

Evaluación experimental de esquemas de iluminación aplicados a un proceso de clasificación de piezas basado en visión de máquina

Ing. José Ignacio Ortega¹
Universidad del Cauca
Colombia
jiortega@unicauca.edu.co

Ing. Jesús David Erazo²
Universidad del Cauca
Colombia
jesusde@unicauca.edu.co

Msc. Francisco Franco Obando³
Universidad del Cauca
Colombia
fobando@unicauca.edu.co

Fecha Recepción: 10/06/18 - Fecha Aprobación: 14/06/18

Resumen: La iluminación es un aspecto fundamental que se debe tener en cuenta en los sistemas de clasificación por visión de máquina; de la escogencia correcta de ésta depende la eficiencia y desempeño del sistema. Dependiendo de la aplicación, se requiere una técnica de iluminación adecuada que permita obtener una imagen correcta para su posterior procesamiento. Actualmente, gracias al desarrollo e investigación en esta área, se logra la construcción de sistemas de clasificación cada vez más robustos y confiables. En este artículo se muestra la evaluación experimental de tres esquemas de iluminación que son implementados, estudiados y validados en una planta de clasificación de piezas basada en visión máquina.

Palabras clave: Esquemas de iluminación, visión de máquina, sistemas embebidos, matriz de confusión.

Abstract: Lighting is a fundamental aspect that must be taken into account in machine vision classification systems; The efficiency and performance of the system depends on the correct choice of this. Depending on the application, an adequate lighting technique is required to obtain a correct image for further processing. Currently, thanks to the development and research in this area, the construction of increasingly robust and reliable classification systems is achieved. This article shows the experimental evaluation of three lighting schemes that are implemented, studied and validated in a machine classification plant based on machine vision.

Keywords: Lighting schemes, Machine vision, Embedded systems, Confusion matrix.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones más frecuentes de la visión de máquina a nivel industrial son las plantas de clasificación de piezas; estos sistemas en ambientes controlados se componen básicamente de iluminación de la escena y una cámara que se encarga de capturar la imagen de un objeto, posteriormente, se realiza su procesamiento por medio de un software, el cual,

incluye algoritmos para procesar y analizar cualquier tipo de información que se desea segmentar y por último, se activa un actuador final que es el encargado de posicionar el objeto para su clasificación [1].

Un factor determinante en el rendimiento de una planta de este tipo es la iluminación que se hace sobre el objeto que se va a clasificar. Todo objeto posee una absorción de radiación, con lo cual, la energía reflejada es función de sus características geométricas

1. Ingeniero en Automática Industrial de la Universidad del Cauca.

2. Ingeniero en Automática Industrial de la Universidad del Cauca.

3. Ingeniero Físico, Magister en Automática de la Universidad del Cauca. Docente Investigador de la Universidad del Cauca.

y del material, por lo tanto, la longitud de onda de absorción es afectada por el medio y el tipo de iluminación que se presente al instante de digitalizar una imagen, generando en ocasiones errores en las funciones del sistema de visión de máquina; esto obliga a incrementar la robustez de los algoritmos y por lo tanto, las capacidades de los procesadores para operar a la velocidad que el proceso industrial requiere, lo que evidentemente se refleja en un aumento en el costo de equipos de cálculo computacional [2].

Cada esquema de iluminación destaca ciertas características en una imagen, algunos resaltan la textura de la superficie, otros permiten imágenes con bordes bien definidos; de igual forma, se puede lograr capturar la estructura de un objeto dependiendo del tipo de proyector de luz que se utilice o el ángulo de incidencia que se maneje [3]. Con lo anterior se concluye, que dependiendo de la aplicación, se requiere una técnica de iluminación adecuada ya sea: direccional, lateral, difusa, anillo, difusa axial, estructurada, contraluz, que permita obtener una imagen correcta para su posterior procesamiento.

En este documento se presentan los principales resultados obtenidos de una evaluación experimental sobre tres esquemas de iluminación, los cuales, fueron seleccionados, implementados y validados en una planta de clasificación de piezas basada en visión de máquina. Se inicia exponiendo las características más relevantes de varios esquemas de iluminación y la elección de tres de ellos usando cinco criterios básicos; posteriormente, se muestra la forma cómo los esquemas de iluminación seleccionados son implementados en la planta de clasificación usando un sistema embebido; seguidamente, se muestran los resultados derivados del proceso de implementación y evaluación de los esquemas de iluminación. Finalmente, se presentan las conclusiones al respecto.

2. ESQUEMAS DE ILUMINACIÓN

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 es recogida por la cámara, por lo tanto, la apariencia de la imagen tomada no solo dependerá de la posición de la fuente sino de la ubicación en que ésta se encuentre respecto al objeto y la cámara. Existen

distintas técnicas para resaltar u opacar determinadas características de un objeto.

2.1. Iluminación frontal.

Se posiciona la cámara mirando al objeto en la misma dirección que la fuente de luz, esto reduce sombras y suaviza texturas, es recomendado para esta técnica usar anillos de luz porque distribuyen de manera uniforme los haces de luz sobre el objeto. Este esquema se compone de una o más luces ubicadas a 45° respecto al eje óptico de la cámara que se encuentra en el objeto. No es recomendado usar ese esquema para elementos con superficie brillante pues aparecen zonas saturadas de luz y esto dificulta el procesamiento de la imagen. Cuando se opta por este esquema es conveniente experimentar con el número de fuentes de luz, distancia objeto – cámara y ángulo respecto al eje óptico de la cámara [4].

2.2. Retroiluminación difusa.

Esta técnica facilita obtener la silueta del objeto porque genera un contraste grande entre el fondo y el elemento captado por la cámara, también es usada para lograr medir el grado de porosidad en sustancias como tejidos, láminas de corcho o también cuando se requiere conocer el nivel de un líquido o presencia de algún componente interno dentro de botellas transparentes [5].

2.3. Iluminación por campo oscuro (Dark Field).

La luz es emitida lateralmente sobre el objeto con un ángulo muy pequeño mediante un anillo en todas las direcciones, esto resalta características particulares que tenga el objeto, se utiliza para generar sombras sobre relieves cuyo contraste es pequeño respecto al fondo. Esta técnica funciona muy bien para detectar imperfecciones sobre elementos planos y brillantes como metales pulidos, cualquier cambio sobre la superficie es detectado fácilmente porque sobre el defecto aparecen brillos un entorno totalmente oscuro [5].

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.

2.4. Iluminación coaxial.

La luz emitida rebota en un espejo semitransparente formando un ángulo de 90° que desvía los haces y los divide en dos partes, una parte atraviesa el espejo y se pierde, la otra toma la dirección del eje de la cámara, esta técnica es apta para superficies planas reflectantes, entre los usos más comunes están inspección de PCB, etiquetas reflectantes, inspección de impresión sobre aluminio o cavidades profundas. Esta configuración es la única que permite inspección de superficies especulares, además la sobra de la cámara no se refleja sobre el objeto a pesar de estar sobre el mismo eje [5].

2.5. Iluminación difusa tipo domo.

Los haces de luz son emitidos dentro de un domo esférico dando como resultado una luz difusa en todas las direcciones, eliminando sobras, suaviza texturas, elimina polvo, relieves y curvaturas que pueda poseer el objeto inspeccionado. A este tipo de iluminación se le llama también "cloudy day" porque no produce sobras sobre el objeto [6].

2.6. Iluminación lateral.

La dirección de la luz es lateral al objeto y la cámara se posiciona mirándolo directamente, el grado de inclinación del elemento emisor de luz está determinado por el grado deseado de resalte de relieve que presente el objeto. Este esquema se usa principalmente para resaltar bordes, rayas y fisuras sobre la superficie. No se deben manejar ángulos muy pequeños respecto a la horizontal porque la luz producirá sombras en todos los relieves y en el contorno del objeto [5].

2.7. Iluminación por contraste (backlight).

En este esquema la fuente de luzes emitida desde la parte posterior del objeto ubicando a éste entre la cámara y la fuente de iluminación. La cámara inspecciona la silueta del objeto y permite observaciones muy precisas pues se eliminan por completo las sombras producidas por la iluminación, es importante que la luz sea uniforme en toda la superficie del elemento. Este montaje es útil para inspección de siluetas, observación de materiales transparentes para detección de manchas, rayas, grietas, etc, pero no permite reconocer detalles

superficiales del objeto como códigos o inscripciones que posea [6].

2.8. Iluminación Laser o luz estructurada.

Para la puesta a punto de este esquema se debe colocar la fuente de luz en un ángulo conocido respecto al objeto a iluminar al igual que la cámara encargada de la captura de la imagen y analizando la distorsión de la luz es posible medir la profundidad del objeto inspeccionado, por eso este tipo de montaje se utiliza para resaltar la tercera dimensión de un objeto [5]. El principio de funcionamiento de este montaje se basa en la proyección de un haz de luz sobre un objeto, cuando éste se distorsiona el sistema lo interpreta como una variación de altura.

Para determinar los esquemas de iluminación a implementar en la planta de clasificación por visión de máquina de la Universidad del Cauca, se plantearon cinco criterios:

- C1: Implementable físicamente en el sistema
- C2: Posición de la cámara
- C3: Flexibilidad
- C4: Reparación y mantenimiento
- C5: Equilibrio costo necesidad

Se evaluaron los 8 esquemas de iluminación para cada uno de los criterios expuestos:

- E1: Retro iluminación difusa
- E2: Iluminación Frontal
- E3: Dark field
- E4: Coaxial

Tabla I
PONDERACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE ILUMINACIÓN

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
C_1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
C_2	-1	1	1	1	1	1	1	1
C_3	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
C_4	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
C_5	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
TOTAL	1	1	5	5	-3	5	-3	-3

A cada esquema de iluminación se le dio una puntuación de 1 si cumple plenamente con el criterio evaluado y -1 si no lo cumple. Los resultados se presentan en la Tabla I.

De acuerdo a la suma aritmética de la Tabla I, se concluye que los esquemas de iluminación más adecuados para implementar sobre la planta clasificadora son:

- Esquema de iluminación Dark Field.
- Esquema de iluminación Coaxial.
- Esquema de iluminación Lateral.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE ILUMINACIÓN

En este ítem se describe el proceso de implementación de los esquemas de iluminación seleccionados.

3.1. Sistema de visión de máquina.

La visión de máquina es una técnica basada en la adquisición de imágenes, generalmente en dos dimensiones, para luego procesarlas digitalmente mediante algún tipo de CPU (computadora, microcontrolador, DSP, etc.), con el fin de extraer y medir determinadas propiedades de las imágenes adquiridas. Se trata, por tanto, de una tecnología que combina las computadoras con las cámaras de video para adquirir, analizar e interpretar imágenes de una forma equivalente a la inspección visual humana [7]. Dentro del sistema que se implementó se hace uso de un PLC recibirá una señal con el fin de controlar un posicionador neumático, dicha señal es proveniente del sistema de visión como resultado de un proceso de análisis de una imagen capturada. Para el desarrollo de la aplicación de visión de máquina en este proyecto se utilizaron elementos hardware y software, que permiten cumplir todas las etapas de procesamiento y análisis de cada imagen. El proceso para la captura y procesamiento de la imagen implementado en la planta de clasificación por visión de máquina de la Universidad del Cauca que se detalla a continuación.

Sobre una banda circulan las piezas que son detectadas por un sensor de presencia, el cual envía una señal al sistema embebido pasando previamente por un circuito de adecuación, se ejecutan las líneas de código programadas en el sistema que permiten a la webcam capturar una imagen de la pieza en un escenario controlado. Posteriormente, se procesa la imagen hasta obtener la respuesta de clasificación, que es enviada al circuito de adecuación y finalmente al PLC, el cual envía una orden al actuador del sistema de clasificación para ejecutar la decisión.

Elementos Hardware

A continuación, se describen cada uno de los elementos que permiten lograr el correcto reconocimiento de patrones con el fin de clasificar la pieza en la posición correcta.

Elementos de iluminación

Se diseña un sistema de tres esquemas de iluminación y se ubican dentro de un cuarto de cuerpo metálico color negro, permitiendo obtener un escenario controlado donde la captura de la imagen no se ve afectada por la iluminación externa. Cada esquema de iluminación es independiente y estos se encienden a través de tres interruptores. En la parte superior se ubica la iluminación coaxial, en la parte intermedia la iluminación lateral y en la parte inferior la iluminación Dark Field.

En el cuarto de toma de imágenes se colocó luz propia con lámparas SN6000K, las cuales constan de un Led con tecnología tipo COB y consumen 3 Watt cada una. Con este tipo de iluminación dirigida se asegura una excelente calidad de imágenes.

Sensor Trigger

Es un sensor óptico infrarrojo que se conecta por medio de un circuito de adecuación al sistema embebido, permite detectar la presencia de una pieza frente a la webcam y da inicio a la ejecución de la rutina de preprocesamiento de la imagen capturada [8].

Elemento de captura de imagen

Está ubicado dentro del cuarto en la parte superior sobre la banda principal y permite capturar una imagen de la escena, recibiendo las propiedades luminosas del objeto y transformándolas en señales digitales. Está conformado por una cámara web Logitech C210 conectada por un puerto USB al sistema embebido. Permite tomar imágenes de 640 x 480 píxeles.

Selección del sistema embebido

Un sistema embebido, se puede definir, como un producto electrónico que contiene uno o más procesa-

dores y un software o sistema operativo para ejecutar funciones específicas [8]. Debe ser confiable y disponer de una comunicación confidencial y autenticada. Existe actualmente una gran variedad de arquitecturas de CPU para sistemas embebidos tales como ARM, MIPS, PowerPCTM, alojadas en un procesador, además utiliza una cierta cantidad de memoria y una serie de salidas y entradas necesarias para comunicarse con otros dispositivos [9]. Para el desarrollo de este - proyecto se usó una Raspberry Pi3.

Circuito de adecuación

Para el circuito de adecuación se utiliza el módulo relés de Arduino de 4 canales a 5 Vdc, el cual sirve para acoplar las señales discretas que se manejan entre el sensor, el sistema embebido y el PLC, ingresando señales de 3.3v y 5v, obteniendo salidas de 24 v que van al PLC.

Herramientas de programación

Dentro de las herramientas de programación se escogieron las siguientes:

Lenguaje de programación

Dentro de los diferentes tipos de lenguaje de programación se encuentra: Java, C, C++, Python, C# y JavaScript. Se escoge Python debido a que su sintaxis es fácil de entender por ser muy cercana al lenguaje natural y los programas se asemejan a pseudocódigos, lo cual permite un mejor mantenimiento. Su código es más organizado ya que hace uso de la indentación teniendo así un código legible, es de código abierto, permite crear aplicaciones e involucrarse en su desarrollo. Tiene tipado dinámico, es multiplataforma y está disponible para Windows, Mac y distribuciones Unix/Linux. Es importante mencionar que el lenguaje Python puede utilizarse sin problemas en entornos embebidos basados en ARM, además las aplicaciones gráficas requieren de análisis numérico con matrices y vectores o el desarrollo de funciones matemáticas, para ello existe la herramienta NumPy, una extensión de Python que le agrega soporte, constituyendo una librería de funciones matemáticas de alto nivel. Al utilizar NumPy, la funcionalidad de Python es comparable a la de Matlab ya que permite al usuario escribir programas de una alta eficiencia y velocidad, basados en operaciones con vectores y matrices [10].

Librerías Gráficas Embebidas

Es importante elegir una librería como herramienta central a la hora de hacer un desarrollo de visión artificial. Estas librerías pueden utilizarse con cámaras y sensores de cualquier fabricante, pues no están ligadas a un hardware específico, en el área de visión artificial y procesamiento de imágenes existen librerías tales como Sherlock, Halcon, OpenCV y Point Cloud Library (PCL) cada una de ellas con una licencia comercial o BSD(Berkeley Software Distribution),y de alta, baja o mediana complejidad, para el desarrollo del proyecto se escoge la librería OpenCV, una de las más utilizadas para programar aplicaciones graficas en los sistemas embebidos ARM. OpenCV fue lanzada bajo una licencia BSD, por lo tanto, es libre tanto en la parte académica como en la comercial. Tiene interfaces para los lenguajes de programación C++, C, Python y Java. OpenCV puede ser utilizada en Linux embebido. OpenCV fue especialmente diseñada para incrementar la eficiencia computacional, con un fuerte enfoque en aplicaciones de tiempo real, un aspecto fundamental, teniendo en cuenta los recursos limitados de los sistemas ARM en comparación con un ordenador. Escrita en C/C++ optimizado, OpenCV puede tomar ventaja del procesamiento con múltiples núcleos. Habilitada con OpenCL, también puede tomar ventaja de la aceleración del hardware del dispositivo ARM donde se ejecute. Reconocida mundialmente, OpenCV tiene un sin fin de miembros en la comunidad de usuarios y el número de descargas estimadas, exceden los 7 millones.

Sistema operativo embebido.

Existen diferentes plataformas, cada uno con su procesador y aquellas que poseen integrado un procesador ARM, funcionan bajo un sistema operativo lo cual permite al usuario concentrarse en el desarrollo de la aplicación, dejando de lado detalles de hardware. La configuración de memoria, la conexión a la red, y los periféricos de Entrada/Salida pueden ser manejados directamente por el sistema operativo, para el desarrollo se empleó Linux el cual ha sido utilizado en los sistemas ARM por décadas. Tiene una gran cantidad de usuarios, y la posibilidad de compilar el kernel de origen; que es una gran ventaja para los sistemas embebidos. El kernel se puede configurar de tal manera que se habiliten únicamente las opciones de hardware mínimas y eliminar las que no son

necesarias. Por otro lado, si se requiere añadir nuevo hardware, existen múltiples fuentes para obtener los drivers. Para los sistemas embebidos están disponibles, las distribuciones Angstrom, Ubuntu, raspbian [11].

Piezas para la banda transportadora

Una vez implementado las herramientas de programación en la tarjeta embebida se realizó un pequeño script que permitiera capturar imágenes con el fin de seleccionar las piezas a utilizar sobre la banda transportadora, previamente se realizaron pruebas con diferentes objetos logrando así determinar qué tipo de piezas deberían usarse las cuales se estarán desplazando sobre la banda a diferentes velocidades. Observando el comportamiento de los objetos y las imágenes obtenidas sobre la banda transportadora se concluye:

- Material de la pieza: El tipo de material es importante al momento de realizar un análisis de las imágenes obtenidas puesto que se busca que los elementos reflejen la menor cantidad de luz posible y evitar los destellos de luz en la imagen.
- El color: El tipo de color debía ser opaco por lo tanto las piezas debieron ser pintadas de un color mate.
- Formas definidas: Se decidió utilizar formas geométricas para fines aplicativos del algoritmo.
- El tamaño de la pieza: El tamaño es fundamental ya que la pieza debe tener una altura ideal que permita ser detectado por el sensor que dispara la cámara, pero no muy alta para evitar que la pieza bloquee los haces de luz proveniente de los esquemas de iluminación e igualmente para evitar bloqueos mecánicos sobre la banda.
- La base de la pieza: Las piezas que se elijan deben tener una base de área mayor, ya que la pieza a ciertas velocidades soporta vibraciones que se generan por el desplazamiento sobre la banda transportadora. Finalmente, para este proyecto se escogieron piezas de madera con forma cuadrada, triangular y octagonales cubiertas con una pintura de color azul, verde y rojo mate, como se observa en la Figura 1, son piezas de diferente forma con igual color para un algoritmo de clasificación. El sistema de clasificación se diseña para clasificar tres tipos de piezas, sin embargo, una cuarta

posición se deja para aquellas piezas que no cumplen con la condición.

Figura 1.

Piezas de forma geométrica para banda transportadora de clasificación. Fuente propia



Descripción del algoritmo

En esta sección se realiza una descripción de las partes del algoritmo donde se explican ciertas líneas de código que son consideradas importantes en la ejecución del script. El algoritmo está alojado en la placa raspberry pi 3, corre sobre el sistema operativo Linux, está escrito en el lenguaje de programación Python y utiliza la librería OpenCV.

Cabecera

Se compone de todos los recursos que utiliza el algoritmo para poder obtener un resultado satisfactorio en la cabecera se habilitan los pines de la placa y se importan las librerías. Con la instrucción RPi.GPIO as GPIO se habilitan los pines que utiliza la raspberry, la otra instrucción permite importar la librería OpenCV con el fin de poder ejecutarla durante el proceso.

```
import RPi.GPIO as GPIO....  
import cv2 ....
```

En esta parte se configuran los pines de entrada o de salida de la placa, que pines se ponen en bajo o en alto, se declaran las constantes, los tipos de datos y las variables que se usan en el algoritmo, se asigna el pin 5 de la placa a una variable creada en este caso ent91, se configura los pines con la siguiente línea de código GPIO.setup(ent91,GPIO.OUT) en este caso

habilitad el pin 5 como salida y lo pone en alto con GPIO.output(ent91,GPIO.HIGH).

```
ent91=5...
GPIO.setup(ent91,GPIO.OUT)..
GPIO.output(ent91,GPIO.HIGH).
```

Cuerpo

Aquí se escriben todas las instrucciones del algoritmo, donde se realiza la captura de la imagen, se ejecuta la rutina que efectúa la segmentación extrayendo la máscara y las rutinas secundarias donde se ha seleccionado con antelación el tipo algoritmo forma o color. Para la captura de la imagen, se hace un llamado a una función captura(), donde se especifica qué cámara se va a utilizar cv2.VideoCapture(0), en caso de tener más de una, se define el tipo de resolución camera.set(3,1920), camera.set(4,1080) y dónde se va a guardar la imagen capturada cv2.imwrite("imagen.jpg",camera_capture).

```
def captura():
camera=cv2.VideoCapture(0)
camera.set(3,1920)
camera.set(4,1080).....
cv2.imwrite("imagen.jpg",camera_capture)
```

Rutina principal

En la rutina principal se hace un llamado a la imagen que se capturo, se recorta dejando solo la zona por donde se desplaza la pieza ya que a diferentes velocidades la pieza estará en otra posición, se utiliza cv2.imread () para cargar la imagen capturada y posteriormente recortarla definiendo un área en Y de 450-1070 y en X de 250-1700.

```
cv2.imread('imagen.jpg')
imagen[450:1070,250:1700]
```

4. EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE ILUMINACIÓN

Para medir el rendimiento del clasificador se hace uso de herramienta estadística que permite evaluar la exactitud de una clasificación, definiendo el grado de concordancia entre las clases y su correcta ubicación.

Matriz de Confusión

La matriz de confusión divide los elementos a clasificar y los llama Clases, por tanto, para un problema de n clases esta debe tener un tamaño nxn donde generalmente las filas se nombran según las clases reales y las columnas son las clases previstas (resultado que arroja el modelo), además, sirve para mostrar cuando una clase es confundida por otra, por eso, permite trabajar de forma separada los distintos tipos de error [12]. Una matriz de confusión de 2x2 se ilustra de la siguiente manera:

Figura 2. Matriz de confusión para dos clases.

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	Verdaderos Positivos (VP)	Falsos Negativos (FN)
	Negativos	Falsos Positivos (FP)	Verdaderos Negativos (VN)

VP es la cantidad de positivos que fueron clasificados correctamente como positivos por el modelo.

VN es la cantidad de negativos que fueron clasificados correctamente como negativos por el modelo.

FN es la cantidad de positivos que fueron clasificados incorrectamente como negativos.

FP es la cantidad de negativos que fueron clasificados incorrectamente como positivos.

La diagonal principal indica el número de coincidencias que se presentan entre el valor real y el valor dado por el modelo, el resto de valores son errores, bien sea positivos clasificados erróneamente como negativos o negativos clasificados erróneamente como positivos.

De la aplicación de la matriz es posible obtener los siguientes valores:

- Exactitud
- Precisión
- Sensibilidad

Exactitud: se refiere al nivel de concordancia entre el valor real y el resultado arrojado por el modelo [13].

$$\text{Exactitud: } (VP+VN)/\text{Total}$$

Precisión: Es inversamente proporcional al error, mide el nivel de relación existente entre resultados iguales [13].

$$\text{Precisión} = VP / (\text{Total clasificados Positivos})$$

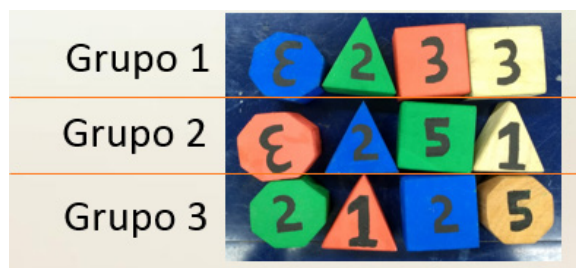
Sensibilidad (recall): Es la tasa de verdaderos positivos (TP) que fueron correctamente identificados por el algoritmo [13].

$$\text{Sensibilidad} = VP / (\text{Total Positivos})$$

Algoritmo de Forma

Para probar el rendimiento del clasificador con el algoritmo de color se dividieron las piezas en tres grupos, cada uno contiene una forma y un color distinto Figura 3, además se realizaron cambios en la velocidad de la banda desde un 10% hasta un 80% variando de 10 en 10, los resultados arrojados por la matriz de confusión para el Grupo 1 se muestran a continuación.

Figura 3. Piezas divididas en grupos para medir el rendimiento del clasificador.



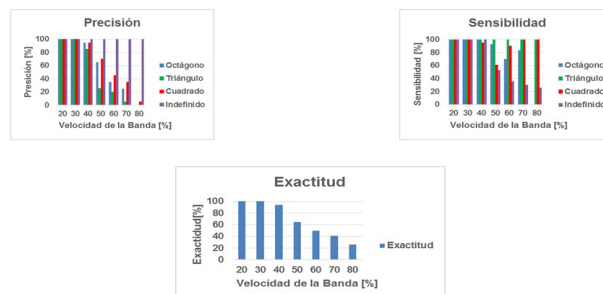
Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo Esquema Coaxial

A continuación se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Coaxial. En la Figura 4, se observa una alta precisión para la clase Indefinido, valor que no se ve afectado a medida que se incrementa la velocidad de la banda, en los rangos comprendidos entre 20% y 30% las piezas fueron clasificadas de manera más precisa por tanto ninguna de las piezas fue clasificada erróneamente, esto se ve reflejado en el gráfico de

exactitud que dentro de el mismo rango presenta un modelo muy exacto. Se evidencia que el triángulo bajó su precisión con el incremento de velocidad sin embargo su porcentaje de sensibilidad es del 100% lo cual quiere decir que ningún elemento distinto a un triángulo es clasificado como triángulo.

Figura 4.

Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por Forma bajo esquema Coaxial.

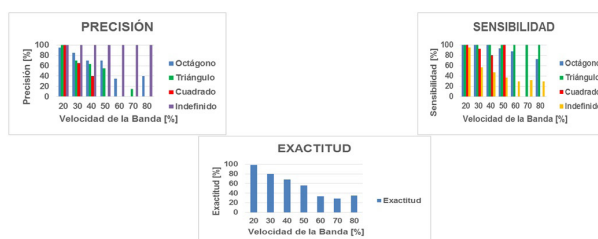


Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo esquema Dark Field

A continuación en la se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Dark Field.

Figura 5.

Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por Forma bajo esquema Dark Field.



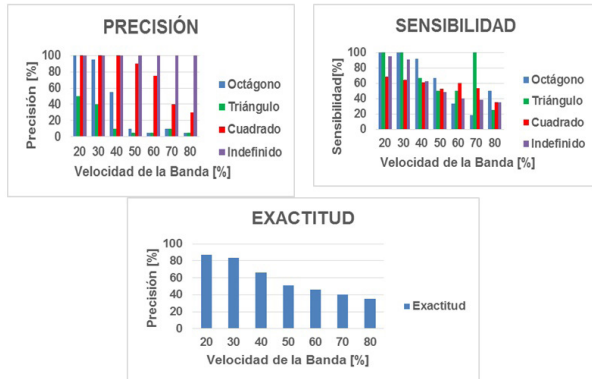
Como se observa en la Figura 5, la precisión para todas las piezas decayó a partir de un porcentaje de velocidad del 20%, en un 50% no se observan clasificaciones correctas para la ficha cuadrada sin embargo su sensibilidad es alta en este punto, además la sensibilidad del triángulo no se ve afectada a cambios de velocidad pero su precisión decae con la velocidad. La exactitud del modelo decae a medida que aumenta la velocidad y a un 80% se presentan errores aleatorios del modelo.

Resultados Matriz de Confusión Grupo 1 bajo esquema Lateral

A continuación, se muestran los resultados arrojados por la matriz de confusión para el grupo 1 bajo esquema de iluminación Lateral.

Figura 6.

Resultados de la Matriz de Confusión usando el algoritmo clasificador por forma bajo esquema.



Bajo las condiciones en que se capturaron las imágenes este esquema presenta los porcentajes de precisión más bajos para la ficha triángulo, a pesar de esto su sensibilidad tiene un porcentaje alto dentro del rango comprendido entre 20% y 30%. La ficha cuadrada es clasificada correctamente a diferencia de las demás piezas que se ven afectadas por el incremento de velocidad, la sensibilidad a partir de 50% presentan variaciones aleatorias.

De las anteriores gráficas, se puede decir que el porcentaje de precisión del modelo se ve afectado a medida que se incrementa la velocidad de la banda, por tanto para una velocidad del 30% el modelo es muy preciso porque todos los octágonos, triángulos, cuadrados e indefinidos son clasificados en la clase que le corresponde, se puede decir que guarda una buena relación entre el valor real y el valor arrojado por el modelo. Conforme incrementa la velocidad se evidencia una reducción en la precisión, los valores reales guardan menor relación con los valores arrojados por el modelo, para la clase de objeto Indefinido se presenta una precisión del 100% debido a la estructura que tiene el algoritmo de segmentación.

El valor de sensibilidad para la clase Indefinido

muestra una reducción de porcentaje conforme aumenta la velocidad de la banda, esto significa que para velocidades superiores a un 40% el modelo arrojará como resultado pieza indefinida, lo cual se debe a que en el momento de captura de la imagen la ficha se encuentra por fuera de la estructura del módulo de visión y esto causa una mala clasificación, por tanto el resultado será indefinido a pesar de que la ficha inspeccionada puede ser un octágono, triángulo o cuadrado, se puede decir entonces que a un mayor porcentaje de sensibilidad para una clase pocos valores erróneos serán clasificados dentro de la clase indefinido, caso contrario cuando se presenta un valor menor de sensibilidad donde caerán muchos valores dentro de esta clase que no corresponden a ella. El porcentaje de exactitud presenta una disminución conforme aumenta la velocidad de la banda, lo cual sucede porque el resultado que arroja el clasificador no corresponde a un valor real observado, dentro de la matriz estos valores son clasificados dentro de otras clases y por lo tanto se presenta un nivel bajo de acierto.

En las gráficas se observa que cuando se realiza un cambio de iluminación existe un cambio en los porcentajes debido a que el color captado por la cámara se modifica de acuerdo a la configuración de luz, lo cual produce una mala clasificación debido a que el valor de V dentro del espacio HSV no está considerado en los rangos definidos, también se observa que los rangos definidos para el color verde bajo el esquema coaxial no son los adecuados para la segmentación bajo las otras configuraciones de luz, por tanto el resultado será Indefinido a pesar de que la ficha inspeccionada puede ser un octágono, triángulo o cuadrado.

5. CONCLUSIONES

- Se logran establecer criterios que permiten realizar un análisis comparativo entre diferentes esquemas de iluminación para determinar la factibilidad de su implementación en procesos de clasificación.
- Al evaluar experimentalmente la incidencia de la luz sobre los sistemas de clasificación de piezas por visión de máquina se debe seleccionar de forma correcta el tipo de iluminación ya que este aspecto influye positivamente en el rendimiento y eficiencia del clasificador.

- Los criterios definidos para la selección de los esquemas de iluminación pueden ser aplicados a otras plantas de clasificación cuyo principio de funcionamiento sea la visión de máquina.
- De acuerdo a las diferentes pruebas realizadas sobre las piezas, se pudo determinar que el rango de segmentación definido debe ser modificado según las condiciones de luz que tenga la escena, con el fin de mejorar el rendimiento en la clasificación.
- Mediante la herramienta estadística Matriz de Confusión fue posible medir el rendimiento del clasificador a través de tres variables: Exactitud, Precisión y Sensibilidad, y además identificar errores puntuales en la clasificación de un objeto. Todo esto permitió formular diferentes soluciones a cada uno de los errores hallados y lograr un clasificador de alto desempeño.

Referencias Bibliográficas

- [1] Franco, R. y Chaves, J. (2011) Desarrollo de un modelo para el seguimiento de patrones mediante reconocimiento óptico. En: Scientia et Technica Año XVII, No 50. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [2] Aranda, J. (2002). Espectrometría de imagen en el infrarrojo: una contribución al estudio de las combustiones y a la teledetección de incendios forestales. Universidad Carlos III de Madrid. Tesis Doctoral, España.
- [3] Morillo, M. (2015). Digitalización 3D con escáner de luz estructurada aplicada al área de la gestión de calidad y la conservación del patrimonio históricoartístico. Departamento de Física Aplicada de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, España.
- [4] E. A. S. Malpartida, "Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot.", p25, 2003.
- [5] Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales Conocimientos básicos de visión artificial," p. 11, 2012.
- [6] M. del C. R. Galloza, "Diseño del sistema de control y automatización para la recolección, selección y empaque de frutos orgánicos en el valle San Lorenzo• Tambogrande de la región de Piura," p. 51 2015.
- [7] Pérez Sandoval, María Fernanda. Velasco Delgado, Oscar Duvier, "Sistema de clasificación de piezas en una línea de producción empleando visión de máquina." Universidad del Cauca. 2011.
- [8] U. N. de Quilmes, "Aspectos de un Sistema de Visión Artificial Aspectos de un Sistema de Visión Artificial," pp. 1-19, 2005.
- [9] J. I. H. Vega, "El Software Embebido y los Retos que Implica su Desarrollo," Concienc. Tecnológica, no. 40, p. 42, 2010.
- [10] S. Engineering, "Master Degree : Industrial Systems Engineering nivel," pp. 1-19, 2011.
- [11] J. C. M. Urquiaga, "¿Por qué aprender Python?," 2017.
- [12] G. D. C. Johanna, "Estudio sobre la viabilidad de desarrollar aplicaciones graficas en sistemas embebidos," 2014.
- [13] Recuero P. "Machine Learning a tu alcance: La matriz de confusión", 2018.