

11. ILUMINACIÓN

La iluminación juega un papel vital dentro de cualquier sistema de visión artificial ya que proporciona las condiciones ópticas bajo las cuales se lleva a cabo la adquisición de la imagen. No obstante, a pesar de su enorme trascendencia, la selección de un buen medio de iluminación suele ser una de las áreas más frecuentemente descuidadas.

A diferencia de otras aplicaciones de visión artificial, en inspección visual automática y también generalmente en células robotizadas el diseñador del sistema de visión puede controlar las condiciones de iluminación y no sólo eso, sino que debe hacerlo. Una iluminación estable y que realce las características de interés en la escena hace mucho más sencillo y fiable el posterior procesamiento de la imagen. La iluminación existente en el entorno de la aplicación no es aceptable nunca ya que proporciona imágenes con bajo contraste, con sombras y brillos molestos o presenta una intensidad variable.

La aplicación de una iluminación adecuada a la naturaleza del objeto a inspeccionar y a sus condiciones ambientales, será determinante en el éxito de una aplicación de inspección automática. Un enfoque para un sistema de inspección que no preste suficiente atención a la iluminación supondrá una mayor complicación en el análisis e interpretación de la imagen captada. La iluminación es, por tanto, un factor que afecta radicalmente a la complejidad de los algoritmos de visión y a la fiabilidad del sistema. Es indiscutible que el éxito de una aplicación industrial depende tanto del diseño de la iluminación como del procesamiento de imagen.

Inicialmente en este capítulo presentaremos de una manera elemental cómo interacciona la luz con la materia. El conocimiento de estas leyes básicas resulta fundamental para establecer la configuración geométrica de iluminación más adecuada para una aplicación. También se analizarán las características de las distintas fuentes de iluminación que nos permitirán establecer qué equipo de iluminación resulta más adecuado para una determinada aplicación.

11.1 LA LUZ

El comprender el comportamiento físico de la luz es importante ya que los datos de una imagen en sí no son más que la distribución espacial de la luz de una escena. El principio de cómo la información se transfiere de un objeto a un sensor se basa en cómo interactúan los fotones con el material del objeto observado. Si el objeto modifica la luz entrante de manera que los rayos salientes sean diferentes de los rayos incidentes, entonces se dice que el objeto origina contraste. Éste es el principio básico de todos los sistemas de visión ya sean biológicos o artificiales. Si el objeto no modifica el rayo de luz incidente de una manera apreciable, entonces dicho objeto no es visible.

La luz es la radiación electromagnética que estimula nuestra respuesta visual. Se expresa como una distribución de energía espectral $L(\lambda)$, donde λ es la longitud de onda perteneciente al espectro electromagnético visible (de 380 nm a 770 nm). La luz que se recibe desde un objeto opaco puede ser escrita como:

$$I(\lambda) = R(\lambda)L(\lambda)$$

donde $R(\lambda)$ representa el factor de reflexión del objeto y $L(\lambda)$ es la distribución de energía incidente. El color que percibimos de un objeto depende no solo de las propiedades intrínsecas del objeto sino también de la naturaleza de la luz que incide sobre él.

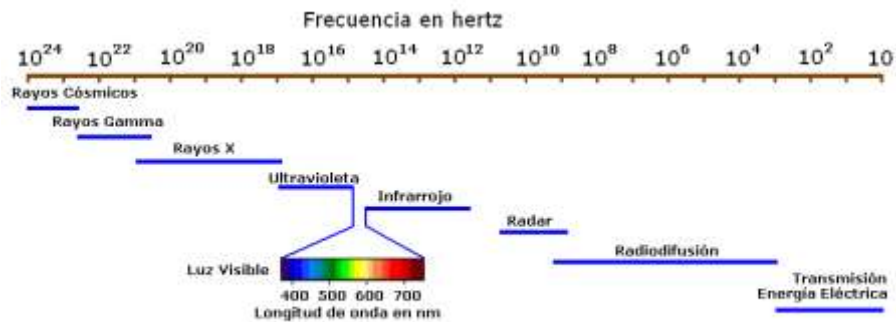


Figura 1 El espectro electromagnético comprende multitud de ondas. La luz visible, con longitudes de onda comprendidas entre 380 y 770 nm., constituye una mínima proporción de este espectro.

La luz visible no es más que un pequeño intervalo del espectro electromagnético que comprende tipos de ondas tan dispares como los rayos cósmicos, los rayos gamma, los ultravioletas, los infrarrojos y las ondas de radio

o televisión entre otros. Cada uno de estos tipos de onda comprende un intervalo definido por una magnitud característica que es la longitud de onda λ .

El diseñador de un sistema de visión dispone de gran cantidad de tecnologías en cuanto a **fuentes de iluminación** que puede emplear bajo distintas configuraciones. El objetivo va a ser siempre optar por aquella solución que aumente al máximo el contraste en la imagen obtenida, de forma que las características del objeto a inspeccionar sean más fácilmente identificables. Este contraste se detecta al ser reflejada la luz desde la superficie de los objetos y por tanto, a la hora de elegir de un sistema de iluminación, es fundamental saber que al iluminar hay una parte de la luz que es absorbida y otra parte que es reflejada o transmitida y esta la que constituye la entrada al sistema de visión.

Cuando la luz encuentra un obstáculo en su camino choca contra la superficie de este y una parte es reflejada. Si el cuerpo es opaco el resto de la luz será absorbida. Si es transparente una parte será absorbida como en el caso anterior y el resto atravesará el cuerpo transmitiéndose. Así, podemos considerar tres fenómenos:

- Reflexión
- Absorción.
- Transmisión

Para cada una se define un coeficiente que nos da el porcentaje correspondiente en tanto por uno. Son el factor de reflexión R , el de transmisión T y el de absorción A respectivamente.



Figura 2. Al incidir un rayo de luz sobre la superficie de un material este se divide en como mucho en tres componentes: una parte que se refleja, otra que es absorbida por el material y otra que le atraviesa y es transmitida de nuevo al medio.

11.1.1 Reflexión

La reflexión de la luz se produce cuando esta choca contra la superficie de separación de dos medios diferentes ya sean gases, líquidos o sólidos y está regida por la ley de la reflexión. La dirección en que sale reflejada la luz viene determinada por el tipo de superficie. Si es una superficie brillante o pulida se produce la reflexión regular en que toda la luz se refleja en una única dirección. Si la superficie es mate la luz se dispersa en todas direcciones y se conoce como reflexión difusa como ocurre por ejemplo en una hoja de papel no satinado. Y, por último, está el caso intermedio, la reflexión mixta, en que predomina una dirección sobre las demás. Este tipo de reflexión aparece en superficies metálicas sin pulir, barnices, papel satinado, etc.

El factor de reflexión de una superficie se da como el cociente de la luz reflejada entre la radiación del incidente:

$$\text{Factor de Reflexión} = \text{LuzReflejada} / \text{LuzIncidente}$$

El factor de reflexión es un número entre cero y uno, aunque se presenta a veces como un porcentaje.

11.1.2 Absorción

Cuando la luz choca con un objeto opaco, una parte de la luz que incide es absorbida por la superficie y otra reflejada. Las longitudes de onda que son reflejadas son las que determinan el color que percibimos. La absorción del material se expresa como el cociente de la luz absorbida con la radiación del incidente:

$$\text{Factor de Absorción} = \text{LuzAbsorbida} / \text{LuzIncidente}$$

El factor de absorción es también un número entre cero y uno, y se da a veces como porcentaje. Un material con alta absorción, tal como un pedazo de fieltro negro tendrá valores próximos a uno.

La absorción es un proceso muy ligado al color. Las longitudes de onda que son reflejadas son las que determinan el color que percibimos. En los extremos, si el cuerpo las refleja todas aparece como blanco y si las absorbe todas como negro. Un objeto es rojo porque refleja longitudes de onda en torno al rojo y absorbe todas las demás. Si se ilumina el mismo objeto con luz azul lo veremos negro porque el cuerpo absorbe esta componente y no refleja ninguna.

Color	Longitudes de onda (nm)
Violeta	380-435
Azul	435-495
Verde	495-565
Amarillo	565-590
Naranja	590-625
Rojo	625-780

Figura 3 El color con que percibimos un objeto depende del tipo de luz que le enviamos y de las longitudes de onda que este sea capaz de reflejar. La tabla muestra el color que percibimos en función de la longitud de onda en nanómetros reflejada.

11.1.3 Transmisión

La transmisión se puede considerar una doble refracción. Si pensamos en un cristal; la luz sufre una primera refracción al pasar del aire al vidrio, sigue su camino y vuelve a refractarse al pasar de nuevo al aire. Si después de este proceso el rayo de luz no es desviado de su trayectoria se dice que la transmisión es regular como pasa en los vidrios transparentes. Si se difunde en todas direcciones tenemos la transmisión difusa que es lo que pasa en los vidrios translúcidos.

Este fenómeno se presenta en materiales que son transparentes, translúcidos, u opacos con los agujeros físicos. En estos tipos de materiales, una cierta cantidad de radiación del incidente (I) que llega a una superficie será transmitida a través del material. El factor de transmisión del material se representa como el cociente de la luz transmitida con la radiación del incidente:

$$\text{Factor de Transmisión} = \text{LuzTransmitida} / \text{LuzIncidente}$$

Como antes, el factor de transmisión es un número entre cero y uno, y se da a veces como porcentaje. Un material con buena transmisión, tal como un pedazo de cristal óptico de calidad, puede alcanzar valores próximos a la unidad.

11.1.4 Relación entre la reflexión, la absorción y la transmisión.

Sobre un objeto real la luz interaccionará combinando los distintos mecanismos dependiendo del factor de reflexión, absorción, y transmisión que presente el objeto. De cualquier forma y en todo caso, hay una relación que va

a cumplirse siempre: la conservación de energía. La suma de todas las formas de radiación saliente debe ser igual a la cantidad de radiación entrante que afecta al material bajo inspección:

$$LuzIncidente = LuzReflejada + LuzAbsorbida + LuzTransmitida$$

Como normalmente iluminamos objetos opacos tendremos simplemente:

$$LuzIncidente = LuzReflejada + LuzAbsorbida$$

Cada material tiene un cierto factor característico de reflexividad, de absorción, y de transmisión que permite que se modifique la luz incidente y que pase la información a un detector. La diferencia en alguno de estos parámetros entre dos materiales va a posibilitar discriminarlos como distintos. Por el contrario, si los dos materiales presentan índices muy similares en los tres índices será imposible diferenciarlos visualmente.

La interacción de la luz con la materia que se ha expuesto, aunque ilustra el comportamiento básico de la luz y es suficiente para el diseño de sistemas de iluminación, se ha realizado de manera muy simplista. Hay factores que no se han considerado que hacen que los mecanismos de interacción de la luz sean más complicados: los parámetros de la reflexión, absorción, y transmisión varían en función de la longitud de onda de la luz incidente, y en función del ángulo de incidencia de la luz.

11.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES DE ILUMINACIÓN

En las aplicaciones de visión artificial, la selección de una fuente de iluminación depende de numerosos factores: geometría y características superficiales del objeto a inspeccionar, velocidad de la aplicación, hostilidad del entorno... que hacen que tengamos que optar por sistemas de iluminación con unas características determinadas de distribución espectral, de patrón de radiación (puntual, lineal o hemisférico) y de distribución de la luz (focalizada, difusa o colimada) además de considerar otros factores como robustez, estabilidad y coste. A continuación veremos a qué se refieren estas características para poder establecer el perfil del sistema más idóneo entre la multitud de fuentes y dispositivos de iluminación.

11.2.1 Nivel de luz

En principio todo sistema de visión artificial industrial debe estar apantallado bajo un carenado que evite en lo posible cualquier entrada de luz ambiente. La luz ambiente de las plantas industriales es muy variable y va a suponer una perturbación que con toda seguridad hará fracasar al sistema. No obstante, algunas veces hay problemas para apantallar completamente la aplicación. En estos casos será especialmente importante disponer de una fuente de luz con buena intensidad para que las variaciones ambientales queden enmascaradas por la mayor potencia de la iluminación y no tengan efecto sobre la imagen.

Otra situación donde también es preciso tener muy en cuenta el nivel de luz es cuando se trabaja en líneas donde los productos se desplazan a alta velocidad. En estas aplicaciones es necesario emplear velocidades de obturación elevadas en la cámara para no obtener imágenes movidas. Cuando se emplean velocidades altas de obturación se requiere luz más intensa pues la escena observada es expuesta al sensor durante un periodo de tiempo más corto. En aplicaciones de alta velocidad hay que tener muy en cuenta este parámetro a la hora de seleccionar la fuente de iluminación y optar por aquella que proporcione una luz suficientemente potente como son los flashes.

11.2.2 Distribución Espectral.

La distribución espectral hace referencia al conjunto de longitudes de onda que emite la fuente de luz. Un cambio en la distribución espectral de la fuente de iluminación origina cambios sustanciales en la imagen capturada por la cámara. Si se trata de una aplicación en color la luz debe ser blanca, no puede ser monocromática pues distorsionaría los colores de la escena. Ya hemos visto que el color percibido por un captador depende de la frecuencia de la luz con que iluminamos.

La distribución de la fuente de luz debe estar contenida dentro de la respuesta espectral de la cámara porque de otra forma la luz proyectada no excitaría el sensor de imagen. En el mercado existen fluorescentes, lámparas halógenas, láseres, LEDs o fibra óptica (utilizando filtros de color) con distintas respuestas espectrales.

Por otra parte, aunque la mayor parte de las aplicaciones de visión artificial utilizan el intervalo del espectro visible, hay otras zonas del espectro no visibles al ojo humano, como el infrarrojo al que sí son sensibles las cámaras, que están siendo utilizados en nuevos campos de aplicación. Por ejemplo, la utilización

de LEDs NIR (infrarrojo cercano) y filtros que bloqueen la radiación visible en la óptica de la cámara proporciona muy buenos resultados en aplicaciones monocromáticas donde sea difícil de aislar completamente al sistema de la luz ambiente. De esta forma las variaciones en lumínicas del entorno no van a afectar tanto a la aplicación, ya que la luz presente en las plantas industriales no contiene una componente infrarroja significativa.

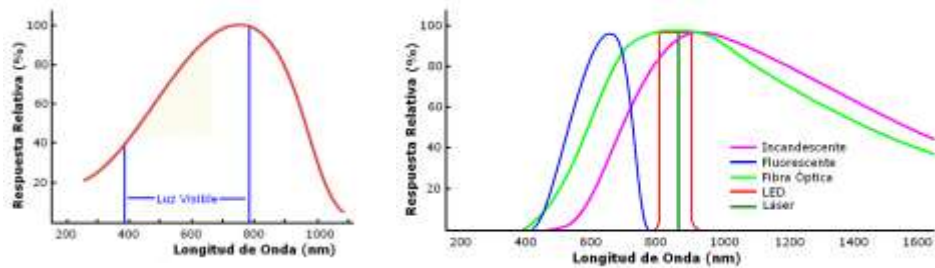


Figura 4 Sensibilidad espectral de un sensor CCD típico y distribución espectral de varias fuentes de luz

11.2.3 Patrón de radiación.

Las fuentes de luz pueden también clasificarse de acuerdo con su patrón de radiación que puede ser puntual, lineal, anular, superficie o hemisférico. Los patrones rectilíneos son especialmente utilizados en inspección de productos continuos como chapa en trenes de laminación, rollos de papel y de tela, etc. ya que las elevadas velocidades de producción de estos productos requieren el empleo de cámaras lineales.



Figura 5 Patrón anular en una aplicación de inspección de válvulas para farmacia. Imagen obtenida con esa iluminación donde se puede apreciar claramente un fallo en la circularidad.

Los patrones anulares y hemisféricos son muy útiles cuando se trabaja con superficies brillantes. Los anulares permiten proyectar sobre superficies planas una luz intensa y homogénea si se observa desde el eje del anillo. Si se trata de una superficie brillante que no es plana o de superficies muy reflexivas para obtener una imagen sin sombras es preciso recurrir a un patrón hemisférico. El resultado es similar a si el objeto fuera observado bajo un cielo completamente cubierto en el que la posición del sol es imposible de adivinar. Con este tipo de iluminación la luz llega desde todas las direcciones reduciendo al mínimo la aparición de sombras y brillos sobre los objetos.

11.2.4 Estabilidad.

El primer aspecto que hay que considerar en lo que respecta a la estabilidad en la iluminación es que la escena no se debe ver afectada por variaciones de la luz ambiente. Siempre se debe apantallar el entorno en el que se va a trabajar el sistema de visión, instalando un carenado que evite las perturbaciones de la luz exterior. Existen aplicaciones de guiado de robots con visión, donde a veces es difícil aislar totalmente al sistema de la iluminación ambiente. En estos casos habrá que emplear una fuente de luz potente con objeto de que las perturbaciones procedentes de las variaciones ambientales queden enmascaradas o bien iluminar fuera del espectro visible por ejemplo en el infrarrojo cercano.

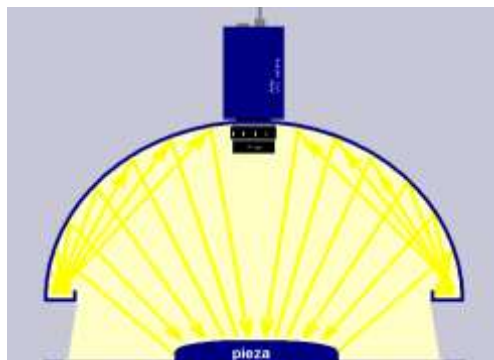


Figura 6 Patrón de luz hemisférico

Hay que tener especial cuidado cuando se emplean velocidades de obturación en las cámaras por debajo de los 20 milisegundos pues aparece una fluctuación en la intensidad de la imagen si la fuente de luz es alimentada

directamente con la intensidad de la red eléctrica. Tal es el caso de las lámparas incandescentes de tungsteno tradicionales y los fluorescentes estándar. Esto origina que la intensidad media de la imagen fluctúe, haciendo prácticamente imposible un procesamiento fiable de la imagen. En estos casos es preciso alimentar las lámparas incandescentes con corriente continua y si se utilizan fluorescentes incorporar un balasto de alta frecuencia,

Por otro lado hay que considerar que las fuentes de iluminación se van degradando con el tiempo disminuyendo su eficiencia lumínica. Esta pérdida de luz alcanza el 30% en fuentes incandescentes tras unos pocos miles de horas de funcionamiento. Incluso los LED que es la fuente con menor degradación en el tiempo, pueden fluctuar en su intensidad de luz debido a las variaciones en voltaje, corriente y temperatura. Por tanto, es fundamental al desarrollar los algoritmos de tratamiento de imagen no hacer nunca la suposición de que la luz va a ser perfectamente constante. En caso de que se requiriera una iluminación especialmente estable existen sistemas que implantan una realimentación de la luz proporcionada para mantener la intensidad lumínica de salida inamovible.

11.2.5 Robustez.

Un sistema de iluminación tiene que tener una esperanza de vida aceptable en un entorno industrial. Debe ser capaz de resistir las vibraciones y golpes siempre presentes en estos entornos. Por ejemplo las tradicionales lámparas incandescentes se muestran como la opción menos robusta por su corta esperanza de vida así como por su fragilidad de los filamentos ante vibraciones o choque. Por este motivo las lámparas incandescentes han sido desplazadas por otras fuentes de luz mucho más robustas y en la actualidad sólo son utilizadas donde se requiere una gran potencia lumínica sobre grandes áreas.

En esta línea es una buena práctica en aquellos sistemas que empleen fuentes con una esperanza de vida más corta y que se degradan con el tiempo, como las lámparas incandescentes y los fluorescentes, implantar un programa de sustitución regular y seguir la política, dado que su coste no es excesivo, de reemplazarlas cuando se encuentran a media vida.

11.2.6 Coste

Para finalizar con las características de las fuentes de iluminación es preciso considerar su coste. Este va a depender de la naturaleza de la fuente de luz y de la aplicación y podemos situar su coste entre los 500 € y 1800 €. Los proyectores de patrones de luz para medición tridimensional son bastante más

caros (hasta 5000 €). En esta línea también es preciso tener en cuenta los costes de mantenimiento relacionados con la vida de la fuente de luz a la hora de elegir entre las distintas fuentes de iluminación.

Aunque el precio es inevitablemente un factor a considerar, este no debe ser determinante en ningún caso. Un buen sistema de iluminación hace más fiable y preciso el sistema de visión y ahorra muchísimo tiempo en el diseño de los algoritmos de procesamiento puesto que proporciona imágenes más estables y con mayor contraste. Los dispositivos de iluminación que garantizan una larga vida y robustez en entornos industriales van a ser lógicamente más caros que sus competidores. No obstante, hay que considerar que una iluminación fiable evitará, entre otras cosas, tener que detener en un momento no programado una máquina en producción para sustituir una lámpara. Ya sólo eso compense con mucho ese ahorro inicial.

11.3 FUENTES DE ILUMINACIÓN

Existe una amplia gama de fuentes de luz para visión artificial cada una con sus características propias de respuesta espectral, distribución de luz, etc. Entre las fuentes más representativas dentro de este campo podemos considerar las siguientes:

- Lámparas incandescentes
- Tubos fluorescentes
- Fibra óptica
- LEDs
- Láser

11.3.1 Lámparas incandescentes.

Las lámparas incandescentes constituyen la fuente de iluminación más tradicional. Generalmente se trata de lámparas con filamentos de tungsteno o halógeno-tungsteno. Debido a que este filamento es relativamente pequeño, las lámparas halógenas se emplean cuando se precisa de una luz que sea potente y focalizada. La principal ventaja es la amplia variedad de potencias existentes siendo asimismo una forma sencilla y barata de suministrar luz continua. Las lámparas incandescentes, sin embargo, presentan varios inconvenientes: su corta esperanza de vida (unas 4000 horas), su pérdida de luz a lo largo de su vida (que alcanza el 20% tras 1500 horas de funcionamiento) y su gran emisión de calor. Estos inconvenientes están haciendo que sean desplazadas por otro tipo de fuentes mas robustas y de menor consumo.

11.3.2 Tubos Fluorescentes.

Los fluorescentes suministran una luz difusa a un coste bajo y con una esperanza de vida aceptable (unas 15.000 horas). Existe una cierta variedad de formas en fluorescentes. Los fluorescentes circulares proporcionan un buen campo de iluminación para campos de visión pequeños y medios. Cuando se emplea esta forma circular, la iluminación más homogénea se logra como ya se ha indicado posicionando la cámara en el centro del anillo luminoso.

En aplicaciones de inspección automática es fundamental que los fluorescentes funcionen a alta frecuencia (al menos a 25kHz). No pueden utilizarse fluorescentes estándar debido a que las cámaras son sensibles a su efecto de parpadeo, obteniéndose imágenes con intensidad variable.

Los tubos fluorescentes estándar no presentan un balance de color uniforme. En el mercado pueden encontrarse fluorescentes específicos para aplicaciones de visión artificial que proporcionan un espectro concreto con una mayor intensidad de luz y estabilidad. Así es posible utilizar fluorescentes casi monocromáticos: ultravioletas, amarillos, rojos, verdes, azules...

Para aplicaciones donde se requiere una buena intensidad de iluminación y una gran longitud como en la inspección continua de papel, se utilizan fluorescentes de apertura, en estos fluorescentes la luz se emite solo en una dirección y con un ángulo muy estrecho, esto permite que la intensidad lumínica pueda ser hasta 10 veces superior a la de un fluorescente estándar.



Figura 7 Fluorescente circular embarcado en un robot para la inspección de chapa embutida

11.3.3 Fibra Óptica.

La iluminación por fibra óptica, se basa en conducir la luz procedente de una lámpara con un reflector de tipo cuarzo-halógeno, o de xenón, a través de un haz de fibras ópticas que finalizan en un terminador con una forma específica para cada tipo de aplicación. Existen terminadores con distintos tamaños y formas: puntual, lineal, circular o de panel. Las soluciones de fibra óptica se utilizan a menudo para conseguir geometrías únicas y formas de luces, que no son alcanzables con ninguna otra fuente. Además, sólo se utiliza la fibra óptica en estos casos ya que es generalmente la opción más cara.

La fibra proporciona una muy buena intensidad lumínica y una potencia de iluminación controlable actuando sobre la lámpara halógena. Algunas fuentes incorporan un control de intensidad vía puerto serie RS-232 de forma que se puede gestionar desde un elemento externo como un PC.

En los haces de fibra óptica hay cierta pérdida de intensidad con la distancia. Normalmente no se aconseja utilizar haces de fibra óptica de una longitud superior a 5 metros, ya que por una parte se pierde intensidad y por otra el precio se incrementa excesivamente.

La fibra resulta especialmente indicada para iluminar pequeñas áreas de difícil acceso o cavidades. Una de las ventajas de la fibra óptica es que proporciona luz fría, y por tanto es ideal en entornos deflagrantes o en cualquier aplicación donde no sea admisible la emisión de calor. Tiene el inconveniente de que la fragilidad de los haces de fibra los no los hace aconsejables en entornos industriales hostiles.

11.3.4 LEDs

En aplicaciones donde no se requiere una gran intensidad luminosa los LED (Light Emiting Diodes) proporcionan una iluminación adecuada con un coste asequible garantizando además una larga vida, de aproximadamente 100.000 horas. Estas características y su reducido tamaño que permite integrarles en los equipos para obtener todo tipo de configuraciones en forma de anillos luminosos, fuentes lineales, matriciales,... les hacen especialmente adecuados como sistemas de iluminación para visión artificial.

Los dispositivos de iluminación LED para visión artificial normalmente emiten luz de color rojo por ser estos LED los más baratos pero se pueden encontrar en otros colores como naranja, verde, azul o blanco y hasta el infrarrojo.

La principal desventaja de los LED es que proporcionan una iluminación que no es tan intensa como otras fuentes iluminación y normalmente no pueden competir en la iluminación de grandes áreas o a largas distancias. No obstante, la intensidad está mejorando rápidamente y en la actualidad ya existen en el mercado LED de alta intensidad que, conectados a un sistema estroboscópico, compiten con fuentes de iluminación tan potentes como las lámparas halógenas. Los sistemas estroboscópicos alimentan los LED con hasta 20 veces su intensidad nominal durante periodos muy cortos de tiempo sin comprometer su integridad originando un potente flash luminoso en el instante de adquisición. Por otra parte, la reciente tecnología de chip-on-board permite concentrar un gran número de LED en una superficie muy reducida y por tanto aumentar aún más el poder lumínico.

Aparte de su escasa intensidad, los LED presentan unas características como fuente de iluminación enormemente atractivas que han supuesto que en diez años se hayan consolidado como la fuente de iluminación con mayor presencia en los sistemas de visión artificial.



Figura 8 Fuente de iluminación LED

Ventajas de los LED frente a otras fuentes de luz.

- **Mayor duración y fiabilidad:** La esperanza de vida para un LED es muy larga en comparación con los demás sistemas de iluminación: Los LED, al carecer de filamento luminiscente, son prácticamente inmunes a las vibraciones que aparecen frecuentemente en los entornos industriales. Además, la pérdida lumínica que sufren con el paso del tiempo es mucho menor que en caso de sus competidores.
- **Pequeño tamaño y flexibilidad en el diseño.** El pequeño tamaño de los LED los hace idóneos para la construcción de dispositivos de iluminación de formas variadas integrando conjunto de diodos. Se pueden encontrar sistemas de iluminación basados en LED con disposiciones lineales, matriciales, circulares, cilíndricas, hemisféricas, etc.,
- **Respuesta espectral precisa:** Los LED emiten dentro de estrechas franjas del espectro (ver figura 4b).
- **Amplia variedad disponible:** Aunque un determinado tipo de LED emite dentro de una franja reducida del espectro, existe en el mercado una enorme variedad de colores que cubren todo el espectro visible e incluso infrarrojo y ultravioleta. Aparte de la respuesta espectral, los LED pueden ser encapsulados bajo distintas ópticas que hacen estos que proyecten la luz de una manera más o menos focalizada. Los diodos con un patrón de dispersión más estrecho o cerrado focalizan más y se pueden obtener intensidades más altas a una determinada distancia que si se emplea un patrón ancho o abierto. En contrapartida estos iluminan un campo de visión mayor. Como regla general se debe emplear el patrón cerrado cuando se requiera más intensidad porque el objeto a iluminar se encuentra más alejado y el abierto para tener una iluminación más difusa sobre objetos que se encuentran más próximos o que son muy reflectantes.
- **Gran rapidez de respuesta:** El LED tiene una respuesta de funcionamiento mucho más rápida que incluso el halógeno, del orden de algunos microsegundos, ello lo hace ideal para funcionar como flash (sistemas estroboscópicos).
- **Baja temperatura:** Los LED emiten muy poco calor puesto que la energía se transforma fundamentalmente en luz. Los demás sistemas de iluminación en igualdad de condiciones de luminosidad emiten mucho más calor, especialmente las lámparas incandescentes.

- **Bajo consumo:** Los LEDs son muchísimo más eficientes lumínicamente que cualquier otra fuente de iluminación. Por ejemplo, para proporcionar la misma iluminación consumen la cuarta parte de potencia eléctrica que una lámpara incandescente.
- **Baja tensión:** todos los dispositivos de iluminación con LED se alimenta a tensiones de 24 VDC como mucho.

11.3.5 Flash de Xenon

Los flashes son lámparas de descarga de alta intensidad. Estas lámparas contienen un gas como el xenón o el criptón que al ser recorrido por una corriente eléctrica produce una fuerte radiación. En los flashes de xenón esta radiación va desde los 50 nm. hasta los 4000 nm. con especial eficiencia en la zona del ultravioleta. Los sistemas estroboscópicos de xenón se emplean desde hace años en visión artificial cuando se requiere de una alta intensidad lumínica durante cortos intervalos de tiempo. Su ancho espectro de emisión les hace muy adecuados para trabajar con color.

La intensidad de esta radiación es muchísimo más alta que la que se puede lograr con cualquier otro sistema y los hace especialmente interesantes para aumentar la profundidad de campo o disminuir los tiempos de integración en el sensor de imagen en aplicaciones de alta velocidad evitando las imágenes movidas.

11.3.6 Láser

La iluminación mediante láser se utiliza normalmente para obtener información tridimensional a partir de una vista de un objeto o simplemente resaltar su tercera dimensión. El método utilizado es colocar la fuente de luz láser formando un ángulo conocido con el objeto a inspeccionar y la cámara. El láser utilizado normalmente proyecta un haz plano de forma que si incide en un superficie totalmente plana la cámara apreciará una recta correspondiente a la intersección del plano del láser con la superficie. Mientras que si existe cualquier diferencia en la superficie del objeto la cámara apreciará una distorsión en la línea proyectada. Esta distorsión será proporcional a la profundidad o altura del objeto.

Barriendo completamente la superficie del objeto con el láser se puede llegar a hacer su reconstrucción en tres dimensiones y determinar por ejemplo la falta o exceso de material.

Interesa que la luz ambiente sea mínima (al menos en la frecuencia de emisión del láser) para que la proyección de la franja aparezca claramente diferenciada del resto de la imagen y así ser fácilmente procesada.

La proyección del haz láser en la imagen es desviada en proporción a la altura del objeto. Midiendo la posición del haz láser captado por la cámara se puede calcular el perfil del objeto correspondiente a esa proyección.

La mayoría de láseres que se utilizan en visión industrial usan lentes cilíndricas para convertir el punto láser en un haz plano. No obstante, existen un gran número de patrones disponibles, entre los que se incluyen: una línea, múltiples líneas paralelas, patrones de puntos, círculos concéntricos, mallas, y cruces, que se utilizan dependiendo de la aplicación.

Aunque el láser más comúnmente empleado es el de baja potencia (1-5 mW) de Helio-Neón en el mercado se pueden encontrar láseres de distinta potencia y longitudes de onda. Así mismo se han realizado diseños específicos para aplicaciones concretas tales como: sistemas de líneas ultra finas, o sistemas láser conectados a fibra óptica para aplicaciones en ambientes con peligro de deflagración.

Fuente de Iluminación	Ventajas	Inconvenientes
Incandescentes	Baratas Buena intensidad	Corta esperanza de vida Calor Frágiles Pérdida de luz progresiva
Fluorescentes	Baratos Buena luz difusa Esperanza de vida aceptable Iluminan áreas amplias Variedad respuestas espectrales Bajo consumo	Precisan balastos de alta frecuencia. No valen para flash Voluminosos Frágiles Pérdida de luz progresiva
Fibra Óptica	Pequeño tamaño Buena intensidad Gran variedad de patrones No genera calor ni posibilidad de chispas	Frágil Haces de 5 metros máximo
LED	Robustez Compacidad Rápida respuesta (flash) Gran variedad de patrones y respuesta espectral No genera calor	Baja intensidad (mejora como flash) Caros Respuesta espectral muy estrecha
Flash Xenon	Altísima intensidad Buena esperanza de vida Respuesta espectral amplia	Caros Voluminosos Alto voltaje: no entornos deflagrantes
Láser	Luz coherente ideal para 3D	Caros Campo de iluminación muy reducido: puntos o líneas

Figura 9 Fuentes de luz Ventajas e inconvenientes.

11.4 CONFIGURACIONES PARA LA ILUMINACIÓN

Se ha indicado que cuando se desea captar con una cámara un objeto o una determinada característica, la luz proporcionada por la fuente de iluminación y que es reflejada por el objeto debe entrar por el objetivo de la cámara. Por tanto, la apariencia del objeto en la imagen no dependerá sólo de la fuente de luz empleada sino también va a depender radicalmente de la posición de la fuente con respecto al objeto y a la cámara.

Existe un conjunto de técnicas de iluminación basadas en la utilización de distintas configuraciones geométricas de la fuente de luz con respecto al objeto y a la cámara que son empleadas frecuentemente en los sistemas de visión artificial

11.4.1 Retroiluminación

Si para el reconocimiento o medida de un producto sólo se precisa su silueta, se puede obtener de forma muy sencilla y estable muy buenas imágenes iluminando con una fuente difusa a contraluz. Esta configuración, conocida como retroiluminación difusa produce imágenes de gran contraste entre el objeto y el fondo que son fácilmente procesables. Esta iluminación también resulta muy adecuada cuando se pretende medir el grado de porosidad de ciertas sustancias, como tejidos, láminas de corcho, o también cuando se desea determinar el nivel de líquido o presencia de algún componente interno en envases transparentes.

Debe tenerse cuidado, especialmente en las aplicaciones de metrología de no sobresaturar el sensor de la cámara con la fuente de iluminación pues en este caso el objeto parecerá mas pequeño de lo que realmente es. Habrá que reducir la apertura o la velocidad del obturador hasta que desaparezca la sobresaturación. Si se trata de una aplicación de metrología fina para la retroiluminación será preciso recurrir a una fuente de iluminación colimada que garantice la emisión de rayos de luz paralelos al eje óptico y que por tanto no va a falsear el perfil de la pieza observada.

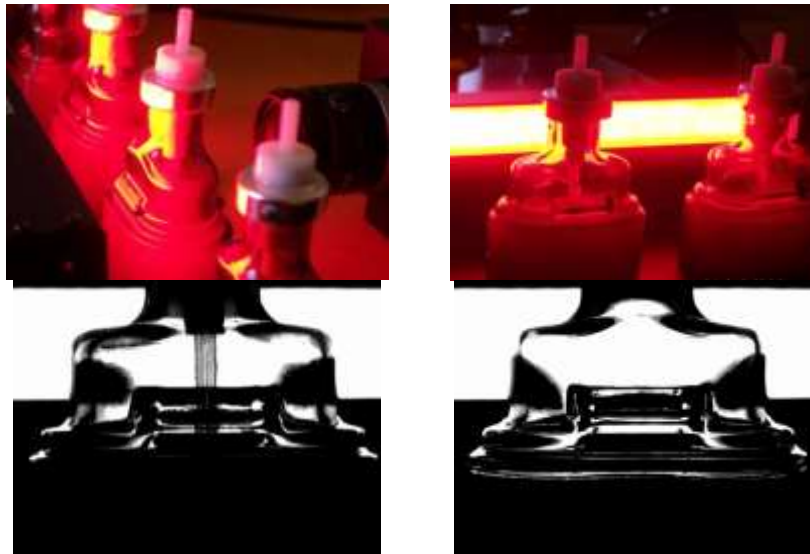


Figura 10: Sistema de inspección con retroiluminación para la detección de falta de pescante en válvulas de inhaladores.

11.4.2 Iluminación frontal

Cuando se requieren más detalles del producto que la simple silueta lo más sencillo es proyectar una o más luces sobre el objeto desde el mismo lado que la cámara. Esta técnica se conoce como iluminación frontal y en su configuración más típica las luces forman 45 grados con el eje óptico de la cámara que se encuentra sobre el objeto.

Si las superficies son brillantes esta configuración no es la más conveniente pues hace aparecer brillos y zonas oscuras que dificultan el procesamiento de imagen.

En este caso para la iluminación frontal es preciso emplear fuentes de iluminación difusa con patrones anulares o hemisféricos para que los haces luminosos incidan sobre el objeto desde todas las direcciones. Los anillos son a menudo la mejor opción cuando se trabaja con objetos circulares aunque también resultan muy útiles para observar objetos pequeños o pequeñas áreas de grandes objetos.

Cuando se opta por la iluminación frontal es conveniente experimentar con el número de lámparas, su distancia al objeto y el ángulo respecto a la cámara.

Muchas veces también resulta útil comparar la iluminación directa con la difusa quitando los difusores y viendo el efecto en la imagen en vivo.

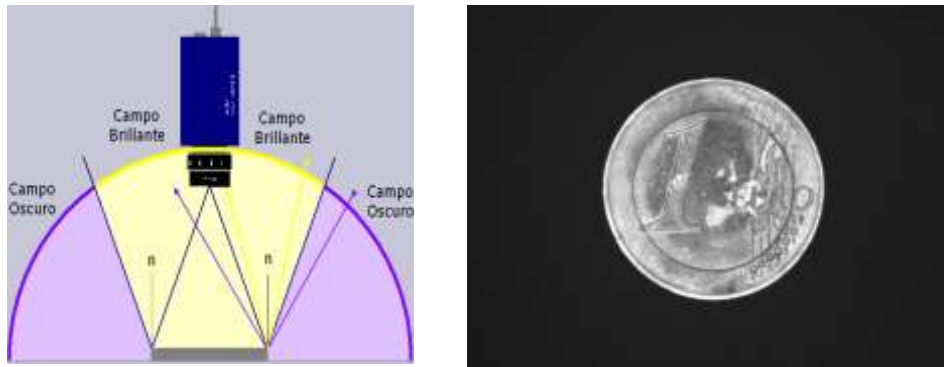


Figura 11: **Campo brillante y campo oscuro.** Imagen de una moneda con iluminación de campo brillante (iluminación frontal) Obsérvese que la moneda en general aparece con bastante claridad salvo en aquellos puntos donde hay un cambio en el relieve.

11.4.3 Iluminación oblicua

Este tipo de iluminación es utilizada para generar sombras sobre relieves cuyo contraste es pequeño respecto del fondo. En objetos planos y brillantes, como los metales pulidos, cualquier cambio en la superficie es detectado claramente con una iluminación oblicua controlada porque hace aparecer sobre el defecto brillos sobre un entorno totalmente oscuro (campo oscuro)

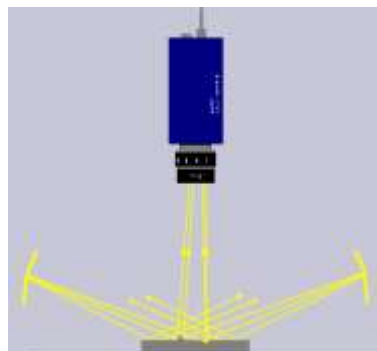


Figura: **Iluminación en campo oscuro:** Cualquier variación sobre la superficie producirá un aumento en la cantidad de luz que recibe el sensor, originando que en la imagen esta zona aparezca más brillante que la superficie que aparecerá oscura por no reflejar la luz hacia el sensor.

El ángulo de iluminación respecto de la superficie hay que mantenerle bajo justo hasta que desaparece todo brillo sobre la superficie. Cualquier imperfección sobre la superficie como polvo, rallas, abolladuras, aparecerá como brillante sobre el fondo negro.

Esta técnica funciona muy bien para detectar imperfecciones superficiales sobre objetos planos y brillantes pero para que opere de una forma fiable los objetos deben aparecer siempre con el mismo ángulo respecto a la fuente de luz.

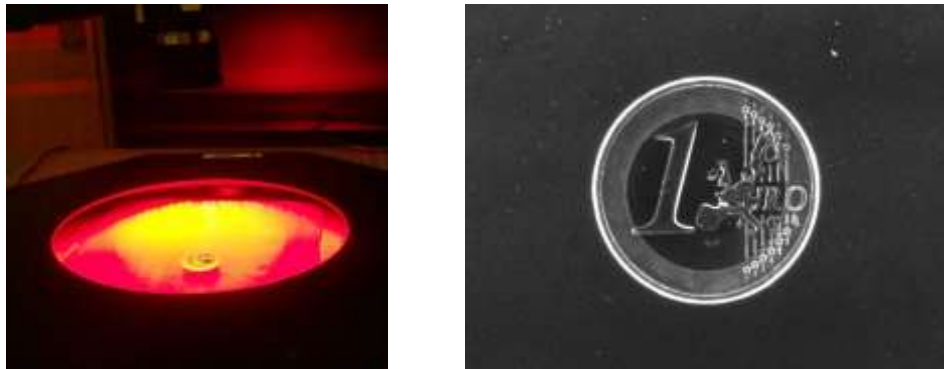


Figura 12: a) Iluminación rasante empleada para trabajar en campo oscuro. b) Imagen obtenida: En este caso la superficie de la moneda aparece oscura en general siendo las variaciones sobre esta las que producen un aumento en la cantidad de luz que recibe el sensor.

11.4.4 Iluminación coaxial

La iluminación coaxial es la iluminación frontal llevada a su extremo. Consiste en iluminar los objetos con una luz difusa que parece salir del mismo objetivo de la cámara. Para lograr esta configuración la luz se emite realmente formando 90° con el eje de la cámara sobre un espejo semi-transparente que divide el haz de luz en dos partes. Una parte del haz atraviesa el espejo y se pierde y otra parte toma la misma dirección que el eje de la cámara, como se muestra en la figura.

La iluminación coaxial es ideal para inspeccionar superficies planas que contienen zonas muy brillantes unidas a otras de mayor absorción de luz. Un ejemplo excelente de la alta capacidad de contraste que puede proporcionar la iluminación coaxial son las placas de circuito impreso donde las brillantes pistas de conductor son claramente realzadas del mate sustrato de fibra de la placa.

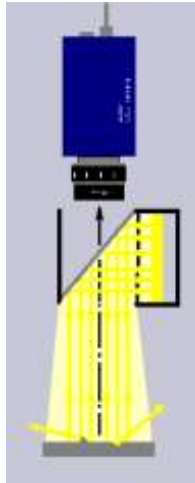


Figura 13: La **iluminación coaxial** constituye el ejemplo más típico de iluminación en campo brillante. Cualquier irregularidad en la superficie producirá la desviación de la luz fuera del objetivo de la cámara apareciendo como oscura en el brillante entorno.

Esta configuración es la única que permite la inspección de superficies especulares, pues cualquier otro método de iluminación haría que la cámara viera reflejado sobre la superficie su propio objetivo, y cavidades o taladros profundos. Al provenir la luz desde el mismo eje de la cámara no se percibe ninguna sombra por la cámara. Cualquier otra forma de luz generaría sombras en el fondo de los taladros si estos son profundos.

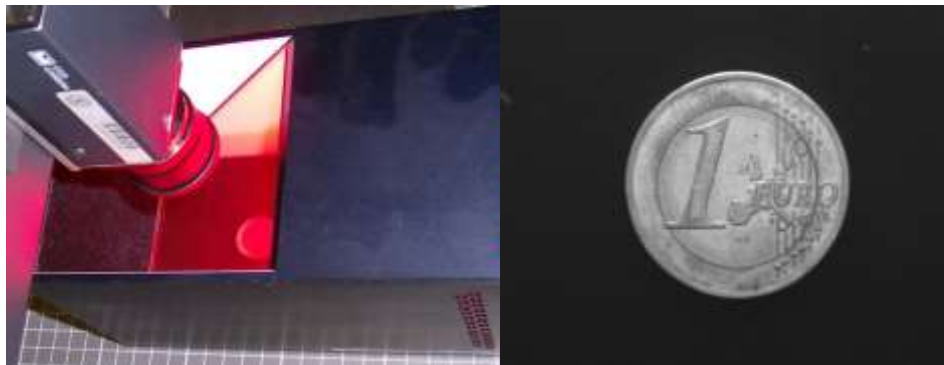


Figura 14: a) Sistema de iluminación coaxial. Se puede apreciar el espejo transparente que orienta la luz según el eje de la cámara a la vez que permite a la cámara captar la escena. b) Imagen obtenida: En este caso la superficie de la moneda aparece clara en general siendo las variaciones sobre esta las que producen una disminución en la cantidad de luz que recibe el sensor (campo brillante).

11.4.5 Iluminación día nublado (*Cloudy Day*)

Cuando la pieza a iluminar es muy brillante precisaremos de una iluminación que no sea direccional, de una iluminación que venga de todas las direcciones, como la que se da en los días día nublados. Este tipo de iluminación se consigue empleando patrones hemisféricos como el presentado en la figura 6. La imagen obtenida no presentará grandes contrastes porque precisamente el objetivo de este tipo de iluminación es no generar brillos ni sombras. Es conveniente solo sobre superficies muy brillantes: papeles satinados y plásticos, superficies metálicas pulidas, etc.

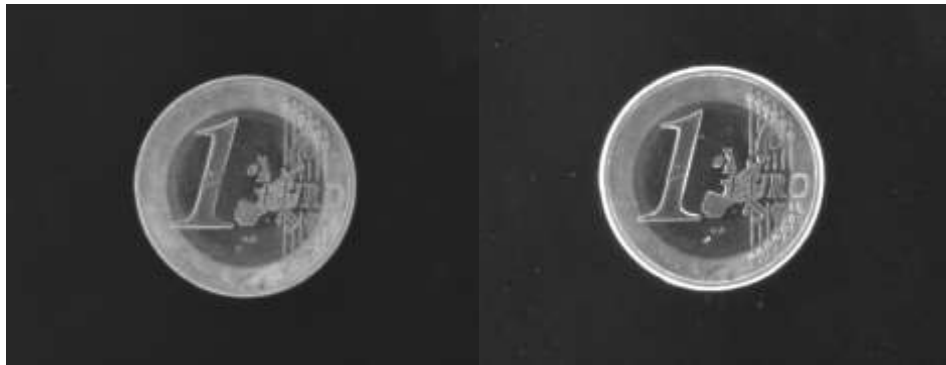


Figura 14: a) Imagen obtenida al iluminar la moneda con un patrón hemisférico. Obsérvese que no fuertes contrastes en la imagen. b) Imagen obtenida iluminando con patrón hemisférico e iluminación rasante simultáneamente que resalta más los defectos superficiales.

11.4.5 Filtros Cromáticos y Polarizadores

Aparte de las distintas configuraciones geométricas de iluminación que se han expuesto es interesante tener en consideración otras técnicas como el empleo de filtros cromáticos y polarizadores. Los filtros de color resultan muy útiles para mejorar el contraste entre características coloreadas mientras que los polarizadores proporcionan una buena forma de eliminar determinados brillos. En el capítulo de componentes del sistema de visión, en el apartado de óptica se abordan con más detalle estas técnicas.

11.5. CONCLUSIONES

La iluminación es el pilar de cualquier aplicación de visión artificial. Sin una buena iluminación nunca se obtendrá una buena imagen y por tanto el sistema de visión estará abocado al fracaso. El diseño de cualquier sistema debe comenzar siempre por la iluminación y no se puede llevar a cabo ninguna otra tarea mientras la iluminación no esté perfectamente definida.

El objetivo será optar por el sistema de iluminación que proporcione el contraste más alto, es decir, aquel que realce al máximo las diferencias entre lo que quiere detectar y lo que no. Para ello se deberá elegir fundamentalmente, la fuente con las características de iluminación más adecuada y la disposición geométrica de la luz. Habrá que considerar también otros factores como la estabilidad, robustez y esperanza de vida.

Aunque en este capítulo se han presentado una serie de ideas que ayudarán a elegir la fuente de iluminación y la configuración geométrica más adecuada, al final, inevitablemente, para lograr la imagen más idónea habrá que experimentar, modificando los ángulos, distancias, añadiendo o quitando difusores, variando el número de fuentes de luz, etc.

Es muy útil a la hora de hacer el montaje del sistema en planta que los soportes de la iluminación permitan ciertos ajustes para lograr imágenes con el mismo contraste que las obtenidas sobre el prototipo y sobre las que se ha desarrollado el sistema. Una vez llevada a cabo esta puesta a punto se anclará rígidamente el sistema de iluminación para evitar cualquier movimiento de este.