

APLICACIONES LUMINOTÉCNICAS DE CÁMARAS DIGITALES

Carlos SIERRA GARRIGA

UPC – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona

1 OBJETIVO

El objetivo principal del presente estudio consiste en diseñar un sistema de medida de magnitudes luminotécnicas basado en la tecnología CCD (Charge Coupled Device).

Cuando se habla de medidas luminotécnicas, la más importante de las estas es la luminancia, pues es la que mejor se aproxima a la descripción del proceso de la visión. Es por ello que basándose en estudios anteriores de diversas aplicaciones y en las experiencias desarrolladas, se va a tratar de aplicar el sistema de medida a la medida de luminancias.

Este sistema debe permitir realizar las medidas de una forma más simplificada que la que emplean los sistemas de medida convencionales, los cuales requieren de una importante preparación y puesta a punto. De aquí se deduce que el primer objetivo de este estudio es la elección de los diversos componentes que formarán parte del sistema de captación.

Una vez configurado el sistema e identificados los parámetros que relacionan la luminancia medida con el sistema de captación, el sistema podrá actuar como luminancímetro, aunque no como los luminancímetros actuales, en los que únicamente se puede conocer la luminancia de un área muy pequeña, sino de una imagen completa (fotografía digital).

Gracias al conocimiento de las diferentes relaciones entre magnitudes luminotécnicas, se podrán deducir otras tales como la iluminancia, el flujo luminoso y la intensidad luminosa.

Una vez se haya definido y configurado el sistema de medida, el siguiente paso consistirá en tratar de aplicarlo al análisis de la

distribución de intensidades lumínicas de aparatos de alumbrado, obteniendo así su sólido fotométrico, pudiendo así conocer de una forma más rápida el comportamiento de un aparato de alumbrado.

2 ANTECEDENTES

El principal aparato de medida de magnitudes lumínicas es el ojo, es lo que se conoce como fotometría visual, es un tipo de fotometría que se realiza por comparación. El ojo actúa como órgano comparador entre diferentes niveles de luminancia, es capaz de detectar si un objeto es más brillante que otro, pero no es capaz de evaluar en que cantidad. El ojo no es capaz de evaluar con una cantidad el nivel de luminancia de un objeto. Es en el momento en que se descubren los sistemas sensibles a la luz (células fotoeléctricas) cuando verdaderamente puede darse un valor de la magnitud lumínica medida. Este es el caso de luxómetros, luminancímetros y otros dispositivos, capaces de transformar una señal eléctrica en una señal lumínica.

Estos dispositivos contienen una célula fotoeléctrica cuya sensibilidad es la misma que la sensibilidad espectral del ojo (Curva CIE).

El hecho de poder dar un valor a las diferentes magnitudes ya representó un gran avance pues permitió evaluar las prestaciones visuales de un entorno o el comportamiento de los aparatos de alumbrado. El inconveniente de estos sistemas reside en que la medida debe realizarse punto a punto, debiéndose invertir cantidad de tiempo en la toma de datos de un entorno.

Con la tecnología CCD lo que se está realizando es una fotografía digital del entorno, en la cual, con una única toma de datos se obtiene gran cantidad de información, pues el

sensor CCD que incorpora tiene una resolución de hasta 752 x 582 píxeles.

3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los objetivos del presente proyecto consiste en poder emplear el sistema diseñado como luminancímetro. Ello implica que la respuesta espectral del sistema debe ser lo más parecida posible a la curva de sensibilidad del ojo, tal y como se muestra en la fig. 1.

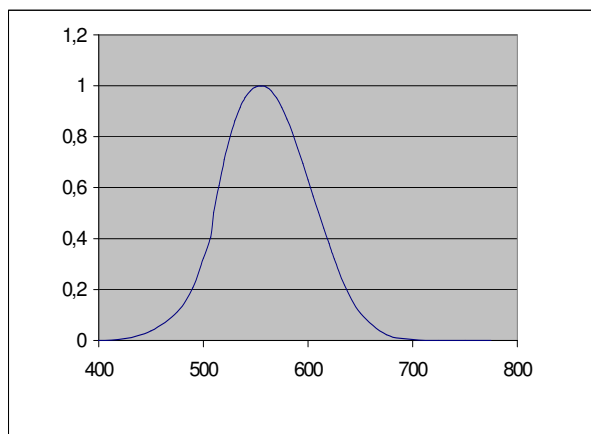


Fig. 1 – Respuesta espectral del ojo.

Para conseguir que el sistema de esta respuesta, deben acoplarse una serie de dispositivos que se pasan a detallar a continuación.

3.1 Cámara digital



Fig. 2 – Cámara digital empleada en el presente proyecto

La cámara digital es la que contiene el sensor CCD, cuya función es la de transformar radiaciones electromagnéticas en impulsos eléctricos.

Concretamente, la cámara empleada es de la casa JAI y el modelo es el CV-M50 ½. Es una cámara CCD monocromo (8 bits) diseñada para aplicaciones de sensibilidad industrial.

Esta cámara tiene dos modos de funcionamiento: CIA y el modo estándar de televisión CCIR. Se ha seleccionado este último modo de funcionamiento debido a que proporciona mayor información.

En este modo de funcionamiento la matriz de píxeles es de 752 H x 582 V, resultando un área sensible de aproximadamente 440.000 píxeles.

Las características principales de este dispositivo son las siguientes:

Shutter: Controla el tiempo de exposición del sensor CCD. Los valores que se pueden adoptar son 1/50, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4500 y 1/10000 seg. La forma de configurar este parámetro es mediante unos microrruptores instalados en la propia cámara.

CCD Accumulation: Es el modo de acumulación del dispositivo, existen dos modos diferentes:

- *Field Accumulation:* Es útil para filmar objetos en movimiento.
- *Frame Accumulation:* Es más efectivo para imágenes estáticas.

Las mediciones a realizar serán totalmente estáticas, por eso se aplicará el Frame Accumulation.

Scanning System: Se emplea para elegir el sistema de escáner entre:

- No entrelazado, para imágenes en movimiento.
- 2:1 Entrelazado, para imágenes estáticas.

En el caso que nos ocupa se tomará el modo 2:1 entrelazado pues permite operar de acuerdo con los sistemas estándar de TV, EIA o CCIR.

Gamma Correction: Es el factor de compensación de gamma, hay dos valores:

- 1.0 linier

- 0.45 correction

Debe emplearse la posición 1.0 linar ya que es la recomendada para las aplicaciones de procesamiento de imagen o de visión directa.

Auto Gain Control: Corresponde a la forma de actuar de la ganancia, la cual puede ser manual o automática. En posición de Auto, este parámetro se ajusta de una forma autónoma según sean las características de la imagen. Por otro lado, el control manual hace que la ganancia se constante independientemente del tipo de imagen.

3.2 Sensor CCD

El sensor CCD es el responsable de transformar las radiaciones electromagnéticas que le llegan en impulsos eléctricos. El sensor CCD con que está equipada esta cámara es un sensor de la marca Sony, y el modelo es el ICX039DLA. Es un sensor de tipo interlinea, adecuada para cámaras con un sistema óptico de 1/2" en blanco y negro que trabajen con el sistema CCIR.

Tiene una gran sensibilidad y bajo ruido conseguido con la adopción de sensores HAD (diodo de acumulación de huecos) que forman este sensor.

Es de gran importancia la sensibilidad espectral del sensor. Para poder tratar al sistema como un "ojo artificial", es imprescindible que su curva de sensibilidad espectral sea lo mas similar a la curva de sensibilidad espectral del ojo. Así pues, la curva de sensibilidad del sensor empleada viene representada por el siguiente gráfico:

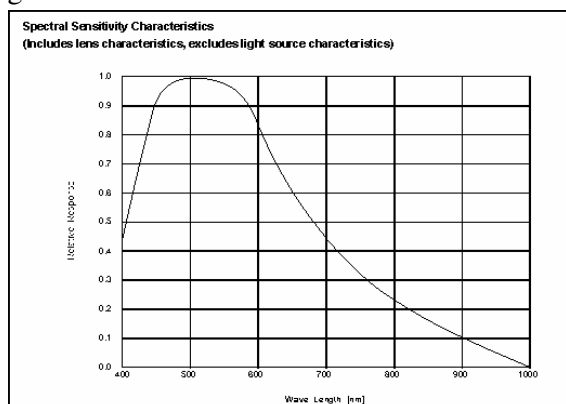


Fig. 3 – Curva de sensibilidad espectral del sensor CCD empleado.

Como se observará más adelante, esta curva no concuerda con la curva de sensibilidad del ojo. Es por ello que debe acoplarse al sistema un conjunto de elementos ópticos.

3.3 Filtro V (λ)

Con la finalidad de ajustar la curva del sensor CCD a la curva de sensibilidad del ojo, debe corregirse mediante la interposición de un filtro que limite la radiación que llega al sensor.

Se debe aplicar un filtro pasa banda que se aproxime lo máximo al espectro visible. De tal forma que la transmitancia del filtro viene expresada por la curva mostrada en la figura 3.

Los filtros pasa-banda son uno de los mecanismos más sencillos y económicos para transmitir una banda de luz bien definida, rechazando así el resto de radiaciones no deseadas.

Se ha empleado un filtro pasa-banda de la casa ANDOVER de referencia 550FS80-50.

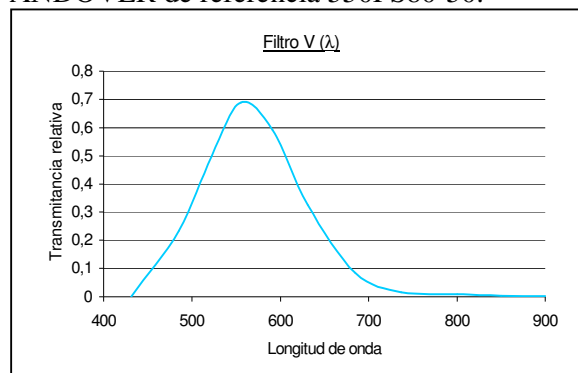


Fig. 4 – Curva de transmitancia espectral del filtro V(λ) empleado.

Aproximadamente el punto de máxima transmitancia se encuentra en la longitud de onda de 550 nm, siendo su valor de un 70 %.

3.4 Objetivo

El objetivo controlará el enfoque y zoom del sistema, así como también regulara la cantidad de luz mediante el control de apertura del diafragma. El objetivo a emplear es de la marca Canon, modelo V6X16-19 MACRO. Los valores de apertura de este objetivo son estándar y tienen los siguientes valores f 16, f 11, f 8, f 5.6, f 4, f 2.8, f 1,9

3.5 Tarjeta de captura de vídeo

La tarjeta de captura de vídeo es un dispositivo que se integra dentro de un ordenador. Su función es la de transmitir al ordenador las imágenes captadas por la cámara. Por lo tanto, junto con el software apropiado, se obtiene la imagen percibida por el sensor.

La placa empleada es una Matrox Meteor, que es un dispositivo PCI captador de imagen. Este tipo de placa es capaz de adquirir imágenes con los sistemas estándar mencionados anteriormente.

El software empleado es el que incorpora la propia tarjeta, el Matrox Intellicam el cual ha sido desarrollado en entorno Windows y permite una rápida y cómoda conexión con la cámara, así como una rápida configuración de la tarjeta de captura.

4 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

4.1 Análisis teórico del sistema

Una vez definidos todos los componentes, la idea es que este sistema se comporte como un “ojo artificial”, es decir, que siga la curva de sensibilidad espectral publicada por la CIE.

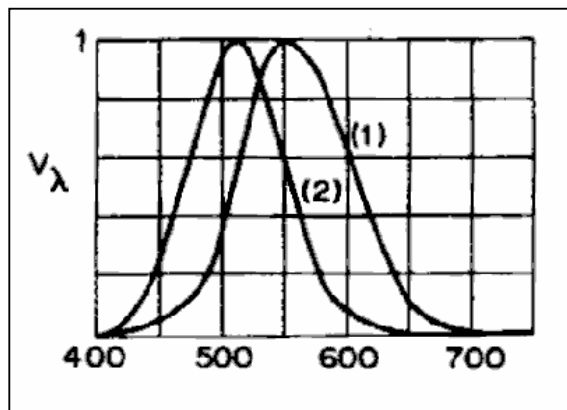


Fig. 5 – Curva de sensibilidad espectral del ojo según CIE

En la figura 5 puede observarse cual es el comportamiento en función de la longitud de onda del espectro electromagnético. La curva (1) representa la visión fotópica o diurna, la cual es activa a partir de una luminancia de 3 cd/m² aproximadamente, mientras que por debajo de 1 cd/m² se encuentra la curva (2) escotópica o nocturna. En el intervalo comprendido entre estos dos valores, el ojo se

comporta de una forma muy variable, conocida como visión mesópica.

El presente estudio se centrará en la visión fotópica, pues es de mayor relevancia.

Como puede observarse en la figura 6, la curva seguida por el sensor difiere de la curva de sensibilidad espectral del ojo. Es por ello que se hace necesaria la interposición de filtros ópticos que corrijan este efecto y aproximen en lo máximo las dos curvas.

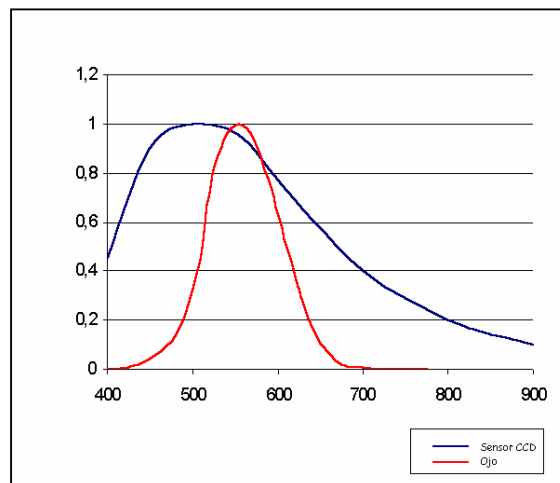


Fig. 6 – Comparación entre la curva de sensibilidad espectral del ojo y del CCD

Para corregir este efecto se ha optado por la interposición de un filtro $V(\lambda)$, el cual sigue aproximadamente la curva de sensibilidad del ojo, aunque con un porcentaje de absorción, tal y como muestra la figura 7.

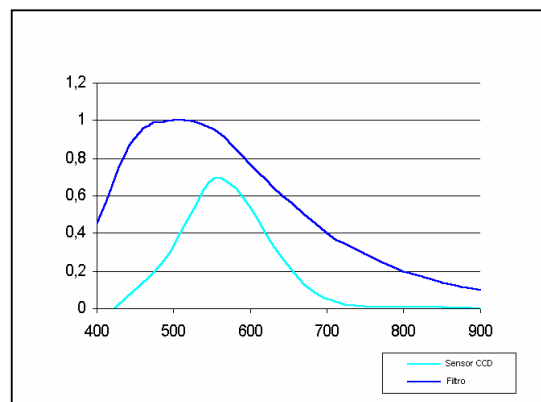


Fig. 7 – Comparación entre la curva de sensibilidad espectral del ojo y del CCD

Así pues, interponiendo el mencionado filtro, se obtiene una curva final de sensibilidad del sistema tal y como se muestra en la figura 8.

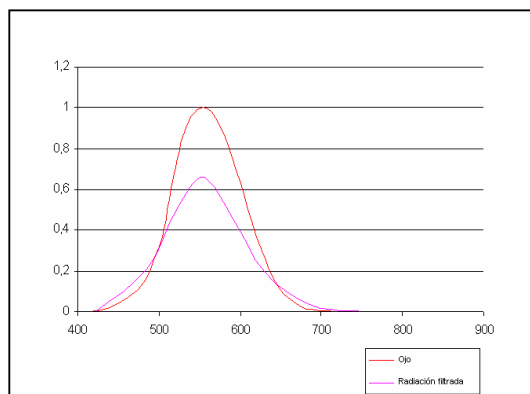


Fig. 8 – Comparación entre la curva de sensibilidad espectral del ojo la resultante del sistema

Se observa una discrepancia entre ambas curvas, no en cuanto a forma pero si en cuanto a tamaño. Si se multiplica la curva del sistema por una constante, el resultado final queda reflejado en la figura 9.

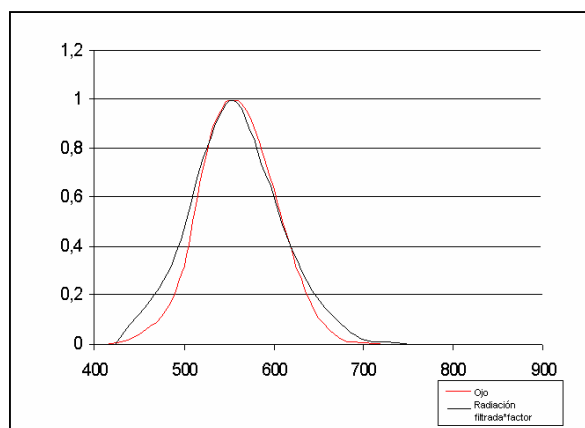


Fig. 9 – Radiación final comparada rectificada comparada con la sensibilidad espectral del ojo.

Como se puede observar, las curvas son muy similares con lo que a priori, y habiendo analizado únicamente datos teóricos, la aplicación de estos sensores a las medidas luminotécnicas es factible.

4.2 Parametrización del sistema

En este apartado se analizará los parámetros sobre los que se puede actuar para configurar el sistema.

Nivel de gris (Ng)

El parámetro que se desea medir es la luminancia de una escena, pero como resultado final se obtiene una fotografía digital, en forma

de niveles de gris, donde cada pixel puede tener un nivel de gris que oscila entre 0 y 255. Es importante destacar un concepto que es la saturación del CCD. Si un pixel tiene un valor de 255, indica que el sensor se ha saturado, con lo que existirá una pérdida de información. Es por ello que se tomará como intervalo válido del

Nivel de Gris el rango [0..254].

Tiempo de exposición (T)

El tiempo de exposición (shutter) será otro de los parámetros a analizar, ya que a mayor tiempo de exposición mayor es la cantidad de radiación que llega al sensor.

Como se comentó anteriormente, los posibles valores que puede adoptar son 1/50, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4500 y 1/10000 seg.

Apertura del diafragma (f)

El diafragma del objetivo regula la entrada de luz según el grado de apertura. Los valores son los siguientes: f 16, f 11, f 8, f 5.6, f 4, f 2.8, f 1.9.

El resto de parámetros tales como la ganancia (manual o automática), el factor de corrección gamma, el tipo de acumulación y el sistema de escaneado quedarán definidos por la tipología de la medición. Serán configurados para imágenes estáticas.

Así, el objetivo es llegar a una expresión del tipo:

$$L = f(Ng, T, f) \quad \text{Ec. 4.1}$$

4.3 Desarrollo experimental

En este apartado se describen los experimentos necesarios para llegar a conseguir una relación entre el valor de la luminancia y los parámetros mencionados anteriormente.

Para ello deben obtenerse un gran número de fotografías digitales variando los diferentes parámetros de que disponemos:

- Tiempo de exposición
- Apertura del objetivo
- Luminancia

El tiempo de exposición y la apertura del objetivo pueden modificarse directamente actuando sobre la cámara.

Para tratar la luminancia, es importante obtener un campo de luminancias constante para obtener una distribución de niveles de gris sobre la foto sea lo más uniforme posible. Para ello se ha diseñado un dispositivo que permitirá variar el campo de luminancias sobre la escena a fotografiar.

Se ha construido un recinto paralelepípedo recubierto interiormente con una pintura blanca, de tal forma que la reflexión interior sea lo más difusa posible.

En un extremo de la caja se ha dispuesto una lámpara de incandescencia de 100 W de tal forma que con un potenciómetro exterior pueda ajustarse a diferentes niveles de potencia. En la parte superior de la caja se ha dispuesto una abertura de tal forma que puedan introducirse los patrones a fotografiar.

En la cara opuesta a la que soporta la lámpara se ha realizado una apertura cuadrada de 10x10 cm, de tal forma que este será el área a fotografiar.

Para evitar la influencia de luz exterior, se ha dispuesto un túnel de 1,3 m de longitud y de 20x26.5 cm de sección pintado interiormente de negro mate para evitar la que reflexión de la luz distorsione la medida.

Las figuras 10 y 11 muestran un esquema del montaje diseñado para la calibración del sistema.

Por otro lado se ha dispuesto de 4 niveles de potencia para aumentar el número de muestras y reducir de esta manera el error.

Por último, para conocer la luminancia de la muestra iluminada se empleará un luminancímetro serie L1000 de la casa LMT.

Para obtener un rango elevado de luminancias se ha optado por seleccionar como patrones secciones rectangulares de cartulina de diversos

colores y degradados. Los colores empleados son los siguientes:

- Blanco
- Gris 1
- Gris 2
- Gris 3
- Negro
- Violeta
- Azul oscuro
- Azul claro
- Verde
- Amarillo
- Naranja
- Rojo

Los patrones empleados son cartulinas debido a la opacidad que tienen y a la buena uniformidad de luminancias que presentan al ser iluminadas. Se han seleccionado unos colores tal que abarcan en prácticamente todo el espectro visible.

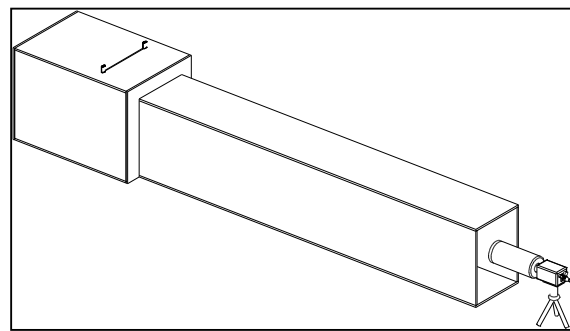


Fig. 10 – Esquema del montaje para la calibración del sistema

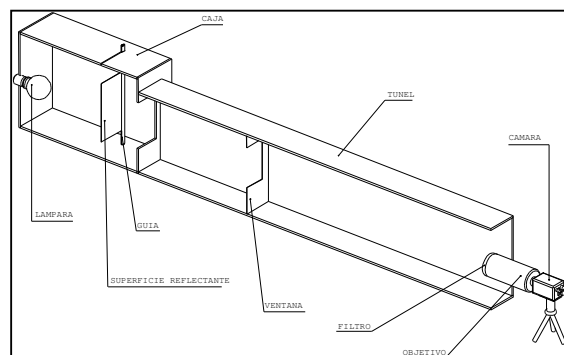


Fig. 11 - Sección detallada del sistema

Una vez configurados todos los parámetros posibles, resultan una cantidad de muestras de 2688 fotografías diferentes, de las cuales únicamente se seleccionarán las que tengan una luminancia superior a 3 cd/m², pues es el valor umbral a partir del cual se considera la visión fotópica.

4.4 Obtención de los resultados

Una vez configurados y dispuestos todos los dispositivos para la captación de imágenes, puede procederse a la obtención de las fotografías y a las medidas de luminancia. Para tomar un valor medio, se procederá a tomar cuatro valores de luminancia de cada configuración y trabajar con la media.

El mecanismo de disparo se realiza con el programa de gestión de la tarjeta (Matrox Intellicam), que al mismo tiempo permite visualizar la imagen en el monitor. La dimensión elegida para el tamaño de las imágenes será de 250x250 píxeles, ya que no se cree necesario almacenar la fotografía completa debido a la alta uniformidad que se presentará. De lo contrario, el espacio en disco duro necesario sería exagerado y poco operativo.

El formato en el cual se almacena la imagen es formato TIFF sin compresión, en el cual no hay pérdida de información, el cual posteriormente puede ser transformado a otros formatos (BMP) de tal forma que sean fácilmente analizables.

Una vez realizada y almacenada la imagen, se procederá a tomar las cuatro medidas de luminancia para garantizar las mismas condiciones.

Para evitar la posible influencia del ruido, se tomarán también fotografías con el objetivo tapado y se analizarán para comprobar su influencia. En principio, las características de la máquina indican que el ruido es totalmente despreciable.

Para la presentación de los resultados se ha elaborado una ficha para cada nivel de potencia empleado y cada color patrón utilizado. En esta ficha se almacenarán los valores de gris medios de la foto así como su desviación tipo.

4.5 Análisis de los resultados

En este punto, una vez tabulados y verificados todos los resultados obtenidos, se procederá a un análisis estadístico para tratar de relacionar los parámetros que intervienen en la calibración del sistema.

En primer lugar, debe darse un rango de valores a cada uno de los parámetros que intervienen:

Luminancia

Como se ha comentado anteriormente, se considerarán válidos valores de Luminancia superiores a 3 cd/m² pues es alrededor de este valor donde puede considerarse la visión fotópica. Por otro lado, con las mediciones realizadas, la luminancia máxima alcanzada se sitúa entorno a las 1200 cd/m². Así pues, se considerará este como el rango de valores válidos para la aplicación del experimento. Es un rango suficientemente amplio para las posteriores aplicaciones del sistema.

Nivel de Gris

Las primeras mediciones realizadas han sido para determinar el ruido del sistema. Como se mencionó anteriormente, fueron mediciones con el objetivo totalmente tapado. En estas condiciones, el valor del nivel de gris obtenido está entorno a 15 (se recuerda que el rango de valores oscila entre 0 y 255). Por otro lado, se considera que como el máximo valor es de 255, si un píxel llega a obtener ese valor indica que la imagen está saturada, es decir, que los píxeles con ese valor pueden tener ese valor o un valor superior. Se considerará un valor no válido. Así pues, el rango de valores de nivel de gris útil para el experimento será de 15 a 254.

Tiempo de exposición

El tiempo de exposición es un parámetro discreto, se dispone únicamente de los valores predeterminados por la cámara, con lo cual se considerarán válidos todos ellos.

Apertura del diafragma

Al igual que ocurre con el tiempo de exposición, este valor adopta valores predeterminados, por lo que también se considerarán útiles todos los valores.

Ganancia

La ganancia es un parámetro no controlable. Existen dos opciones: Dejarla en una posición fija o permitir que la cámara autorregule este parámetro. Para esta primera toma de datos se ha optado por dejarla en una posición fija.

Los parámetros de tiempo de exposición y apertura del diafragma tiene utilidad en el sentido de que evitan la saturación del sensor. A menor tiempo de exposición, menor entrada de luz y viceversa. Con la apertura del diafragma ocurre lo mismo: A mayor apertura del diafragma, mayor entrada de luz.

Para tratar de averiguar las diferentes relaciones entre los parámetros se han graficado los resultados de forma que se pueda intuir algún tipo de relación entre los parámetros que intervienen.

Como se ha comentado anteriormente, los parámetros de apertura del diafragma y de tiempo de exposición evolucionan de una forma discreta, es por ello que las gráficas que se estudiarán serán del tipo L-Ng, (T cte y f cte), así se obtendrán una serie de relaciones según el tiempo de exposición y la apertura del objetivo.

La expresión que se espera obtener es la ecuación de una recta:

$$L = a * Ng + b \quad \text{Ec 4.2}$$

Así pues, esperan obtenerse tantas ecuaciones como combinaciones de Tiempos de exposición y apertura del objetivo. Dado que existen 8 valores de T y 7 valores de f, en total se obtendrán 56 ecuaciones diferentes.

Todas estas ecuaciones serán implementadas en un programa informático, el cual se encargará de seleccionar la ecuación en función de los parámetros de entrada.

4.6 Evaluación del error del sistema

Una vez realizado todo el análisis estadístico se procederá a evaluar el error del sistema en la toma de medidas. Se considerará adecuado un error entorno al 1%.

5 APLICACIÓN DIRECTA DEL SISTEMA

Las aplicaciones a que se han destinado los sistemas de este tipo han sido básicamente la medida de luminancias. El hecho de que se pueda obtener la luminancia de una escena simplifica enormemente el análisis visual de dicho entorno.

El objetivo de este estudio consiste en llegar a convertir este sistema en un artefacto capaz de determinar la fotometría de una luminaria. Si se analiza el comportamiento de un fotogoniómetro, se observa que es análogo al comportamiento de un luminancímetro, únicamente puede obtenerse la medida de un punto en cada toma de datos. Al aplicar el sistema basado en cámaras digitales, puede llegar a simplificar enormemente el trabajo pues en cada medida se obtiene una cantidad de datos muy superior a los sistemas actuales.

Por otro lado, al poder obtener muchas más medidas, el error cometido se reducirá. Para que los sistemas actuales lleguen a tener una precisión como la que se espera del nuevo sistema, los tiempos de medida se dispararían, llegando a hacer inviables estos aparatos.

Otro de los aspectos en que se mejoraría es en la preparación del sistema. En los fotogoniómetros actuales los tiempos de preparación son casi mayores que los tiempos de toma de datos, pues el correcto centrado de la luminaria es importantísimo, ya que en caso contrario la medida se deforma, dejando de ser válida.

5.1 Descripción del sistema

Los sistemas actuales realizan la toma de datos de una forma directa, es decir, toman la medida directamente resultante de la fuente de luz. El sistema propuesto analizaría el resultado de la reflexión en una superficie plana. Para poder llegar a obtener el valor de la intensidad luminosa, es requisito indispensable que esta superficie sea difusora perfecta (Lambertiana). Para conseguirlo se pintará de un color blanco espectralmente neutro.

Los resultados que se podrían obtener serían:

- Distribución de luminancias (cd/m²)
- Distribución de iluminancias (lux)
- Sólido fotométrico (cd)

- Rendimiento de la luminaria
- Flujos lumínicos superior e inferior

Todos estos valores vendrían determinados a partir de la medida de la luminancia.

Conocido el valor de la luminancia, si la superficie donde se mide es difusora perfecta, se cumple la ley de Lambert:

$$L = \frac{I}{S} = \frac{\rho \cdot \Phi}{\pi \cdot S} = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad \text{Ec 5.1}$$

donde

L : Luminancia medida (cd/m²).
 I : Intensidad luminosa recibida (cd).
 S : Superficie de medida (m²)
 Φ: Flujo recibido por la superficie (lm)
 ρ : Factor de reflexión de la superficie
 E : Iluminancia (lux)

De esta ecuación se deduce la Iluminancia:

$$E = \frac{\pi \cdot L}{\rho} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Así pues, conocida la iluminancia y la posición relativa de la luminaria, siguiendo la ley del coseno del ángulo de incidencia, puede llegarse a obtener la intensidad luminosa en una dirección.

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \alpha \quad \text{Ec. 5.3}$$

Así pues, puede obtenerse la intensidad luminosa que llega a un determinado punto proveniente de la luminaria.

La superficie de medida (S) es la equivalente a la proyección de un pixel sobre el plano de medida, la cual dependerá de la distancia a la que se coloque la cámara digital y de la resolución empleada en la cámara.

El número de medidas dependerá de la relación entre el tamaño de la luminaria y la distancia al plano, ya que para considerarse un emisor puntual esta relación debe ser superior a 10.

Otro de los aspectos a tener en cuenta es el tipo de emisión de la luminaria, si esta es directa o si es directa-indirecta, el número de medidas cambia. Es por ello que deberá dotarse al sistema de un mecanismo que permita rotar la luminaria de forma que se consiga cubrir todas

las direcciones de emisión. Otro de los aspectos que se deben destacar es el entorno en que irá ubicado el sistema. Es necesario garantizar que no habrá influencia de las medidas indirectas producto de las reflexiones. El habitáculo donde vaya integrado el sistema de medida deberá estar pintado de un color negro mate, incluso con cortinas negras, de tal forma que se elimine las emisiones indirectas.

5.2 Limitaciones

El presente proyecto tiene por objetivo demostrar la posibilidad de emplear las cámaras CCD para la elaboración de las características fotométricas de un aparato de alumbrado.

Por cuestiones de falta de espacio y de presupuesto., este proyecto se limitará a fuentes de luz de reducido tamaño, de tal forma que pueda construirse el artefacto.

Carlos SIERRA GARRIGA

Estudios Luminotécnicos – Dpto. Proyectos de Ingeniería – UPC, Barcelona, España

Fax: +34.93.334 02 55

E-mail: sierra@pe.upc.es

APLICAȚII LUMINOTEHNICE ALE CAMERELOR DE LUAT VEDERI DIGITALE

1 Obiective

Obiectivul principal al acestui studiu este proiectarea unui sistem de măsură a mărimilor luminotehnice bazat pe tehnologia CCD (Charge Completed Device).

Când se vorbește despre mărimi luminotehnice, cea mai importantă dintre acestea este luminanța deoarece aceasta aproximează cel mai bine procesul de vedere. Acesta este motivul pentru care, pe baza diverselor aplicații anterioare și a experimentărilor realizate, sistemul propus va fi utilizat pentru măsurarea luminanțelor.

Acest sistem trebuie să permită simplificarea procesului de măsurare față de sistemele convenționale care se caracterizează prin pregătiri și ajustări destul de laborioase. Rezultă că primul obiectiv al acestui studiu este

alegerea diverselor componente care vor face parte din sistemul de achiziție.

Odată configurat sistemul și identificați parametrii care leagă luminanța măsurată de sistemul de achiziție, sistemul de măsură va putea fi utilizat ca luminanțmetru; diferența constă în faptul că luminanțmetrele utilizate în prezent pot determina luminanța unei arii foarte mici și nu pe cea a unei imagini complete (fotografie digitală) așa cum va fi cazul sistemului proiectat.

Cunoscându-se relațiile dintre diferitele mărimi luminotehnice, se vor putea deduce și alte mărimi precum iluminarea, fluxul luminos și intensitatea luminoasă.

După definirea și configurarea sistemului de măsură, pasul următor va consta în aplicarea sa în analiza distribuției intensității luminoase la corpurile de iluminat; se va putea obține corpul fotometric al acestora și se va permite o cunoaștere mai rapidă a comportamentului unui corp de iluminat.

2 Antecedente

Principalul aparat de măsură a mărimii luminanțelor este ochiul; metoda se numește fotometrie vizuală și se realizează prin comparare. Într-adevăr, ochiul acționează ca un organ comparator între diferite niveluri de luminanță, este capabil să detecteze dacă un obiect este mai strălucitor decât altul, dar nu este capabil să evalueze în ce măsură. Ochiul nu este capabil să evalueze cantitativ nivelul de luminanță al unui obiect. Numai în momentul descoperirii unor sisteme sensibile la lumină (celulele fotoelectrice) s-a putut da o valoare mărimii luminotehnice măsurate. Acesta este cazul luxmetrelor, luminanțmetrelor și a altor dispozitive capabile să transforme un semnal luminos în unul electric.

Aceste dispozitive conțin o celulă fotoelectrică a cărei sensibilitate este aceeași cu sensibilitatea spectrală a ochiului (curba CIE).

Faptul de a putea da o valoare diferitelor mărimi a reprezentat un mare avantaj deoarece a permis să se evalueze prestațiile vizuale ale unui mediu sau comportamentul corpurilor de iluminat. Inconvenientul acestor sisteme constă în faptul că măsurătorile trebuie realizate punct cu punct, consumându-se o mare cantitate de timp pentru luarea datelor aceluia mediu. Cu tehnologia CCD se poate realiza o fotografiere digitală a mediului din

care, cu o singură achiziție de date, se poate obține o mare cantitate de informație, căci senzorul CCD încorporat are o rezoluție de până la 752x582 pixeli.

3 Descrierea sistemului

Așa cum s-a menționat anterior, unul din obiectivele proiectului constă în utilizarea sistemului proiectat ca luminanțmetru. Aceasta presupune că răspunsul spectral al sistemului să fie cât mai apropiat posibil de curba de sensibilitate a ochiului, așa cum se arată în figura 1. Pentru a se obține un astfel de răspuns al sistemului trebuie să se interconecteze o serie de dispozitive care vor fi descrise în continuare.

3.1 Camera digitală

Camera digitală - figura 2 - conține senzorul CCD a cărui funcție este de a transforma radiațiile electromagnetice în impulsuri electrice. Camera utilizată este producție JAI, model CV-M50 1/2. Este o cameră CCD monocromă (8 biți) proiectată pentru aplicații de sensibilitate industrială. Această cameră are două moduri de lucru: CIA și modul standard de televiziune CCIR. S-a selectat acest ultim mod de funcționare datorită faptului că oferă informații îmbunătățite. În acest mod de funcționare, matricea de pixeli este de 752 H x 582 V, rezultând o arie sensibilă de aproximativ 440.000 pixeli.

Caracteristicile principale ale acestui dispozitiv sunt următoarele:

- **Shutter** - controlează timpul de expunere al senzorului CCD. Valorile care pot fi alese sunt: 1/50, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4500 și 1/10.000 sec. Configurarea acestui parametru se face prin intermediul unor microîntreruptoare instalate pe cameră.

- **CCD Accumulation** - este modul de acumulare al dispozitivului existând două moduri diferite:

- *Field Accumulation* - este util pentru a filma obiecte în mișcare;

- *Frame Accumulation* - este mai eficace pentru imagini statice; măsurătorile care se vor realiza vor fi în întregime statice, deci se va utiliza "Frame Accumulation".

- **Scanning System** - se utilizează pentru a alege sistemul de scanare (zoom) între:

- *Întreșut* pentru imagini;

- 2:1 *Întreșut* pentru imagini statice; în cazul analizat se va utiliza modul 2:1 *Întreșut* deoarece permite să se opereze în acord cu sistemele standard de TV, EIA sau CCIR.

- **Gamma Correction** - factorul de compensare gamma are două valori:

- 0,45 *corecție*;

- 1,0 *liniar*; trebuie utilizată poziția 1,0 liniar care este recomandată pentru aplicații de procesare a imaginilor sau de vizare directă.

- **Auto Gain Control** - corespunde formei de a modifica câștigul care poate fi manuală sau automată. În poziția Auto, acest parametru se ajustează într-o manieră autonomă în funcție de caracteristicile imaginii. Pe de altă parte, controlul manual permite un câștig constant, independent de tipul imaginii.

3.2 Senzorul CCD

Senzorul CCD are rolul de a transforma radiațiile electromagnetice incidente în impulsuri electrice. Senzorul care echează camera aleasă este produs de Sony și este model ICX039DLA. Este un senzor de tip interlinie adecvat pentru o cameră cu un sistem optic de 1/2" în alb-negru care să lucreze cu sistemul CCIR. Are o mare sensibilitate și zgomot scăzut datorită elementelor sensibile HAD care formează acest senzor.

Foarte importantă este sensibilitatea spectrală a senzorului. Pentru a putea trata sistemul ca un "ochi artificial" este imperios necesar ca sensibilitatea sa spectrală să fie cât mai apropiată de curba sensibilității spectrale a ochiului. Curba de sensibilitate a senzorului utilizat este dată în graficul din figura 3. Cum se va observa în continuare această curbă nu este identică cu cea a ochiului. Din această cauză, sistemului trebuie să i se adauge un ansamblu de elemente optice.

3.3 Filtru $V(\lambda)$

Pentru a ajusta curba senzorului CCD la curba de sensibilitate a ochiului, aceasta se corectează prin interpretarea unui filtru care limitează radiația primită de senzor. Trebuie utilizat un filtru trece-bandă care să aproximeze la maximum spectrul vizibil; spectrul transmis de filtru este exprimat prin curba arătată în figura 4.

Filtrele trece bandă sunt unul din mecanismele cele mai simple și mai economice

pentru transmiterea unei benzi de lumină bine definită eliminându-se astfel restul de radiație nedorită. S-a utilizat un filtru trece-bandă de producție ANDOVER, model 550FS80-50.

Punctul de transmitanță maximă se găsește la lungimea de undă de 550 nm și are valoarea de 70%.

Obiectivul va controla focalizarea și zoom-ul sistemului și va regla cantitatea de lumină prin controlul deschiderii diafragmei. Obiectivul utilizat este Canon, model V6X16-19 MACRO. Valorile diafragmei acestui obiectiv sunt standard și au valorile f16, f11, f8, f5.6, f4, f2.8, f1.9.

3.4 Placa video

Placa video este un dispozitiv care se montează într-un calculator și are rolul de a transmite calculatorului imaginile înregistrate de cameră. Ca urmare, împreună cu un software corespunzător, se obține imaginea percepută de senzor. Placa utilizată este "Matrox Meter" care este un dispozitiv PCI captator de imagini. Ea este capabilă de a primi semnale video de la sistemele standard menționate anterior.

Software-ul utilizat este cel existent pe placă, "Matrox Intellicam", dezvoltat sub MS Windows și care permite atât o legătură rapidă și comodă cu camera cât și o configurare rapidă a plăcii video.

4 Calibrarea sistemului

4.1 Analiza teoretică a sistemului

Odată definite toate componentele, ideea este ca sistemul să se comporte ca un "ochi artificial", adică să urmărească curba de sensibilitate spectrală publicată de CIE. În figura 5 se poate observa care este comportamentul, în funcție de lungimea de undă a spectrului electromagnetic. Curba (1) reprezintă vederea fotopică, care este activă începând de la o luminanță de aproximativ 3 cd/m^2 , în timp ce sub 1 cd/m^2 se întâlnește curba (2) – vederea scotopică. În intervalul dintre aceste valori, ochiul se comportă foarte variabil, manifestare cunoscută ca vedere mesopică.

Actualul studiu se va concentra asupra vederii fotopice deoarece aceasta este mai relevantă.

Cum se poate observa în figura 6, curba sensibilității senzorului diferă de cea a ochiului,

fapt care face necesară prezența filtrelor optice; acestea vor realiza o apropiere cât mai bună a celor două curbe. Pentru a corecta efectul amintit s-a optat pentru interpunerea unui filtru $V(\lambda)$ care urmărește aproximativ curba de sensibilitate a ochiului, deși cu un anumit factor de absorbție, așa cum se arată în figura 7. Prin urmare, prin intercalarea filtrului amintit se obține curba finală de sensibilitate a sistemului prezentată în figura 8. Se observă o discrepanță între cele două curbe, nu atât ca formă ci ca mărime. Dacă se multiplică curba sistemului cu o constantă, rezultatul final este cel prezentat în figura 9. După cum se poate observa, curbele sunt foarte apropiate și analizând numai date tehnice, utilizarea acestor senzori pentru măsurători luminotehnice este posibilă.

4.2 Parametrii sistemului

Analiza parametrilor asupra cărora se poate acționa pentru configurarea sistemului:

Nivel de gri (N_g). Parametrul care trebuie măsurat este luminanța unei scene, însă, ca rezultat final se obține o fotografie digitală, în formă de niveluri de gri, unde fiecare pixel poate avea un nivel de gri între 0 și 255. Este important de evidențiat conceptul de saturare a CCD. Dacă un pixel are valoarea de 255 el indică faptul că senzorul s-a saturat, ceea ce presupune o pierdere de informație. Acesta este motivul pentru care se va lua ca interval valid al Nivelului de gri domeniul [0...254].

Timpul de expunere (T). Timpul de expunere (shutter) este un alt parametru care trebuie analizat, deoarece, cu cât este mai mare timpul de expunere, cu atât cantitatea de radiații primită de senzor va fi mai mare.

Așa cum s-a amintit anterior, valorile posibile care pot fi adoptate sunt 1/50, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4500 și 1/10.000 sec

Apertura diafragmei (f). Diafragma obiectului va regla intrarea luminii corespunzător gradului de deschidere. Valorile sunt următoarele: f16, f11, f8, f5.6, f4, f2.8, f1.9.

Restul parametrilor, precum câștigul (fixat manual sau automat), factorul de corecție gamma, tipul de acumulare și sistemul de scanare vor trebui definiți în funcție de tipul măsurării. Configurarea se va face pentru imagini statice. Ca urmare, obiectivul poate fi

exprimat ca o relație de forma: $L = f(N_g, T, f)$ - (4.1).

4.3 Realizări experimentale

În acest paragraf vor fi descrise experimentările necesare pentru obținerea unei relații între valoarea luminanței și parametrii menționați anterior.

Pentru aceasta este necesar să se obțină un număr mare de fotografii digitale variindu-se diferiți parametri: - timpul de expunere; - deschiderea obiectivului; - luminanța.

Timpul de expunere și apertura obiectivului se pot regla acționând direct asupra camerei.

Pentru a modifica luminanța este important să se obțină un câmp cu luminanța constantă pentru ca distribuția nivelurilor de gri pe fotografie să fie cât mai uniformă posibil. Pentru aceasta s-a proiectat un dispozitiv care permite modificarea câmpului de luminanțe a scenei care se fotografiază.

S-a construit o incintă paralelipipedică acoperită pe pereții interiori de o vopsea albă astfel încât reflexia internă să fie cât mai difuză. La o extremitate a cutiei s-a dispus o lampă cu incandescență de 100 W, tensiunea de alimentare putând fi modificată cu un potențiomtru extern. În partea superioară a cutiei s-a realizat o deschidere prin care se pot introduce modelele care trebuie fotografiate. Pe partea opusă celei pe care se găsește lampa s-a practicat o deschizătură pătratică de 10x10 cm, reprezentând aria care va fi fotografiată. Pentru a elimina influența luminii externe s-a prevăzut un tunel cu o lungime de 1,3 m și secțiune 20x26,5 cm pictată pe interior cu vopsea neagră mat pentru a evita ca reflexia luminii să distorsioneze măsurătorile.

Figurile 10 și 11 indică schema montajului proiectat pentru calibrarea sistemului, respectiv secțiune de detaliu prin sistem.

Pe de altă parte s-au utilizat patru niveluri de putere a lămpii pentru a mări numărul mostrelor și a reduce în acest fel erorile.

În sfârșit, pentru a cunoaște luminanța mostrei iluminate s-a folosit un luminanțmetru seria L1000 produs de LMT.

Pentru a obține o ierarhizare precisă a luminanțelor s-au utilizat ca modele forme rectangulare din hârtie divers colorate și în diferite nuanțe. Culoarele utilizate sunt:

Alb	Negru	Verde
Gri 1	Violet	Galben
Gri 2	Albastru închis	Portocaliu
Gri 3	Albastru deschis	Roșu

Modelele utilizate trebuie să fie opace și să aibă o luminanță uniformă. Culorile alese asigură practic cuprinderea întregului spectru vizibil.

După configurarea tuturor parametrilor posibili au rezultat 2688 fotografii diferite dintre care s-au selecționat numai cele corespunzătoare unei luminanțe mai mari de 3 cd/m^2 deoarece aceasta este valoarea de la care se consideră vederea fotopică.

4.4 Obținerea rezultatelor

Odată ce toate dispozitivele pentru captarea imaginilor au fost configurate și amplasate se poate trece la realizarea fotografiilor și la măsurarea luminanțelor. Pentru a obține o valoare medie se vor considera patru valori ale luminanței pentru fiecare configurație și se va lucra cu valoarea medie.

Declanșarea camerei va fi comandată de programul software al plăci video (Matrox Intellicam) care în același timp, permite vizualizarea imaginii pe monitor. Dimensiunea aleasă pentru imagine este de 250x250 pixeli și se consideră că nu este necesară păstrarea fotografiei complete datorită uniformității ridicate pe care aceasta o prezintă. În caz contrar, spațiul ocupat pe hard-disk ar fi exagerat iar sistemul puțin operativ.

Formatul în care se memorează imaginile este formatul TIFF necompactat care evită pierderea de informație și care poate fi ulterior transformat în alte formate (BMP) în scopul unei analize mai facile.

Odată ce imaginea este realiată și memorată, se vor lua cele patru măsurători de luminanță pentru a asigura aceleași condiții.

Pentru a evita posibila influență a zgomotului, se vor realiza și fotografii cu obiectivul acoperit și se vor face analize asupra influenței acestora. În principiu, caracteristicile echipamentelor utilizate indică că influența zgomotului este total neglijabilă. S-a elaborat o fișă conținând rezultatele obținute pentru fiecare nivel de putere a lămpii și fiecare culoare a modelelor utilizate. În această fișă se vor înregistra valorile medii de

gri ale fotografiilor precum și abaterile tipice constatate.

4.5 Analiza rezultatelor

În acest punct, rezultatele obținute fiind tabelate și verificate, se va proceda la o analiză statistică pentru găsirea unei relații între parametrii care intervin la calibrarea sistemului. În primul rând fiecărui parametru trebuie să i se asocieze un domeniu posibil de valori.

Luminanța. Așa cum s-a menționat anterior, se vor considera numai valorile mai mari de 3 cd/m^2 deoarece numai peste această valoare se poate vorbi de vedere fotopică. Pe de altă parte, în măsurătorile realizate, luminanța maximă obținută a fost de aproximativ 1200 cd/m^2 . Prin urmare, acest interval va fi considerat ca domeniu de valori valide pentru aplicațiile experimentale; el este suficient de larg pentru aplicațiile ulterioare ale sistemului.

Nivelul de gri. Primele măsurători realizate au fost utilizate pentru a determina zgomotul sistemului și s-a specificat mai sus că ele au fost efectuate cu obiectivul acoperit în totalitate. În aceste condiții, valoarea nivelului de gri a fost de circa 15 (se amintește că domeniul posibil variază între 0 și 255). Pe de altă parte, se consideră că valoarea maximă este 255 și dacă un pixel atinge această valoare înseamnă că imaginea este saturată, adică pentru pixelii respectivi valoarea nivelului de gri ar putea fi chiar mai ridicată. Ca urmare, valoarea nu va fi validă; în concluzie, domeniul de valori pentru nivelul de gri acceptat în experimente va fi de la 15 la 254.

Timpul de expunere. Timpul de expunere este un parametru discret, fiind disponibile numai valorile predeterminate pe camera digitală; toate aceste valori sunt considerate valide.

Deschiderea diafragmei. Ca și în cazul anterior, toate valorile caracteristice camerei vor fi considerate valide.

Câștigul. Câștigul este un parametru incontrollabil. Există două opțiuni: impunerea unei valori fixe sau posibilitatea autoreglării libere a camerei. Pentru primele cercetări experimentale s-a optat pentru o valoare fixă (impusă).

Timpul de expunere și apertura diafragmei sunt utili în sensul că pot evita saturarea senzorului. Cu cât timpul de expunere este mai mic, cu atât se micșorează cantitatea

de lumină primită de senzor și invers. Cu apertura diafragmei se întâmplă același lucru: odată cu mărirea deschiderii crește cantitatea de lumină.

Pentru a verifica diferitele relații între parametri, rezultatele au fost prezentate grafic în scopul intuirii oricărui tip de relație între parametrii care intervin.

După cum s-a comentat anterior, apertura diafragmei și timpul de expunere iau valori discrete, așa că graficele obținute sunt de tipul L- Ng ($T=\text{const.}$ și $f=\text{const.}$), iar relațiile deduse depind de valoarea timpului de expunere și a aperturii diafragmei.

Expresia care se speră să fie obținută este de forma $L=a \cdot Ng+b$ - (4.2), adică ecuația unei drepte. Desigur se așteaptă să fie obținute atâtea relații câte combinații ale timpului de expunere și aperturii există. Ținând cont că T are 8 valori iar f are 7, se vor obține 56 de ecuații distincte. Toate aceste ecuații vor fi introduse într-un program de calcul care va selecționa ecuația corectă în funcție de valorile de intrare ale parametrilor.

4.6 Evaluarea erorilor sistemului

Odată realizată analiza statistică, se va proceda la evaluarea erorii sistemului în achiziția de date. Se consideră adecvat un nivel de eroare de circa 1 %.

5 Aplicarea directă a sistemului

Aplicațiile unui sistem de acest tip sunt în principal măsurătorile luminanțelor. Posibilitatea obținerii valorii luminanțelor unei scene simplifică enorm analiza vizuală a mediului respectiv.

Obiectivul acestui studiu constă în transformarea sistemului propus într-un dispozitiv capabil să determine fotometria unui corp de iluminat. Dacă se analizează comportarea unui fotogoniometru se observă că acesta este similar unui luminațmetru, putându-se determina caracteristicile unui singur punct pentru fiecare achiziție de date. Prin aplicarea unui sistem bazat pe camere digitale, activitatea poate fi simplificată foarte mult deoarece la fiecare măsurătoare se obține o cantitate de date mult superioară celei furnizate de sistemele actuale.

Pe de altă parte, putându-se efectua mult mai multe măsurători, vor fi reduse erorile

comise. Pentru ca echipamentele actuale să atingă precizia care se așteaptă de la noile sisteme, timpul de măsură va crește enorm astfel încât utilizarea lor va deveni imposibilă.

Alte aspecte care se vor îmbunătăți sunt legate de pregătirea sistemului. La fotogoniometrele actuale, timpii de pregătire sunt în general mai mari decât timpii de măsurare efectivă; în plus, corecta centrare a corpului de iluminat este foarte importantă, în caz contrar obținându-se rezultate eronate.

5.1 Descrierea sistemului

Sistemele actuale realizează o achiziție de date într-o formă directă, adică măsoară parametrii luminii emise de sursă. Sistemul propus va analiza rezultatul reflexiei pe o suprafață plană. Pentru a se putea măsura intensitatea luminoasă se impune ca această suprafață să fie perfect difuzantă. Această cerință se realizează prin vopsirea suprafeței cu o culoare albă (neutră spectral).

Se vor putea determina următoarele:

- distribuția luminanțelor (cd/m^2);
- distribuția iluminărilor (lux);
- corpul fotometric (cd);
- randamentul corpului de iluminat;
- fluxul luminos (lm).

Toate aceste mărimi vor fi determinate plecându-se de la măsurarea luminanței.

Cunoscându-se valoarea luminanței, dacă suprafața unde se măsoară este perfect difuzantă, este satisfăcută legea lui Lambert $L=I/S=\rho\Phi/\pi S=\rho E/\pi$ - (5.1), unde L este luminanța măsurată (cd/m^2); I – intensitatea luminoasă (cd); S – suprafața de măsură (m^2); Φ – fluxul luminos incident (lm); ρ – factorul de reflexie al suprafeței; E – iluminarea (lux).

Din ecuația (5.1) se poate obține iluminarea $E=\pi L/\rho$ - (5.2). În continuare, cunoscând iluminarea și poziția relativă a corpului de iluminat, în conformitate cu legea cosinusului unghiului de incidență, se obține intensitatea luminoasă într-o direcție dată $E=I \cdot \cos\varphi/d^2$ - (5.3).

Suprafața de măsură (S) este echivalentă proiecției unui pixel pe planul de măsură, aceasta depinzând de distanța la care se amplasează camera digitală și de rezoluția acesteia.

Numărul de măsurători va depinde de raportul dintre mărirea luminanței și distanța față de plan deoarece pentru a se putea

considera o sursă punctiformă, acest raport trebuie să fie mai mare decât 10.

Alt aspect care trebuie luat în considerare este tipul distribuției fluxului acest motiv, sistemul este prevăzut cu un mecanism care permite rotirea corpului de iluminat astfel încât să fie acoperite toate direcțiile de emisie.

Trebuie scoasă în evidență influența mediului în care va fi instalat sistemul: este necesar să se garanteze că nu vor exista influențe ale unor mărimi rezultate din reflexii. Incinta în care va fi integrat sistemul trebuie vopsită în negru mat și eventual, prevăzută cu cortine negre, astfel încât să fie evitate emisiile indirecte.

luminos emis de corp: dacă este direct, mixt etc., numărul de măsurători se schimbă. Din

5.2. Limitări

Prezentul proiect vrea să demonstreze posibilitatea utilizării camerelor CCD pentru ridicarea caracteristicilor fotometrice ale unui corp de iluminat.

Din considerente de lipsă de spațiu și de buget, studiul va fi limitat la surse de lumină de dimensiuni reduse astfel încât să poată fi realizat un prototip.

Notă: Traducerea a fost realizată de Prof.dr.ing. Mircea CHINDRIȘ