es la distancia focal de la lente, n es el índice de refracción de la misma y R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las dos superficies de la lente.

2.3 Detección del foco

Uno de los principales problemas que enfrentamos es la determinación del foco o ¿cómo saber cuándo una imagen se encuentra enfocada? Aunque en la literatura encontramos diferentes maneras de determinar el foco, en este trabajo empleamos el método de medición de la intensidad luminosa concentrada por la lente. A continuación se presentan algunos métodos para encontrar el foco que se trabajan actualmente [10, 11, 12, 13, 14].

2.3.1 Sistema estereoscópico

El sistema estereoscópico funciona de manera similar a como funciona el sistema de visión de los humanos, en donde se cuenta con dos captadores de imágenes separados una cierta distancia. Como los dos se enfocan al mismo objeto, se tienen dos imágenes ligeramente diferentes, lo que nos permite estimar la distancia al objeto.

2.3.2 Estructura a partir del movimiento

Si disponemos de un sistema monocular y movemos éste lateralmente tendremos que los objetos más cercanos se moverán más rápidamente que los más distantes. En base a este principio se puede determinar la distancia hasta algún objeto en particular.

2.3.3 Por medio de cintas de luz

En donde es posible iluminar la escena con algún tipo de radiación, este método provee de una solución robusta y barata a varios problemas, Sin embargo, adolece de un problema: la velocidad. Para lograr mapas con suficiente resolución espacial, se requiere una cantidad grande de (N) de líneas de luz ligeramente espaciadas. Si todas las líneas de luz se proyectan simultáneamente, es imposible asociar una línea específica con cualquier

punto de la imagen. Por lo tanto, el proceso requiere del método de triangulación. El método clásico requiere de la obtención de N imágenes, una para cada tira de luz. Si definimos el tiempo que tarda en sensar y digitalizar cada imagen como T_f , el barrido de N tiras de luz tardaría, al menos, $N \cdot T_f$. SE pueden obtener mejoras substanciales asignando códigos de gris a las tiras de luz y barriendo la colección entera de tiras en juegos. Entonces, toda la información necesaria es adquirida en un tiempo de $\log_2(N) T_f$. Un método alternativo emplea patrones de tiras codificadas por colores. Los últimos avances en este método emplean el paralelismo de celdas para construir un sensor en donde cada elemento registra una sola tira de luz mientras el láser barre la escena a alta velocidad. De esta manera se pueden producir mapas de profundidad en un tiempo record de 1ms aunque con baja resolución espacial (28x32).

2.3.4 Profundidad por enfocamiento

En este método, también llamado análisis por foco de la imagen, se toma una secuencia de imágenes con parámetros diferentes de la cámara como, por ejemplo, distancia focal y/o distancia de la lente al sensor. En cada una de estas imágenes vamos a tener que, objetos diferentes, se verán borrosos en grados diferentes dependiendo de su distancia a la lente de la cámara. Cada objeto estará en foco en solamente una imagen de toda la secuencia. Se procesa la secuencia total de imágenes para encontrar la imagen mejor enfocada de cada objeto en la escena 3D. La distancia de cada objeto en la imagen es encontrada a partir de los parámetros de la cámara que corresponden a la mejor imagen enfocada del objeto. Este método se basa en que, en el empleo de lentes convergentes libres de aberraciones tenemos:

a) la radiancia en un punto en la escena es proporcional a la radiancia en la imagen enfocada;

b) la posición de un punto en la escena y la posición de su imagen enfocada se relacionan por medio de la fórmula Gaussiana de las lentes delgadas (limitante geométrica)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D} + \frac{1}{d}$$

en donde f es la distancia focal de la lente, D es la distancia del objeto al plano de la lente y d es la distancia del plano de la lente a la imagen del objeto. Dadas la irradiancia y la posición de la imagen enfocada de un punto, su radiancia y posición en la escena se pueden determinar de manera única. En esencia, las posiciones de un objeto puntual y su imagen son intercambiables (la imagen de la imagen del objeto es el objeto mismo). Entonces, si tenemos una superficie de un objeto enfrente de la lente, tendremos una superficie detrás de la lente (ver Fig. 2.4). A esta superficie se le llama “superficie de la imagen enfocada” y la irradiancia de la imagen en esta superficie es la imagen enfocada. La geometría y la distribución de la radiancia son determinadas de manera única por la superficie de la imagen enfocada y la imagen enfocada. En los métodos tradicionales de análisis de la imagen enfocada, se toma una secuencia de imágenes mientras se varía la distancia entre la lente y el sensor de imagen y/o la distancia focal. Para cada imagen de la secuencia, se calcula el foco de cada píxel, en cada dirección y en una área pequeña alrededor de él. Entonces, por un procedimiento de búsqueda, se encuentra la medición máxima del foco en la secuencia de imágenes. El nivel de gris, que es proporcional a la irradiancia de la imagen, del píxel del cuadro de la imagen encontrada así nos da el nivel de gris de la imagen enfocada para ese píxel. Entonces los valores de d y f se emplean para calcular la distancia del punto del objeto que corresponde a ese píxel. Un ejemplo de la medición del foco es la varianza del nivel de gris. Este método involucra la búsqueda de los valores de d y/o f que resulte en una medición máxima del foco y esto requiere la adquisición y procesamiento de una gran cantidad de imágenes. Como, al adquirir cada imagen, se requiere tiempo para ajustar los parámetros de la cámara (posición de la lente y/o variación de la distancia focal) antes de grabarla, el tiempo de adquisición de una secuencia grande de imágenes es alto y esto es una desventaja del método. Esto involucra, generalmente, movimientos mecánicos de la cámara y éstos suelen ser más lentos que los cálculos electrónicos. Otra desventaja es que durante el período de ajuste de los parámetros de la cámara, la escena debe de estar fija.

2.3.5 Profundidad por desenfocamiento

Últimamente algunos investigadores han propuesto métodos para encontrar la distancia y la imagen enfocada de un objeto que no requiere enfocar el mismo. Lo que ellos hacen es tomar el nivel de desenfocamiento del objeto y los correspondientes parámetros de la cámara para determinar la distancia y la imagen enfocada. A este método se le llama Análisis de desenfoque de la imagen o, para ser más breves, análisis por desenfocamiento.

El fundamento para la detección de la profundidad de una imagen por medio de desenfocamiento es la relación que existe entre una imagen enfocada y otra desenfocada. En la figura 2.6 podemos ver cómo se forma la imagen. La luz que emite el objeto P y que pasa por la lente es refractada y converge en el punto Q, en el plano de la imagen. Para una lente delgada, la relación entre la distancia al objeto D, la distancia a la imagen d y la distancia focal de la lente f, está dada por la ecuación Gasussiana de la Ley de la lente delgada:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D} + \frac{1}{d}$$

Cada punto del objeto P proyecta un punto perfectamente enfocado en Q, creando así una imagen clara. Cuando el plano del sensor de la imagen no coincide con el plano de la imagen, la energía recibida del objeto P sobre la lente, es distribuida sobre una mancha en el plano del sensor. Esto da como resultado una imagen desenfocada. Obviamente, una sola imagen no nos proporciona suficiente información como para poder estimar la profundidad. Para solventar este problema, se emplean dos imágenes I_1 e I_2 separadas por una distancia conocida β . Entonces el problema se reduce a determinar la borrosidad relativa de cada punto en cada imagen y calcular la distancia a la imagen en foco. A partir de esto, se emplea $d = \gamma - \alpha$ y la Ley de la lente delgada para obtener la profundidad del punto de la escena. Aunque parece simple, lo anterior presenta problemas a la hora de implementarlo como, por ejemplo: a) la estimación no muy exacta del desenfoque relativo en las dos imágenes; b) la recuperación de la información de superficies con y sin textura; c) lograr la amplificación constante que es invariable al grado de desenfoque.

Capítulo 3

Propuesta

Como vimos en los capítulos anteriores, el distanciómetro por enfocamiento electrónico es parte de un sistema, más complejo, de visión para aplicaciones en robots móviles. En este capítulo haremos un análisis más detallado de la propuesta.

3.1. Distanciómetro monocular de enfoque

En el capítulo anterior vimos que ya existen métodos que emplean el mismo principio de tomar imágenes a diferentes distancias o distancias focales para obtener la información en tercera dimensión de la escena. La principal diferencia entre esta propuesta y las anteriores está en que la primera trata de determinar el foco de la imagen en función de la energía recibida por un arreglo de fotorreceptores (FR) y las segundas emplean una cámara CCD y un sofisticado programa de computadora. A continuación veremos el análisis de un distanciómetro con un solo fotorreceptor (FR) de la propuesta.

3.2. Análisis para un solo canal

3.2.1. Formación de la señal óptica

Si dentro de algún ángulo sólido de número jk no se encuentra ningún objeto, en la salida del fotorreceptor (FR) de número jk (FR_{jk}) el nivel de la señal será constante, correspondiente al fondo de luz. Si a cierta distancia ΔD se encuentra un objeto, el nivel de la señal en la salida del FR_{jk} cambiará. Con un objeto de color oscuro el nivel disminuirá, con un de color claro, subirá, como se muestra en la Fig.3.1.

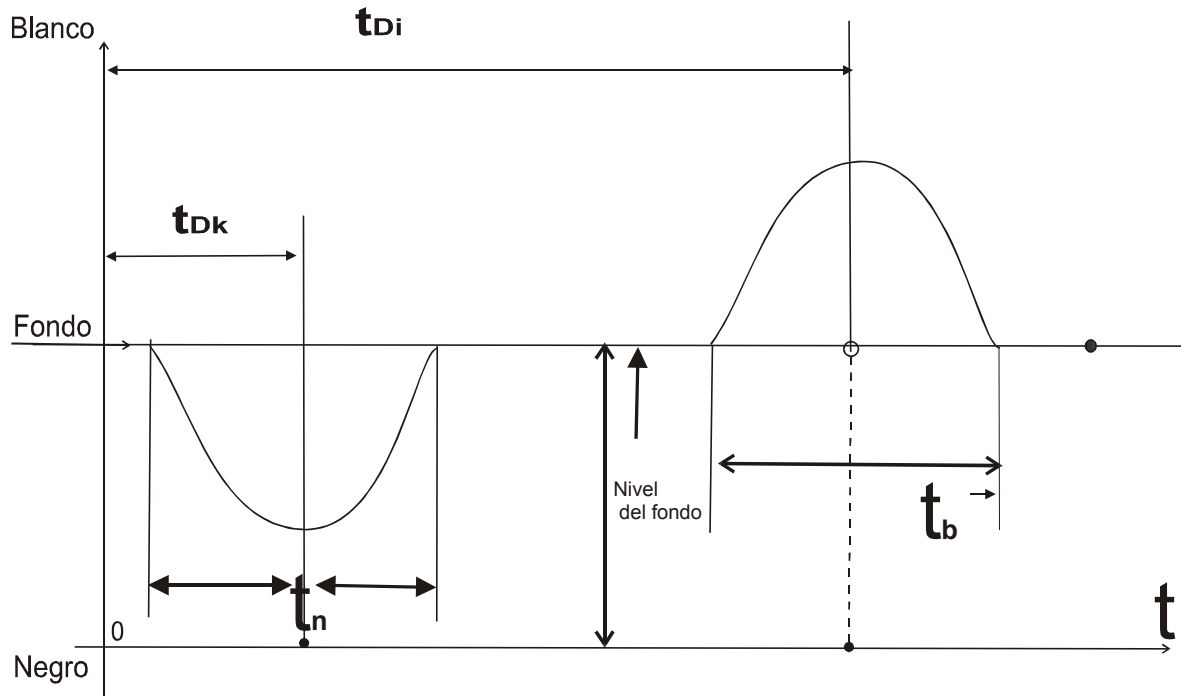


Fig. 3.1. Señal esperada a la salida del amplificador.

Las amplitudes de las señales corresponderán a los niveles de la escala blanca-y-negra de los objetos, las abscisas de los máximos o mínimos, a las distancias hasta los objetos. De esta manera, la posición de un punto cualquiera del espacio dentro del ángulo sólido OPRST (de la Fig. 2.3) se representa por los números j y k del FR_{jk} elemental y por la distancia d_{jk} .

Desde el punto de vista de la óptica geométrica, la señal en la entrada del FR_{jk} se forma por la incidencia de los rayos 1 y 2 (Fig. 2.4). En nuestra percepción éste es un punto que corresponde a la entrada de uno de los FR de número jk . Al enfocar el objetivo (desplazamiento a uno u otro lado del eje OX), aumenta o disminuye el contraste del punto indicado.

Desde el punto de vista ondulatorio podemos considerar que, en el punto jk , ocurre la interferencia de dos ondas electromagnéticas coherentes:

$$e_1(t) = E_0 \sin \omega t \quad \text{y} \quad e_2(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

donde E_0 es la magnitud de la amplitud del campo eléctrico, t es el tiempo actual y φ es el desplazamiento de fase. Es evidente que:

$$e_{jk}(t) = e_1(t) + e_2(t) = E_0 [\sin \omega t + \sin(\omega t + \varphi)].$$

De las matemáticas es sabido que:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right).$$

Por eso

$$e_{jk} = 2E_0 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right).$$

La intensidad de la luz en el punto jk será:

$$i_{jk}(t) = 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin^2\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right). \quad (3.1)$$

El fotorreceptor reacciona solamente al primer componente, independientemente del tiempo de la multiplicación en 3.1. Entonces:

$$I_{jk} = I_{\max} \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (3.2)$$

El valor máximo de la intensidad $I_{\max}$ se encuentra con $\varphi = 2\pi n$, a la cual corresponde el resto del paso de los rayos ópticos $\delta = \lambda n$. Aquí $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ - orden de la interferencia, $\lambda = 2\pi c / \omega$ - longitud de la onda de la luz, c - velocidad de la luz. Entre los restos de las fases φ y el resto del paso existe una relación simple:

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (3.3)$$

Para las construcciones, mencionadas tenemos:

$$\delta = r_1 - r_2 = \frac{d}{\cos \theta} - d = d \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right), \quad \Delta = 2\delta, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{x}{d}. \quad (3.4)$$

El intervalo $\Delta = 2\delta$ muestra qué tanta es la profundidad de la interferencia de las ondas a lo largo de los rayos 1 y 2 [7].

Consideraremos un ejemplo. Sea el diámetro del diafragma de la entrada del objetivo $y = 30$ mm. El parámetro $x \leq y$. Para las magnitudes de borde de la distancia, que pertenecen al intervalo, por ejemplo, $D_1 = 10\text{m} \geq D \geq D_2 = 0.1\text{ m}$, pondremos correspondientemente $x_1 = y/2 = 15$ mm y $x_2 = y = 30$ mm. Para las magnitudes escogidas de la distancia (ver tabla 2.1) y con arreglo a las formulas (3-4) definimos:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{15}{30.09} = 26^\circ, \theta_2 = \tan^{-1} \frac{30}{42.85} = 35^\circ,$$

$$\delta_1 = 30.09 \left(\frac{1}{\cos 26^\circ} - 1 \right) = 3.388 \text{ mm}, \quad \delta_2 = 42.85 \left(\frac{1}{\cos 35^\circ} - 1 \right) = 9.460 \text{ mm}.$$

De ésta manera, la dimensión lineal de la señal óptica de la fuente de la irradiación monocromática, que se puede observar desplazando el FR, es:

$$6.776\text{mm} \leq \Delta \leq 18.92 \text{ mm}. \quad (3.5)$$

Si la luz no es monocromática, y las longitudes de sus ondas están en el intervalo $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$, lo que se encuentra en las condiciones naturales, la interferencia pura no se observa. Con esto, a consecuencia de la aberración cromática, la longitud lineal de la señal crecerá un poco.

3.2.2 Amplitud y frecuencia de barrido

La vista del ser humano es adaptable con respecto a los objetos del panorama externo. Al remover la vista de un objeto y ponerla en otro el reenfoque del cristalino se realiza automáticamente, sin participación de conciencia del hombre. En nuestra percepción esto pasará instantáneamente. Es decir, nosotros vemos enseguida la profundidad de la imagen sin reajustar la vista concientemente. El mecanismo de adaptación de la vista humana es desconocido para la mayoría de las personas. Por lo tanto, como en otras situaciones similares, en el caso considerado se usa el barrido de la imagen.

El barrido, en el sentido amplio de la palabra, supone el recorrido cíclico por el elemento activo en el espacio, que contiene información que nos interesa. La posición del FR de número jk con respecto a la lente objetivo contiene la información sobre la distancia D_{jk} de la lente objetivo hasta un punto del objeto. Por lo tanto, para la percepción de la abscisa d_{jk} del FR con respecto al eje OX' (Fig.2.3) se requieren los desplazamientos mecánicos cíclicos: 1) de la lente objetivo por el eje OX o 2) de la rejilla con los FR por el eje OX' .

Aunque se prefiere más el primero, ya que la lente objetivo es libre de los compuestos eléctricos, que complican los desplazamientos mecánicos, durante el experimento se desplazó el fotorreceptor ya que representa menor masa que la lente objetivo. La posición de la lente objetivo o la rejilla se puede medir por el método de tiempo-impulso. La velocidad del barrido y la escala de los impulsos pueden ser lineales.

3.2.2.1 Definición de la amplitud del barrido

Para la realización del distanciómetro monocular de enfoque (DME) en el sistema de visión técnica en tercera dimensión (SVT 3D), la lente objetivo del DME se monta en el manipulador del sistema de posicionamiento, que funciona bajo de control de la computadora de a bordo (CB) (Fig.3.2). La lente objetivo, junto con el manipulador, realiza

los movimientos recíprocos, desplazando, con arreglo de la ley lineal, en algún intervalo $\Delta d = \phi(\Delta)$, que corresponde al intervalo de las distancias ΔD .

Cada movimiento de la lente objetivo hacia adelante o hacia atrás puede ser activo. De la expresión (2.3) se sigue que a las distancias pequeñas corresponden las magnitudes grandes de d y al revés. Por tanto, cuando el manipulador desplaza la lente objetivo hacia la rejilla del FR, por ejemplo, de la posición de borde, donde él está lejos del plano de la imagen, entonces, esto lleva al enfoque en fila de los objetos delante del SVT, comenzando de los cercanos.

El parámetro geométrico del barrido es una magnitud de los desplazamientos recíprocos de la lente objetivo o su amplitud. Si son sabidas las distancias mínima y máxima entre el centro de la lente objetivo y la rejilla de los FR ($d_{\min}, d_{\max}$), y la longitud máxima de la señal ($\Delta_{\max}$) (t_b o t_n en la Fig. 3.1), entonces la longitud mínima del desplazamiento recíproco deberá ser:

$$\Delta d = d_{\max} - d_{\min} + \Delta_{\max} . \quad (3.6)$$

Para las condiciones del ejemplo considerado anteriormente, $d_{\min}, d_{\max}$ son iguales respectivamente a $d_1 = 30.09$ mm, $d_2 = 42.85$ mm y $\Delta_{\max} = 18.92$ mm. De esta manera $\Delta d \geq 42.85 - 30.09 + 18.92 = 31.68$ mm.

Ponemos $\Delta d = 35$ mm para asegurar que el intervalo de barrido incluya completamente la longitud de la señal de salida del fotorreceptor (FR). Subrayamos que la magnitud Δd , obtenida de la expresión (3.6), cubre todo el intervalo posible de las magnitudes de d_i .

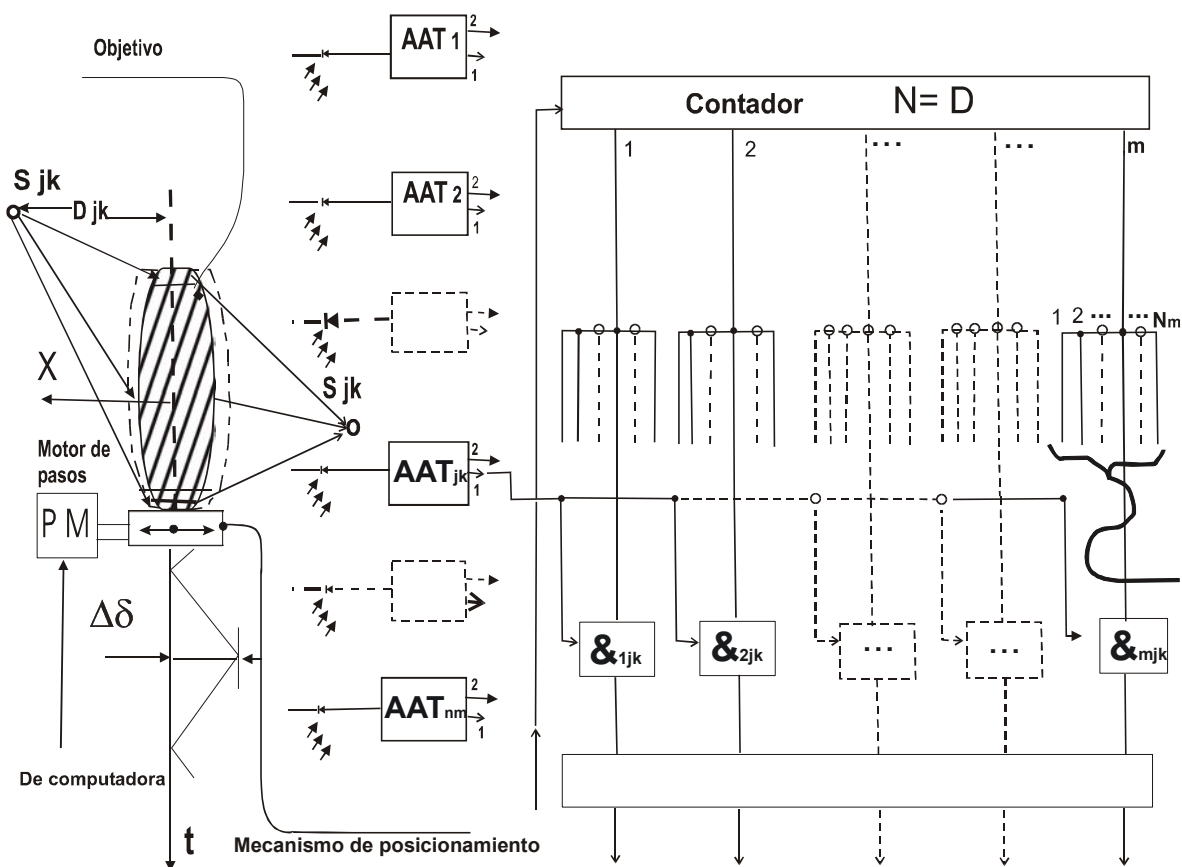


Fig. 3.2. Principio de funcionamiento del SVT-3D.

3.2.2.2. La frecuencia de barrido y los parámetros de tiempo de las señales eléctricas.

Uno de los parámetros más importantes del SVT es su velocidad. Para ilustrarlo consideraremos otra vez el analizador humano de la vista. Es sabido que la vista humana es inercial. Si la frecuencia de la exposición de un solo objeto es menos que 20 Hz, las exposiciones individuales son distinguibles, es decir que se advierten los cambios de las exposiciones (*apariciones y desapariciones de las imágenes*). Con la frecuencia arriba de 20 Hz, los cambios de las exposiciones resultan indistinguibles. Entonces, la frecuencia de los cálculos del panorama, así como en telemetría, debe ser $f_c \geq 2f_u$. Por este motivo se explica la frecuencia de 25 Hz en los sistemas de televisión PAL y 30 Hz en los de NTSC. Este fenómeno de la vista humana tiene una explicación sencilla, si suponemos que la frecuencia de sincronización del cerebro humano, como el medio de cálculo es de 24 Hz. Sin embargo, en los manuales de oftalmología, por ejemplo, en los cortes esquemáticos de la retina, se muestra, que los elementos sensibles del ojo en la tercera capa están conectados a las fibras de nervios de este modo: varias piezas por una fibra. De esto resulta la idea de que los elementos sensibles del ojo perciben la imagen y memorizan sus fragmentos (cuantos), y después los agrupan. Al usar su propio canal por cada grupo, transmiten la información al cerebro con una frecuencia mucho más grande que 24 Hz. En este medio, la frecuencia de sincronización del analizador de la vista es suficiente para que un hombre-operador pueda manejar, por ejemplo, aviones con una velocidad mucho más grande que 100 m/s. Se puede considerar que con la frecuencia 24 Hz de la sincronización del SVT (la frecuencia de la exposición de las imágenes) también fuera suficiente en la mayoría de los casos para los SVT instalados en los RM.

Durante el tiempo total t_t que tarda el SVT en responder, el RM deberá desplazarse una distancia mínima para evitar colisionar con el objeto que tenga enfrente. Es decir:

$$t_t \ll t_d$$

en donde $t_d = \frac{D}{v}$ sería el tiempo que tarda el RM en desplazarse la distancia D a la velocidad v .

Por lo tanto, el SVT, si esta bien diseñado, debe presentar a la computadora $2j * 2k$ de las distancias en un período de tiempo t_m , durante el cual el robot se traslada una distancia pequeña, adecuado al error de la medición de la distancia. Suponemos que el error instrumental δD de la medición de la distancia por medio del DMF es igual a la magnitud δD_e del elemento reconocido del panorama ante del RM. Con respecto al principio del óptimo de los sistemas de medición, pondremos que el error dinámico es $\delta D_\partial = \delta D_e = \delta D$. Ya que $\delta D_\Sigma = \sqrt{\sum_i (\delta D_i)^2}$, entonces $\delta D_\Sigma = \sqrt{2} \delta D$, o en el caso común es $\varepsilon \delta D$, donde $\varepsilon > 1$. Por consiguiente, durante el tiempo t_m de la recepción de $2j \times 2k$ de las distancias, el RM no debe de pasar más que δD_Σ . Para la velocidad V del RM el tiempo indicado es:

$$t_m = \frac{\varepsilon \delta D}{V}$$

Si despreciamos el tiempo que tardan los circuitos electrónicos en responder ya que son mucho más rápidos que los mecanismos, entonces durante este lapso de tiempo la lente objetivo pasará de una posición de borde a la otra, mientras el SVT registrará en la memoria de la computadora las $2j * 2k$ distancias. Al poner los recorridos derecho e inverso del objetivo como los laborables, encontramos la frecuencia de desplazamiento del objetivo:

$$f_m = \frac{V}{2\varepsilon(\delta D)} \quad (3.7)$$

De esto resulta que el SVT tiene su velocidad propia, que depende de la velocidad del movimiento del RM y de los tamaños supuestos de los obstáculos. Al tomar en consideración que el SVT es multicanal, la productividad de la computadora debe corresponder a la velocidad del RM.

Como ejemplo consideremos lo siguiente:

$$\delta D_e \approx 0,15 \text{ m}, V = 30 \text{ m/s}, \varepsilon = \sqrt{2} = 1.41,$$

$$t_m \leq \sqrt{2} \cdot 0.15 / 30 = 7.05 \cdot 10^{-3} \text{ s},$$

$$f_m = 30 / 2\sqrt{2} \cdot 0.15 = 70.71 \text{ Hz} \approx 71 \text{ Hz}.$$

Ahora, en consideración a (3.7), podemos definir la velocidad lineal del objetivo (del barredor) en la distancia laboral del barrido Δd

$$v = \frac{\Delta d}{t_m}.$$

Aquí es pertinente notar, que la velocidad V del RM de fábrica o de clínica puede ser menor, en un factor de 20-30, que la velocidad de un automovil. Con esto, consecuentemente, se disminuirá la velocidad de barrido, aunque para los sistemas mecánicos las frecuencias de barrido (10-100 Hz) son realizables tecnológicamente. El tiempo de procesamiento de la información debe ser tal que permita el frenado el RM antes de su encuentro con el obstáculo o realizar una maniobra, si es posible.

3.3. Teoría del procesamiento digital de la señal

3.3.1. Elección del punto de fijación de la señal

La mejor posición del punto de fijación es la proyección del centro de energía de la señal eléctrica en la salida del FR al eje horizontal, es decir, su abscisa. Las aplicaciones geométricas y físicas de las integrales definidas nos dan las fórmulas de determinación de las coordenadas (ξ, η) del centro de gravedad del trapecio curvolineal que se forma por la curva continua $y = f(x)$ para las magnitudes $a \leq x \leq b$ (fig. 3.3 con $f(x) = I(t)$). En particular, la abscisa del centro de gravedad se calcula por la fórmula:

$$\xi = \frac{1}{S} \int_a^b x f(x) dx \quad (3.8)$$

Aquí S es la superficie del trapecio. Se supone que la masa es distribuida regularmente por toda la superficie y su densidad de superficie es igual a uno.

La fórmula (3.8) es útil para la determinación de los centros de gravedad de los trapecios planos curvolineales, formados no solo por la geometría de los objetos mecánicos en la estática, sino, por ejemplo, por las señales ópticas y eléctricas que cambian en función del tiempo. En realidad nosotros encontramos el trapecio semejante (Fig. 3.4b), que se forma por una curva continua plana material $u(t)$ de la señal en el intervalo del tiempo $t_1 \leq \tau_r \leq t_2$, donde nos interesa la abscisa t_c - el análogo ξ de la fórmula (3.8).

Como la curva $u(t)$ y sus límites t_1 y t_2 en el caso común tuvieran el carácter aleatorio, es necesario determinar la abscisa t_c en cada realización de la función aleatoria $u(t)$, realizando una serie de operaciones con la señal:

1. Registrar, entonces memorizar la curva de la señal $u(t)$.

2. Calcular el valor de la integral en (3.4), usando los datos memorizados sobre la curva $u(t)$.
3. Calcular la superficie S bajo la curva.
4. Dividir el valor de la integral entre el valor de la superficie S .

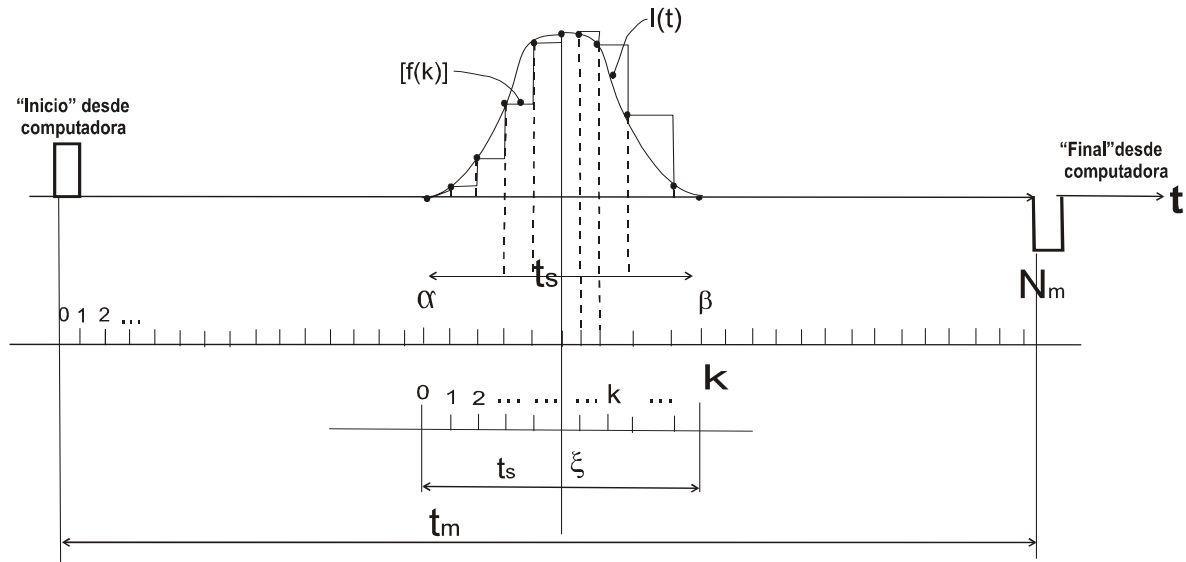


Fig 3.3. Diagrama del procesamiento de la señal.

Llevar a cabo automáticamente las operaciones indicadas por los medios analógicos conocidos, en el tiempo real, no parece realizable. Sin embargo, los elementos discretos de la optoelectrónica han alcanzado una rapidez fantástica. Esta circunstancia hace necesario crear el modelo discreto para la solución del mismo problema.

3.3.2 Modelo discreto de fijación de la señal

En la teoría de los números la discretización de las magnitudes continuas y las notaciones de la parte entera del número real α se realiza por la función $[\alpha]$, para la cual se

cumple la desigualdad $[\alpha] \leq \alpha < [\alpha] + 1$. La parte fraccional del número real α es igual al resto $\alpha - [\alpha]$, cuya notación es $\{\alpha\}$. Por consiguiente, $\{\alpha\} = \alpha - [\alpha]$ y $0 \leq \{\alpha\} < 1$. La función $[\alpha]$ es muy importante durante el cálculo de los puntos discretos en la rejilla plana (Fig. 3.4c). Los puntos tienen las coordenadas enteras x e y y se sitúan dentro de un trapecio ABCD que está formado (así como en el caso del modelo continuo) por una curva material $y = f(x)$. Si al suponer que las células de la rejilla son de dimensiones $x_o = 1$ e $y_o = 1$, entonces el área de cada rejilla es $s_o = x_o y_o = 1$. Sea $y = f(x)$ una función no negativa y continua dentro del intervalo $a \leq x \leq b$. Para todo valor entero k ($a \leq k \leq b$) la longitud del intervalo MM es igual $f(k)$. El número de los puntos con las coordenadas enteras, situadas dentro del intervalo indicado (excepto el punto situado directamente en el eje OX), es igual el número de las magnitudes enteras de y , entonces es igual $[f(k)]$. Ya que todos los puntos con las coordenadas enteras dentro del ABCD se sitúan dentro de tales intervalos, donde $a \leq k \leq b$, entonces el número total de estos puntos es igual la suma:

$$S' = \sum_{a \leq k \leq b} [f(k)] \quad (3.9)$$

La suma (3.9) es aproximadamente igual al área S del trapecio. Esto lo podemos observar en la Fig. 3.4c. Allí el área S' está subrayada. Definiremos el área S , aplicando la magnitud conocida S' , y valoraremos la exactitud del cálculo. Para todo valor de los puntos k , la magnitud $[f(k)]$ representa el resultado de la cuantización de la ordenada $f(k)$ por el cuanto y_o , cuya magnitud es puesta $y_o = 1$. El error de la cuantización Δy está distribuido regularmente dentro del segmento $[0, 1]$. El promedio de los errores es $M\Delta Y =$

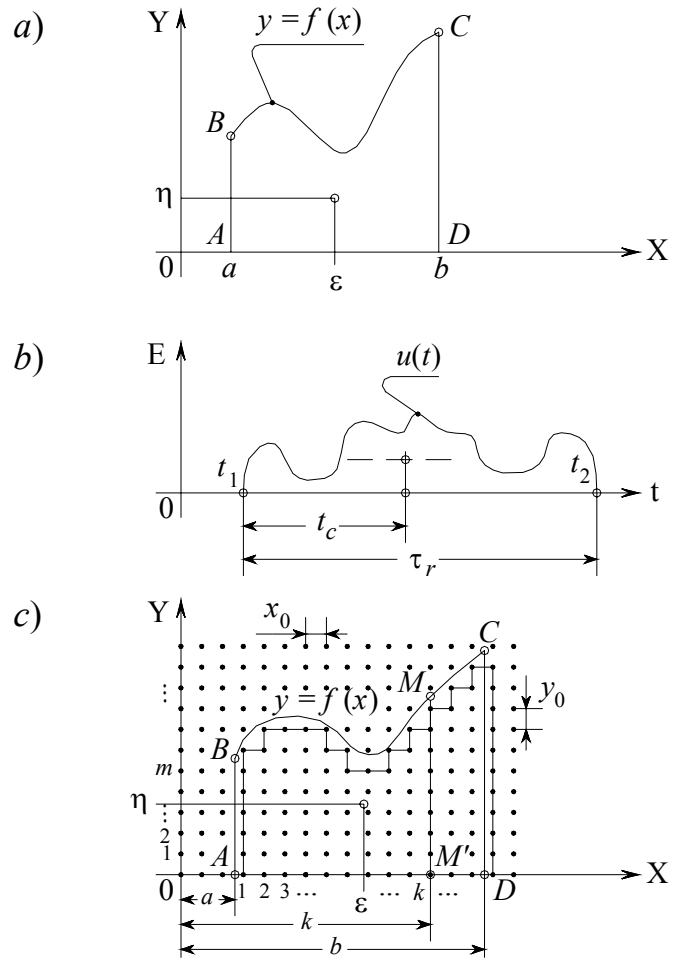


Fig. 3.4. Discretización de una señal continua.

$\frac{1}{2}$ y la dispersión es $D\Delta Y = \frac{1}{12}$. Vamos a considerar que los errores de la cuantización de las ordenadas $f(k)$ son independientes estadísticamente. En éste caso la dispersión de la suma (3.9) es:

$$DS' = \frac{K}{12}$$

y la desviación estándar experimental es:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K}{3}}$$

(En las dos últimas formulas y en el futuro, cuando sea necesario, $K = \left[\frac{b-a}{x_o} \right]$ - es un valor máximo de la variable discreta $k = 1, 2, \dots$.) Para la simplificación de las construcciones matemáticas supondremos que la base AD del trapecio ABCD se divide por x_o sin resto, es decir:

$$\left\{ \frac{b-a}{x_o} \right\} \approx 0. \quad (3.10)$$

En el caso dado, el proceso de la división hay que considerarlo como el proceso de la medición del intervalo $b-a$ por la medida x_o . Para la posición aleatoria de la escala de medición relativamente del intervalo se encuentran los errores de la cuantización: Δx_b - en el comienzo y Δx_e en el fin de la medición. El error total $\Delta x = \Delta x_e - \Delta x_b$ es suficientemente pequeño y la suposición hecha (3.10) es correcta.

Ya que la magnitud del área del trapecio ABCD depende de los parámetros aleatorios, su promedio se escribirá por la formula:

$$MS = S' + KM\Delta Y.$$

El área buscada es:

$$S = \sum_{a \leq k \leq b} [f(k)] + \frac{K}{2}. \quad (3.11)$$

Su desviación estándar experimental es:

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K}{3}}$$

Ahora encontraremos el valor del equivalente discreto de la integral en la fórmula (3.8). La expresión integral se transforma en la forma discreta (así como antes) por medio de la cuantización de $f(k)$ por el cuanto y_o con error Δy , y por la multiplicación del resultado por su valor $k = 1, 2, \dots, K = [b-a]$. Todos los k -productos tienen la forma $k\{[f(k)] + M\Delta Y\}$. El reemplazo de la integral por la suma nos lleva a:

$$\sum_{a \leq k \leq b} k[f(k)] + M\Delta Y \sum_{a \leq k \leq b} k$$

Ya que con $y_o=1$ es $M\Delta Y = \frac{1}{2}$, y es sabido, que:

$$\sum_{a \leq k \leq b} k = \frac{K(K+1)}{2}$$

entonces tenemos:

$$\int_a^b xf(x)dx = \sum_{a \leq k \leq b} k[f(k)] + \frac{K(K+1)}{4}. \quad (3.12)$$

Encontraremos la desviación estándar experimental del valor recibido de la función integral de las construcciones siguientes. La dispersión del error de la cuantización Δy para todos valores k , y como antes sea $D\Delta Y = \frac{1}{12}$. La dispersión del producto de la constante (en nuestro caso es k) por la magnitud aleatoria (en nuestro caso es Δy) la calculamos por la fórmula:

$$D(k\Delta Y) = k^2 D\Delta Y = \frac{k^2}{12}$$

La formación de la suma de la integral en la expresión (3.11) también requiere la formación de las dispersiones por todas las magnitudes de k . Entonces:

$$D\Sigma = \frac{1}{12} \sum_{a \leq k \leq b} k^2$$

y la desviación estándar para la valoración de la integral será:

$$\sigma_i = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{a \leq k \leq b} k^2}$$

Ya que:

$$\sum_{a \leq k \leq b} k^2 = \frac{K(K+1)(2K+1)}{6}$$

entonces:

$$\sigma_i = \frac{1}{6\sqrt{2}} \sqrt{K(K+1)(2K+1)}$$

Por los datos discretos obtenidos encontramos:

$$\xi = \left\{ \sum_{a \leq k \leq b} k[f(k)] + \frac{K(K+1)}{4} \right\} / \left\{ \sum_{a \leq k \leq b} [f(k)] + \frac{K}{2} \right\}. \quad (3.13)$$

Aquí es necesario notar que, en la expresión (3.11) para el cálculo del área de la señal, y en la expresión (3.12) para el cálculo de la integral, los segundos miembros son las correcciones para la traslación de los valores discretos del área y de la integral. Los experimentos de cálculos muestran que la expresión (3.12) es prácticamente invariante en relación a los segundos miembros en (3.10) y (3.11). Para $K = 10$ el error del cálculo de ξ sin correcciones suma 0,25% y disminuye rápidamente con el aumento de K . La introducción de las correcciones indicadas para la definición de la abscisa ξ según la fórmula (3.13) es sobrada. Ésto reduce notablemente el volumen de los cálculos durante el funcionamiento en tiempo real. Entonces:

$$\xi = \frac{\sum_{a \leq k \leq b} k[f(k)]}{\sum_{a \leq k \leq b} [f(k)]}. \quad (3.14)$$

3.3.3 Esquema funcional del procesamiento de la señal

En las cámaras CCD 2D mencionadas anteriormente en el capítulo 2, los niveles de las señales estáticas de la imagen plana, después de la finalización del enfoque, se transforman en códigos binarios. Estos códigos de alguna manera son relacionados con las distancias de cada FR (píxel) hasta el objetivo y, a la vez hasta el objeto cuya brillantez se refleja.

En el caso considerado, el proceso de enfoque automático de cada punto del panorama se acompaña con el cambio del nivel (de la amplitud) de la señal dinámica en la salida del FR correspondiente en la rejilla que tiene los $2j \times 2k$ FR. En la Fig. 3.2 se muestra un principio común del procesamiento de las señales blancas y negras (de polaridad positiva y negativa) mediante el bloque AAT. Las abscisas de los centros de gravedad de las señales representan las distancias hasta los objetos del panorama. Para transformar la

cámara CCD-2D en la cámara 3D es, necesario durante el proceso de enfoque por medio del convertidor análogo-digital (AD) obtener las mediciones de las ordenadas $[f(k)]$ en cada píxel y por todo el intervalo del barrido ($\Delta d.$). De tales códigos se obtendrán los K . Como resultado del procesamiento de los códigos, según (3.14), obtendremos la abscisa ξ en el segmento del tiempo t_s , como se muestra en la figura 3.3, que representa un diagrama temporal del procesamiento de la señal en el bloque AAT.

La figura 3.5 presenta los elementos más importantes del esquema funcional del procesamiento de la señal. El principio del funcionamiento del esquema sigue de la consideración de estos elementos (ver también Fig. 3.2). La señal en la salida del fotorreceptor (FR) de número i , formado por el movimiento del objetivo, después de la amplificación en el amplificador **A**, en paralelo llega a las entradas del convertidor AD y del comparador. Con la orden de “Inicio”, recibido de la computadora, el disparador (trigger) pasa del estado “0” al estado “1”. El conjuntor &1 admite los impulsos para los cálculos en el contador **a**. El cálculo continúa hasta la llegada en la segunda entrada del disparador (trigger) del impulso de paro. La señal de paro representa la frontera delantera del impulso rectangular desde la salida del comparador. El tiempo t_s del impulso rectangular se transforma en el número de los impulsos **k** para los cálculos en el contador **K**. Los impulsos para los cálculos, que salen de la computadora, sincronizan el funcionamiento del convertidor AD. Los códigos de salida en cada caso se pasan a la computadora. La computadora calcula ξ según la formula (3.14). El código de la distancia D_i es:

$$N_{Di} = a + \xi$$

El distanciómetro se calibra en la oscuridad por medio de un objeto luminoso, alejado una cierta distancia del objetivo.

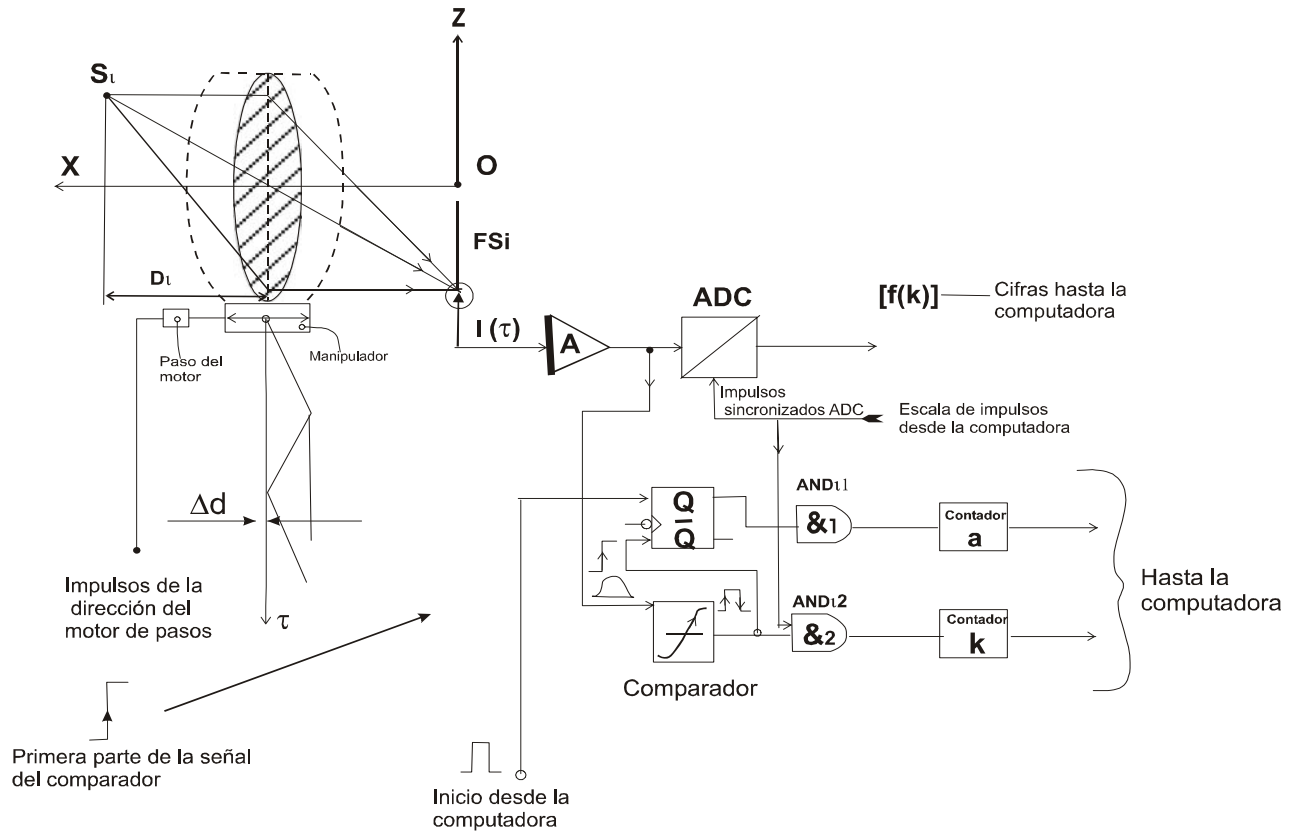


Figura 3.5. Los elementos importantes del esquema del procesamiento de las señales ópticas

3.3.4 Cálculo de la distancia con iluminación solar

Sea que el terreno, donde se presenta el RM, se irradia por el flujo luminoso, cuya densidad es $Q \text{ W/m}^2$. Vamos a considerar que la superficie de aquel terreno se subordina a la ley de Lambert, pues refleja la irradiación por todos los lados regularmente, con el coeficiente de reflexión K_r . Extraeremos de esta superficie un área elemental S_{el} de diámetro d_{el} . La potencia de la irradiación reflejada de esta área es:

$$P_{el} = K_r Q S_{el} \quad (3.15)$$

Notaremos que la potencia reirradiada por la área S_{el} con respecto al objetivo del DME la podemos considerar como la irradiada por una fuente puntual. Esta potencia se irradia en el ángulo sólido $\Omega_{el} = 4\pi \sin^2(i_{el}/2)$, donde i_{el} es el ángulo de la vista. En el caso consideramos $i_{el} = 90^\circ$ y $\Omega_{el} = 2\pi$ sr. La densidad de la irradiación del elemento es:

$$I_{el} = \frac{K_{el}QS_{el}}{2\pi} \quad (3.16)$$

Al objetivo del DME la irradiación de la densidad I_{el} desde el elemento S_{el} genera un ángulo sólido $\Omega_{ob} = \frac{S_{ob}}{D^2}$, donde $S_{ob} = \pi d_{ob}^2 / 4$, D – es la distancia hasta el elemento S_{el} . La potencia de esta irradiación es:

$$P_{fr} = I_{el}\Omega_{ob} \quad (3.17)$$

Precisamente es esta potencia la que, al atravesar el objetivo con el coeficiente de traspaso $K_{tr} < 1$, incide sobre el FR. Entonces, según (3.15), (3.16) y (3.17), se puede escribir:

$$P_{fr} = \frac{K_r K_{tr} S_{el} S_{ob} Q}{2\pi D^2} \quad (3.18)$$

Esto es una parte P_{el} de la potencia, que alcanzó el FR.

De esta expresión se sigue que, con parámetros constantes de construcción del DME, con la iluminación constante Q , la potencia P_{fr} , que atina el FR, solo depende de las propiedades de reflexión de los objetos que se encuentran en el campo de vista, y de las

distancias, que separan aquellos objetos del DME. Teniendo en consideración $d_{el} = 0.1\text{m}$, $d_{ob} = 0.03\text{m}$, $K_{tr} \approx 0.5$ y, por ejemplo, la densidad de la iluminación solar en la superficie de la tierra [4] $Q \approx 10^3 \text{ W/m}^2$, de la fórmula (3.18) encontramos:

$$P_{fr} = \frac{4.42 \cdot 10^{-4} K_r}{D^2} \quad (3.29)$$

Supondremos que los objetos de color blanco en el campo de vista del DME poseen el coeficiente $K_{rb} \approx 0.9$, y de color negro - $K_{rn} \approx 0.1$. En este caso la escala blanca-y-negra del DME posee un intervalo de:

$$P_{bn} = 4.42 \cdot 10^{-4} \frac{K_{rb} - K_{rn}}{D^2} = \frac{3.53 \cdot 10^{-4}}{D^2}$$

Al poner el valor de umbral de la sensibilidad del FR $P_t \approx 10^{-10} \text{ W}$ por la unidad de la medición, se puede encontrar la cantidad de graduaciones diferibles condicionales (GDC) en el nivel de sobrefondo de la señal para las diferentes distancias:

$$N_g = \frac{P_{bn}}{P_t} = \frac{3.53 \cdot 10^{-4}}{P_t D^2} \quad (3.20)$$

Por ejemplo, para la distancia $D = 100 \text{ m}$

$$N_g = \frac{3.53 \cdot 10^{-4}}{10^{-10} \cdot 10^4} = 353 \text{ gcd.}$$

El valor N_g permite escoger de manera objetiva la cantidad de los niveles del CAD para el esquema del procesamiento de la señal óptica. Por todo el intervalo de las distancias la cantidad de los niveles del CAD se cumple la condición:

$$N_{AD} \geq N_g$$

3.4. Estimación de la incertidumbre

3.4.1. Incertidumbre

De la Guía para estimar la incertidumbre en la medición tenemos que la incertidumbre de una magnitud de entrada X obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales [15, 16]. Por lo tanto, si X se determina por n mediciones independientes, siendo q_j cada una de ellas, el mejor estimado x_i del valor de X es la media de los resultados individuales, es decir:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (3.21)$$

Y la dispersión de los resultados de la medición q_j para la magnitud de entrada X se encuentra por medio de su desviación estándar experimental cuya fórmula es:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (3.22)$$

La incertidumbre estándar $u(x_i)$ de X se obtiene mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (3.23)$$

Por lo tanto, para la incertidumbre estándar de la medición X tenemos:

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (3.24)$$

Cuando una medición se lleva a cabo por un método bien caracterizado y bajo condiciones controladas, es lógico suponer que los q_j no cambian, es decir, que la dispersión es nula. En este caso la componente de la incertidumbre puede ser determinada de manera confiable, con la desviación estándar s_p obtenida de un solo experimento anterior.

La incertidumbre estándar de la media se estima, en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (3.25)$$

3.4.2. Distribución de probabilidad uniforme o rectangular

En una distribución de probabilidad uniforme o rectangular (como se conoce en el ámbito metrológico) cada valor, en un intervalo dado, tiene la misma probabilidad de

ocurrencia, es decir, que la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. Ejemplos típicos serían: la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. De manera general, podemos considerar que, cuando hay exclusivamente conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución de probabilidad uniforme o rectangular [15, 16, 17].

Si la magnitud de entrada X tiene una distribución de probabilidad uniforme o rectangular con el límite superior a_+ y el límite inferior a_- , el mejor estimado x_i para el valor X está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (3.26)$$

y la incertidumbre estándar se calcula por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad (3.27)$$

o lo que es lo mismo:

$$u(x_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad (3.28)$$

en donde $a/2$ es el semiancho del intervalo a con:

$$a = a_+ - a_- \quad (3.29)$$

Una aplicación típica de lo anterior es la resolución de un instrumento digital o la incertidumbre relacionada con el número finito de cifras significativas de datos tomados de la literatura que puede ser tratada con este tipo de distribución (siempre y cuando no haya indicios de que la incertidumbre en realidad sea mayor que la incertidumbre relacionada con la cifra menos significativa). Si se aplica a la resolución de un instrumento digital, a correspondería al dígito menos significativo. Si se aplica a datos tomados de la literatura, a correspondería a la cifra menos significativa.

Entonces, podemos decir que una medición X consta de un mejor estimado x_i más una declaración de la incertidumbre en la medición Δx_i , es decir:

$$X = x_i \pm \Delta x_i \quad (3.30)$$

en donde, una medida de la dispersión de las mediciones individuales x_i sería la varianza:

$$v = s^2 \quad (3.31)$$

Sin embargo, es más práctico emplear la desviación estándar como medida de dispersión, de tal manera que:

$$s = \sqrt{v} \quad (3.32)$$

Entonces, Si tenemos el valor medio de una función de distribución de probabilidad uniforme o rectangular:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2}$$

con una incertidumbre:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} = \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad (3.33)$$

Para una sola medición.

Si hacemos n mediciones, es lógico suponer que esta incertidumbre se verá afectada de la siguiente manera:

$$u_T(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{a}{2\sqrt{3}\sqrt{n}} \quad (3.34)$$

3.4.3 Incertidumbre esperada

Como no disponemos de mayor información, podemos partir de que se tomaron mediciones cada 50 milésimas de pulgada, es decir, cada 1,27 mm. Por lo tanto, podemos considerar una incertidumbre, tipo B, máxima por resolución, asumiendo que el instrumento tiene una distribución de probabilidad rectangular, de:

$$u(x_i) = \frac{1,27mm}{2\sqrt{3}}$$

$$u(x_i) = 0,3666mm$$

Sin embargo, haciendo uso de la estadística, podemos bajar aún más esta incertidumbre según se evidencia en la sección anterior (fórmula 3.34). De esta forma, podemos hacer 20 mediciones de cada punto y entonces la incertidumbre esperada sería:

$$u_T(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{0,3666mm}{\sqrt{20}}$$

$$u_T(x_i) = 0,0819mm$$

$$u_T \cong 82\mu m$$

Capítulo 4

Resultados

4.1 Planeación del experimento

Para poner en contexto las mediciones que se van a tomar con su análisis, es necesario seguir la secuencia de pasos involucrados en la toma de mediciones, según lo explica Kratochvil [18]. Esta secuencia consiste de cinco acciones mayores que son: modelado, planeación, muestreo, medición y evaluación. En el modelado se determinan las preguntas que deberán contestarse por medio del estudio; se definen los objetivos del trabajo. En la etapa de planeación se determinan los medios por medio de los cuales se van a lograr los objetivos. Aquí se incluyen la selección de la metodología analítica a emplear, los recursos y potenciales a emplearse y los tiempos de ejecución. En el plan se especifican también el número y tamaño de las muestras y los lugares de muestreo. Cuando no se tiene información previa sobre la población, el plan también requiere muestreos preliminares para determinar la variabilidad de la población. A esta etapa le siguen las actividades de muestreo, en donde se toman muestras de campo y, de ser necesario, se refina el experimento. Después viene la etapa de medición, que involucra la preparación del experimento y la adquisición de los datos. Por último, se selecciona el mejor valor y se determinan la precisión y la exactitud. Con los resultados se determina la validez del modelo o se revisa, en caso de ser necesario, y se repiten las operaciones.

En nuestro caso, el modelo empleado se muestra en las figs. 1.4 y 3.5. Cabe mencionar que, en lugar de montar la lente sobre el mecanismo de posicionamiento, colocamos el fotorreceptor (FR) y éste lo conectamos a un amplificador electrónico cuya salida monitoreamos por medio de un voltmetro. Determinamos hacer 20 corridas midiendo cada 50 milésimas de pulgada, es decir, cada 1,27 mm tanto la distancia en el micrómetro como la salida del amplificador en el voltmetro. La razón de lo anterior se debió a que, al no contar con un sistema automatizado, se requiere de mucho tiempo para hacer una cantidad mayor de mediciones.

Durante las primeras pruebas se hicieron algunos muestreos para poder determinar los ajustes necesarios. Dichos ajustes implicaron, entre otros, el cambio del sensor fotorreceptor, el encapsulado de todo el sistema fotorreceptor y la adición de un soporte extra al sistema para evitar movimientos al manipularlo.

A continuación se dan algunos detalles de los elementos que componen el sistema de medición y algunos elementos previos al experimento.

4.2 Programa para calcular las distancias

Para estimar las distancias “d” que debíamos medir con el movimiento micrométrico, se elaboró un programa en matlab que nos da como resultado un archivo en donde se encuentran, en forma tabular, la distancia de la lente al objeto “D” y la distancia de la lente a la imagen “d”. Además del archivo antes citado, el programa nos muestra una gráfica de los valores de “D” contra “d”. Así mismo, el programa nos muestra una gráfica de la variación de la resolución con la distancia. Por cuestiones prácticas limitamos la distancia “D” a un máximo de 100 m y a un mínimo de 1 m. A continuación se presentan algunas gráficas y tablas obtenidas con dicho programa.

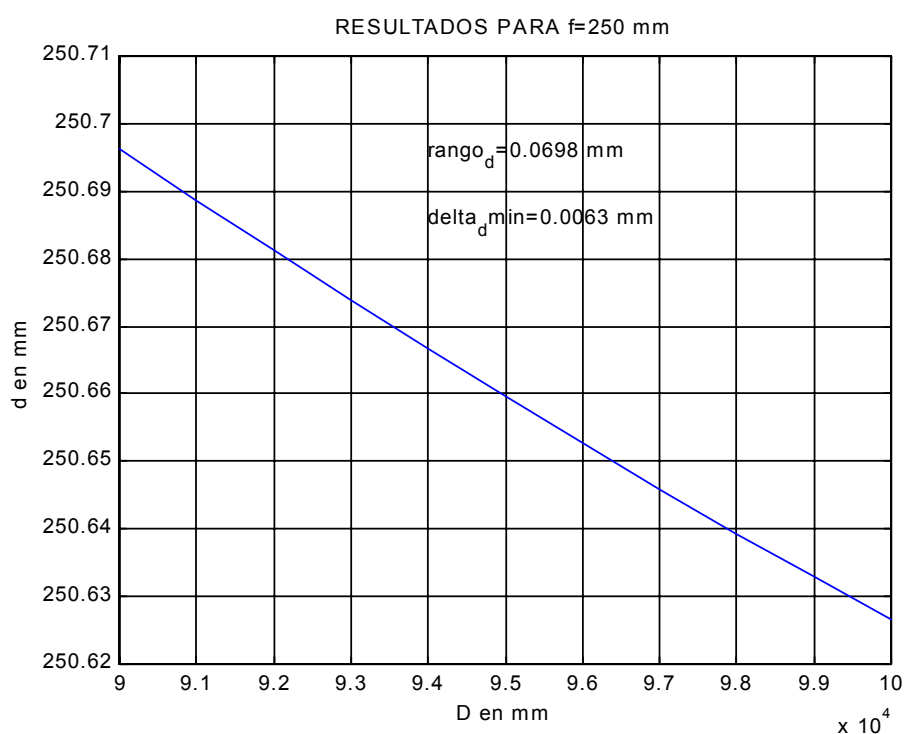


Fig. 4.1. Gráfica de “D” contra “d” para un intervalo de “D” de 90 a 100 m.

D(mm)	d(mm)
90000.0000	250.6964
91000.0000	250.6887
92000.0000	250.6812
93000.0000	250.6739
94000.0000	250.6667
95000.0000	250.6596
96000.0000	250.6527
97000.0000	250.6460
98000.0000	250.6394
99000.0000	250.6329
100000.0000	250.6266

Tabla 4.1. Resultados para “D” entre 90 y 100 m.

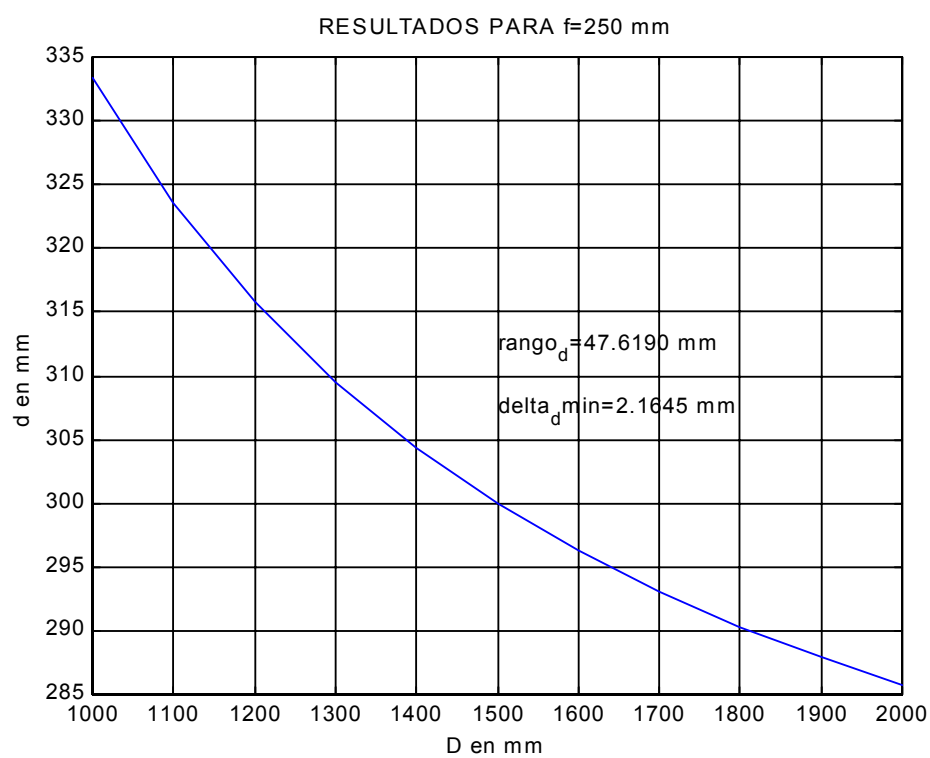


Fig. 4.2. Gráfica de “D” contra “d” para un intervalo de “D” de 1 a 2 m.

D(mm)	d(mm)
1000.0000	333.3333
1100.0000	323.5294
1200.0000	315.7895
1300.0000	309.5238
1400.0000	304.3478
1500.0000	300.0000
1600.0000	296.2963
1700.0000	293.1034
1800.0000	290.3226
1900.0000	287.8788
2000.0000	285.7143

Tabla 4.2. Resultados para “D” entre 1 a 2 m.

Como podemos observar, para poder medir hasta 100 m necesitamos un mecanismo que pueda desplazarse y medir pasos de 6.3 μ m. Además de necesitarse una mesa de trabajo de más de 100 m de largo, lo cual, es totalmente impráctico. Por tal motivo, se decidió limitar el intervalo quedando de 1 a 2 m. En la gráfica 4.2 y en la tabla 4.2 observamos que los pasos mínimos que se requieren para este intervalo son de 2,17 mm, lo cual ya es un valor más manejable. Aún así, se compró un mecanismo con pasos de 1 μ m como se detalla en la siguiente sección.

4.3 Mecanismo.

La parte mecánica fue integrada con partes compradas, algunos diseños propios sencillos, que se mandaron hacer y algunas adaptaciones de mecanismos que encontramos en esta búsqueda.

Después de analizar las tablas y gráficas de la sección anterior, llegamos a la conclusión de que, difícilmente podríamos hacer los experimentos para distancias mayores a 3 m. Aún más, la mesa óptica, que llegó en el transcurso, nos permitía solamente una distancia máxima de 2 m, así que optamos por armar todo sobre dicha mesa y nos limitamos a medir una distancia máxima de 1 m; suficiente para validar la hipótesis.

Como necesitábamos desplazamientos micrométricos, se decidió comprar el mecanismo con un micrómetro analógico y digital integrado. Dicho mecanismo se encontró

en Edmund Scientific con las siguientes características: un desplazamiento máximo de 50 mm (2") y una resolución de 1 μ m. A continuación se muestran las fotos del sistema en sus diferentes etapas. A dicho mecanismo se le adaptó al principio un aro con tornillos para sujetar la lente o el fotorreceptor (FR) según se diera el caso (fig. 4.3.) y todo esto se montó sobre un soporte que permite regular la altura, el cual se desliza horizontalmente sobre un riel para experimentos ópticos sujeto a la mesa por medio de tornillos (fig. 4.3). El circuito electrónico se construyó sobre una tarjeta perforada y, también sobre ésta se montó el sensor fotorreceptor. En la fig. 4.5 superior se aprecia, de izquierda a derecha, el fotorreceptor, el circuito integrado y los potenciómetros de ajuste de offset y ganancia. En la fig. 4.5 inferior se ve una vista más clara del FR y, al fondo, el tubo de ABS en el cual se metió toda la electrónica. Cuando nos dimos cuenta de que era más práctico mover el FR en lugar de la lente, optamos por el mecanismo que se muestra en la fig. 4.6. Aquí podemos ver el tubo con la electrónica montado sobre el mecanismo de desplazamiento y los cables de alimentación y salida del amplificador.

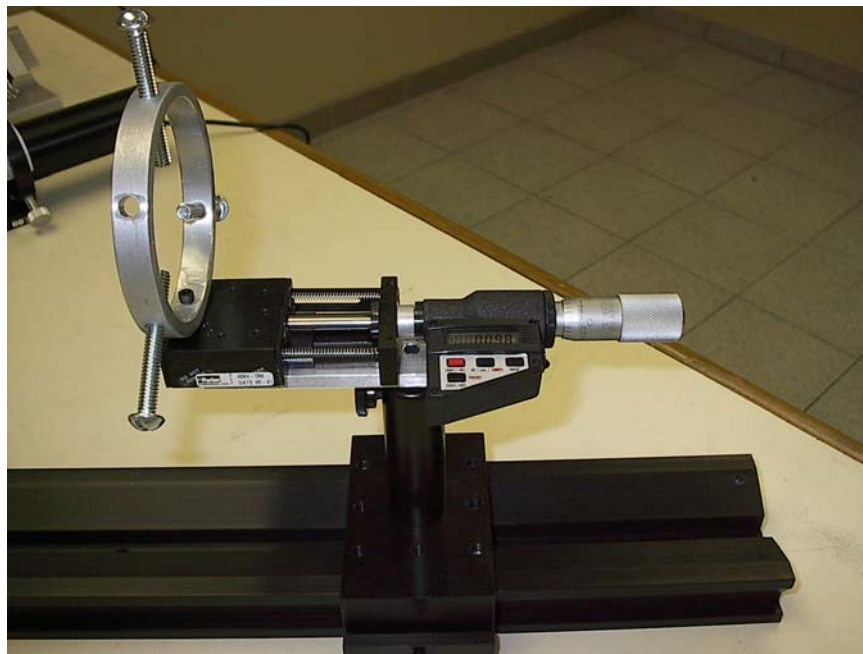


Fig. 4.3. Mecanismo para el desplazamiento micrométrico y aro para sujetar la lente.



Fig. 4.4. Vista lateral del mecanismo anterior.

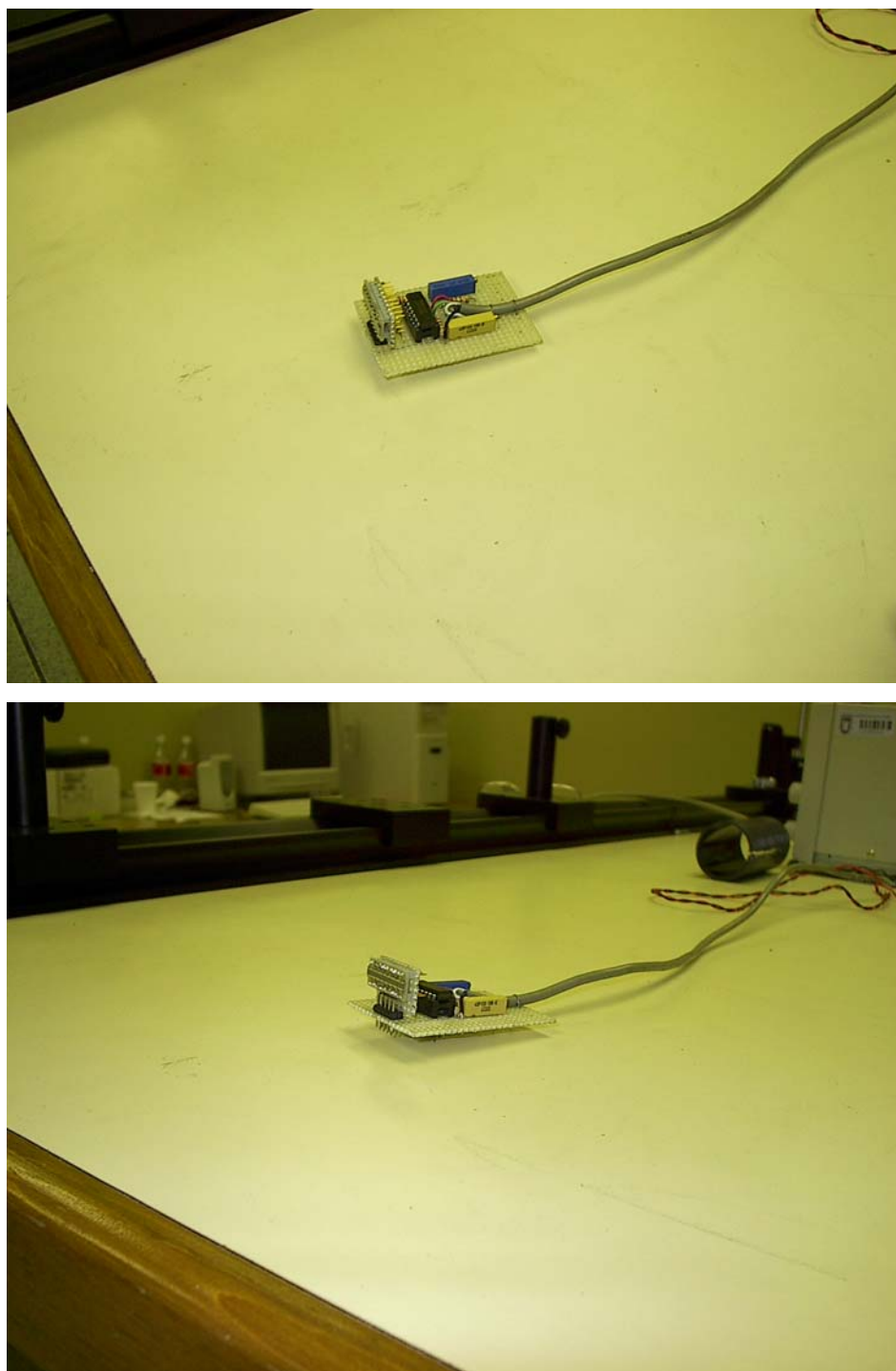


Fig. 4.5. Dos vistas del fotorreceptor y el amplificador.



Fig. 4.6. Mismo mecanismo con el fotorreceptor montado.

4.4 Circuito electrónico

Para poder detectar cuando la imagen está en foco por medio de una señal eléctrica suministrada por el fotorreceptor (FR), es necesario el uso de un circuito electrónico que nos permita amplificar dicha señal hasta los niveles deseados. A la entrada del amplificador tenemos la señal de corriente proporcionada por un fotodiodo de photonic detectors modelo PDB-C110 [38] con un área activa de 100 mm^2 y máxima respuesta a 950 nm , que es el que actúa como fotorreceptor (en el anexo B se muestran las características completas proporcionadas por el fabricante).

A la salida del amplificador requerimos un voltaje lo suficientemente grande como para poder medirlo con un voltmetro sin ninguna dificultad, por lo tanto, se optó por un amplificador de corriente similar al presentado por Coughlin y Driscoll en el libro “Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales” [19] basado en el circuito operacional de propósito general 747, quedando como el que se muestra en el apéndice C

con un potenciómetro para el offset y otro para variar la ganancia según las necesidades ya que se estuvo experimentando con diferentes fuentes de luz.

4.5 Configuración final del experimento

En la primera etapa del experimento, el fotorreceptor (FR) se montó sobre la tarjeta en donde se construyó el amplificador y todo el conjunto se introdujo dentro de un tubo negro de ABS para evitar ruido por luz. Como tuvimos problemas, tanto con el fotorreceptor original como por la sensibilidad del amplificador y la estabilidad del mecanismo, optamos por mejorar el diseño quedando como se muestra en las siguientes figuras. El fotorreceptor se cambió por uno con una superficie sensible de aproximadamente 1 cm^2 al que se le puso un “pinhole” enfrente. Para evitar las interferencias por las luces reflejadas, incluso en la ropa, el fotorreceptor se encapsuló dentro de un fuelle que encontramos en el laboratorio de óptica, de tal manera que sólo le llegara la luz que entra por la lente. Finalmente, para mejorar la estabilidad del mecanismo y evitar variaciones cada vez que movíamos el micrómetro, se le puso un soporte adicional atornillado (figs. 4.7 y 4.9).

Para llevar a cabo el experimento se empleó un sensor tipo fotodiodo montado sobre un mecanismo de deslizamiento micrométrico con una resolución de 1 micrómetro. La salida del sensor se conectó a un amplificador de transconductancia de alta ganancia, el cual fue alimentado con +12 V y -12 V por medio de una fuente Tektronix modelo PS280, y la salida de éste se conectó a un voltmetro digital marca HP, modelo 34401A (figs. 4.7 a 4.9). Enfrente del sensor se colocó la lente con un diámetro de 33,8 mm y una distancia focal de 75 mm. Para minimizar el ruido producido por nuestros movimientos, se colocó un fuelle entre la lente y el sensor. La fuente de luz, consistente en una Fiber-Lite series 180, se colocó a una distancia de 1 m de la lente y se hicieron mediciones con la fuente de luz con un diámetro de 1 cm y con una superficie Lambertiana del mismo diámetro (fig. 4.10). Todo esto fué colocado sobre un riel sujeto a una mesa óptica.

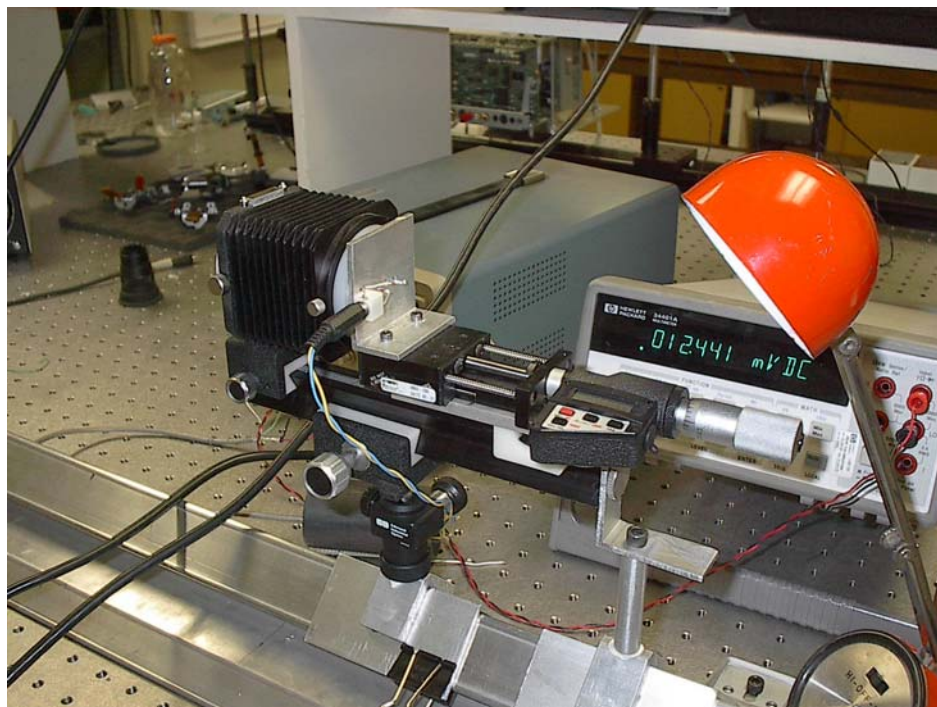


Fig.4.7. Montaje final después de las mejoras.

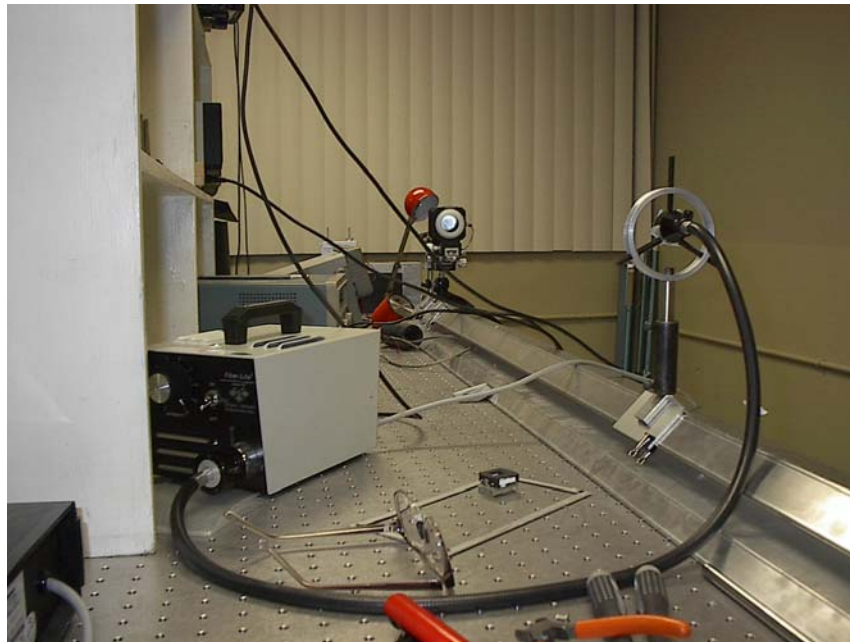


Fig. 4.8. Otra vista del arreglo para el experimento final.

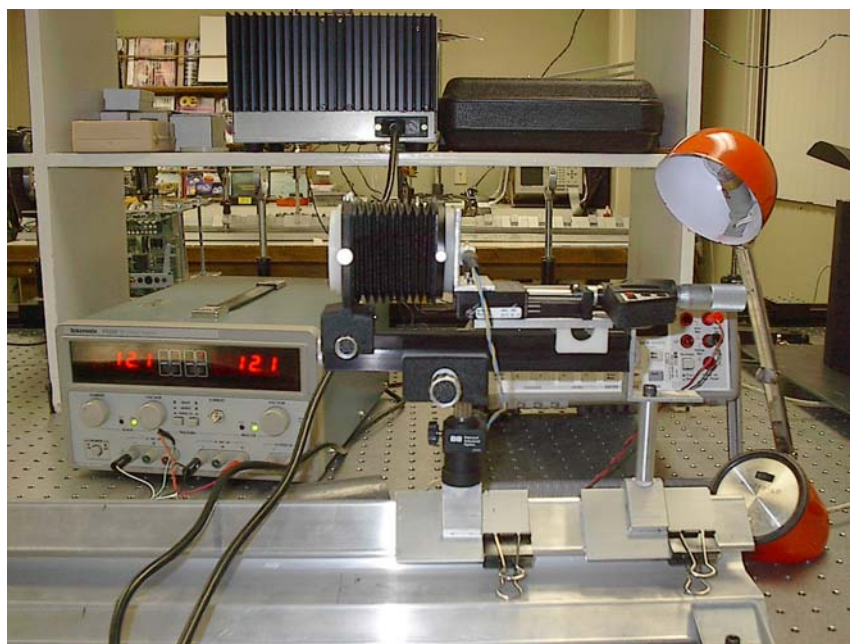


Fig. 4.9. Mecanismo para movimientos micrométricos, lente y fotosensor.



Fig. 4.10. Fuente de luz.

4.6 Análisis de los resultados

Se llevaron a cabo varias series de mediciones en diferentes días y bajo diferentes condiciones. En la siguiente tabla se muestra un grupo de mediciones hechas el día 5 de septiembre del 2002 así como su respectiva gráfica.

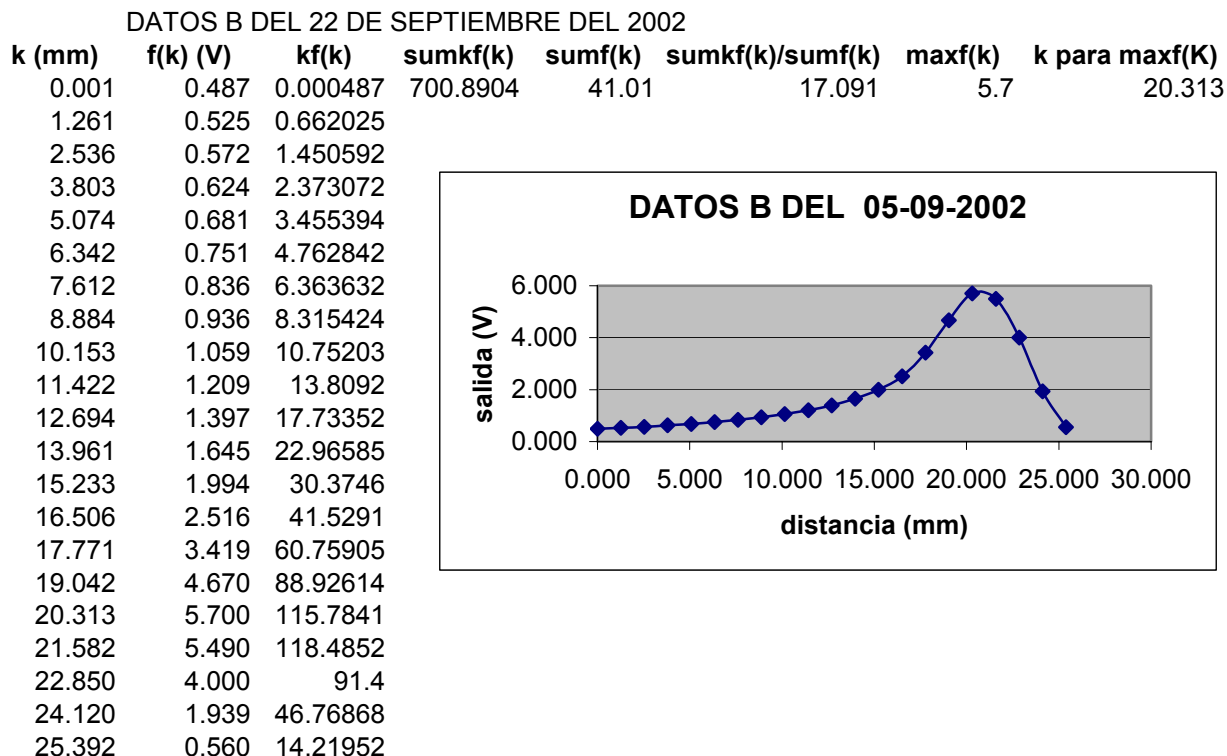


Tabla 4.3. Datos del 5 de sep. de 2002 y gráfica correspondiente.

4.6.1 Gráficas

Como es mucha la información recabada, se optó por mostrar únicamente algunas de las gráficas junto a los valores tabulados correspondientes (tabla 4.3). Así mismo, los datos obtenidos y los cálculos de los valores de las abscisas de los centros de energía de las señales y las abscisa correspondientes a los valores máximos se muestran en la tabla 4.4.

4.6.2 Cálculo de medias y media de medias

En la siguiente tabla se dan los valores promedios obtenidos de la siguiente manera:

a) bajo la columna de **sumkf(k)/sumf(k)** están los valores de las abcisas de los centros de energía de cada grupo de mediciones obtenidos por medio de la siguiente fórmula:

$$\xi = \frac{\sum_{a \leq k \leq b} k [f(k)]}{\sum_{a \leq k \leq b} [f(k)]}$$

b) bajo la columna **k para maxf(K)** están los valores de la abcisa que corresponde al máximo de la señal.

c) bajo la columna **PARA VALORES SUPERIORES A V** se encuentran los valores de la abcisa del centro de energía de la señal para valores superiores a los 2 Volts.

PARA VALORES SUPERIORES A 2 V		
sumkf(k)/sumf(k)	k para maxf(K)	sumkf(k)/sumf(k)
17.091	20.313	20.038
16.983	20.315	19.63
17.041	20.312	19.684
16.97	20.319	19.631
17.072	20.311	20.038
16.955	20.317	19.621
17.094	20.312	19.696
16.936	20.32	19.63
17.104	20.312	20.047
16.964	20.319	19.991
17.157	20.317	20.04
17.003	20.32	19.988
17.152	20.314	19.997
17.041	20.321	19.646
17.137	20.312	19.988
17.024	20.321	19.639
17.175	20.312	19.999
17.031	20.32	19.64
17.147	20.317	19.99
17.031	20.318	19.638
promedio=17.055	promedio=20.316	promedio=19.829
s=0.074	s=0.004	s=0.189

Tabla 4.4. Promedios para las diferentes situaciones y su respectiva desviación estándar.

4.6.3 Cálculo de varianzas

También se dan, en la misma tabla 4.4, las desviaciones estándar de las abcisas de los centros de energía de las señales, de las abcisas de los máximos y de las abcisas de los centro de energía de las señales para valores superiores a 2 V. Para el cálculo de los mismos se empleó la ya conocida fórmula de:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

4.6.4 Análisis de los datos

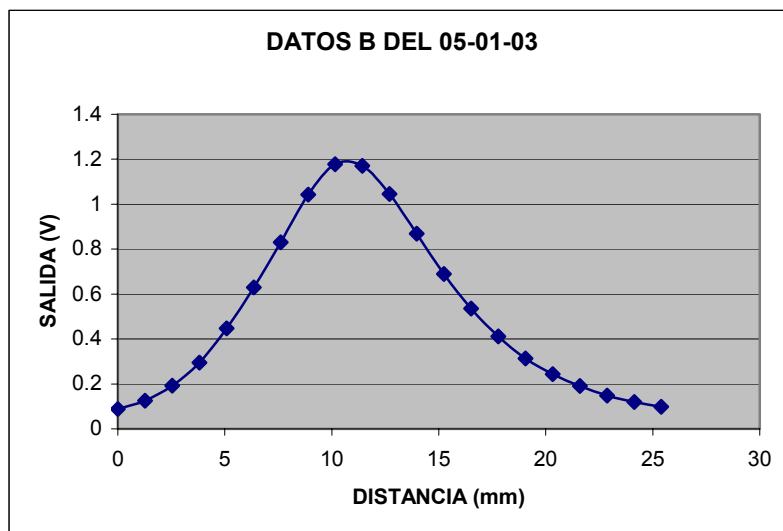
De los conjuntos de mediciones analizados encontramos que en todos los casos pudimos encontrar el valor máximo de la señal con un error muy pequeño: 20,316 mm como valor medio y con una desviación estándar de 0,004 mm. Así mismo encontramos el valor promedio del centro de energía de la señal en 17,055 mm con una desviación estándar de 0,074 mm. Cabe destacar que en el análisis estadístico se eliminaron los valores A del conjunto ya que representaban una significativa desviación con el resto de los valores.

Como se puede ver en la tabla 4.4, se sacó el valor promedio del centro de energía de la señal para valores superiores a 2 V. Esto se hizo porque el valor máximo y el centro de energía no coinciden debido a que la gráfica, como se puede ver, está cargada hacia la derecha. Podemos ver que, aunque el valor del centro de energía de la señal se aproxima bastante al valor del máximo, la desviación estándar se amplía a más del doble.

Tratando de corregir la inclinación que presenta la gráfica de la señal y, sospechando que pudiera deberse a alguna pequeña desviación en la alineación del sistema óptico, se procedió a tratar de mejorar el mismo y se repitió el experimento obteniéndose una mejoría notable en los resultados, de los cuales, presentamos una muestra en la tabla 4.5.

DATOS B DEL 05 DE ENERO DEL 2003

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.005	0.089	0.000	124.884	10.664	11.711	1.178	10.153
1.269	0.125	0.159					
2.538	0.192	0.487					
3.81	0.295	1.124					
5.082	0.447	2.272					
6.351	0.63	4.001					
7.619	0.83	6.324					
8.891	1.043	9.273					
10.161	1.178	11.970					
11.43	1.17	13.373					
12.702	1.046	13.286					
13.971	0.869	12.141					
15.242	0.689	10.502					
16.511	0.535	8.833					
17.778	0.411	7.307					
19.051	0.314	5.982					
20.319	0.244	4.958					
21.592	0.191	4.124					
22.861	0.148	3.383					
24.132	0.12	2.896					
25.395	0.098	2.489					



sumkf(k)/sumf(k)	k para maxf(K)
11.655	10.153
11.711	10.153
11.678	10.153
11.722	10.153
11.724	10.153
11.714	10.153
11.735	10.153
11.715	10.153
11.692	10.153
11.696	10.153
11.691	10.153
11.685	10.153
11.692	10.153
11.696	10.153
11.692	10.153
11.69	10.153
11.699	10.153
11.651	10.153
11.691	10.153
11.694	10.153

promedio= 11.696

promedio=10.153

s=0.021

s=0.000

Tabla 4.5. Promedios y desviaciones de los resultados finales.

Como podemos ver la inclinación de la forma de onda de la señal se corrigió. Ahora tenemos que las abcisas del centro de energía de la señal y del máximo de la misma se encuentran más juntas. Hablamos de una separación de apenas 1,543 mm contra 3,261 de la corrida anterior. Notamos también que la desviación estándar para la abcisa del centro de energía de la señal, en este caso, es de 0,021 mm contra 0,074 mm de la corrida anterior, es decir, una mejoría en un factor superior a tres. Con respecto a la desviación estándar de la abcisa del máximo de la señal tenemos que, en este caso es de 0,0 contra 0,004 de la corrida anterior.

Podemos entonces concluir que la correcta alineación del sistema óptico es crítica y que necesitamos de mecanismos que nos permitan llevar a cabo esta alineación. Desafortunadamente y, por falta de tiempo y recursos económicos, no fue posible llevar a cabo las mejoras requeridas al sistema.

Podríamos preguntarnos entonces ¿Por qué tomar el centro de energía de la señal y no el valor máximo como indicador cuando este ultimo tiene una desviación mucho menor que el primero? Y la respuesta es sencilla. Porque, en condiciones controladas como las del laboratorio, es fácil detectar el máximo de la señal pero, si consideramos un sistema con ruido, como seria fuera del laboratorio, esta tarea seria mucho más compleja. Por lo tanto, es más confiable emplear la detección del centro de energía de la señal.

4.6.5 Comparación entre incertidumbres

Como se tomaron mediciones cada 50 milésimas de pulgada, es decir, cada 1,27 mm, podemos considerar una resolución de 1,27 mm y, si se asume que el instrumento tiene una distribución de probabilidad rectangular, la desviación estándar asociada a la incertidumbre, según se vió en un capítulo anterior es de:

$$s = \frac{l}{2\sqrt{3}\sqrt{n}}$$

$$s = \frac{1,27}{2\sqrt{3}\sqrt{20}}$$

$$s = 0,082mm = 82\mu m$$

Para el cálculo de la incertidumbre de los valores obtenidos con los experimentos, se considera que ésta es tipo A, es decir, es la obtenida por métodos estadísticos y, por lo tanto, se emplea la fórmula:

$$s(\bar{q}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

en donde $s(\text{promedio})$ es la incertidumbre básica asociada al valor promedio experimental de las observaciones, s es la desviación estándar experimental y n es el número de mediciones independientes hechas. Esto nos da:

$$s(\bar{q}) = \frac{0.074}{\sqrt{19}}$$

$$s(\bar{q}) = 0.017mm$$

Como podemos ver con el resultado anterior, cualquiera de las corridas hechas sobrepasa la incertidumbre esperada según los cálculos. Se puede observar claramente que predomina la incertidumbre tipo B por resolución lo cual no es de extrañar ya que existe una relación de 4.83 a 1 entre las dos incertidumbres.

4.7 Fuentes de error

Como en todo experimento, el nuestro adolece de varias fuentes de error. Las principales se enlistan a continuación.

4.7.1 Error por simplificación de la fórmula

En la sección 2.2 derivamos la ecuación de la lente delgada. Sin embargo, por facilidad, hicimos algunas consideraciones que afectan la exactitud de los resultados. La primera de ellas es que consideramos ángulos tan pequeños entre los rayos y el eje óptico (rayos paraxiales) que se cumple:

$$\text{sen } \theta \approx \theta$$

$$\cos \theta \approx 1$$

$$\tan \theta \approx \theta$$

La segunda consideración es la de la lente delgada, en donde despreciamos el grosor de la misma considerando que es mucho menor que el radio de curvatura de la lente.

4.7.2 Errores por los lentes

Los lentes, por más que queramos, no son perfectos e introducen una serie de errores como veremos a continuación a los cuales se les llama aberraciones de las lentes. Éstas se dividen de la siguiente manera [10]:

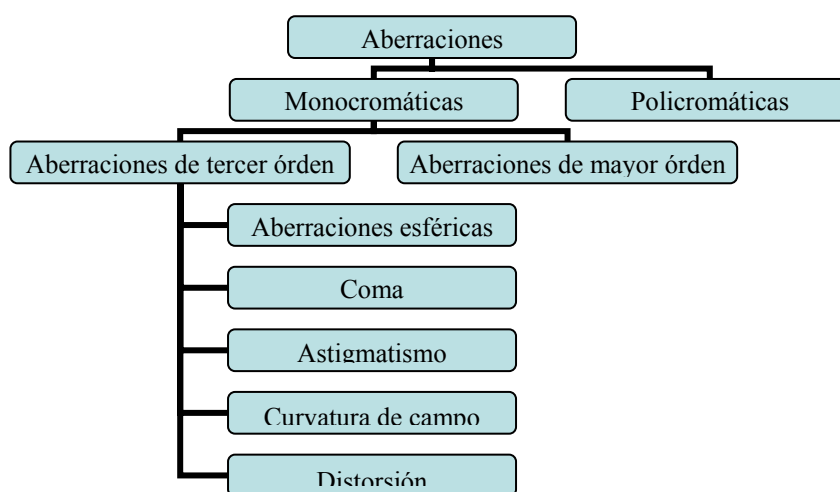


Fig. 4.11. Aberraciones debidas a la lente.

Aberraciones esféricas. Como una simplificación hemos estado trabajando en el dominio paraxial sin embargo, fuera de éste, una superficie esférica ya no enfoca los rayos paralelos en un solo punto. Al contrario, los rayos que llegan a la superficie de la lente más alejados del centro, son enfocados en un punto más cercano a la superficie de la lente. Podemos decir entonces que la distancia focal depende de la distancia radial y del rayo al centro óptico.

Para describir la severidad de la aberración esférica, se emplea la distancia axial desde el foco real hasta el punto focal paraxial y a esto se le llama aberración esférica longitudinal. El signo de dicha aberración es igual al de la distancia focal de la lente.

Para representar la influencia de la aberración esférica sobre la calidad de las imágenes, se puede usar el término “aberración esférica transversal”, la cual es definida como la distancia radial de la intersección del rayo de salida con con el plano focal paraxial trasero. Debido a este tipo de aberración, el enfoque exacto es imposible. Siendo prácticos, podemos minimizar la influencia de este tipo de aberración de la siguiente manera:

- Baja apertura. Si escogemos un número- f más grande reducimos la aberración esférica pero perdemos brillo. Sin embargo, como aberración esférica longitudinal es proporcional a y^2 y la aberración esférica transversal es proporcional a y^3 , esta es una manera muy efectiva para reducir la aberración.
- Desplazamiento del plano de la imagen. Para minimizar lo borroso mientras se mantiene la apertura, es mejor mover el plano de la imagen a la posición I_0 en donde el diámetro de la envoltura del conjunto de rayos es mínima. Al mínimo pero inevitable círculo borroso se le llama círculo de menor confusión. Es importante tomar nota de que la localización del plano de imagen I_0 depende, en particular de la distancia al objeto y el número- f .
- Arreglo de lentes óptimo. Otra manera de reducir la aberración esférica es arreglando las superficies del sistema de tal manera que los ángulos de los rayos a las superficies sean lo más pequeños posibles. Esto se debe a que la aberración

esférica es causada por la violación a la aproximación de ángulos pequeños. Como regla general podemos decir que una lente simple deberá ser usada siempre con su lado plano apuntando hacia los rayos con el mayor ángulo de incidencia. Al enfocar objetos distantes, una lente planoconvexa con una superficie trasera casi plana producirá los mejores resultados.

Coma. Es una aberración asociada con puntos del objeto fuera del eje. Debido a su forma asimétrica, coma es, a menudo, considerada como la peor de todas las aberraciones. Y es causada por la dependencia de la magnificación transversal M_T sobre la altura del rayo. Aún cuando no tenemos aberración esférica, coma impide el enfoque del punto del objeto en un solo punto de la imagen. Se considera una coma positiva si la magnificación se incrementa con la altura del rayo h .

Astigmatismo. El astigmatismo está asociado con conjunto de rayos desviados saliendo de puntos de la fuente no axiales. Para entender mejor esto, es conveniente visualizar dichos conjuntos de rayos en un plano meridional y otro sagital. El plano meridional es definido como aquel que contiene al eje óptico y al rayo principal. El plano sagital es aquel que contiene al rayo principal y que es perpendicular al meridional. Ambos planos cambian con el punto fuente de los rayos. Además, el plano sagital cambia con cada superficie, mientras que el meridional permanece constante dentro del sistema óptico. Si asumimos un elemento óptico de simetría axial, entonces, para un punto dentro del eje no existe diferencia entre los planos sagital y meridional. Un punto fuera del eje enfrentará a la lente desde diferentes ángulos, causando que las distancias focales efectivas en los dos planos sean diferentes. Dicha diferencia se incrementa con la distancia focal paraxial de la lente y el ángulo de desvío de los rayos.

Curvatura de campo. Con un sistema óptico que no es totalmente perfecto, el hecho de que los planos cardinales no sean realmente planos produce una aberración primaria llamada “curvatura de campo Petzval”. Debido a la ausencia de otras aberraciones, la imagen de una fuente puntual es, otra vez, un punto. Dentro del dominio paraxial, todos los puntos en el plano del objeto se verán exactamente como puntos de la imagen. Debido a que los planos cardinales son esferas fuera del dominio paraxial, los planos conjugados se convierten en

esferas conjugadas. Consecuentemente, al forzar los puntos de la fuente a una superficie plana deforma la superficie de la imagen convirtiéndola en una superficie parabólica llamada superficie Petzval. Una lente con distancia focal positiva dobla la superficie Petzval hacia ella mientras que una lente con distancia focal negativa la dobla alejándola. Combinado lentes con distancias focales positivas y negativas podemos eliminar la curvatura de campo al aplanar la superficie Petzval.

Distorsiones. El desplazamiento de puntos de la imagen con respecto a locaciones paraxiales produce distorsiones en la geometría de la imagen sin degradar la nitidez. Usualmente, el desplazamiento se incrementa con la altura del objeto ya que los rayos se vuelven más inclinados. Para un sistema óptico con simetría rotacional, el desplazamiento de los puntos de la imagen es puramente radial y la distorsión se podría ver como dependiente de la magnificación transversal y la distancia del objeto al eje. La distorsión está influenciada por lo grueso de la lente y la posición de la apertura de salida. Sin embargo, reduciendo la apertura de salida no se reduce la distorsión pero si reduce otro tipo de aberraciones.

Aberraciones cromáticas. Hasta ahora hemos visto únicamente aberraciones monocromáticas causadas por la no linealidad de la ley de refracción, sin embargo, la dependencia del índice de refracción de casi todos los materiales, de la longitud de onda de la luz nos produce un nuevo tipo de aberración. Esto se debe a que los rayos de diferente color viajan en caminos diferentes a través de la óptica. Entonces, las imágenes de un punto en la fuente son diferentes para luces de diferentes longitudes de onda. En particular, la distancia focal varía con la longitud de onda. Los efectos de las aberraciones cromáticas son similares a aquellas producidas por las aberraciones esféricas.

4.7.3 Errores por alineación del sistema óptico

Como vimos en una sección anterior, la alineación del sistema óptico es crítica para el correcto funcionamiento del SVT. Con el sistema óptico mal alineado se corre el riesgo de que la imagen se forme en un eje que no coincida con el del sistema y, por lo tanto, la señal de salida se ve seriamente deteriorada. En nuestro caso, aunque empleamos un

sistema láser para llevar a cabo la alineación, la falta de dispositivos para mover los elementos del sistema óptico adecuados dificulta seriamente el trabajo.

4.7.4 Errores por el mecanismo de posicionamiento

Como hemos visto, el mecanismo empleado permite mover la lente o el fotorreceptor (FR) con pasos muy pequeños. Sin embargo, el eje de desplazamiento de dicho mecanismo debe de ser paralelo al eje del sistema óptico para evitar malas mediciones por incompatibilidad en los ejes. Así mismo, la resolución y la histéresis del mecanismo afectan la incertidumbre de la medición.

4.7.5 Errores de medición

Como ya sabemos, toda medición lleva implícita un error o, para estar mas acordes con el vocabulario metrologico, de una incertidumbre. En nuestro caso empleamos un micrómetro con indicador digital para medir el desplazamiento y un voltmetro digital para medir la tensión de cc en la salida del amplificador. Esto implica posibles errores en la lectura del micrómetro y, por lo tanto, en la medición de la distancia y del voltmetro o medición de la amplitud de la señal. Afortunadamente para este caso, las incertidumbres de los dos instrumentos empleados son mucho menores a la de los pasos del sistema.

4.7.6 Errores por procesamiento de los datos

Es bien sabido que las calculadoras y las computadoras pueden introducir errores en el procesamiento de los datos. Esto se da, entre otras cosas, por el truncamiento de cifras significativas debido a las limitaciones del número de dígitos que puede manejar el instrumento. Para minimizar esto, en este trabajo se empleo el programa de Microsoft Excel para procesar y graficar los datos empleando la mayor cantidad de cifras significativas y redondeando solo los valores finales.

4.7.7 Errores por cifras significativas

Este tipo de errores se dan por el manejo de valores con diferentes cifras significativas como, por ejemplo: la distancia focal de la lente es de 75 mm y no tenemos

más cifras significativas, mientras que los pasos del movimiento micrométrico son de 1,27 mm que tienen ya una cifra significativa más que la anterior. Para poder trabajar con esto suponemos una distancia focal de 75,0 mm, lo cual, no necesariamente es cierto.

4.8. Puesta a punto y calibración

4.8.1 Puesta a punto del distanciómetro

Como es sumamente difícil ajustar y medir la distancia exacta del centro de la lente al sensor, tendremos que recurrir a algunas argucias. Esta dificultad se da por el hecho, por ejemplo, de que es muy difícil localizar el centro de la lente con una precisión micrométrica, o localizar exactamente el plano del sensor de luz. Lo que proponemos para solucionar este problema es lo siguiente, basado, por supuesto en que debemos de tomar una gran cantidad de mediciones k_i en el intervalo de medición para disminuir la incertidumbre como se vió en un capítulo anterior:

a) en base al intervalo de distancias D que queremos medir, calcular, por medio del programa dista01c, el intervalo de las distancias d y los valores correspondientes a cada una de las d_i . A continuación se muestran estos datos generados por dicho programa para un intervalo de distancias D entre 1 y 3 m.

D(mm)	d(mm)
1000.0000	81.0811
1200.0000	80.0000
1400.0000	79.2453
1600.0000	78.6885
1800.0000	78.2609
2000.0000	77.9221
2200.0000	77.6471
2400.0000	77.4194
2600.0000	77.2277
2800.0000	77.0642
3000.0000	76.9231

Tabla 4.6. Cálculo de “d” para una lente de $f=75$ mm

Del mismo programa obtenemos que:

Rango_d = 4,1580 mm

b) como la d mínima es 76,9231 mm y la máxima es de 81,0811 mm y el rango máximo del movimiento micrométrico es de 50 mm, colocamos el sensor a una distancia tal que nos garantice que todo el intervalo de las k_i caiga dentro del rango_d = 4,1580 mm. Colocando pues el cero del movimiento micrométrico a una distancia de 54 mm del centro de la lente, garantizamos que todo lo anteriormente expuesto se cumpla.

b) A continuación, colocamos la superficie lambertiana a la distancia D_1 y hacemos una corrida de, al menos 50 veces sobre el intervalo para que sean 25 de ida y 25 de vuelta.

c) Calculamos la media $\bar{k}_1$ y se la sumamos a la distancia del centro de la lente al cero del movimiento micrométrico, que es de 54 mm. Esto nos da una distancia $d_1 = 54mm + k_1$.

d) Calculamos el error e con respecto al valor teórico. Esto es:

$$e = d_{1t} - d_{1m}$$

e) Repetimos el procedimiento para cada uno de los valores de D y obtenemos los errores correspondientes. Si existiera alguna desviación con respecto a los valores obtenidos teóricamente, esto se manifestaría como un error sistemático y sería muy fácil estimarlo por medio de un análisis de los datos y corregirlo moviendo el mecanismo, por medio de una gráfica de calibración de D contra d , por medio de programación o por medio de una combinación de métodos.

4.8.2. Calibración del distanciómetro.

Para la debida calibración del distanciómetro, requerimos de un patrón de longitud calibrado con su respectivo certificado de calibración. Patrón con el que no contamos por lo pronto. Como método alternativo se propone poner a punto el sistema y calibrar el movimiento micrométrico tipo vernier y el voltmetro que se emplea para medir la salida del amplificador. También se recomienda caracterizar dicho amplificador para evitar posibles no linealidades en el rango de operación.

Capítulo 5

Conclusiones.

Del análisis de los datos se puede concluir lo siguiente:

- a) es posible hacer mediciones de alta exactitud con la configuración propuesta;
- b) se puede mejorar la resolución del sistema si disminuimos el tamaño del paso;
- c) se puede minimizar la influencia del ruido automatizando el sistema para que se tomen más mediciones en un período corto de tiempo;
- d) es posible determinar el valor máximo de la señal con un error muy pequeño.
- e) se puede emplear el sistema como base para diseñar un equipo para medir distancias.

5.1. Posibles mejoras al sistema.

Como todo proyecto, el nuestro también estuvo limitado por la insuficiencia de recursos y la falta de una infraestructura adecuada. Es posible, entonces, hacerle varias mejoras. La primera de ellas sería automatizar el sistema por medio de la compra de un mecanismo de desplazamiento micrométrico y un sistema de adquisición de datos manejados por una micro computadora. Esto nos permitiría hacer mediciones con pasos más pequeños a los empleados manualmente que, en este caso fueron de 50 milésimas de pulgada, es decir, de 1,27 mm y a una velocidad de adquisición muy superior a la manual. Por ejemplo, manualmente hicimos toda la serie de mediciones en más de dos horas. Supongamos que el tiempo total fue de 2 h por simplicidad, esto nos da una medición cada 18 segundos. Es decir que tenemos una velocidad máxima de muestreo de 0,06 Hz, lo que es muy lento para el SVT de un robot móvil y, mucho más para un distanciómetro. Comparado con los distanciómetros electrónicos que vimos en el capítulo 1 con una velocidad de 500 000 muestras por segundo, lo nuestro es sumamente lento pero, aún así es útil.

5.1.1. Velocidad de muestreo

Partiendo de la ecuación que obtuvimos anteriormente y que se repite a continuación:

$$u_T(x_i) = \frac{l}{2\sqrt{3}\sqrt{n}}$$

en donde T es la resolución y n el número de mediciones hechas, podemos ver que la incertidumbre disminuye al aumentar el número n y/o disminuir l . De hecho, los instrumentos para medir distancias que existen actualmente en el mercado ya incorporan esta técnica estadística y existen distanciómetros que hacen hasta 25 000 mediciones para estimar una sola distancia.

Sin embargo, haciendo un análisis de las posibles limitaciones que existen para alcanzar una cierta velocidad de muestreo, encontramos que ésta está limitada por la velocidad del convertidor analógico-digital (A/D) pero, más que nada por la velocidad del mecanismo, el cual, por su propia naturaleza, es lento.

Para tratar de rebasar esta limitante, hacemos que nuestro A/D sea rápido y que haga mediciones de una manera continua mientras el mecanismo se mueve. Supongamos que tenemos una velocidad del mecanismo tal que recorre todo el intervalo en $1s$ (ver Fig. 3.3), es decir:

$$t_m = 1s$$

Si hacemos $\Delta\tau = \overline{\sigma_n}$ tendremos una manera de estimar la velocidad requerida por nuestro convertidor A/D para un cierto número de muestras n o podremos estimar el número de muestras n que se requieren empleando un convertidor A/D con una velocidad dada. Por ejemplo: Uno de los convertidores A/D más rápidos encontrados en el mercado es el ADS5102 de Texas Instruments que tiene una velocidad máxima de muestreo de 65

MSPS. Aplicando esto a lo visto anteriormente tenemos que la frecuencia del convertidor es $f_{A/D} = 65MHz$ y como

$$n = f_{A/D} \times t_m$$

$$n = 65 \times 10^6 \times 1$$

$$n = 65 \times 10^6$$

La resolución, en este caso sería:

$$l = \frac{L}{n}$$

en donde l es la resolución y L es la longitud del recorrido. Entonces, para un recorrido de 5 cm tenemos:

$$l = \frac{0,05m}{65 \times 10^6}$$

$$T = 77 \times 10^{-9} m$$

$$T = 77nm$$

Esto nos dará una incertidumbre, si hacemos 20 recorridos de:

$$u_T(x_i) = \frac{77 \times 10^{-9}}{2\sqrt{3}\sqrt{20}} m$$

$$u_T(x_i) = 4,98 \times 10^{-9} m$$

$$u_T(x_i) = 4,98nm$$

Podemos ver que la incertidumbre se reduce considerablemente con sólo disminuir el paso del mecanismo. Habría que ver si existe en el mercado un mecanismo con pasos de esta magnitud o si es posible construir uno.

Si en lugar de hacer 20 recorridos hacemos, por decir un número, 100 tendremos que:

$$u_T(x_i) = \frac{77 \times 10^{-9}}{2\sqrt{3}\sqrt{100}} m$$

$$u_T(x_i) = 2,23 \times 10^{-9} m$$

$$u_T(x_i) = 2,23 nm$$

Y así sucesivamente la incertidumbre baja conforme aumentamos el número de recorridos n de tal manera que para $n = 1000$ tendríamos una incertidumbre de $0,7 nm$.

5.2. Propuestas de proyectos futuros.

Hasta ahora hemos tratado de enfocar, ya sea, moviendo la lente o moviendo el fotorreceptor. Esto trae como consecuencia una baja velocidad de movimiento ya que implica un motor que haga girar una flecha roscada sobre la cual se mueve la lente o el fotorreceptor. Si queremos aumentar la velocidad de respuesta del sistema, necesitamos una manera de enfocar que sea más rápida. A continuación se dan algunas ideas al respecto.

a) Galvanómetro

Una de las primeras ideas que vienen a la mente es la de emplear un galvanómetro de espejo, como los que se emplean en sistemas de luces láser, para desviar el haz y hacerlo incidir sobre una serie de fotorreceptores cuya separación sea conocida (un CCD lineal ligeramente curvo). Un galvanómetro para escaneo con láser consiste de un motor de torque limitado, con un sensor de posición y un espejo sujeto en el eje. Los límites típicos de rotación son de alrededor de 40 grados mecánicos (± 40 grados ópticos). El rotor puede estar soportado sobre laminillas flexibles o sobre baleros. La gran ventaja de los galvanómetros es que tienen una respuesta de banda ancha para una señal de comando mientras que mantienen la exactitud y la repetibilidad bajo un amplio rango de condiciones de operación. Los galvanómetros son controlados con amplificadores de servo y su respuesta depende de la inercia del rotor y la carga del espejo. Su ancho de banda está limitado por resonancias en toda la estructura del rotor, incluyendo el espejo. Un galvanómetro con una razón de torque a inercia alta y estructura de amortiguamiento

rotor/motor proveerá de una velocidad óptima, por eso, los galvanómetros más avanzados utilizan materiales con una razón amortiguamiento a peso alta, tal como la cerámica.

b) Sensor 3D

Si ponemos una pila de fotorreceptores como una barra de pan rebanado de tal manera que el primer fotorreceptor permita pasar la luz al siguiente y así sucesivamente hasta llegar al último tendremos un sensor 3D. Como la intensidad de luz que llegaría a los fotorreceptores sería cada vez menor, tendríamos que considerar esto para compensar por medio de software. Se analizaría la salida de cada fotorreceptor secuencialmente hasta encontrar aquel que nos de la máxima lectura y, como sabemos la separación entre las capas de fotorreceptores, tendríamos la distancia d con una velocidad mucho más grande que con cualquier sistema mecánico.

c) Cambio de la distancia focal de la lente

Para lograr esto se nos ocurre, por lo pronto, las siguientes opciones:

1) Cambio de la curvatura de la lente por presión interior

Para lograr esto se hace necesario construir la lente de un material flexible y aumentar o disminuir la presión de un líquido con coeficiente de refracción similar al de la lente. Al hacer esto se podría cambiar la curvatura de la lente y, por lo tanto, su distancia focal.¹

2) Cambio de la curvatura de la lente por presión exterior

La naturaleza es una gran maestra. Analizando los procesos naturales hemos logrado aprender y comprender muchos principios aplicables actualmente en la tecnología. Siguiendo este camino, analicemos el funcionamiento del ojo humano cuando tiene que enfocar (refiérase al cap. 2). Inmediatamente detrás del iris se encuentra una estructura en forma de lente biconvexa llamado cristalino, el cual es perfectamente transparente pero, a diferencia de la córnea, es sumamente elástico en condiciones normales. En toda su periferia el cristalino está sujeto al ojo por medio de una fibrillas conectadas a un músculo

¹ Idea de mi director de tesis Dr. Valentin Tyrsa.

circular llamado músculo ciliar. Cuando el cristalino está en reposo el sistema óptico del ojo que corresponde a la suma óptica de los poderes de la córnea y del cristalino hace que el ojo esté enfocado al infinito, es decir, a la visión lejana. Cuando el objeto se acerca, los rayos luminosos que llegan al ojo ya no son paralelos sino que paulatinamente se hacen cada vez más divergentes, por lo que el ojo tiene que modificar su fuerza en el músculo ciliar para poder enfocarlos en su retina. Para ello el músculo ciliar se contrae relajando la tensión a la que está sometido el cristalino y éste se abomba provocando un aumento en su poder óptico. Siguiendo este mismo principio, podemos construir la lente con un material flexible y lleno de un material líquido tal que al aplicarle una presión externa sobre ciertos puntos podamos abombarlo y así cambiar su distancia focal. Dicha presión podría ser aplicada por medio de un motor con eje tipo tornillo y un mecanismo que corra sobre este y aplique la presión a la lente. Sabiendo la relación entre la distancia focal y la posición del eje del motor con respecto a una referencia podemos girar el eje del motor una cantidad y determinar la distancia focal correspondiente.

d) Revólver

Podemos también colocar varios lentes con diferentes distancias focales sobre un revólver y hacerlos girar hasta que el fotorreceptor detecte la máxima salida.

e) Lente variable

Podemos construir una lente que gire sobre su centro y cerca de su diámetro exterior pulirlo para obtener un radio variable, es decir que al girar cambiaría su distancia focal de manera continua.

f) Sensor tipo revólver

Si colocamos una serie de fotorreceptores sobre un revólver pero a diferentes distancias con respecto a la lente, podremos, al girarlo, determinar el mejor enfoque y, por lo tanto, la distancia óptima.

g) Por correlación de patrón de bordes.

Si lo que queremos es la imagen enfocada sin importar el tipo de detector de foco empleado, encontramos en la literatura que la detección de bordes o correlación de patrón de bordes es muy empleada. Básicamente, el sistema consiste de una cámara CCD en donde se forma la imagen y, por medio de un algoritmo de computación se analizan los resultados para determinar la máxima diferencia entre píxeles contiguos. Cuando se tiene este caso es porque se ha encontrado la imagen mejor enfocada.

Referencias

- [1] Markus Vincz, Minu Ayromlou, Carlos Beltran, Antonio Gasteratos, Simon Hoffgaard, Ole Madsen, Wolfgang Ponweiser, Michael Zillich. A system to navigate into a ship structure. Machine vision and Applications. Springer-Verlag, 2003
- [2] Tyrsa Valentin E., Saucedo Carvajal Angel, Burtseva Larisa P., Rivera Castillo Javier, Tyrsa Vera V.. Navigation of Spacecrafts and Mobile Robots. Proceedings of the IASTED International Conference. ROBOTICS AND MANUFACTURING. Mayo 2001, Cancún, Q.R. México.
- [3] Bernt Shiele, Gerhard Sagerer. Computer vision systems. Machine vision and Applications. Springer-Verlag, 2003.
- [4] Tyrsa Valentin, Saucedo Carvajal Angel, Burtseva Larisa, Rivera Castillo Javier. Sistema Tridimensional de Visión Técnica. XXIV Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica Electro 2002. Octubre 21 al 25. Chihuahua, Chi., México.
- [5] Hill Bailey, Jon Reese, Randy Sargent, Carl Witty, Anne Wright. Robots with a vision. Using the Cognachrome Vision System. Circuit Cellar. The computer applications journal. Issue 92, March 1998
- [6] Davis Raymond E., Foote Francis S., Anderson James M., Mikhail Edward M.. Surveiyng. Theory and Practice. Ed. Mc. Graw-Hill, 1981
- [7] Serway Raymond A., Beichner Robert J.. Física para Ciencias e Ingeniería. Tomo II. McGraw-Hill, México, 2002. ISBN 970-10-3582-8
- [8] Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's guide to Digital Signal Processing. Second Edition. California Technical Publishing. San Diego, California. 1999. ISBN 0-9660176-6-8.
- [9] John R. Murphy. Panoramic Video for Robotic Telexploration. The Robotics Institute, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, Pennsylvania 15213. Mayo 1998.
- [10] Jähne Bernd, Haußecker. Computer Vision and Applications. A guide for students and practitioners. Academic Press, 2000. ISBN 0-12-379777-2.
- [11] Nayar Shree K., Watanabe Masahiro, Noguchi Minori. Real-Time Focus Range Sensor. Department of Computer Science, Columbia University, New York, NY.
- [12] Liu Yen-Fu. A Unified Approach to Focus and Defocus Analysis. Tesis Doctoral de la State University of New York. Junio de 1998.
- [13] Nayar Shree K, Noguchi Minori, Watanabe Masahiro, Nakagawa Yasuo.

- Focus Range Sensors. Department of Computer Science, Columbia University
New York, NY, USA. Productional Engineering Research Laboratory, Hitachi
Ltd. Yokohama, Japan.
- [14] Schechner Yoav Y., Kiryati Nahum. Depth from Defocus vs. Stereo: How different Really are They? Department of Electrical Engineering, Technion, Haifa 32000, Israel.
 - [15] Schmid Wolfgang A., Lazos Martínez Rubén J.. Guía para estimar la incertidumbre de la medición. Centro Nacional de Metrología, El Marqués, Qro., México, mayo de 2000
 - [16] Notas del curso “Cálculo de incertidumbre en mediciones eléctricas
Impartido por la división de mediciones electromagnéticas del CENAM
El Marqués, Qro., México, Junio de 1999.
 - [17] McClave Sheaffer. Probabilidad y Estadística. Grupo Editorial Iberoamérica.
 - [18] Kratochvil Byron. General Principles of sampling. ASTM STP 957, J. K. Taylor, Ed., American Society for testing and Materials, Philadelphia, 1987, pp. 5-13
Sampling and Calibration for Atmospheric Measurements
John K. Taylor, editor
ASTM , 1987.

Bibliografía adicional

- [19] Coughlin Robert F., Driscoll Frederick F.. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Tercera Edición. Ed. Prentice Hall, México, 1999. ISBN 970-17-0267-0.
- [20] Blanchard Jim, Tsuneto Reiko. Stereoscopic Viewing
<http://www.hitl.washington.edu>
- [21] Teittinen Marko. Depth Cues in the Human Visual System
- [22] Pastorius Walt Dr.. Triangulation Sensors. An overview. LMI Automotive.
- [23] Gonzo L., Gottardi M., Comper F., Simoni A.. Smart Sensors for 3D Digitization
ITC-Istituto per la Ricerca Scientifica e Tecnologica
Via Sommarive 16, I-38050 Povo, Trento, Italy
J. Angelo Beraldin, F. Blais, M. Rioux, J. Domey. Natioal Research Council
Canada, Institute of Information Technology Ottawa, Canada, K1A 0R6
- [24] Basic Optics and Optical Instruments
Prepared by the Naval Education and Training Program Development Center
Dover Publications Inc.

Mineola, New York, 1997

- [25] Perales Benito Tomás. Televisión Actual. Parainfo Thomson Learning España, 2001
- [26] Starner Thad, Leibe Bastian, Minnen David, Westyn Tracy, Hurst Amy, Weeks Justin. The perceptive workbench: Computer vision based gesture tracking, object tracking end 3D reconstruction for augmented desks. Machine Vision and Applicatins. Springer-Verlag, 2003
- [27] Vincze Markus, Ayromlou Minu, Beltran Carlos, Gasteratos Antonios, Hoffgaard Simon, Madsen Ole, Ponweiser Wolfgang, Zillich Michael. A system to navigate a robot into a ship structure. Machine Vision and Applicatins. Springer-Verlag, 2003.
- [28] Ramírez Zavala Salvador, Paniagua de Jesús Víctor Hugo. Diseño y construcción de un instrumento de medición de distancias mediante ultrasonido. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Electro 2002. Instituto Tecnológico de Chihuahua.
- [29] Bravo Zanoguera Miguel Enrique, Price Jeffrey H.. Autofoco para barrido continuo de imágenes en citometría. Universidad Autónoma de Baja California, University of California, San Diego. Electro 2002. Instituto Tecnológico de Chihuahua.
- [30] Vergauwen Maarten, Pollefeys Marc, Van Gool Luc. A stereo-vision system for support of planetary surface exploration. Machine Vision and Applications. Springer-Verlag 2003.
- [31] Ishii Akira, Mitsudo Jun, Mizushima Shinsuke. Shape and Height measurement of solder bumps using focus measure difference. Ritsumeikan University, Shiga Japan.
- [32] Yoshikawa Nobukazu, Suzuki Yosuke. Three-dimensional object recognition using two-dimensional complex amplitude including three-dimensional shspe information. Department of Electronics and Communication Engineering, Caculty of Engineering, Musashi Institute of Technology, Tokyo Japan.
- [33] Kim Min Y., Cho Hyungsuck. An active view planning method for mobile robots using a trinocular visual sensor. Department of echanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- [34] Park Won Shik, Cho Hyungsuck. Measurement of three-dimensional rotational end translational displacements using a multi-facet mirror. Department of echanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.

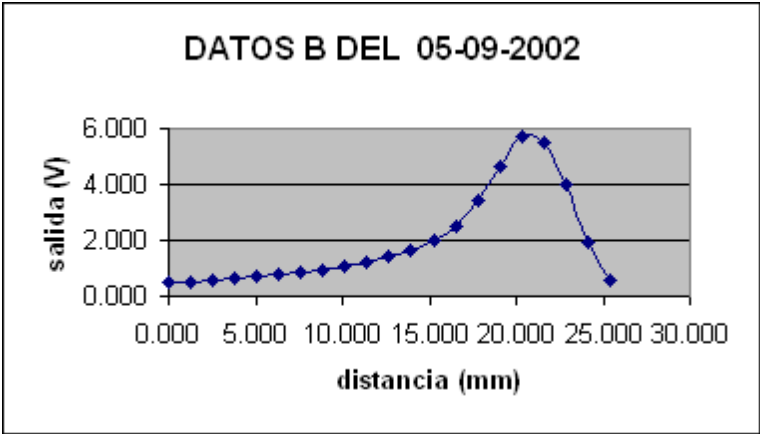
- [35] Roman de la Vara Salazar. Diseno de experimentos en metrologia. Centro de investigación en matematicas.
- [36] Schmid Wolfgang A. La simulación numerica como una herramienta en la estimacion de la incertidumbre. Centro Nacional de Metrologia, Division de Optica y Radiometria.
- [37] Schmid Wolfgang A. La incertidumbre expandida y los grados de libertad: un analisis comparativo entre el metodo recomendado por la GUM y metodos simplificados. Centro Nacional de Metrologia, Division de Optica y Radiometria.
- [38] Castelazo Sinencio Ismael. Uso de la distribución t en la estimacion de la incertidumbre de la medicion. Centro Nacional de Metrologia, El Marques, Qro., Mexico, diciembre de 2002.
- [39] <http://www.photonicdetectors.com>
- [40] <http://www.laseroptronix.com>
- [41] <http://www.latronix.se>
- [42] <http://www.howstuffworks.com>
- [43] <http://www.ti.com>

APÉNDICE A

Resultados

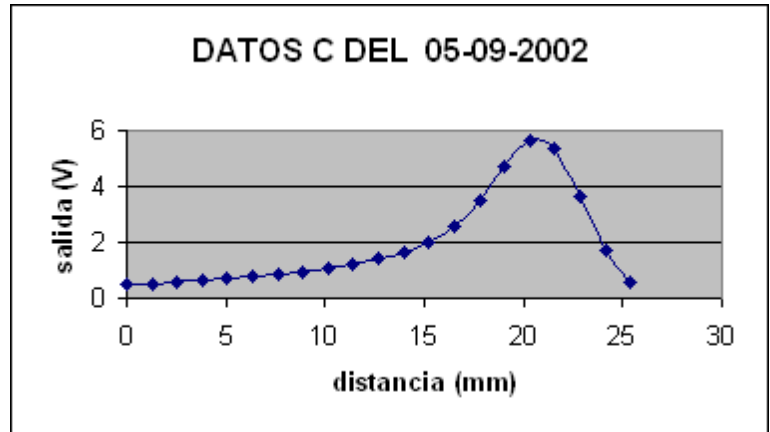
DATOS B DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.001	0.487	0.000487	700.8904	41.01	17.091	5.7	20.313
1.261	0.525	0.662025					
2.536	0.572	1.450592					
3.803	0.624	2.373072					
5.074	0.681	3.455394					
6.342	0.751	4.762842					
7.612	0.836	6.363632					
8.884	0.936	8.315424					
10.153	1.059	10.75203					
11.422	1.209	13.8092					
12.694	1.397	17.73352					
13.961	1.645	22.96585					
15.233	1.994	30.3746					
16.506	2.516	41.5291					
17.771	3.419	60.75905					
19.042	4.670	88.92614					
20.313	5.700	115.7841					
21.582	5.490	118.4852					
22.850	4.000	91.4					
24.120	1.939	46.76868					
25.392	0.560	14.21952					



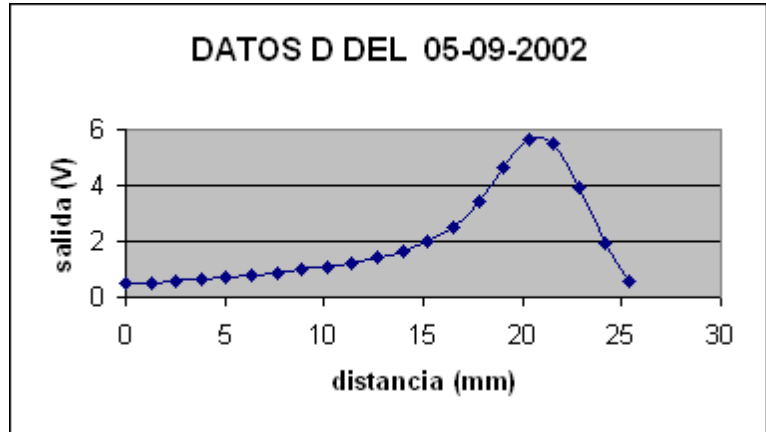
DATOS C DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0	0.483	0	684.7427	40.32	16.983	5.619	20.315
1.268	0.523	0.663164					
2.536	0.569	1.442984					
3.808	0.62	2.36096					
5.08	0.683	3.46964					
6.348	0.755	4.79274					
7.618	0.832	6.338176					
8.888	0.929	8.256952					
10.157	1.047	10.63438					
11.426	1.218	13.91687					
12.699	1.4	17.7786					
13.971	1.66	23.19186					
15.236	2.012	30.65483					
16.508	2.564	42.32651					
17.777	3.469	61.66841					
19.048	4.711	89.73513					
20.315	5.619	114.15					
21.584	5.348	115.4312					
22.86	3.63	82.9818					
24.13	1.69	40.7797					
25.392	0.558	14.16874					



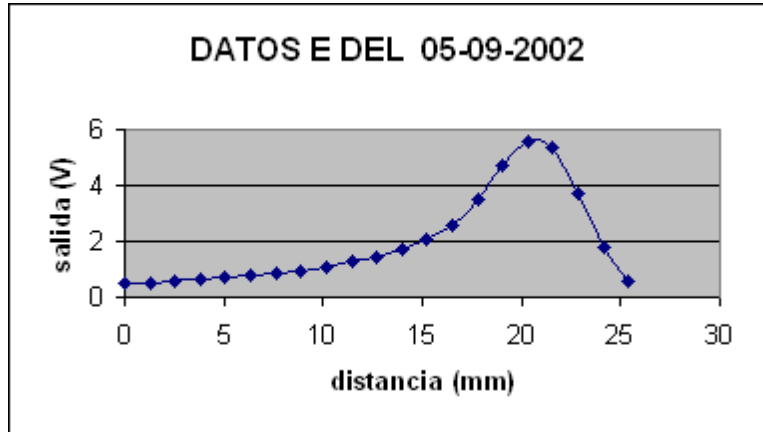
DATOS D DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0	0.478	0	701.3454	41.156	17.041	5.66	20.312
1.26	0.531	0.66906					
2.528	0.576	1.456128					
3.808	0.647	2.463776					
5.076	0.699	3.548124					
6.342	0.773	4.902366					
7.613	0.864	6.577632					
8.884	0.967	8.590828					
10.153	1.085	11.01601					
11.421	1.236	14.11636					
12.69	1.429	18.13401					
13.963	1.674	23.37406					
15.231	2	30.462					
16.501	2.523	41.63202					
17.773	3.409	60.58816					
19.042	4.633	88.22159					
20.312	5.66	114.9659					
21.58	5.479	118.2368					
22.851	3.938	89.98724					
24.123	1.949	47.01573					
25.392	0.606	15.38755					



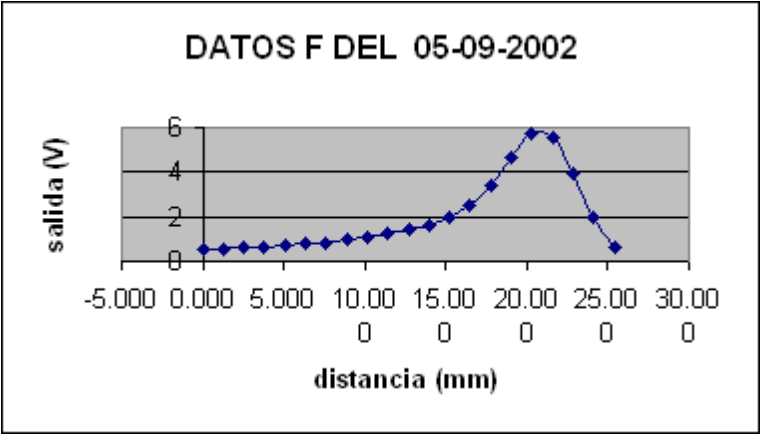
DATOS E DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.002	0.491	0.000982	692.6392	40.816	16.970	5.604	20.319
1.27	0.525	0.66675					
2.54	0.573	1.45542					
3.807	0.633	2.409831					
5.078	0.694	3.524132					
6.346	0.765	4.85469					
7.617	0.851	6.482067					
8.889	0.952	8.462328					
10.159	1.071	10.88029					
11.429	1.26	14.40054					
12.696	1.455	18.47268					
13.967	1.713	23.92547					
15.239	2.042	31.11804					
16.507	2.577	42.53854					
17.776	3.484	61.93158					
19.045	4.713	89.75909					
20.319	5.604	113.8677					
21.588	5.336	115.1936					
22.859	3.699	84.55544					
24.126	1.771	42.72715					
25.392	0.607	15.41294					



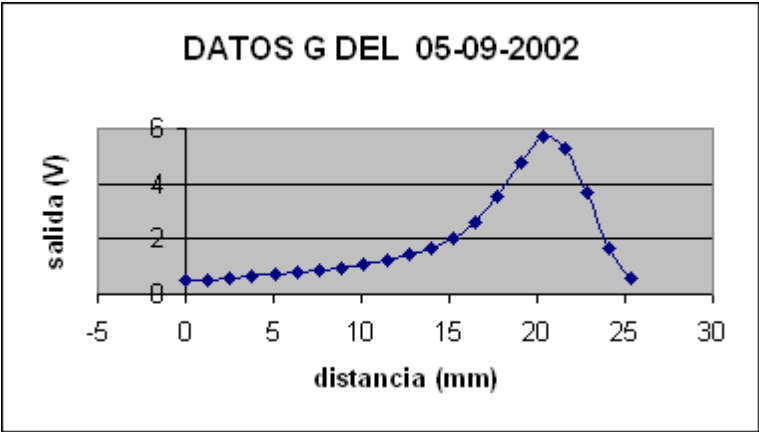
DATOS F DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
-0.002	0.498	-0.001	704.6316	41.274	17.072	5.701	20.311
1.260	0.536	0.67536					
2.530	0.586	1.48258					
3.800	0.634	2.4092					
5.069	0.701	3.553369					
6.341	0.766	4.857206					
7.611	0.85	6.46935					
8.883	0.95	8.43885					
10.149	1.074	10.90003					
11.422	1.224	13.98053					
12.692	1.402	17.79418					
13.964	1.655	23.11042					
15.234	1.994	30.3766					
16.503	2.518	41.55455					
17.771	3.434	61.02561					
19.046	4.651	88.58295					
20.311	5.701	115.793					
21.587	5.518	119.1171					
22.853	3.976	90.86353					
24.124	1.991	48.03088					
25.394	0.615	15.61731					



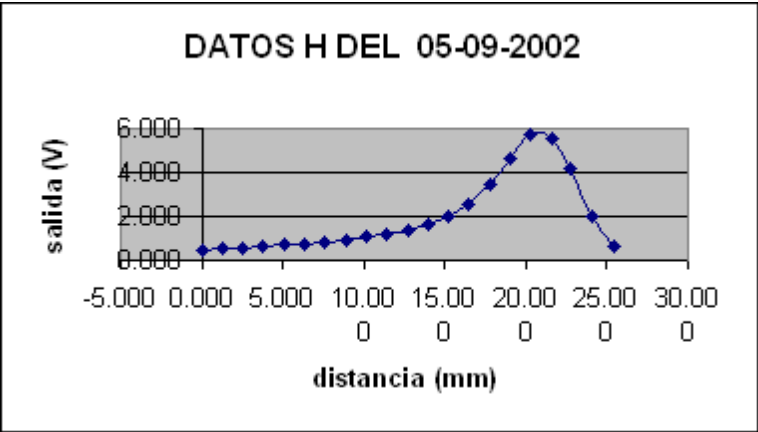
DATOS G DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
-0.002	0.499	-0.001	691.9169	40.809	16.955	5.697	20.317
1.27	0.541	0.68707					
2.538	0.587	1.489806					
3.806	0.633	2.409198					
5.076	0.696	3.532896					
6.347	0.766	4.861802					
7.621	0.848	6.462608					
8.884	0.95	8.4398					
10.158	1.074	10.90969					
11.427	1.229	14.04378					
12.698	1.413	17.94227					
13.966	1.673	23.36512					
15.241	2.02	30.78682					
16.509	2.601	42.93991					
17.779	3.54	62.93766					
19.048	4.795	91.33516					
20.317	5.697	115.7459					
21.586	5.289	114.1684					
22.855	3.669	83.855					
24.128	1.676	40.43853					
25.394	0.613	15.56652					



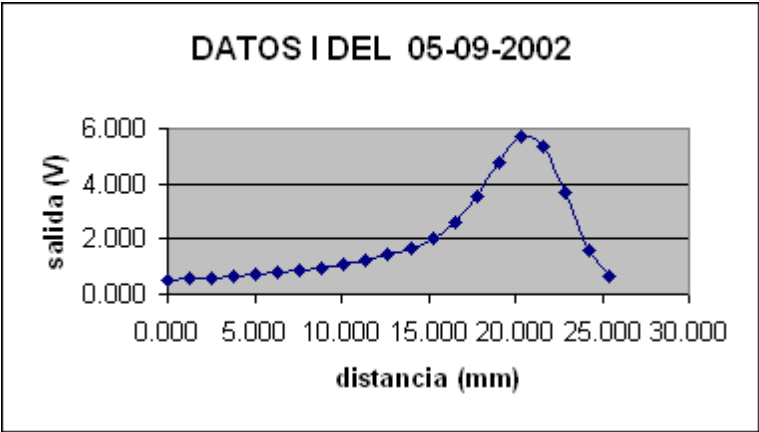
DATOS H DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
-0.002	0.500	-0.001	708.2234	41.432	17.094	5.691	20.312
1.261	0.539	0.679679					
2.530	0.584	1.47752					
3.801	0.631	2.398431					
5.070	0.696	3.52872					
6.344	0.769	4.878536					
7.619	0.852	6.491388					
8.880	0.946	8.40048					
10.150	1.064	10.7996					
11.423	1.206	13.77614					
12.692	1.399	17.75611					
13.960	1.647	22.99212					
15.233	2.000	30.466					
16.504	2.514	41.49106					
17.772	3.417	60.72692					
19.042	4.669	88.9071					
20.312	5.691	115.5956					
21.581	5.522	119.1703					
22.730	4.170	94.7841					
24.123	1.986	47.90828					
25.391	0.630	15.99633					



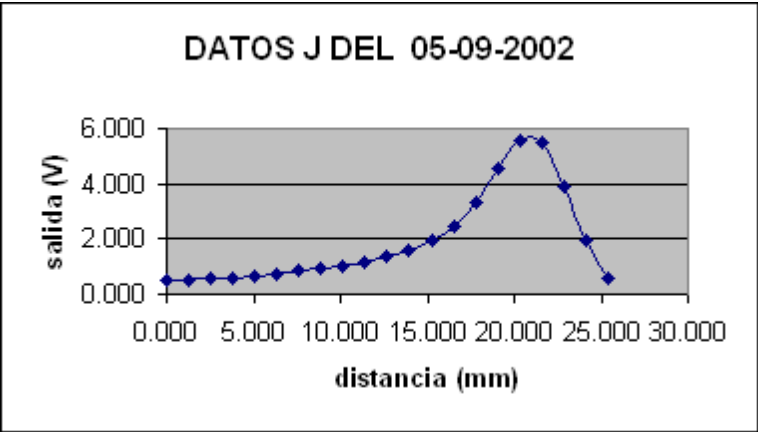
DATOS I DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.000	0.506	0	692.8144	40.907	16.936	5.694	20.320
1.267	0.547	0.693049					
2.539	0.592	1.503088					
3.806	0.645	2.45487					
5.078	0.706	3.585068					
6.348	0.774	4.913352					
7.618	0.860	6.55148					
8.889	0.952	8.462328					
10.159	1.078	10.9514					
11.429	1.235	14.11482					
12.699	1.421	18.04528					
13.968	1.681	23.48021					
15.239	2.041	31.1028					
16.508	2.601	42.93731					
17.779	3.533	62.81321					
19.050	4.771	90.88755					
20.320	5.694	115.7021					
21.591	5.361	115.7494					
22.858	3.700	84.5746					
24.252	1.577	38.2454					
25.391	0.632	16.04711					



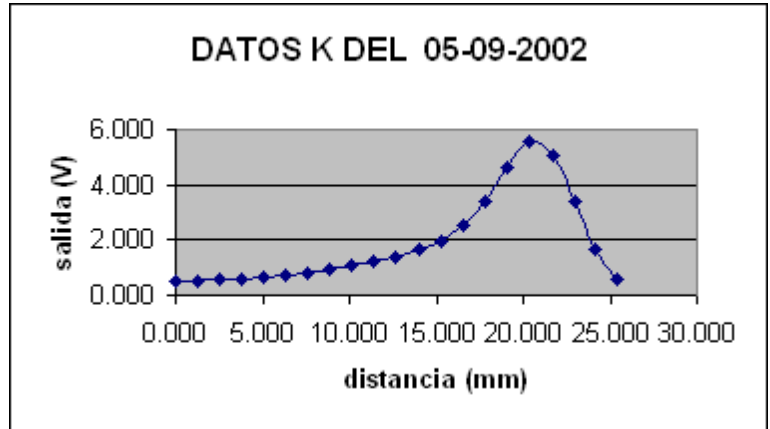
DATOS J DEL 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.000	0.506	0	691.1614	40.41	17.104	5.592	20.312
1.259	0.517	0.650903					
2.533	0.561	1.421013					
3.800	0.613	2.3294					
5.073	0.672	3.409056					
6.343	0.742	4.706506					
7.610	0.833	6.33913					
8.881	0.924	8.206044					
10.151	1.036	10.51644					
11.422	1.179	13.46654					
12.695	1.363	17.30329					
13.965	1.616	22.56744					
15.231	1.941	29.56337					
16.503	2.450	40.43235					
17.770	3.337	59.29849					
19.043	4.574	87.10268					
20.312	5.592	113.5847					
21.582	5.466	117.9672					
22.854	3.921	89.61053					
24.123	1.967	47.44994					
25.394	0.600	15.2364					



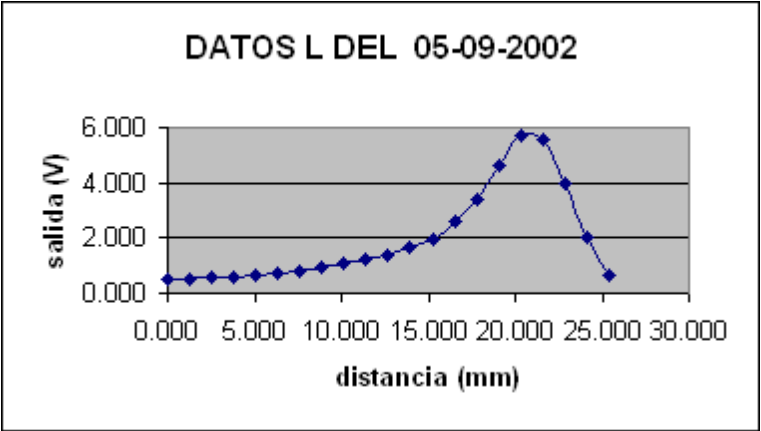
DATOS K DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.000	0.471	0	668.3064	39.395	16.964	5.541	20.319
1.268	0.513	0.650484					
2.539	0.558	1.416762					
3.809	0.612	2.331108					
5.076	0.675	3.4263					
6.346	0.748	4.746808					
7.617	0.830	6.32211					
8.888	0.926	8.230288					
10.158	1.055	10.71669					
11.427	1.203	13.74668					
12.699	1.374	17.44843					
13.968	1.630	22.76784					
15.239	1.970	30.02083					
16.508	2.509	41.41857					
17.778	3.421	60.81854					
19.047	4.637	88.32094					
20.319	5.541	112.5876					
21.715	5.079	110.2905					
22.982	3.381	77.70214					
24.129	1.658	40.00588					
25.394	0.604	15.33798					



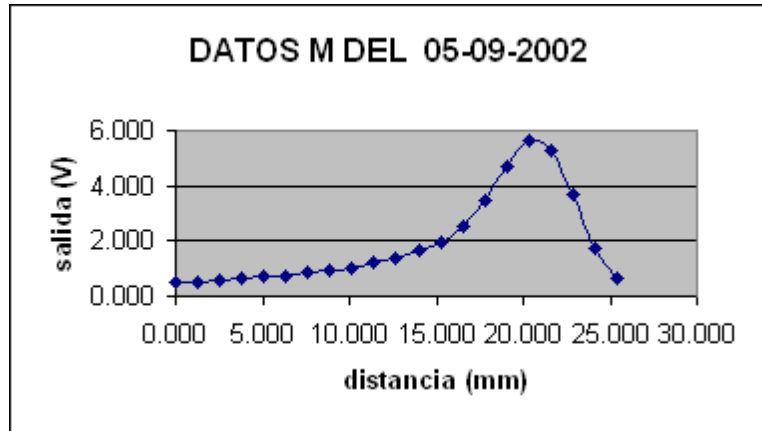
DATOS L DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.000	0.472	0	704.5575	41.065	17.157	5.684	20.317
1.263	0.509	0.642867					
2.531	0.555	1.404705					
3.800	0.604	2.2952					
5.070	0.662	3.35634					
6.339	0.744	4.716216					
7.611	0.826	6.286686					
8.880	0.923	8.19624					
10.151	1.060	10.76006					
11.424	1.208	13.80019					
12.694	1.398	17.74621					
13.963	1.640	22.89932					
15.231	1.987	30.264					
16.501	2.567	42.35807					
17.772	3.399	60.40703					
19.044	4.647	88.49747					
20.317	5.684	115.4818					
21.585	5.555	119.9047					
22.854	4.000	91.416					
24.125	1.997	48.17763					
25.393	0.628	15.9468					



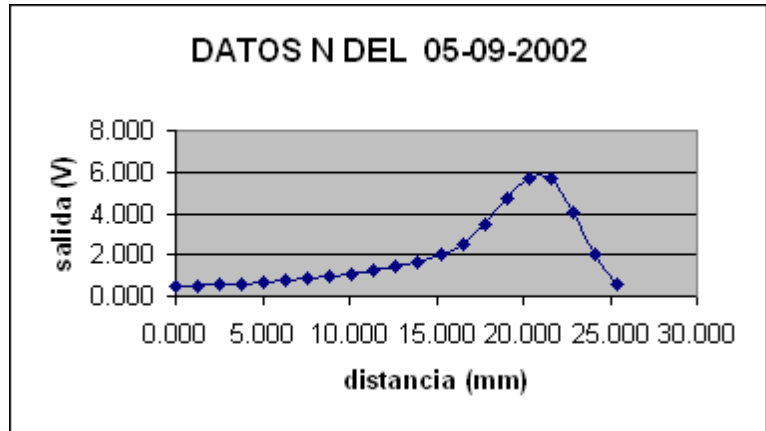
DATOS M DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.003	0.485	0.001455	684.1729	40.238	17.003	5.609	20.320
1.268	0.524	0.664432					
2.538	0.569	1.444122					
3.808	0.624	2.376192					
5.080	0.687	3.48996					
6.349	0.750	4.76175					
7.614	0.836	6.365304					
8.889	0.933	8.293437					
10.161	1.044	10.60808					
11.429	1.198	13.69194					
12.698	1.391	17.66292					
13.969	1.633	22.81138					
15.240	1.979	30.15996					
16.511	2.507	41.39308					
17.780	3.490	62.0522					
19.049	4.701	89.54935					
20.320	5.609	113.9749					
21.590	5.275	113.8873					
22.859	3.667	83.82395					
24.131	1.709	41.23988					
25.393	0.627	15.92141					



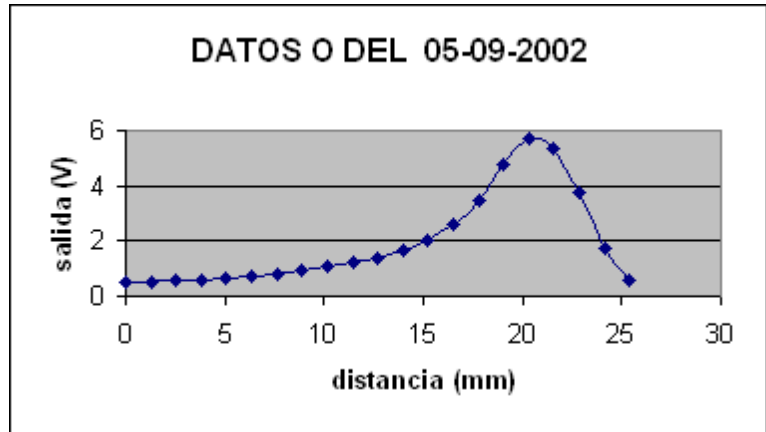
DATOS N DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.003	0.469	0.001407	712.5365	41.542	17.152	5.711	20.314
1.261	0.507	0.639327					
2.530	0.561	1.41933					
3.802	0.618	2.349636					
5.078	0.688	3.493664					
6.342	0.759	4.813578					
7.610	0.846	6.43806					
8.884	0.949	8.430916					
10.153	1.069	10.85356					
11.420	1.218	13.90956					
12.693	1.402	17.79559					
13.963	1.654	23.0948					
15.235	2.000	30.47					
16.503	2.551	42.09915					
17.773	3.461	61.51235					
19.041	4.728	90.02585					
20.314	5.711	116.0133					
21.585	5.684	122.6891					
22.854	4.038	92.28445					
24.122	2.011	48.50934					
25.394	0.618	15.69349					



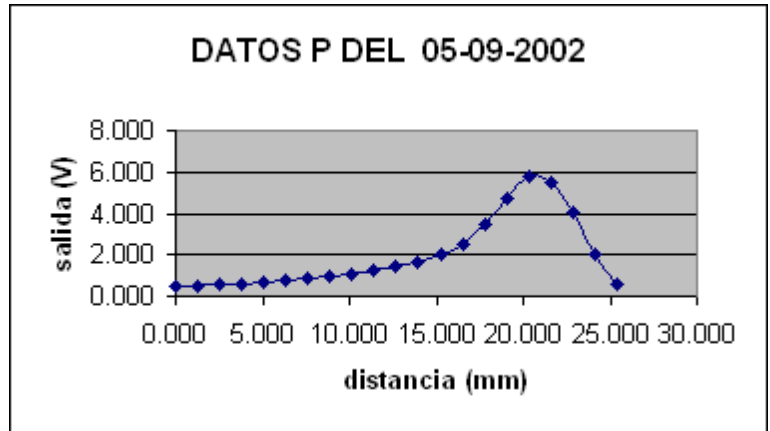
DATOS O DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.002	0.481	0.000962	692.9307	40.662	17.041	5.697	20.321
1.269	0.521	0.661149					
2.539	0.569	1.444691					
3.806	0.613	2.333078					
5.076	0.676	3.431376					
6.35	0.746	4.7371					
7.619	0.83	6.32377					
8.888	0.93	8.26584					
10.158	1.054	10.70653					
11.428	1.209	13.81645					
12.699	1.401	17.7913					
13.97	1.643	22.95271					
15.239	2.018	30.7523					
16.506	2.57	42.42042					
17.78	3.49	62.0522					
19.05	4.75	90.4875					
20.321	5.697	115.7687					
21.589	5.37	115.9329					
22.858	3.746	85.62607					
24.127	1.736	41.88447					
25.394	0.612	15.54113					



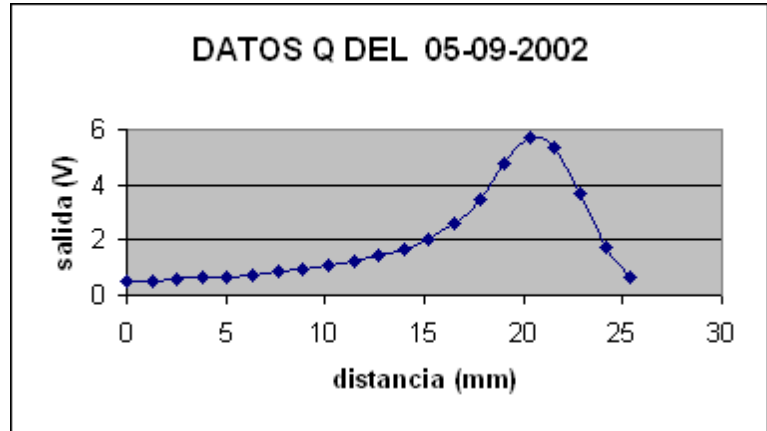
DATOS P DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.002	0.482	0.000964	709.9371	41.427	17.137	5.772	20.312
1.262	0.516	0.651192					
2.532	0.566	1.433112					
3.802	0.615	2.33823					
5.071	0.678	3.438138					
6.340	0.755	4.7867					
7.611	0.841	6.400851					
8.882	0.941	8.357962					
10.154	1.062	10.78355					
11.421	1.211	13.83083					
12.694	1.406	17.84776					
13.962	1.661	23.19088					
15.230	2.014	30.67322					
16.502	2.540	41.91508					
17.772	3.457	61.4378					
19.041	4.739	90.2353					
20.312	5.772	117.2409					
21.590	5.472	118.1405					
22.853	4.061	92.80603					
24.122	2.014	48.58171					
25.395	0.624	15.84648					



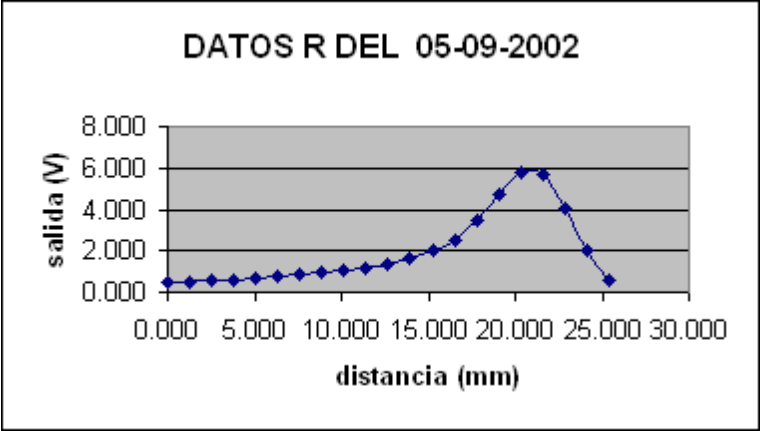
DATOS Q DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.002	0.484	0.000968	694.3384	40.785	17.024	5.701	20.321
1.269	0.528	0.670032					
2.538	0.559	1.418742					
3.81	0.62	2.3622					
5.074	0.679	3.445246					
6.349	0.751	4.768099					
7.618	0.841	6.406738					
8.89	0.941	8.36549					
10.159	1.063	10.79902					
11.427	1.213	13.86095					
12.699	1.414	17.95639					
13.967	1.671	23.33886					
15.237	2.029	30.91587					
16.508	2.571	42.44207					
17.78	3.505	62.3189					
19.052	4.782	91.10666					
20.321	5.701	115.85					
21.588	5.37	115.9276					
22.86	3.711	84.83346					
24.131	1.723	41.57771					
25.395	0.629	15.97346					



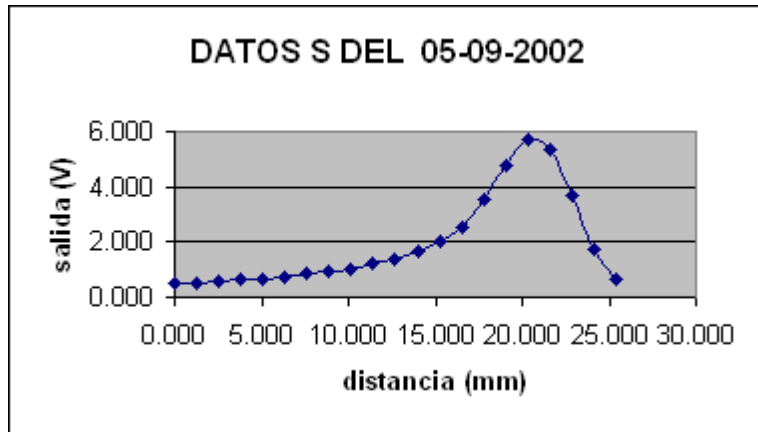
DATOS R DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.002	0.479	0.000958	714.89	41.625	17.175	5.819	20.312
1.261	0.517	0.651937					
2.532	0.560	1.41792					
3.801	0.617	2.345217					
5.070	0.675	3.42225					
6.342	0.745	4.72479					
7.611	0.839	6.385629					
8.880	0.937	8.32056					
10.152	1.060	10.76112					
11.424	1.200	13.7088					
12.692	1.393	17.67996					
13.960	1.634	22.81064					
15.231	2.012	30.64477					
16.502	2.541	41.93158					
17.772	3.463	61.54444					
19.041	4.761	90.6542					
20.312	5.819	118.1955					
21.583	5.666	122.2893					
22.855	4.077	93.17984					
24.122	2.016	48.62995					
25.392	0.614	15.59069					



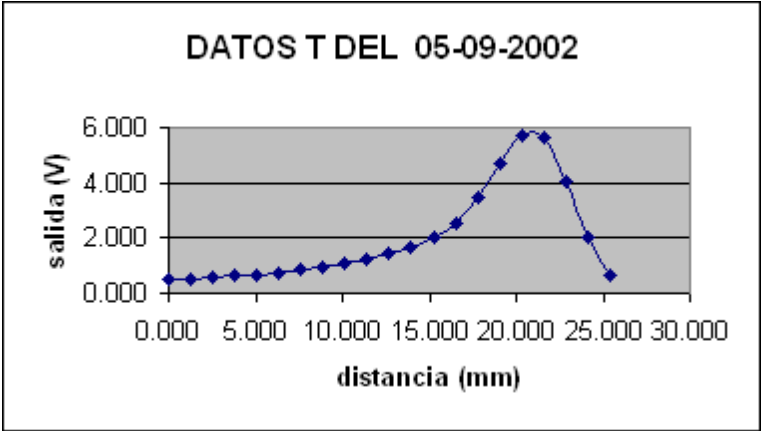
DATOS S DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.002	0.474	0.000948	690.3623	40.536	17.031	5.677	20.320
1.261	0.520	0.65572					
2.538	0.557	1.413666					
3.808	0.617	2.349536					
5.079	0.679	3.448641					
6.347	0.751	4.766597					
7.619	0.837	6.377103					
8.889	0.934	8.302326					
10.159	1.048	10.64663					
11.428	1.206	13.78217					
12.699	1.401	17.7913					
13.967	1.650	23.04555					
15.237	2.006	30.56542					
16.504	2.548	42.05219					
17.777	3.507	62.34394					
19.049	4.752	90.52085					
20.320	5.677	115.3566					
21.589	5.330	115.0694					
22.859	3.699	84.55544					
24.131	1.725	41.62598					
25.392	0.618	15.69226					



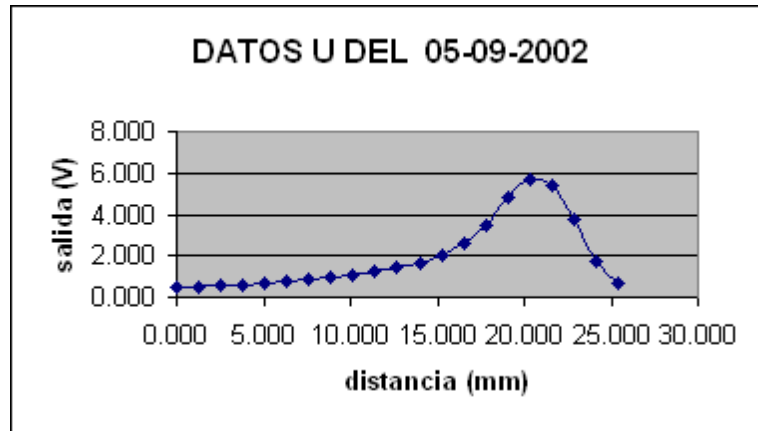
DATOS T DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

k (mm)	f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.002	0.480	0.00096	713.5828	41.616	17.147	5.701	20.317
1.261	0.520	0.65572					
2.530	0.565	1.42945					
3.800	0.620	2.356					
5.073	0.680	3.44964					
6.340	0.747	4.73598					
7.610	0.841	6.40001					
8.887	0.937	8.327119					
10.153	1.062	10.78249					
11.420	1.224	13.97808					
12.691	1.418	17.99584					
13.960	1.675	23.383					
15.233	2.033	30.96869					
16.501	2.564	42.30856					
17.773	3.481	61.86781					
19.043	4.726	89.99722					
20.317	5.701	115.8272					
21.583	5.608	121.0375					
22.853	4.071	93.03456					
24.121	2.024	48.8209					
25.393	0.639	16.22613					



DATOS U DEL 05 DE SEPTIEMBRE DEL 2002

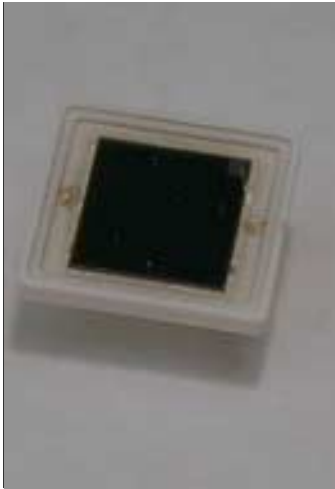
f(k) (V)	kf(k)	sumkf(k)	sumf(k)	sumkf(k)/sumf(k)	maxf(k)	k para maxf(K)
0.480	0.00048	695.7104	40.85	17.031	5.720	20.318
0.521	0.66167					
0.567	1.439613					
0.619	2.357771					
0.681	3.458118					
0.754	4.787146					
0.839	6.392341					
0.940	8.35472					
1.062	10.78249					
1.213	13.86338					
1.412	17.92675					
1.670	23.32656					
2.030	30.93517					
2.586	42.69745					
3.516	62.51096					
4.778	91.01134					
5.720	116.219					
5.379	116.1272					
3.718	84.99348					
1.731	41.76557					
0.634	16.09916					



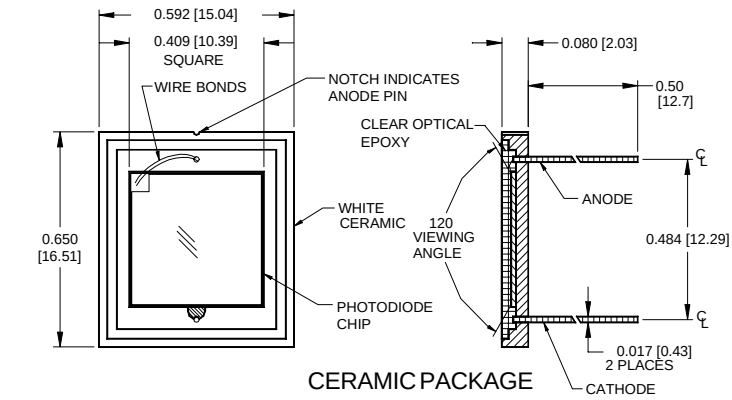
APÉNDICE B
Características del fotorreceptor

PHOTONIC DETECTORS INC.

Silicon Photodiode, Blue Enhanced Photoconductive Type PDB-C110



PACKAGE DIMENSIONS INCH (mm)



ACTIVE AREA = 100.00 mm²

FEATURES

- High speed
- Low capacitance
- Blue enhanced
- Low dark current

DESCRIPTION

The **PDB-C110** is a silicon, PIN planar diffused, blue enhanced photodiode. Ideal for high speed photoconductive applications. Packaged in low profile ceramic substrate with clear epoxy covering.

APPLICATIONS

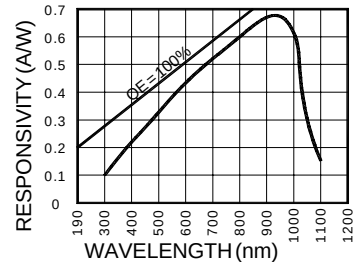
- Scintillation detection
- Optical power meters
- Instrumentation
- Particle detection

ABSOLUTE MAXIMUM RATING (TA=25°C unless otherwise noted)

SYMBOL	PARAMETER	MIN	MAX	UNITS
V _{BR}	Reverse Voltage		100	V
T _{STG}	Storage Temperature	-20	+80	°C
T _O	Operating Temperature Range	-20	+60	°C
T _S	Soldering Temperature*		+220	°C
I _L	Light Current		0.5	mA

*1/16 inch from case for 3 secs max

SPECTRAL RESPONSE



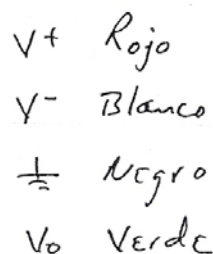
ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS (TA=25°C unless otherwise noted)

SYMBOL	CHARACTERISTIC	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
I _{SC}	Short Circuit Current	H = 100 fc, 2850 K	1.0	1.3		mA
I _D	Dark Current	H = 0, V _R = 10 V		10	30	nA
R _{SH}	Shunt Resistance	H = 0, V _R = 10 mV	15	30		MΩ
TC _{RSH}	R _{SH} Temp. Coefficient	H = 0, V _R = 10 mV		-8		% / °C
C _J	Junction Capacitance	H = 0, V _R = 10 V**		300		pF
λ _{range}	Spectral Application Range	Spot Scan	350		1100	nm
λ _p	Spectral Response - Peak	Spot Scan		950		nm
V _{BR}	Breakdown Voltage	I = 10 mA	30	50		V
NEP	Noise Equivalent Power	V _R = 10 V @ Peak		3x10 ⁻¹³		W/ √ Hz
tr	Response Time	RL = 1 KΩ V _R = 50 V		25		nS

Information in this technical data sheet is believed to be correct and reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omission. Specifications are subject to change without notice. **f = 1 MHz

[FORM NO. 100-PDB-C110 REV C]

APÉNDICE C
Diagrama del circuito amplificador



Title: Circuit1		
Project 1		
Designed by: Jrivera	Document N 0001	Revision 1.0
Checked by:	Date Oct 31, 2001	Size A
Approved by:	Sheet 1 of 1	

uA747C, uA747M DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS009A – D971, FEBRUARY 1971 – REVISED OCTOBER 1990

- No Frequency Compensation Required
- Low Power Consumption
- Short-Circuit Protection
- Offset-Voltage Null Capability
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- No Latch-Up
- Designed to Be Interchangeable With Fairchild μ A747C and μ A747M

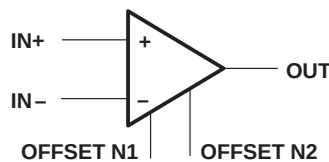
description

The uA747 is a dual general-purpose operational amplifier featuring offset-voltage null capability. Each half is electrically similar to uA741.

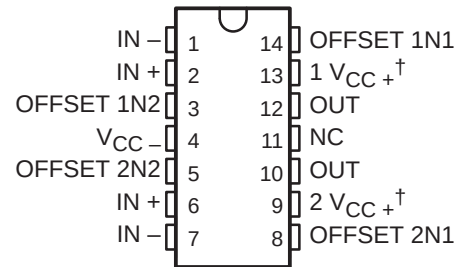
The high common-mode input voltage range and the absence of latch-up make this amplifier ideal for voltage-follower applications. The device is short-circuit protected and the internal frequency compensation ensures stability without external components. A low-value potentiometer may be connected between the offset null inputs to null out the offset voltage as shown in Figure 2.

The uA747C is characterized for operation from 0°C to 70°C; the uA747M is characterized for operation over the full military temperature range of –55°C to 125°C.

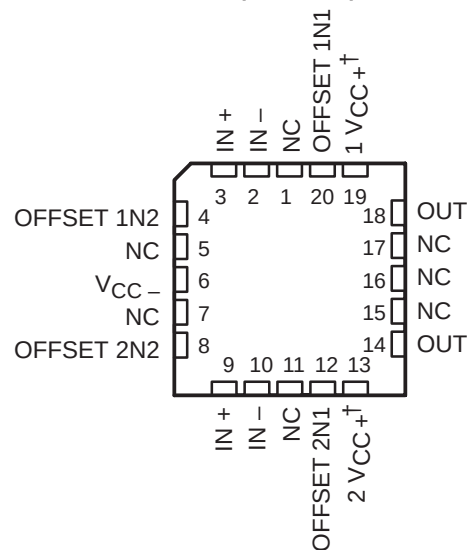
symbol (each amplifier)



D, J, N, OR W PACKAGE
(TOP VIEW)



uA747m . . . FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

† The two positive supply terminals (1 VCC + and 2 VCC +) are connected together internally.

AVAILABLE OPTIONS

T _A	V _{IO} Max AT 25°C	PACKAGE				
		14-PIN				20-PIN
		SMALL OUTLINE (D)	CERAMIC DIP (J)	PLASTIC DIP (N)	FLAT PACK (W)	CHIP CARRIER (FK)
0°C to 70°C	6 mV	uA747CD	—	uA747CN	—	—
–55°C to 125°C	5 mV	—	uA747MJ	—	uA747MW	uA747MFK

The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type, (i.e., uA747CDR).

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

TEXAS
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

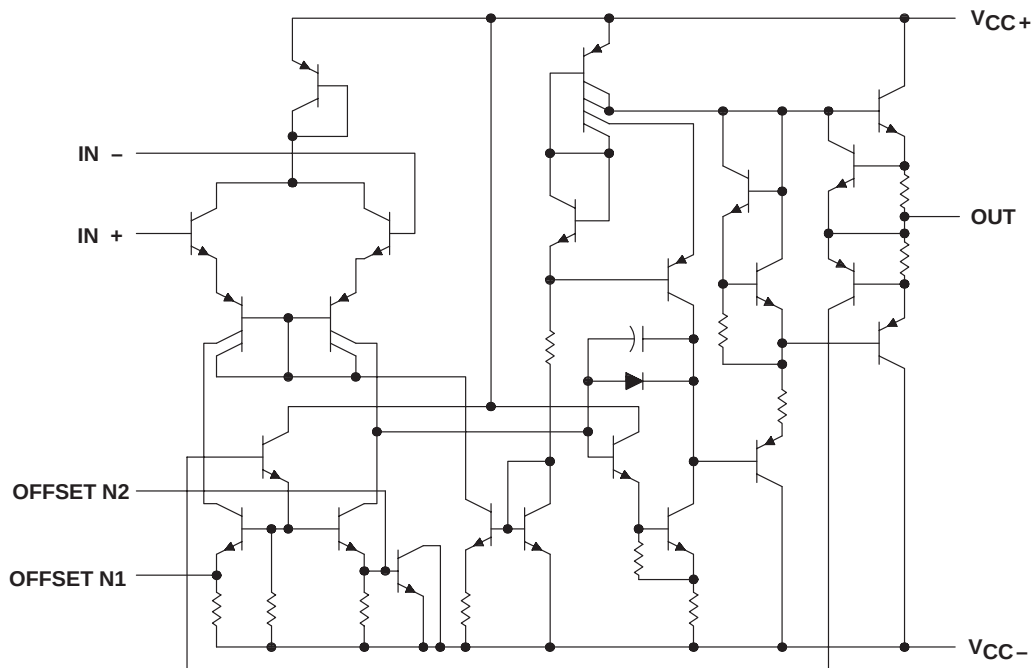
Copyright © 1990, Texas Instruments Incorporated

uA747C, uA747M

DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS009A – D971, FEBRUARY 1971 – REVISED OCTOBER 1990

schematic (each amplifier)



absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	uA747C	uA747M	UNIT
Supply voltage, V_{CC+} (see Note 1)	18	22	V
Supply voltage, V_{CC-} (see Note 1)	-18	-22	V
Differential input voltage (see Note 2)	± 30	± 30	V
Input voltage any input (see Notes 1 and 3)	± 15	± 15	V
Voltage between any offset null terminal (N1/N2) and V_{CC-}	± 0.5	± 0.5	V
Duration of output short circuit (see Note 4)	unlimited	unlimited	
Continuous total dissipation	See Dissipation Rating Table		
Operating free-air temperature range	0 to 70	-55 to 125	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range	-65 to 150	-65 to 150	$^{\circ}\text{C}$
Case temperature for 60 seconds	FK package		260
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds	J or W package		300
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	D or N package		260

- NOTES: 1. All voltage values, unless otherwise noted, are with respect to the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
2. Differential voltages are at the noninverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 V, whichever is less.
4. The output may be shorted to ground or either power supply. For the uA747M only, the unlimited duration of the short circuit applies at (or below) 125 $^{\circ}\text{C}$ case temperature or 75 $^{\circ}\text{C}$ free-air temperature.

DISSIPATION RATING TABLE

PACKAGE	$T_A \leq 25^{\circ}\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR	DERATE ABOVE T_A	$T_A = 70^{\circ}\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 125^{\circ}\text{C}$ POWER RATING
D	800 mW	7.6 mW/ $^{\circ}\text{C}$	45 $^{\circ}\text{C}$	608 mW	—
FK	800 mW	11.0 mW/ $^{\circ}\text{C}$	77 $^{\circ}\text{C}$	800 mW	275 mW
J	800 mW	11.0 mW/ $^{\circ}\text{C}$	77 $^{\circ}\text{C}$	800 mW	275 mW
N	800 mW	9.2 mW/ $^{\circ}\text{C}$	63 $^{\circ}\text{C}$	736 mW	—
W	800 mW	8.0 mW/ $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$	640 mW	200 mW

uA747C, uA747M DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS009A – D971, FEBRUARY 1971 – REVISED OCTOBER 1990

electrical characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC} \pm = \pm 15 \text{ V}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS [†]	T_A [‡]	uA747C			uA747M			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$	25°C		1	6		1	5	mV
		Full range			7.5			6	
$\Delta V_{IO}(\text{adj})$ Offset voltage adjust range		25°C		±15			±15		mV
I_{IO} Input offset current		25°C		20	200		20	200	nA
		Full range			300			500	
I_{IB} Input bias current		25°C		80	500		80	500	nA
		Full range			800			1500	
V_{ICR} Common-mode input voltage range		25°C	±12	±13		±12	±13		V
		Full range	±12			±12			
$V_{O(PP)}$ Maximum peak-to-peak output voltage swing	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$	25°C	24	28		24	28		V
	$R_L \geq 10 \text{ k}\Omega$	Full range	24			24			
	$R_L = 2 \text{ k}\Omega$	25°C	20	26		20	26		
	$R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	Full range	20			20			
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$, $V_O = \pm 10 \text{ V}$	25°C	25	200		50	200		V/mV
		Full range	15			25			
r_i Input resistance		25°C	0.3	2		0.3*	2		MΩ
r_o Output resistance	See Note 5	25°C		75			75		Ω
C_i Input capacitance		25°C		1.4			1.4		pF
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR}$	25°C	70	90		70	90		dB
		Full range	70			70			
k_{SVS} Supply-voltage sensitivity ($\Delta V_{IO} / \Delta V_{CC}$)	$V_{CC} = \pm 9 \text{ V}$ to $\pm 15 \text{ V}$	25°C		30	150		30	150	μV/V
		Full range			150			150	
I_{OS} Short-circuit output current		25°C		±25	±40		±25	±40	mA
I_{CC} Supply current (each amplifier)	No load	25°C		1.7	2.8		1.7	2.8	mA
		Full range			3.3			3.3	
P_D Power dissipation (each amplifier)	No load, $V_O = 0$	25°C		50	85		50	85	mW
		Full range			100			100	
V_{O1}/V_{O2} Channel separation		25°C		120			120	0	dB

[†] All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified.

[‡] Full range for uA747C is 0°C to 70°C and for uA747M is –55°C to 125°C.

*On products compliant to MIL-STD-883, Class B, this parameter is not production tested.

NOTE 5: This typical value applies only at frequencies above a few hundred hertz because of the effects of drift and thermal feedback.

operating characteristics, $V_{CC} \pm = \pm 15 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_r Rise time	$V_I = 20 \text{ mV}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, See Figure 1		0.3		μs
Overshoot factor			5%		
SR Slew rate at unity gain	$V_I = 10 \text{ mV}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, See Figure 1		0.5		V/μs



uA747C, uA747M DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS009A – D971, FEBRUARY 1971 – REVISED OCTOBER 1990

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

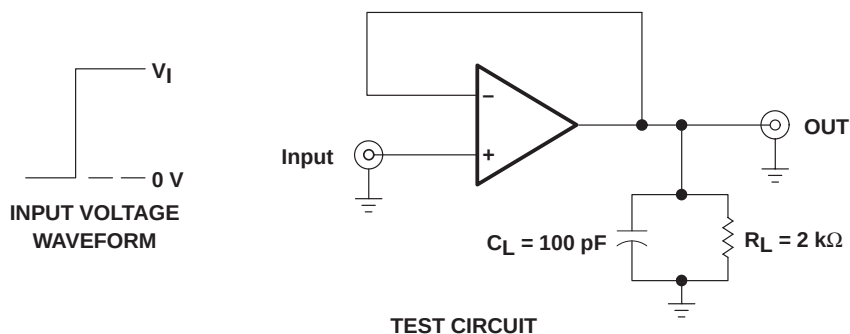


Figure 1. Rise Time, Overshoot, and Slew Rate

APPLICATION INFORMATION

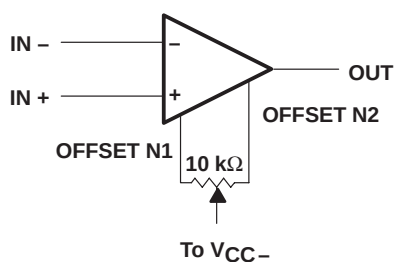


Figure 2. Input Offset Voltage Null Circuit

TYPICAL CHARACTERISTICS†

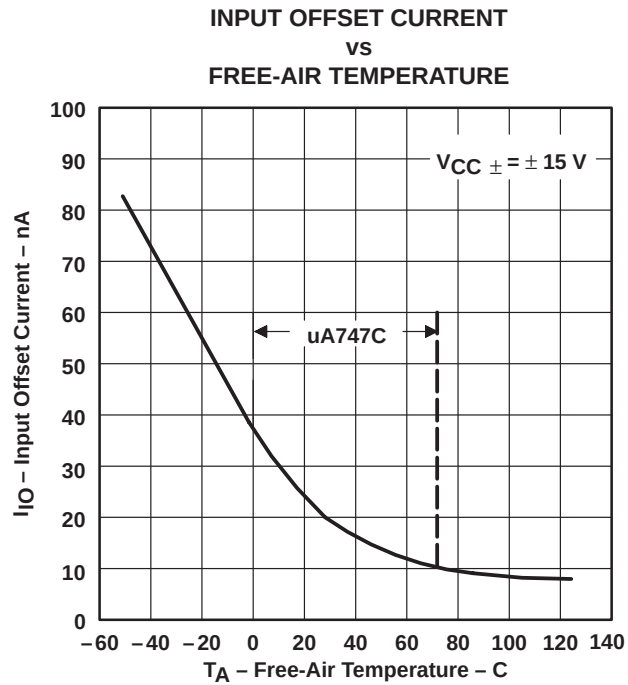


Figure 3

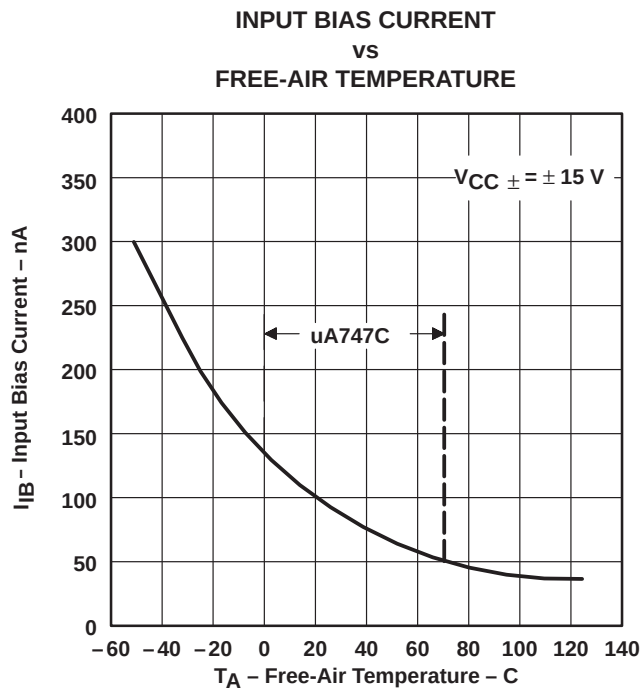


Figure 4

† Data at high and low temperatures are applicable only within the rated operating free-air temperature range of the particular devices.

uA747C, uA747M DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS009A – D971, FEBRUARY 1971 – REVISED OCTOBER 1990

TYPICAL CHARACTERISTICS

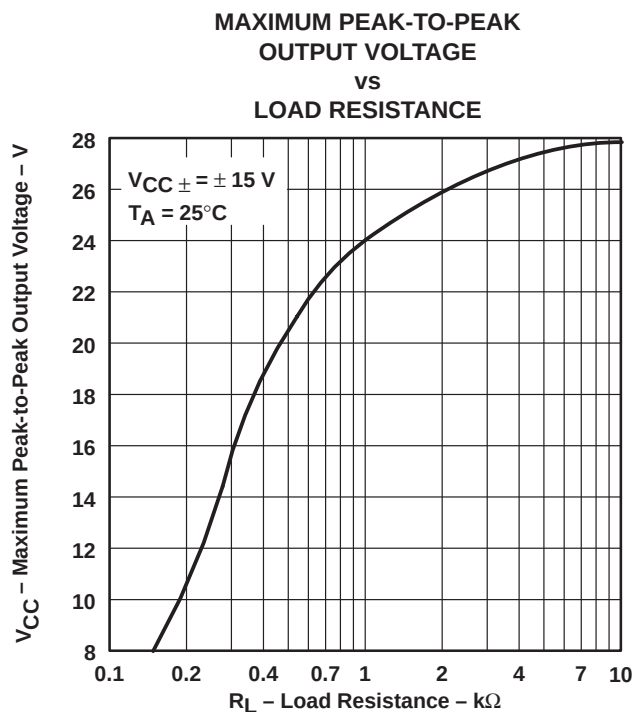


Figure 5

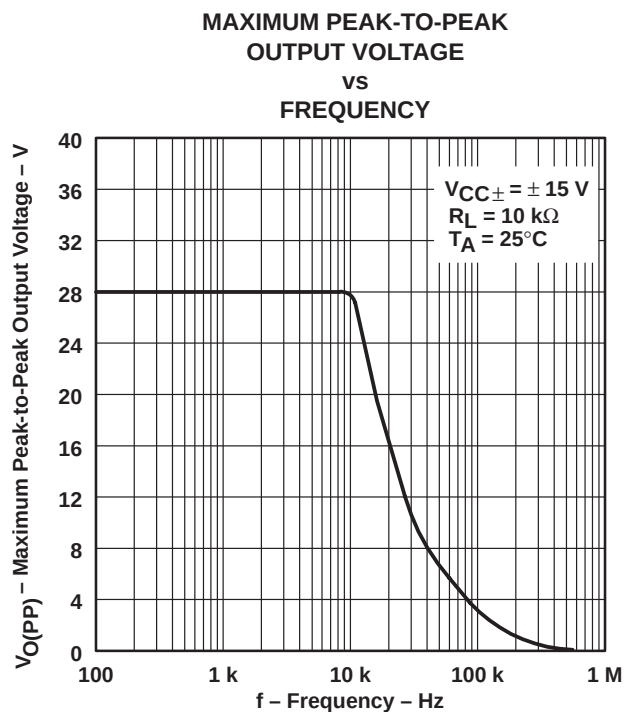


Figure 6

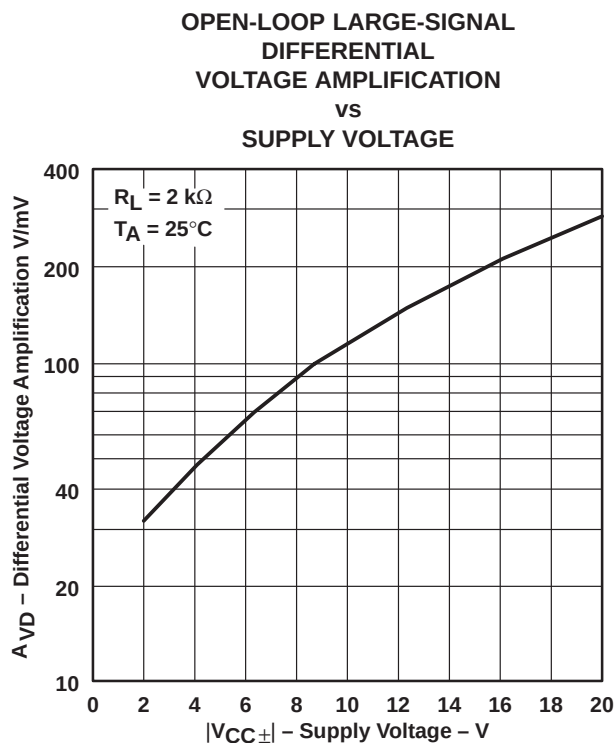


Figure 7

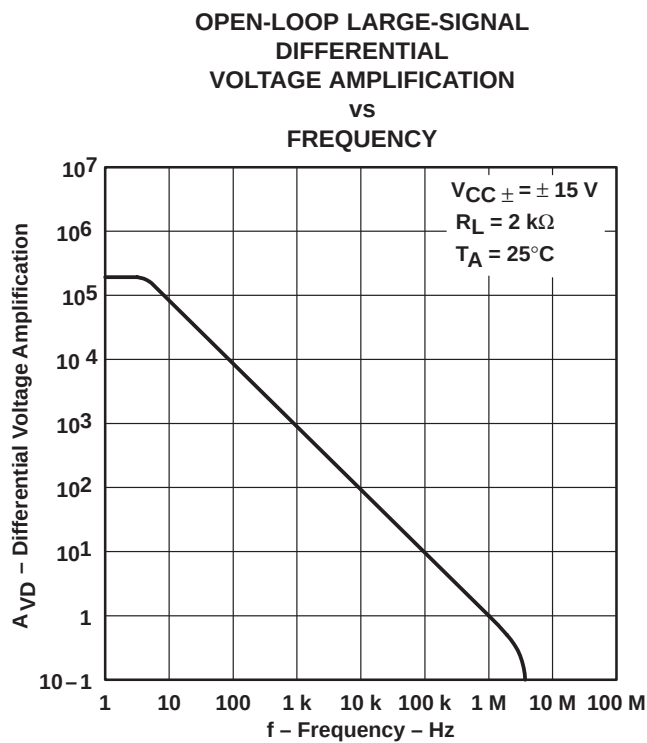


Figure 8

TYPICAL CHARACTERISTICS

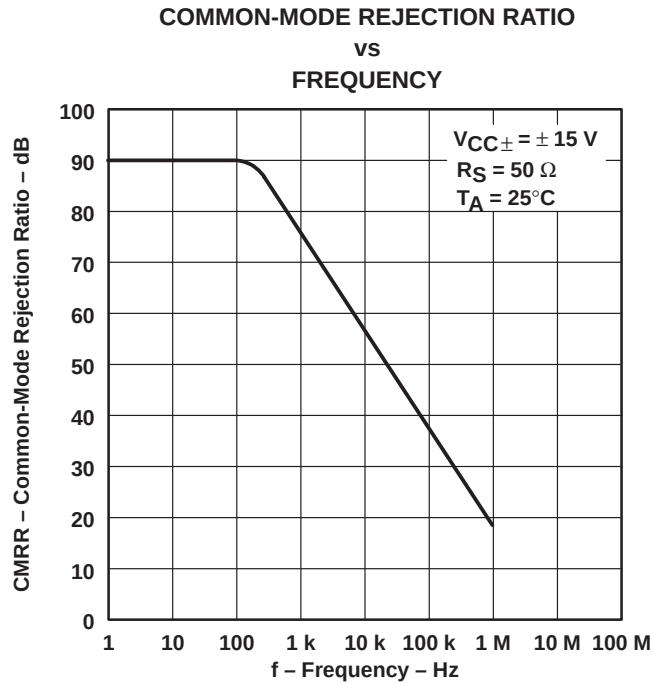


Figure 9

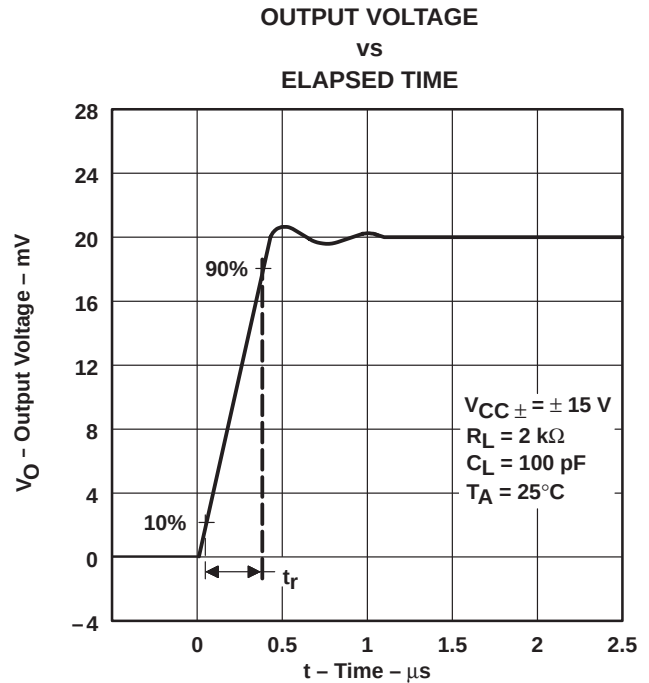


Figure 10

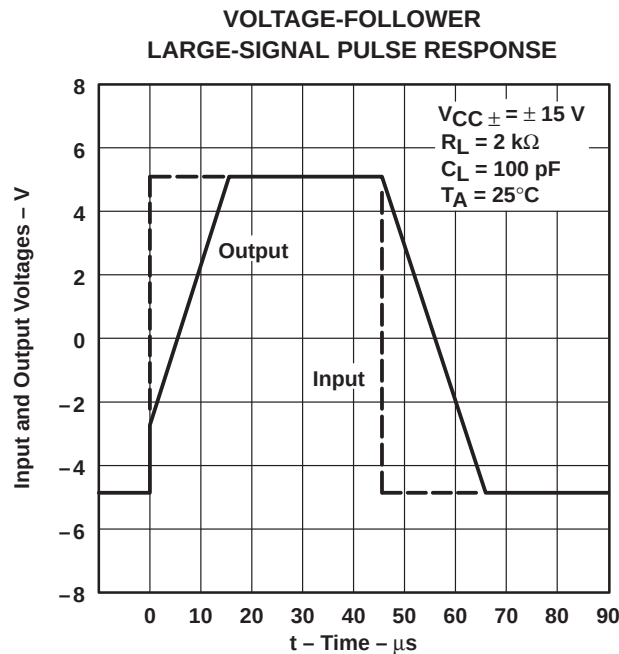


Figure 11

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status ⁽¹⁾	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan ⁽²⁾	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp ⁽³⁾
UA747-1MJ	OBSOLETE	CDIP	J	14		TBD	Call TI	Call TI
UA747CD	OBSOLETE	SOIC	D	14		TBD	Call TI	Call TI
UA747CD	OBSOLETE	SOIC	D	14		TBD	Call TI	Call TI
UA747CDR	OBSOLETE	SOIC	D	14		TBD	Call TI	Call TI
UA747CDR	OBSOLETE	SOIC	D	14		TBD	Call TI	Call TI
UA747CN	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
UA747CN	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
UA747CNE4	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
UA747CNE4	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type

⁽¹⁾ The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

⁽²⁾ Eco Plan - The planned eco-friendly classification: Pb-Free (RoHS), Pb-Free (RoHS Exempt), or Green (RoHS & no Sb/Br) - please check <http://www.ti.com/productcontent> for the latest availability information and additional product content details.

TBD: The Pb-Free/Green conversion plan has not been defined.

Pb-Free (RoHS): TI's terms "Lead-Free" or "Pb-Free" mean semiconductor products that are compatible with the current RoHS requirements for all 6 substances, including the requirement that lead not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, TI Pb-Free products are suitable for use in specified lead-free processes.

Pb-Free (RoHS Exempt): This component has a RoHS exemption for either 1) lead-based flip-chip solder bumps used between the die and package, or 2) lead-based die adhesive used between the die and leadframe. The component is otherwise considered Pb-Free (RoHS compatible) as defined above.

Green (RoHS & no Sb/Br): TI defines "Green" to mean Pb-Free (RoHS compatible), and free of Bromine (Br) and Antimony (Sb) based flame retardants (Br or Sb do not exceed 0.1% by weight in homogeneous material)

⁽³⁾ MSL, Peak Temp. -- The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

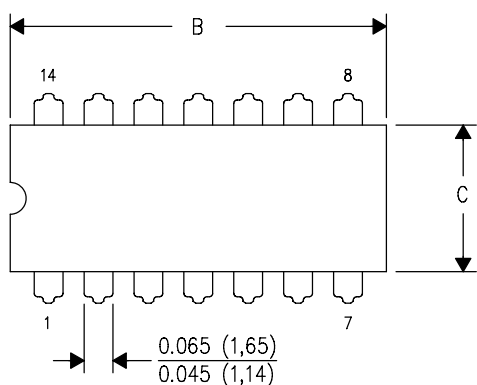
Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

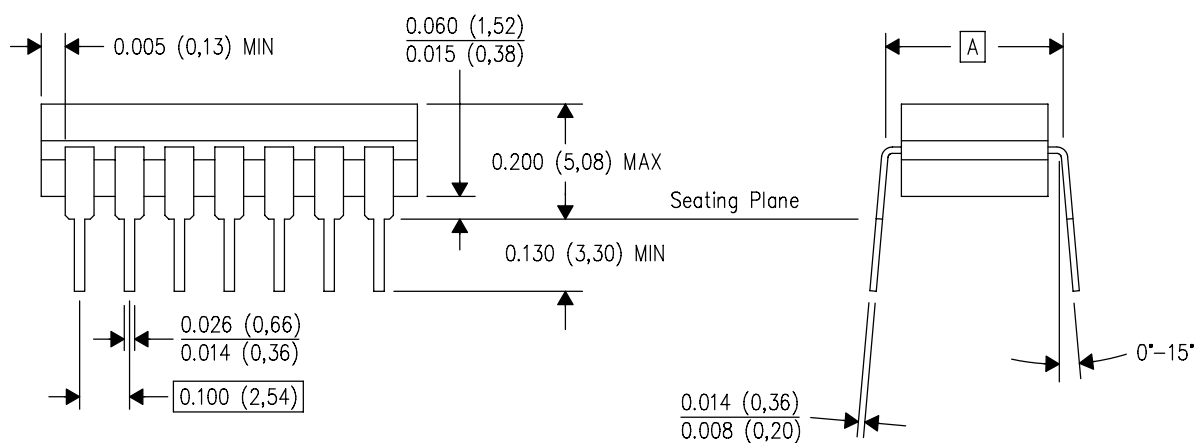
J (R-GDIP-T**)

14 LEADS SHOWN

CERAMIC DUAL IN-LINE PACKAGE



PINS ** DIM	14	16	18	20
A	0.300 (7,62) BSC	0.300 (7,62) BSC	0.300 (7,62) BSC	0.300 (7,62) BSC
B MAX	0.785 (19,94)	.840 (21,34)	0.960 (24,38)	1.060 (26,92)
B MIN	—	—	—	—
C MAX	0.300 (7,62)	0.300 (7,62)	0.310 (7,87)	0.300 (7,62)
C MIN	0.245 (6,22)	0.245 (6,22)	0.220 (5,59)	0.245 (6,22)



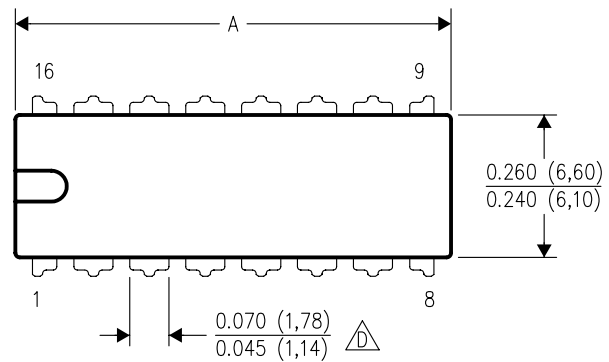
4040083/F 03/03

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. This package is hermetically sealed with a ceramic lid using glass frit.
 - D. Index point is provided on cap for terminal identification only on press ceramic glass frit seal only.
 - E. Falls within MIL STD 1835 GDIP1-T14, GDIP1-T16, GDIP1-T18 and GDIP1-T20.

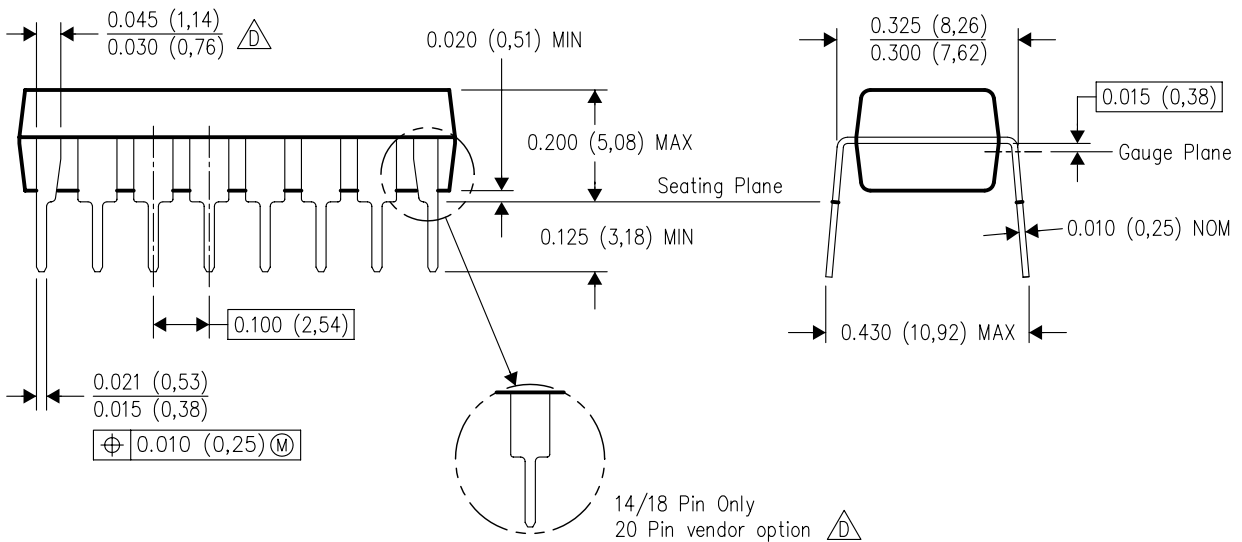
N (R-PDIP-T**)

16 PINS SHOWN

PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE



PINS **	14	16	18	20
DIM				
A MAX	0.775 (19,69)	0.775 (19,69)	0.920 (23,37)	1.060 (26,92)
A MIN	0.745 (18,92)	0.745 (18,92)	0.850 (21,59)	0.940 (23,88)
MS-001 VARIATION	AA	BB	AC	AD

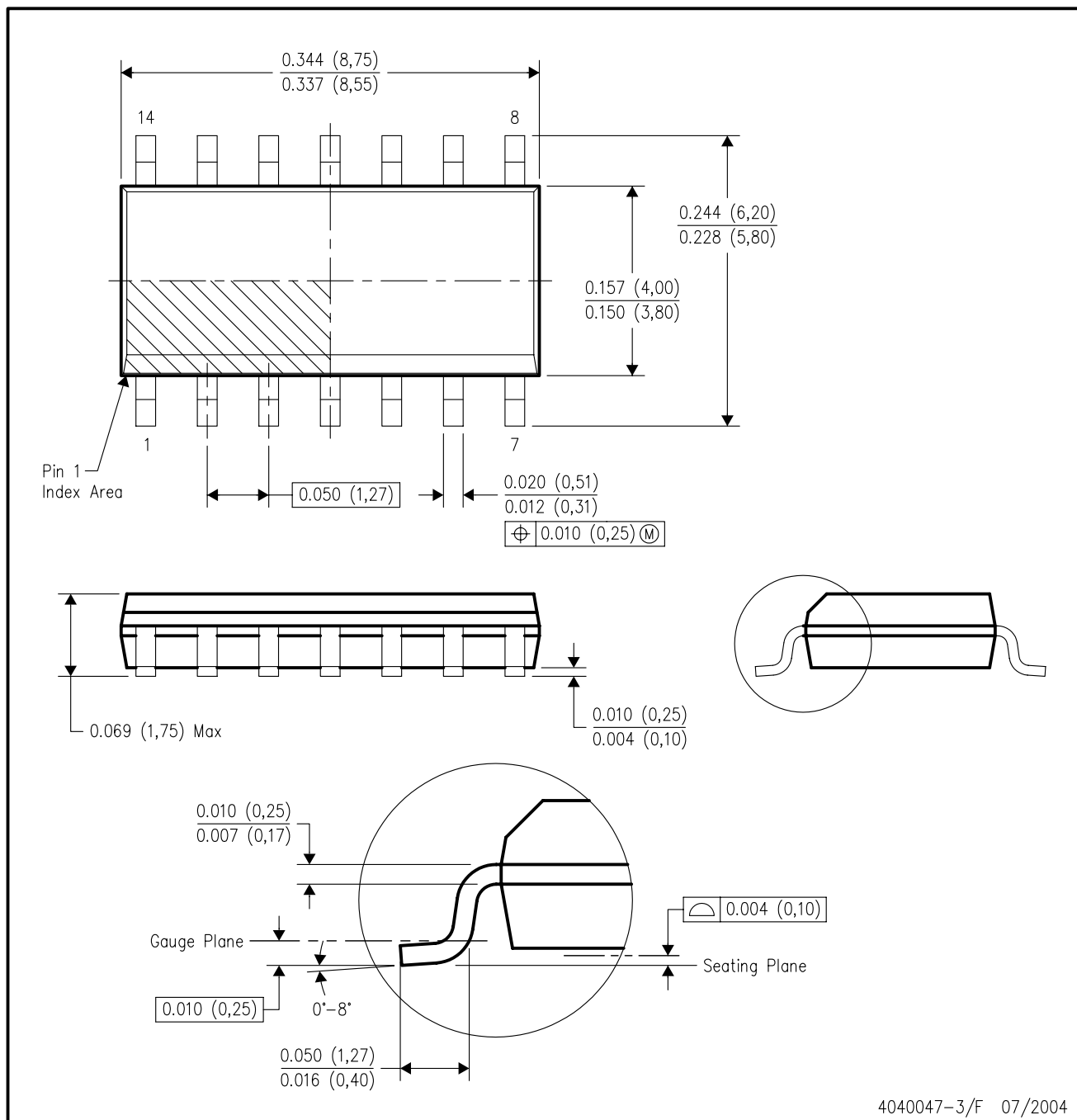


4040049/E 12/2002

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Falls within JEDEC MS-001, except 18 and 20 pin minimum body length (Dim A).
 - D. The 20 pin end lead shoulder width is a vendor option, either half or full width.

D (R-PDSO-G14)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE



4040047-3/F 07/2004

NOTES:

- All linear dimensions are in inches (millimeters).
- This drawing is subject to change without notice.
- Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0.006 (0,15).
- Falls within JEDEC MS-012 variation AB.

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services at any time and to discontinue any product or service without notice. Customers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All products are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its hardware products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by government requirements, testing of all parameters of each product is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. Customers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with customer products and applications, customers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any TI patent right, copyright, mask work right, or other TI intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license from TI to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. Reproduction of this information with alteration is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for such altered documentation.

Resale of TI products or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that product or service voids all express and any implied warranties for the associated TI product or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Following are URLs where you can obtain information on other Texas Instruments products and application solutions:

Products		Applications	
Amplifiers	amplifier.ti.com	Audio	www.ti.com/audio
Data Converters	dataconverter.ti.com	Automotive	www.ti.com/automotive
DSP	dsp.ti.com	Broadband	www.ti.com/broadband
Interface	interface.ti.com	Digital Control	www.ti.com/digitalcontrol
Logic	logic.ti.com	Military	www.ti.com/military
Power Mgmt	power.ti.com	Optical Networking	www.ti.com/opticalnetwork
Microcontrollers	microcontroller.ti.com	Security	www.ti.com/security
		Telephony	www.ti.com/telephony
		Video & Imaging	www.ti.com/video
		Wireless	www.ti.com/wireless

Mailing Address: Texas Instruments
Post Office Box 655303 Dallas, Texas 75265

Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated