Índice de contenidos

1	INTRODUCCIÓN.	5
1.1	Sistemas para el control de calidad	6
1.2	Motivaciones para la realización del proyecto.	8
2	PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO. PRIMERA APROXIMACIÓN A LA	4
SO	LUCIÓN.	11
2.1	Situación preliminar y planteamiento del proyecto.	.11
2.2	Fraccionamiento del Proyecto en Fases. Participantes	.14
2.3 case	Fase I del proyecto global: Estudio de los procedimientos de detección de carilla residual.	.15
2	2.3.1 Objetivo.	.15
2	.3.2 Descripción	.15
	2.3.2.1 Estudio de propiedades de emisión/absorción de los materiales	.16
	2.3.2.2 Estudio en laboratorio de un sistema específico de adquisición de imágenes para la detección de cascarilla	.16
	2.3.2.3 Propuesta de la estructura del prototipo a montar en la Fase II	.17
2.4	Especificaciones.	.17
2.5	Estudio preliminar del problema. Dificultades técnicas	.18
3	FUNDAMENTOS TEORICOS.	21
3.1	Representación de imágenes	.21
3	1.1 Imágenes en color	.23
3	.1.2 Histograma.	.23
3.2	Óptica	.25
3	2.1 Factor de magnificación y distancia al objeto.	.26
3	2.2.2 Apertura, número F y profundidad de campo	.27
3.3	Nociones básicas de radiometría.	.32
3.4	Sensores de imagen electrónicos.	.35
3	.4.1 Sensores CCD	.37
3	.4.2 Sensores CMOS	.43

4	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.	47
4.1	Resolución.	48

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

4.1.1 Resolución en	la Fase I	48
4.1.2 Resolución en	fases posteriores	51
4.2 Aspectos óptico	98	54
4.2.1 Aspectos óptic	os en la Fase I	54
4.2.2 Aspectos óptic	os en fases posteriores	54
4.3 Tiempo de expo	osición	56
4.3.1 Tiempo de exp	osición en la Fase I	56
4.3.2 Tiempo de exp	osición en fases posteriores	56
4.4 Tipo de ilumina	ción	75
4.4.1 Tipo de ilumin	ación en la Fase I	76
4.4.2 Iluminación en	fases superiores	83

5	ALGOR	ITMOS DE PROCESAMIENTO DE LA FASE I.	5-89
5.1	Funda	amentos teóricos del procesado digital de imágenes	5-89
5.	1.1 Oper	aciones de mejora. Preprocesado	5-90
	5.1.1.1	Filtrado	5-90
	5.1.1.2	Eliminación de variaciones en la iluminación	5-95
5.	1.2 Segn	nentación	5-112
5.2	Algor	itmos de proceso en la Fase I	5-115
5.3	Concl	lusiones	5-130

6	PROPUESTA PARA LA ADQUISICIÓN DE EQUIPAMIENTO.	6-133
6.1	Cámara	6-133
6.2	Óptica	6-135
6.3	Sistema de iluminación	6-136
6.4	Frame graber	6-140
6.5	Software	6-141
6.6	Resumen de la propuesta.	6-141
7	CONCLUSIONES Y RESULTADO DE LA FASE I.	7-143

APÉNDICE A. ESTUDIO DE CÁMARAS CON APLICACIONES CIENTÍFICAS E INDUSTRIALES. CARACTERÍSTICAS Y PRESTACIONES. A-147 A.1 Introducción. A-147

A.2 Listado y explicación de características a estudiar	A-147
---	-------

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

A.3 Características de ruido.	A-155
A.4 Tablas.	A-157
A.5 Comentarios	A-163
APÉNDICE B. MANUALES Y HOJAS DE ESPECIFICACIONES.	B-169

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA 203

1 Introducción.

Este Proyecto Fin de Carrera se centra en demostrar la viabilidad de un sistema automático que solucione un problema real de detección de defectos en superficies metálicas, como un paso en el control de calidad en la fabricación de las mismas.

La memoria se ha estructurado en siete capítulos cuya materia se resume a continuación. El capítulo uno es de introducción, y en él se habla a grandes rasgos de los sistemas automáticos de control de calidad, y se exponen las motivaciones que sostienen este proyecto. En el capítulo dos se definen de forma extensa el proyecto, la situación inicial del problema en la empresa solicitante y los problemas que la llevan a plantearlo, así como la propuesta presentada para solucionar estos problemas. El capítulo tres contiene un repaso no exhaustivo de las bases teóricas necesarias para realizar el proyecto (salvo lo relativo a algoritmos de proceso, a lo que se dedicará un capítulo aparte). La adquisición de imágenes se estudia en el capítulo cuatro, y la creación de los algoritmos de proceso y la teoría necesaria para ello en el capítulo cinco. En el capítulo seis se desarrolla la propuesta de un sistema completo de detección y control para una fase superior, una vez demostrada la viabilidad del proyecto. Finalmente, el capítulo siete contiene las conclusiones obtenidas del estudio desarrollado.

Adicionalmente, se incluyen dos apéndices: el Apéndice A contiene un estudio acerca de las cámaras para aplicaciones de visión artificial que pueden encontrarse en el mercado. En el Apéndice B pueden encontrarse los manuales y/o catálogos del equipamiento que se menciona en este Proyecto Fin de Carrera.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

1.1 Sistemas para el control de calidad.

Las actividades de inspección y control representan una de las funciones básicas en todo proceso de fabricación en serie. De forma genérica se engloban dentro de lo que se denomina control de calidad. A través del uso de procedimientos de control e inspección, el control de calidad se ocupa de la detección y, en la medida de lo posible, de la corrección de defectos en el producto o productos fabricados.

Tradicionalmente, el control de calidad ha sido efectuado por operarios humanos y de forma manual, lo que es en la mayor parte de las veces, costoso, o directamente imposible, debido al alto rendimiento en las líneas de producción modernas. Como ejemplo, sería imposible para un ser humano inspeccionar defectos o realizar medidas en piezas de tamaño de décimas de milímetros que avanzan en una línea a una velocidad de 1m/s (condiciones no excesivamente estrictas). Por otro lado, otra desventaja importante de estos métodos de control de calidad manuales es que en la mayor parte de los casos son aplicados a posteriori, cuando el problema detectado ya no tiene solución; así, si el producto no cumple las especificaciones, deberá ser retocado, o en el peor de los casos, ser desechado. De cualquier manera, la consecuencia es un aumento del coste.

Con el desarrollo de la electrónica en general y de los sensores visuales basados en el silicio en particular (encabezado en principio por la tecnología CCD y tendiendo actualmente hacia sensores CMOS¹) se pueden realizar inspecciones realmente ambiciosas. Actualmente, se pueden encontrar en el mercado cámaras con sensores cuya resolución alcanza los 81 millones de píxeles [1] y con velocidades de hasta un millón de imágenes (de mucha menor resolución) por segundo [2], por citar casos concretos. Gracias a esta mejora tecnológica, se pueden realizar mediciones, encontrar defectos de superficie, etc. en líneas de producción a velocidades realmente elevadas, lo que aumenta, por supuesto, la productividad. Además, se pueden ir corrigiendo errores a lo largo del proceso de producción, introduciendo varios sistemas de inspección y mecanismos de realimentación.

¹ Ver aptdo 3.4: Sensores de imagen electrónicos.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Los sistemas de inspección automática se han introducido en líneas de producto muy variadas: ropa [3], aislamiento de cables [4], papel [5], bolsas de plástico [6], metales [7], madera [8], cuero [9], etc.; y la lista podría crecer bastante más.

El esquema de un sistema genérico de inspección y control automático se puede observar en la Figura 1-1. En ella, el elemento azulado es el producto a inspeccionar. Para que la imagen tomada por el sensor sea de calidad, se ha de contar con un sistema de iluminación adecuado. Éste es un paso fundamental al que no siempre se da la importancia que merece. El conseguir una buena iluminación puede simplificar enormemente el posterior desarrollo de los algoritmos de proceso de imagen. Y viceversa: una mala iluminación provocará imágenes no adecuadas (con falta de nitidez, mal contraste, sombras...) que pueden convertir en ardua tarea la creación de algoritmos de procesado (con el consiguiente aumento de tiempo de desarrollo y coste) o incluso hacerla inviable.



Figura 1-1. Control de calidad. Sistema de inspección y control.

La estructura de la parte derecha de la figura no está ni mucho menos definida hoy día, aunque es bastante general. Tal como en ella aparece, la señal analógica proveniente del sensor pasa a una tarjeta en la que es digitalizada, almacenada y preprocesada (si procede) cuando corresponda. También se dispone de un elemento monitor que suele gobernar el sistema y desde el que el usuario puede tomar decisiones. Este elemento suele ser un ordenador, y es corriente que también se encargue del procesado.

Sin embargo, ya es frecuente encontrar en el mercado cámaras cuya salida es directamente digital, por lo que el convertidor A/D de la tarjeta no sería necesario. Incluso están comenzando a proliferar hoy día cámaras que contienen "*on board*" sincronización, convertidores y preprocesado [10].

Pese a lo mencionado en el párrafo anterior, hay muchas aplicaciones complejas en las que es necesario un esquema como el mostrado en la Figura 1-1. Por ejemplo, sistemas multicámara [11], aquellos en los que el procesado haya de ser tan rápido o tan complejo que se requiera el uso exclusivo del procesador o incluso varios sistemas procesadores operando en paralelo [12]. En ese caso, se necesitan tarjetas específicas y además un ordenador que realice un papel de monitor y/o supervisión. Obviamente, el esquema adoptado dependerá de cada aplicación particular.

Otro apartado importante en el diseño de un sistema de estas características es el software. Se presenta la disyuntiva de diseñar los algoritmos de proceso con lenguajes de propósito general, que serán más eficientes en coste, o adquirir paquetes de software especializado para una determinada aplicación, cuya ventaja radica, en la mayoría de los casos, en una alta variedad de algoritmos muy eficientes para aplicaciones concretas sin coste de diseño (obviamente de medio/alto coste económico).

1.2 Motivaciones para la realización del proyecto.

El grupo de trabajo en el que se enmarca la realización de este proyecto se dedica desde hace años a desarrollar sistemas de procesamiento de imágenes basados en técnicas no convencionales, orientadas a la consecución de sistemas de visión artificial versátiles y programables, construidos en un único chip.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Estos sistemas tienen ventajas potenciales muy significativas con respecto a las soluciones convencionales, tanto en lo referente a funcionalidad y prestaciones en general (disipación de potencia, capacidad de cómputo, velocidad de sensado y operación, tamaño físico de los sistemas, complejidad máxima de los algoritmos, etc.) como en lo referente a costes de producción.

La afirmación que se acaba de hacer nace necesariamente de una comparación con las técnicas convencionales, basadas en cámaras con salida digital y procesadores digitales tradicionales. En este sentido, la continua evolución tecnológica y el consiguiente aumento de las prestaciones de los sistemas convencionales requieren una actualización continua de los parámetros de comparación. Por otra parte, el conocimiento práctico de los problemas de inspección visual en casos reales es cuando menos muy conveniente a la hora de centrar y definir objetivos de investigación.

La realización de este proyecto, aparte de producir los resultados académicos inherentes, persigue mantener actualizados los mencionados parámetros de comparación así como adquirir experiencia práctica de primera mano en las técnicas de inspección visual convencionales, incluyendo los procesos de adquisición y también los de procesamiento empleando hardware convencional.

Por otra parte, el reto de resolver un problema real de producción en la factoría de Acerinox S.A. en los Barrios (Cádiz), de gran relevancia económica, supone un aliciente más en la realización de este trabajo, y en general, en la continuación de las tareas del grupo en la línea de sistemas de visión artificial en un único chip.

2 Planteamiento del Proyecto. Primera aproximación a la solución.

En este capítulo se introducirá el planteamiento del proyecto, y se tratarán de exponer las especificaciones y toda la información de la que se dispone para llevarlo a cabo. Finalmente, se hará una breve reflexión sobre los principales problemas que se prevén puedan aparecer durante su desarrollo, y las posibles dificultades técnicas que se tendrán para solucionarlos.

2.1 Situación preliminar y planteamiento del proyecto.

Este proyecto es solicitado por Acerinox S.A.² a un consorcio empresarial formado por la Universidad de Málaga, el Instituto de Automática de Madrid, el Instituto de Microelectrónica de Sevilla, TCC S. A. y Anafocus S. L., y consiste en detectar de forma totalmente automática cierto defecto en uno de los trenes de producción de la factoría que Acerinox posee en Los Barrios, Cádiz.

El mencionado tren de producción es una línea de laminación en caliente (en adelante, LC) llamada AP2, y por ella pasan planchas de acero de aproximadamente 1,6*m* de anchura por 1000*m* de longitud y de espesor variable, a alrededor de 1*m/s*. En cierto instante del proceso de producción, las planchas han de ser clasificadas en tres categorías según su calidad respecto a la densidad del defecto a detectar: A, B y C, donde A es la mejor calidad posible y C la peor. Cada plancha, en función de la categoría a la que pertenezca, será destinada a distintas aplicaciones, según el tipo de acero requerido para ellas. Esta clasificación ha de ser realizada de la forma más

² ACERINOX S.A. es una empresa española cuya actividad principal es la fabricación y distribución de aceros inoxidables para distintos usos.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

fiable posible, ya que en caso de errores, y dado el tamaño de las láminas, las pérdidas económicas pueden ser muy elevadas, sobre todo en el caso de que se clasifique como A (y por supuesto se venda como tal) una plancha de tipo C. Por otro lado, una presencia continuada de este defecto es indicativa de fallos en el proceso de producción, por lo que se fabricarán de forma continuada planchas de mala calidad si dichos fallos no se detectan.

Durante todo el proceso de fabricación del acero, ACERINOX ha clasificado un total de 287 defectos que determinan su calidad. El defecto que se ha de detectar pertenece a ese conjunto, y es llamado *cascarilla residual de LC*. Éste aparece como consecuencia de un decapado insuficiente realizado en un determinado paso del proceso de producción; más adelante se expondrán las características de la cascarilla residual.

Actualmente ACERINOX dispone de un sistema de detección, clasificación y control de la compañía Parsytec [13], denominado HTS4, que no es capaz de detectar la cascarilla residual de LC. Obviamente, éste es un problema grave para ACERINOX, ya que después de realizar una fuerte inversión en el mencionado sistema, sigue sin tener fiabilidad en la clasificación de las planchas de acero.

Para evitar este problema a corto y medio plazo, en este momento es un operario humano el encargado de llevar a cabo el control de calidad referente a la cascarilla residual. El proceso se explica a continuación: la línea AP2 decrece su velocidad en tres ocasiones para cada plancha: al principio, aproximadamente en la mitad y al final de la misma. Cada vez que la velocidad decrece, el operario hace uso de una lente y toma una (o varias, no más de tres en ningún caso) muestra visual de aproximadamente 2x2cm, anotando referencias a la cantidad de cascarilla visualizada. Una vez pasa toda la plancha, se toma como resultado de la inspección el más desfavorable de los tres muestreos.

Hay que notar que no sólo el proceso es totalmente manual, sino que el área de la plancha que se inspecciona es mínimo, no alcanzando siquiera el 1 ‰000 del total (el área máxima abarcada por el operario es 36 cm², como puede extraerse del

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

párrafo anterior)³. Además la norma interna de ACERINOX para efectuar el control de calidad en este caso es un tanto vaga, teniendo como patrón de comparación una muestra de cada uno de los tipos en que puede ser clasificada una plancha atendiendo a la densidad de cascarilla residual.

A continuación se reproduce la norma interna de la que ACERINOX dispone a tal efecto:

"Se comprobará tres veces a lo largo de la bobina y solamente en la cara superior de la línea, anotándose como tipo de cascarilla la más desfavorable de las tres comprobaciones. En la cara inferior, se comprobará visualmente (sin microscopio)".

En la Figura 2-1 se reproducen los patrones para clasificar la cascarilla, extraídos también de la mencionada norma; dichos patrones se muestran con 25 aumentos respecto al tamaño real en el acero.



Figura 2-1. Grado de cascarilla residual. (a) Planchas tipo A. (b) Planchas tipo B. (c) Planchas tipo C. Todas las imágenes fueron tomadas con 25 aumentos.

³ Realmente el operario procesa más área, como se verá más adelante en este mismo capítulo.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

La poca fiabilidad de la clasificación efectuada por humanos, y el hecho de que su equipo de inspección actual no sea capaz de estimar la presencia de cascarilla en las planchas de acero con suficiente fiabilidad, es lo que motiva a ACERINOX a buscar un sistema autónomo de detección de cascarilla residual independiente del mencionado sistema de Parsytec.

2.2 Fraccionamiento del Proyecto en Fases. Participantes.

Una vez definido el problema, los objetivos se pueden intuir fácilmente: se ha de construir un sistema en línea que sea capaz de detectar el defecto de *cascarilla residual de LC* en tiempo real (las planchas viajarán a una velocidad constante de 1m/s una vez instalado el sistema). Por motivos estratégicos se pretende que el sistema sea, además, versátil, de forma que sea sencillo hacer que en un futuro, se abarque la detección de otros tipos de defectos (incluso en otro tipo de materiales).

El proyecto global se ha segmentado en tres fases secuenciales:

- Fase I: estudio de viabilidad, análisis y determinación de los métodos básicos de detección y clasificación.
- Fase II: construcción de un prototipo experimental para la verificación en línea de los sistemas de detección, discriminación y clasificación.
 Determinación de las características constructivas y operativas del sistema industrial final.
- **Fase III**: construcción e instalación en la línea AP2 del sistema industrial de detección de cascarilla residual. Integración en el puesto de inspección.

Se tratarán de alcanzar los objetivos por dos vías no excluyentes: usando visión artificial y espectrometría. Ambas aproximaciones serán detalladas más adelante.

En el proyecto participan cinco socios tecnológicos:

- Universidad de Málaga (Departamento de electrónica de la Escuela Técnica Superior de Informática).
- Instituto de Automática Industrial de Madrid (IAI) del CSIC.

- Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE) del CSIC.
- T.C.C. S.A.
- AnaFocus S.L.

A continuación se describe la propuesta enviada a ACERINOX para llevar a cabo los objetivos planteados.

2.3 Fase I del proyecto global: Estudio de los procedimientos de detección de cascarilla residual.

2.3.1 Objetivo.

El objetivo de la fase I es la realización de un estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de la cascarilla residual que pueda instalarse en la salida de la línea de proceso de material procedente de LC, así como la realización de una propuesta para la construcción de un prototipo en la fase II teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta fase.

2.3.2 Descripción.

Esta primera fase del Proyecto se centra en la determinación de un procedimiento eficiente y económicamente viable para la detección de este defecto. Este método de detección debe reunir las siguientes características generales:

- Ha de discriminar suficientemente la presencia de cascarilla de otro tipo de defectos o características de la superficie.
- ✓ Ha de poder clasificar/determinar su gravedad en base a la densidad encontrada según los criterios de calidad establecidos en ACERINOX (ver Figura 2-1).
- ✓ Ha de poderse instalar en el entorno industrial concreto de la línea de proceso objetivo (AP2), y esto implica:
 - Robustez adecuada a las características del entorno.
 - Facilidad de mantenimiento.
 - Viabilidad económica de instalación y mantenimiento.

Los siguientes subapartados explican las actividades a realizar dentro de que cada aproximación (espectrometría/visión artificial) para alcanzar los objetivos propuestos.

2.3.2.1 Estudio de propiedades de emisión/absorción de los materiales.

El material que constituye la cascarilla residual está formado fundamentalmente por óxidos de hierro. En este bloque de trabajo se tratará de determinar si es viable detectar la densidad de las manchas de forma contrastada y robusta aprovechando diferencias sustanciales en las respuestas espectrales del acero y la cascarilla (en principio dentro del espectro visible o en las cercanías, evitando sistemas costosos si es posible). Para abordar este procedimiento se precisa realizar un análisis espectral de emisión/absorción/reflexión de la sustancia que constituye la cascarilla, y del acero limpio. Obviamente, la elección en su caso de esta alternativa no es excluyente de la que se explica en el apartado siguiente, sino complementaria: si, por ejemplo, la cascarilla presentara un pico de absorción en una longitud de onda correspondiente al color rojo, se podría usar una fuente de luz de este color en el sistema de iluminación del sistema visual. De esta forma se maximizaría la calidad de las imágenes tomadas, facilitando su posterior procesado.

El *IAI* es la institución encargada de llevar a cabo esta tarea.

2.3.2.2 Estudio en laboratorio de un sistema específico de adquisición de imágenes para la detección de cascarilla.

Las tareas a realizar en este caso consisten en la realización de experimentos de captación y procesamiento de imágenes mediante técnicas convencionales. Éstos han de demostrar la viabilidad de esta aproximación para la detección del defecto de cascarilla residual, a la vez que sirvan para determinar un conjunto de especificaciones mínimas del sistema de adquisición/procesamiento definitivo.

Los ensayos serán realizados sobre muestras de planchas en laboratorio y sin movimiento, pero atendiendo en lo previsible a las condiciones necesarias para que los resultados puedan extrapolarse al entorno de un prototipo real instalado en la línea AP2.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

El *IMSE* y AnaFocus S. L. realizarán esta tarea, la cual se desarrollará en el presente Proyecto Fin de Carrera.

2.3.2.3 Propuesta de la estructura del prototipo a montar en la Fase II.

Finalmente se pondrán en común los resultados de las tareas expuestas en los apartados 2.3.2.1 y 2.3.2.2, extrayéndose de aquí las conclusiones necesarias para proponer el diseño del prototipo de la fase II. Esta tarea será efectuada por la Universidad de Málaga y TCC S.A.

2.4 Especificaciones.

Las especificaciones de las que se dispone para llevar a cabo el proyecto son:

- <u>Tamaño mínimo de una mancha de cascarilla detectable⁴</u>: ha de pertenecer al intervalo [0.05, 0.1]*mm*.
- <u>El aspecto de la cascarilla</u> es muy oscuro, y de tamaño y forma aleatorios.
 Ésta se aloja entre el granulado presente en las planchas.
- Área a procesar: la necesaria para dar un resultado fiable. En principio, si se consigue una fiabilidad en cada muestra igual o mayor a la del operario, con abarcar más área que la que él inspecciona (menor de 36*cm*²), sería suficiente. Por otro lado, se ha de evitar el estudio de los bordes laterales de las planchas hasta una anchura de 250 mm. El motivo es que en los bordes se acumulan errores que no son indicativos de fallos en el proceso de producción.
- <u>Distancia de la cámara al objeto</u>: al menos 30*cm*. Por seguridad ante las ondulaciones superficiales de la línea de producción o por incidencias en el tren de laminado.
- <u>Velocidad de la plancha</u>: hasta 1m/s. Esta velocidad es, además, muy variable a lo largo del recorrido de una plancha.
- <u>Clasificación</u>: se tiene como especificación adicional el ser conservador: en caso de duda, se elegirá como tipo de plancha el peor.

⁴ El tamaño mínimo detectable es aquel por debajo del cual las manchas no se adquieren con fiabilidad. Es posible que se detecten manchas de un tamaño menor; y eso ocurre dependiendo del mencionado tamaño, de la posición relativa de éstas con respecto a los píxeles y del procesado.

Éstas son las especificaciones de las que se disponía en un principio para la realización del Proyecto, pero a lo largo del mismo, evolucionaron y se introdujeron algunos cambios significativos:

- ✓ Puesto que las reglas de clasificación son hasta el momento, subjetivas, se introduce como especificación del Proyecto global el analizar la aparición de cascarilla con el fin de proponer un conjunto de parámetros analíticos que permitan una mayor fiabilidad en la clasificación (recordar la subjetividad del criterio de clasificación expuesto en el apartado 2.1). Esto elimina de las especificaciones de la Fase I el diseñar el algoritmo de clasificación, y la centra en demostrar únicamente la viabilidad de la detección.
- Relacionada con la introducción de esta última especificación, también se añade el estudiar manchas de cascarilla del menor tamaño posible para contar con la máxima información en la extracción de características en el posterior estudio del algoritmo de clasificación. Otro motivo de gran importancia para el estudio de manchas de pequeño tamaño es la posibilidad de que, en determinados pasos del proceso de producción, dichas manchas provoquen otros defectos que sí serán visibles.
- ✓ No se podrá afirmar con seguridad que se podrá distinguir con claridad la cascarilla del resto de defectos, ya que no se dispone de muestras de la mayoría de ellos. En esta fase se tomarán imágenes de regiones que contengan cascarilla y otros defectos, y se tratarán de discriminar en la adquisición de la imagen. En caso contrario, se habrá de acudir a soluciones software, eventualmente cruzadas con los resultados obtenidos por el sistema de Parsytec.

2.5 Estudio preliminar del problema. Dificultades técnicas.

Este apartado contiene consideraciones previas que permiten comenzar a perfilar la solución y que tratan de localizar los aspectos más problemáticos en el desarrollo del Proyecto:

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

- ✓ El reducido tamaño de las manchas hará que se necesite usar cámaras de muy alta resolución⁵ si se quiere alcanzar una densidad alta de píxeles por unidad de longitud y abarcar un área apreciable (se verá en el capítulo 4); además, dicha resolución es variable con la naturaleza del procesado. En función de ésta, es posible que se haya de tomar un número elevado de píxeles por mancha (se verá más adelante), y que consecuentemente se haya de usar un sensor mayor para conseguir la misma densidad de píxeles.
- ✓ La especificación del área a procesar no es inmediata, ya que aún procesando más área que el operario, se pueden no obtener resultados mejores; influyen de forma importante factores subjetivos de éste, que antes de usar la lente, echa un vistazo general a la plancha, situando *a grosso modo* lugares en los que se encuentre localizada la cascarilla. Así, coloca la lupa en posiciones concretas usando información obtenida a priori. Sin embargo, es asumible según ACERINOX una cierta homogeneidad en la distribución espacial de la cascarilla en las planchas una vez que ésta comienza a aparecer. Además se puede aleatorizar evitando por ejemplo muestrear siempre en la misma coordenada horizontal (transversal al movimiento de la lámina), y esto llevaría a pensar en realizar muestreos en zig-zag o en sistemas multicámara (obviamente, para fases superiores).
- ✓ El tiempo de exposición será un parámetro importante en este proyecto, puesto que la plancha puede llegar a alcanzar velocidades de 1m/s; por tanto, dado el tamaño de la cascarilla residual, es posible que dicho tiempo haya de ser excesivamente corto para cámaras convencionales (esto también hace que sea necesaria una elevada potencia luminosa, y de nuevo se alude al capítulo 4 para un estudio más detallado de este problema).
- ✓ Otra cuestión de vital importancia (como ya se ha mencionado en el capítulo de Introducción y se repetirá varias veces a lo largo del

⁵ *Resolución* es un concepto muy amplio y multidisciplinar. En el contexto de este Proyecto podría ser usado con dos significados: número de píxeles del sensor de imagen y número de píxeles por unidad de longitud en el plano del objeto. Mientras no se indique lo contrario, cuando se hable de *resolución* en esta memoria, indicará número de píxeles del sensor, y se usará otra notación para la segunda acepción.

proyecto), es la iluminación. A la vista de las muestras disponibles, las planchas poseen cierto grado de brillo y un granulado cuyo "tamaño" es variable de una muestra a otra⁶. Esto favorece la aparición de sombras en la imagen, cuyo tamaño puede ser del orden e incluso mayor que el de las manchas de cascarilla. En ese caso, el algoritmo de detección puede complicarse en exceso, y hacer difícil (o imposible) la detección.

- El que las planchas presenten ondulaciones superficiales puede provocar problemas de enfoque y de iluminación. En el primer caso, se tratará de usar una óptica estándar con una profundidad de campo suficiente para la aplicación. En caso de que no se pueda conseguir, habría que acudir a ópticas con gran profundidad de campo o dotar a la cámara de un sistema de enfoque automático. El problema de la iluminación se tratará a nivel de software.
- Probablemente será difícil hacer que el sistema sea versátil, en cuanto a facilidad de ampliación para la detección de otros defectos. El motivo es que cuando se ha de llevar a cabo una clasificación de múltiples objetos generalmente se ha de usar una red neuronal o algún tipo de sistema experto o difuso, sobre todo si los objetos son muy diferentes unos de otros. En estos sistemas, durante la clasificación, se realiza una extracción de características, que requiere un número de píxeles por objeto relativamente elevado. En el caso de la cascarilla, debido a su reducido tamaño, esto dispara la resolución necesaria. Éste es el motivo por el cual el sistema de Parsytec no detecta este defecto (el resto tienen un tamaño sensiblemente mayor).

Todas estas cuestiones se tratan con más profundidad en los capítulos 4 y 5.

⁶ El tamaño del grano depende del grosor de las planchas, el cual es variable. El motivo es que el volumen de acero usado para la fabricación de éstas es constante, por lo que, teniendo en cuenta que AP2 es un tren de laminación, el espesor de las planchas varía con el aplanado (cuanto mayor sea éste, menos gruesa es la plancha y más pequeño es el grano).

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

3 Fundamentos teóricos.

Este capítulo repasa de una forma no exhaustiva las bases teóricas de todo lo que se va a estudiar en el Proyecto, salvo del apartado de procesamiento por software, que se estudiará íntegramente en el capítulo 5. En primer lugar se hablará de representación matemática de imágenes. Posteriormente se introducirán conceptos de óptica básica, y seguidamente se resumirán y explicarán las magnitudes radiométricas y sus unidades de medida. Para finalizar el capítulo, se tratará de forma también muy resumida los tipos de sensores que existen hoy día en las cámaras para aplicaciones científicas, industriales, de vigilancia, etc.

3.1 Representación de imágenes.

Normalmente, se entiende por imagen una función bidimensional de la intensidad luminosa f(x, y), donde x e y son las coordenadas espaciales. Es decir, el valor de f en un punto (x,y) es proporcional a la intensidad luminosa (o brillo) de una escena en ese punto. En los sistemas de procesamiento visual, las imágenes suelen ser discretizadas en las coordenadas espaciales y, normalmente, en brillo (imagen digital)⁷. De esta forma, una imagen será representada como una matriz cuyos índices de filas y columnas definen la posición de un punto en la imagen, y el correspondiente elemento define un valor proporcional a la intensidad luminosa en ese punto. Cada elemento de esa matriz se llama píxel *(picture element)*. Es evidente

⁷ En el caso en que el procesado lo lleve a cabo un dispositivo digital. Actualmente, existen chips que, además de sensar la imagen llevan a cabo un procesado analógico sobre ella [14].

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

que de esta forma se lleva a cabo un muestreo espacial de la imagen, y cada elemento de la mencionada matriz es una muestra.

$$f(x,y) = \begin{pmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \cdots & f(N-1,M-1) \end{pmatrix}$$
(3.1)

Si la imagen es también discretizada en brillo, cada elemento de f(x, y) contiene un valor entero V entre 0 (nivel mínimo de luminosidad) y $2^n - 1$ (nivel máximo de luminosidad), donde n es el número de bits usado en la codificación de las muestras.

Las imágenes que percibimos, o que pueden ser percibidas por un sensor visual, normalmente se forman con luz reflejada por los objetos. Por tanto, f(x, y)puede ser caracterizada por dos componentes multiplicativas, que son llamadas componente de iluminación y componente reflectiva, respectivamente; i(x, y) es la cantidad de luz presente en la escena, y r(x, y) indica la fracción de aquella que es reflejada hacia el sensor que captará la imagen. El modelo de imagen en ese caso, es:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y)$$
 (3.2)

Se ha hablado del muestreo espacial que se efectúa en el sensado de las imágenes, pero no es el único: si se trata de captar una escena dinámica, es obvio que ésta ha de ser muestreada temporalmente. De esta forma, un flujo continuo de información visual se convierte en un conjunto discreto de imágenes estáticas.

La frecuencia de muestreo temporal ha de adecuarse a la aplicación. Si sólo se desea reproducir una escena, es adecuada una frecuencia de 25 imágenes por segundo (normalmente, en el campo de la visión artificial se usa la notación *frames por segundo -fr/s--)*, ya que el ojo humano no es capaz de seguir una tasa mayor. Es decir, un flujo de 25fr/s es percibido por una persona como un flujo continuo de imágenes, y ésta es la frecuencia usada por los sistemas de reproducción de vídeo convencionales.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Pueden ser necesarias frecuencias mucho mayores en caso de que se quieran estudiar fenómenos de variación rápida, como puede ser el estudio de la trayectoria de un proyectil o, en seguridad automovilística, el estudio de choques.

3.1.1 Imágenes en color.

En las imágenes monocromas (o de niveles de grises), el valor de cada píxel es el resultado de integrar valores de luminosidad dentro de determinados rangos de tiempo, de espacio, y en toda la banda de frecuencia que el sensor es capaz de detectar. En este caso, la imagen es representada por una matriz como la de la ecuación (3.1).

La representación de imágenes en color es más sencilla de lo que puede parecer. El ojo humano ve todos los colores como combinaciones de otros tres, llamados *colores primarios* y que son: rojo, verde y azul. Por tanto, es suficiente dividir la banda de frecuencia en la que se integra luz en los intervalos correspondientes a dichos colores primarios.

Así, para obtener una imagen en color, se separan en el sensor óptico dichas componentes primarias, obteniéndose una imagen denominada comúnmente *imagen RGB* (en [15] el lector podrá encontrar una forma de conseguir dicha separación usando un único sensor). En este caso una imagen es una matriz de dimensiones *NxMx*3; es decir, cada píxel es una tripleta de números, cuyos valores son aproximadamente proporcionales a la intensidad luminosa integrada en cada banda.

A partir de la representación RGB se pueden obtener otras diferentes, que dan lugar a otros formatos, como son: MCY (*Magenta Cyan Yellow*), HSB (*Hue Saturation Brightness*), etc, cada uno con unas ventajas y características específicas (Ver por ejemplo, [16]).

3.1.2 Histograma.

El histograma es una función de la imagen que da información general acerca de la misma. Se define como

$$h = p(V)$$
 $V = 0, ..., 2^{n-1}$

donde p es el número de píxeles de la imagen cuyo nivel de gris es V.

Viendo el histograma se pueden percibir fácilmente aspectos tales como el que una imagen sea clara, oscura, o cuales son los niveles de gris predominantes en ella.

Como ejemplo, en la Figura 3-1 (a), se muestra el histograma de una imagen de 64 píxeles y 8 bits en la que todos ellos son negros (o sea, $h(0) = 64, h(V) = 0, V \neq 0$; todos en (b) son blancos $(h(255) = 64, h(V) = 0, V \neq 255)$ y en (c) la mitad son negros y la otra mitad son blancos (h(0) = h(255) = 32, h(V) = 0, $V \neq 0$, 255). Del histograma (d) de la misma Figura, se puede decir que proviene de una imagen predominantemente oscura (ya que los valores mayores del histograma se concentran en valores bajos de V). Por último, de (e) se puede afirmar que corresponde a una imagen con varios niveles dominantes; usualmente cada nivel corresponde a objetos distintos en la imagen o a objeto y fondo.



Figura 3-1. Histogramas de imágenes (a) con todos sus píxeles negros (b) con todos sus píxeles blancos (c) con la mitad de píxeles blancos y negros (d) con tonalidad oscura y (e) con varios niveles de gris dominantes.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

3.2 Óptica.

La óptica o sistema óptico se encarga de focalizar la luz que ha de formar la imagen en el sensor. Este apartado utiliza la óptica paraxial o de primer orden, que es aquella en la que los ángulos que forman los rayos con el eje óptico del sistema son lo suficientemente pequeños para que se pueda asumir la aproximación

$$sen(x) \approx x$$
 (3.3)

Esto conlleva la linealización de las ecuaciones que describen la trayectoria de los rayos [17] a través de un sistema óptico y permite calcular de forma sencilla datos del objeto real como tamaño y localización a partir de la imagen.

Cada punto de un objeto se puede considerar una fuente de luz que emite en todas las direcciones posibles (si el objeto es plano, en una semiesfera), y la información visual del objeto es la intensidad de cada una de esas fuentes de luz (imágenes monocromas). La lente del sistema óptico hace que algunos rayos divergentes que parten del objeto, intersecten de nuevo en un punto del plano de la imagen.

Puesto que sería imposible dibujar los rayos que parten de todos los puntos de un objeto (son infinitos), se busca obtener toda la información posible usando un pequeño número de rayos, como se indica en la Figura 3-2. En ella se muestra un sistema óptico formado por una lente, el plano objeto (plano donde se encuentra el objeto a sensar), el plano imagen (plano donde se formará la imagen) y el eje del sistema óptico.

Para formar la imagen de un objeto en el plano imagen, se siguen las siguientes reglas:

- Rayos provenientes del infinito (paralelos al eje óptico) pasan, tras atravesar la lente, por un punto común, llamado foco.
- Rayos provenientes del foco, salen hacia el infinito.
- Rayos que pasen por el centro de la lente no cambian de dirección.

3-25



Figura 3-2. Óptica. Reglas de trazado gráfico.

Con estas reglas, todos los puntos del plano objeto se proyectan en el plano imagen.

En la Figura 3-2 y en el desarrollo que sigue, se asume *la aproximación de lente fina*, esto es, que los rayos de luz no se desvían en altura mientras atraviesan la lente. Según la ley de Snell [18], eso no es cierto, ya que el cambio de índice de refracción al pasar del aire a la lente produce un cambio de dirección. Sin embargo, siempre que el grosor de la lente sea despreciable comparado con su distancia focal, este cambio será inapreciable.

3.2.1 Factor de magnificación y distancia al objeto.

De la Figura 3-2, y por semejanza de triángulos, se pueden extraer dos relaciones algebraicas para el modelo de lente fina:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \tag{3.4}$$

$$M = \frac{-h_{img}}{h_{obj}} = \frac{q}{p} \tag{3.5}$$

Tal como se ve en la figura, p es la distancia del objeto a la lente e ídem con q para la imagen. M es el factor de magnificación, el cual es la relación entre el tamaño

del objeto en los planos objeto e imagen (Nótese que h_{img} es negativa porque se forma debajo del eje óptico, de ahí el signo "–" que aparece en la definición de *M*).

Despejando q de (3.5) y sustituyendo en (3.4), se obtiene p en función de f y M; en términos más usuales, se puede calcular de forma inmediata la distancia a la que hay que situar una cámara para captar un objeto dados la focal de la cámara y la relación entre los tamaños del sensor y del objeto.

$$DO = f\left(1 + \frac{1}{M}\right) \tag{3.6}$$

Obviamente, puesto que p, q y f están relacionados por la ecuación (3.4), dados f y p (DO), q queda también fijado. Realmente, lo que viene fijado es f por la lente, y q por el tamaño del objetivo (distancia desde la lente al plano del sensor), que normalmente es variable, con lo que se tiene un rango de p (distancias al objeto) determinado.

3.2.2 Apertura, número F y profundidad de campo.

La *apertura* es la superficie que limita el ángulo de aceptación de rayos axiales (aquellos que van desde el punto del eje óptico que pertenece al plano objeto hasta el punto del eje óptico que pertenece al plano imagen). Normalmente esta superficie es un círculo (la propia lente o el iris de la óptica) y se toma la apertura como el diámetro de dicha superficie (ver la Figura 3-3).



Figura 3-3. Rayos axiales. Apertura.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Se define el *número* $F(F/\#)^8$ como la relación entre la focal de la lente y la apertura.

$$F/\# = \frac{f}{D_{apertura}} \tag{3.7}$$

Por definición, un F/# grande, implica una apertura pequeña (para una focal fija). Un sistema de este tipo es llamado lento, y el contrario rápido, en relación al tiempo de exposición que puede usarse en ellos: a igualdad de focal, un sistema con, por ejemplo F/3 requerirá más exposición que un sistema con F/1 para conseguir el mismo nivel de brillo.

La apertura está directamente relacionada con la *profundidad de campo* (*DOF*, del inglés *Depth Of Field*). Bien es sabido que cuando se captura una imagen se realiza una proyección del mundo real, que es tridimensional, en un espacio bidimensional. Por tanto, puesto que sólo los puntos del plano objeto se proyectan convenientemente enfocados en el plano imagen, aquellos que queden fuera de él, no aparecerán enfocados en la imagen (como curiosidad, en [19] se puede encontrar un uso constructivo del *DOF* en el campo de la visión artificial).

Si se observa la Figura 3-4 se puede apreciar cómo el punto *a* del plano objeto se proyecta en el *a*' del plano imagen. Sin embargo, los puntos *b* y *c*, que no se encuentran en el plano objeto, se transforman en superficies en la imagen; concretamente, en círculos de diámetro *d*, en amarillo en la figura. La más grande de ellas es denominada *círculo de confusión*. Nótese que, tal como muestra la Figura 3-5, cuanto menor sea la apertura (mayor F/#) menor será el diámetro del círculo de confusión y por tanto la imagen de mayor calidad.

La profundidad de campo se define como un intervalo de variación de la distancia al objeto para el cual el desenfoque no afecta significativamente a la medida de los datos; por tanto, los objetos que vayan a ser tratados por una determinada aplicación, se han de encontrar dentro de la zona conocida como profundidad de campo. Es decir, para cada aplicación se ha de decidir el tamaño del

⁸ La barra de F/# no indica división. La notación puede resultar confusa, pero es una de las más usadas. Como ejemplo, F/3 quiere decir que el valor del número F es 3.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

círculo de confusión permitido y posteriormente calcular la profundidad de campo asociada.







Figura 3-5. Profundidad de campo. F/# grande.

Para establecer la relación entre el diámetro del círculo de confusión y la profundidad de campo, se usará la Figura 3-4. Según la ecuación (3.4), para los puntos a, b y c respectivamente, se verifican las siguientes relaciones:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$
(3.8)

$$\frac{1}{p + DOF^{+}} + \frac{1}{q\left(1 - \frac{d}{D_{apertura} + d}\right)} = \frac{1}{f}$$
(3.9)

$$\frac{1}{p - DOF^{-}} + \frac{1}{q \left(1 + \frac{d}{D_{apertura} - d}\right)} = \frac{1}{f}$$
(3.10)

Despejando DOF^+ y DOF^- de las ecuaciones (3.9) y (3.10):

$$DOF^{+} = \frac{pd(p-f)}{fD_{apertura} - d(p-f)}$$
(3.11)

$$DOF^{-} = \frac{pd(p-f)}{fD_{apertura} + d(p-f)}$$
(3.12)

Finalmente, se sustituye la apertura por un dato más accesible, F/#, mediante la relación que aparece en la ecuación (3.7) y se renombra p como la distancia al objeto, DO. Se obtiene:

$$DOF^{+} = \frac{DO \cdot d \cdot F / \# (DO - f)}{f^{2} - d \cdot F / \# (DO - f)}$$
(3.13)

$$DOF^{-} = \frac{DO \cdot d \cdot F / \# (DO - f)}{f^{2} + d \cdot F / \# (DO - f)}$$
(3.14)

las ecuaciones (3.13) y (3.14) pueden ser particularizadas para el caso de cámaras con sensores discretos (CCD o CMOS). En ese caso, un valor adecuado para el diámetro máximo del círculo de confusión sería el tamaño físico de un píxel en el plano de la imagen, TAM_{pix} . Así, dado un valor razonable de TAM_{pix} se verifica, para un amplio conjunto de aplicaciones:

$$f^2 \gg TAM_{pix} \cdot F / \# (DO - f) \tag{3.15}$$

En concreto, para los siguientes valores: f = 55 mm, $TAM_{pix} = 10 \mu m$, F/2.5 y DO = 300 mm, se obtiene una diferencia de tres órdenes de magnitud.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Así, se pueden reformular (3.13) y (3.14) y escribir una fórmula global para la profundidad de campo:

$$DOF^{+} \simeq \frac{DO \cdot TAM_{pix} \cdot F / \# (DO - f)}{f^{2}}$$

$$DOF^{-} \simeq \frac{DO \cdot TAM_{pix} \cdot F / \# (DO - f)}{f^{2}}$$

$$\Rightarrow DOF = DOF^{+} + DOF^{-} \simeq \frac{2DO \cdot TAM_{pix} \cdot F / \# (DO - f)}{f^{2}}$$
(3.16)

Si en (3.16) se sustituye (3.6), se obtiene una ecuación ampliamente usada para calcular la profundidad de campo en cámaras con sensores discretos.

$$DOF = \frac{2TAM_{pix} \cdot F / \#(1+M)}{M^2}$$
(3.17)

En la Figura 3-6 se ha representado la profundidad de campo en función del factor de magnificación y para varios valores de F/#. Como se puede comprobar, aumenta con F/# y disminuye con M.

Es necesario mencionar que los cálculos teóricos acerca de la profundidad de campo arrojan resultados no demasiado próximos a la realidad (fundamentalmente porque dichos cálculos dependen de definiciones muy cualitativas), siendo necesario acudir al fabricante de la óptica para obtener información acerca de este parámetro, o adquirir instrumentos de medida de la profundidad de campo [20].



Figura 3-6. Curvas de la Profundidad de Campo en función del Factor de Magnificación para F/4, F/5.6, F/8 y F/16.

3.3 Nociones básicas de radiometría.

La radiometría es necesaria para poder entender de forma cuantitativa el flujo luminoso en un sistema óptico. Fundamentalmente, lo que se busca es la cantidad de potencia de la fuente luminosa que llega a la superficie del detector.

En la Tabla 1 se encuentran las principales magnitudes radiométricas y sus unidades, y se explican a continuación.

- Energía y potencia no necesitan explicación.
- La intensidad es la cantidad de potencia radiada por unidad de ángulo sólido, y normalmente caracteriza las fuentes puntuales.
- La irradiancia y la excitancia tienen las mismas unidades, pero interpretaciones diferentes. La irradiancia caracteriza la densidad espacial de potencia asociada a una superficie que recibe potencia, mientras que la excitancia se refiere a una superficie que emite potencia.

- La radiancia se usa para caracterizar fuentes extensas, y es la potencia radiada por unidad de área y por unidad de ángulo sólido.

Magnitud	Símbolo	Unidades
Energía	Q	J
Potencia	φ	W=J/s
Intensidad	Ι	W/sr
Irradiancia	М	W/cm^2
Excitancia	L	W/cm ²
Radiancia	E	$W/(cm^2sr)$

Tabla 1. Magnitudes radiométricas.

Un ejemplo de aplicación muy sencillo y que será de utilidad más adelante, es el cálculo de la potencia recibida por un sensor de imagen dada la excitancia del objeto.

En la Figura 3-7 se muestra un esquema de la situación, y los parámetros que en ella aparecen son:

A_{objeto}: área del objeto (que se supone plano) que es visible por la cámara.

 A_{lente} : área de la lente (se supone que la lente concentra toda la energía que recibe en el sensor).

d: distancia entre el objeto y el diafragma de la cámara.

L: excitancia del objeto.

Así, es fácil comprobar que se puede obtener la potencia recibida por la lente usando la ecuación

$$\varphi_{lente} = \frac{L A_{objeto} \Omega_{obj-lente}}{2\pi}$$
(3.18)



Figura 3-7. Ejemplo de aplicación de cálculo radiométrico. Potencia recibida por un sensor de imagen dada la excitancia de un objeto plano.

En esta expresión se supone que la superficie del objeto irradia en todas las direcciones (dentro de la semiesfera existente en la cara que está siendo observada) de forma constante, por lo que $L/2\pi$ es la radiancia del objeto.

Por otro lado, $\Omega_{obj-lente}$ es el ángulo sólido del objeto a la lente, y resulta ser, en este caso

$$\Omega_{obj-lente} = \frac{A_{lente}}{d^2}$$
(3.19)

Para la obtención de este resultado se ha asumido que $d \ll A_{objeto}/2$, lo que permite suponer que $\Omega_{obj-lente}$ es constante para todos los puntos del plano objeto⁹.

La definición de ángulo sólido y la obtención de este resultado se puede consultar en, por ejemplo, [21].

Teniendo en cuenta (3.19), (3.18) resultar ser:

$$\varphi_{lente} = \frac{L A_{objeto} A_{lente}}{2\pi d^2}$$
(3.20)

 $^{^{9}}$ En el caso concreto de este Proyecto es apropiado, puesto que la distancia de la lente a la plancha de acero ha de ser, para cumplir las especificaciones, de 30cm, cantidad mucho mayor que el tamaño de un sensor electrónico de imagen.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

En [22] se pueden encontrar más ejemplos de aplicación dentro del campo de la visión artificial.

3.4 Sensores de imagen electrónicos.

En este apartado se hará una introducción muy simple y cualitativa a los sensores electrónicos de imagen que usan las cámaras actuales, tanto de vídeo como de fotografía.

La práctica totalidad de estos sensores están construidos en silicio. Cuando en un cristal de silicio incide luz, los fotones interactúan con los átomos que forman la red cristalina, cediéndoles su energía. Esta energía es función de la longitud de onda de la luz según la expresión

$$E_{foton} = \frac{hc}{\lambda_{luz}}$$
(3.21)

donde *h* es la constante de Planck (h = 6.67E-34J/s), y *c* la velocidad de la luz en el vacío (c = 3E8m/s).

Los electrones usan esta energía para franquear la banda prohibida, generándose un par electrón hueco que puede contribuir a la generación de una corriente eléctrica.

El uso del silicio en la fabricación de sensores de imagen no es algo fortuito; es debido a que el rango de longitudes de onda al que éste es "sensible" se encuentra centrada en la parte visible del espectro [23].

En todo semiconductor existe un proceso contrario a la generación, que es la recombinación. La tasa de recombinación es proporcional al producto de las concentraciones de electrones y huecos; por tanto, el que aumenten éstas debido a la generación óptica hace que aumente también la recombinación.

Con todo esto, para detectar una señal eléctrica indicativa de la cantidad de luz que incide en el cristal, se necesita:

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

- Separar los pares electrón hueco fotogenerados para minimizar la recombinación.
- Llevar a esos portadores a contactos donde puedan ser detectados.

La forma más usual de conseguir esos objetivos es formando una unión p-n en la región activa (donde incide la luz) y polarizándola inversamente. Así, los pares electrón hueco son separados por el campo eléctrico presente en la región de deplexión y transportados a los contactos (ver Figura 3-8). Los portadores generados a una distancia de la unión menor que una longitud característica de difusión también pueden contribuir a la corriente fotogenerada; de hecho, debido al pequeño espesor de la región de deplexión, un elevado número de portadores son generados fuera de ella.

El parámetro que indica el número de portadores que contribuyen efectivamente a la corriente fotogenerada es la *eficiencia cuántica*, que se define como

$$\eta = \frac{N_e^{pixel}}{N_{ph}^{pixel}} \tag{3.22}$$

Es decir, la eficiencia cuántica es la fracción de los fotones que inciden en el píxel que generan un par electrón – hueco que es colectado.

La corriente fotogenerada de la forma descrita tiene un valor muy pequeño [24], de ahí que se colecte carga durante un cierto periodo de tiempo, llamado *tiempo de integración* o de *exposición*, cuya relación con la carga colectada y la corriente fotogenerada es muy sencilla y se puede apreciar en la ecuación (3.23).

$$Q_{col} = i_{foto} T_{exp} \tag{3.23}$$

Aunque el uso del diodo como detector es bastante general, el sensado y transporte de esta carga varía sustancialmente según la tecnología de fabricación. A continuación se introducirán las dos tecnologías de fabricación de sensores visuales más usadas en los últimos años.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.


Figura 3-8. Movimiento de portadores en una unión p-n inversamente polarizada.

3.4.1 Sensores CCD.

En este tipo de sensores, la carga generada se almacena en condensadores MOS. Un condensador MOS se forma depositando una capa de polysilicio llamada *puerta*, sobre otra de óxido de silicio que está sobre el sustrato de la oblea.

Si se aplica una tensión positiva en la puerta con respecto al sustrato (en caso de que éste sea tipo p), se genera un campo eléctrico que atrae a los electrones hacia la puerta y empuja a los huecos hacia el sustrato. Esto genera una región de almacenaje llamada *pozo de potencial*, cuyo tamaño está controlado por la mencionada tensión de puerta.

Los electrones que son atraídos hacia la puerta se acumulan en la interfaz óxido/sustrato. Esto es un problema, ya que en ella hay una elevada concentración de "trampas"; éstas son estados energéticos accesibles dentro de la banda prohibida y que aparecen por la discontinuidad en la red cristalina asociada a la transición entre materiales. La existencia de estos estados hace que a temperatura ambiente haya un número apreciable de pares electrón hueco que contribuyen a la corriente fotogenerada incluso en ausencia de luz, lo que degrada la calidad del sensor. Para evitar este problema, se trata de mover la región de almacenamiento lejos de la mencionada interfaz, añadiendo una delgada capa de silicio con dopaje n bajo la capa de óxido y que está vacía de carga en condiciones normales de operación. Los dispositivos así conseguidos se llaman *Buried Channel Devices* [25].

Ya se ha visto que la carga que se genera ópticamente se almacena en las capacidades MOS descritas. Ahora bien, si el pozo de potencial "se llena", y trata de almacenar más carga de la que es capaz, ésta se "derramará" y afectará al contenido de capacidades adyacentes (este fenómeno se denomina *blooming*, y se puede observar un ejemplo en el apéndice Apéndice A, apartado A.2). Usualmente, antes de que esto ocurra, se transporta la carga hacia algún punto donde pueda ser sensada. Para efectuar este transporte se usan los llamados registros CCD (*Charge Coupled Device*).

Un registro CCD está formado por un array de capacidades MOS, de forma que la carga va pasando secuencialmente de una a otra hasta el nodo de salida. En él se efectúa la conversión carga-tensión, obteniéndose una señal de tensión proporcional (aunque pueden conseguirse otras funciones) a la luz incidente en la región activa del diodo.

Llegados a este punto, ya se puede mostrar como es, a grandes rasgos, la estructura de un sensor de imagen CCD, la cual puede ser observada en la Figura 3-9.

Cada elemento de la matriz es un píxel, que contiene básicamente un diodo y una capacidad MOS. Las capacidades se agrupan en registros CCD, de forma que cada columna es un registro que transfiere la carga sensada en cada píxel durante el tiempo de exposición hacia la última fila, que también es un registro CCD, pero que lleva la carga esta vez hacia el nodo de salida.



Figura 3-9. Estructura de un sensor CCD.

El proceso está gobernado por, al menos, un reloj. En cada ciclo, la carga se transfiere por filas un solo píxel, con lo que cada fila actualiza sus capacidades. Sin embargo, la carga almacenada en la última fila ha de pasar en serie por el nodo de salida antes del siguiente ciclo, por lo que se requiere otro reloj n veces más rápido que el anterior, donde n es el número de columnas (normalmente es éste el primario, y el que temporiza el transporte de carga en la matriz se obtiene por división a partir de él).

Otro aspecto importante de los sensores CCD es que la circuitería de sincronización y polarización está fuera del chip, como se puede ver en la Figura 3-9. Esto hace que este tipo de sensores sean menos compactos que los CMOS, como se verá más adelante.

La máxima tasa de transferencia de un CCD está limitada por la llamada *eficiencia de transferencia de carga* [25], que es la fracción de carga que se transfiere con éxito de una puerta a la siguiente (es obvio que siempre quedará una carga residual en una puerta, debido a imperfecciones en el material y a la velocidad finita de los electrones). Por otro lado, este error es acumulativo, por lo que ha de ser reducido mediante técnicas de diseño específicas y un cuidado proceso de fabricación.

En la Figura 3-10 se puede observar un esquema detallado de un píxel en un sensor CCD. El diodo tiene a ambos lados sendas puertas, cada una con una funcionalidad distinta:

 PR (Píxel Reset) es utilizada para drenar los restos de carga que queden en el diodo antes de empezar una exposición. Además, durante la exposición, impide el desbordamiento de carga hacia píxeles adyacentes.



Figura 3-10. Estructura genérica de un píxel en sensor CCD.

- TCK (Transfer Gate) habilita el paso de la carga detectada por el diodo hacia la capacidad MOS. Durante la integración, TCK está "cerrada", y la carga que está colectando el diodo no afecta a la que está siendo transferida por la capacidad MOS (recordar que forma parte de un registro CCD). Una vez finalizan la transferencia y la integración, se "abre" TCK, y la carga detectada pasa a la capacidad para ser transferida.

Otro problema que aparece en este tipo de sensores es que durante la transferencia de carga se sigue integrando luz, y la carga generada puede perturbar a la que se está transportando. Para evitar este problema se siguen varias estrategias de diseño, que llevan a distintos tipos de sensores:

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

- Tipo Frame: el sensor está formado por dos matrices de píxeles, pero sólo una de ellas es activa¹⁰. Cuando se toma una imagen, ésta se va transfiriendo por filas a la matriz pasiva, donde ya no interfiere la luz. El problema de este esquema es que mientras se produce la transferencia, los píxeles de la matriz activa siguen recibiendo luz, por lo que la imagen final se verá distorsionada en cualquier caso (aunque el reloj de transferencia a la matriz pasiva es mucho más rápido; en la mayor parte de los casos es el mismo que el del CCD de la salida). En la Figura 3-11 se puede ver un esquema de transferencia tipo frame para una matriz de 5x5 píxeles.



Figura 3-11. Transferencia tipo Frame.

- Tipo Interline: para evitar el problema anterior, sería deseable que los píxeles que están siendo transferidos no reciban luz. En esto se basa este esquema; en él se encuentran intercaladas columnas activas y pasivas, de forma que se transfiere la carga de las columnas activas a las pasivas, y ya en éstas se desplaza por filas hacia el registro de desplazamiento. Esto soluciona el problema anterior, pero si la imagen que se está tomando es

¹⁰ En este contexto se usará píxel activo/pasivo en función de si puede recibir luz o no (píxel no escudado/escudado).

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

muy luminosa, se pueden producir problemas de crosstalk¹¹ durante la transferencia. Ver Figura 3-12.



Figura 3-12. Transferencia tipo Interline.

- Tipo Frame-interline: es una combinación de los dos tipos anteriores, y minimiza el tiempo que la carga está en los píxeles adyacentes a las columnas activas, lo que también minimiza los efectos de crosstalk. Este esquema casi no se usa comercialmente, debido al exceso de área (y todo lo que ello conlleva). En la Figura 3-13 se puede observar de forma esquemática la arquitectura frame-interline.



Figura 3-13. Tipo Frame-Interline.

Se puede encontrar más información acerca de las distintas estrategias de transferencia de carga en [26].

¹¹ Se conoce como crosstalk al fenómeno por el que un par electrón hueco generado en un píxel se difunde hasta otro vecino, donde es sensado.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

3.4.2 Sensores CMOS.

La idea es usar tecnologías CMOS estándar para realizar los sensores de visión. Esto presenta dos ventajas fundamentales que dan lugar a otras de igual o mayor importancia:

- Menor disipación de potencia. Debido, fundamentalmente, a las menores tensiones de alimentación.
- Se consiguen escalas de integración muy elevadas en comparación con las de tecnologías CCD.

Gracias a la alta escala de integración y al menor consumo, se puede pensar en incluir en el mismo chip circuitería que en CCD era exterior al sensor, como las de polarización y temporización. Por el mismo motivo, en este tipo de sensores se pueden incluir convertidores A/D en el propio píxel e incluso elementos de procesamiento (procesadores de plano focal).

Otra gran ventaja de este tipo de sensores frente a los CCD es que disponen de acceso aleatorio al valor de los píxeles, lo que los hace, normalmente, más rápidos. Esto contribuye también a la diferencia de consumos de potencia, ya que los CCD han de ser polarizados con elevadas tensiones para mejorar la eficiencia de la transferencia de carga, y por otro lado, las líneas que contribuyen a esta transferencia están la mayor parte del tiempo conmutando.

La Figura 3-14 muestra el esquema típico de un sensor CMOS. Aunque es bastante general, corresponde a una arquitectura concreta, denominada de *píxel activo*. Los sensores basados en ella son llamados *APS (Active Pixel Sensor)*. En cualquier caso, la arquitectura de un sensor CMOS puede variar bastante de un fabricante a otro, y es un campo de investigación abierto.

En el mencionado esquema, la conversión carga – tensión se lleva a cabo en el píxel, a diferencia de lo que ocurría en los sensores CCD, en las que hay un solo nodo de conversión para todo el chip. Esto puede resultar una mejora en la responsividad (cantidad de señal por unidad de energía óptica) si se incluyen en el píxel amplificadores de alta ganancia y bajo consumo. Sin embargo, supone hasta el

momento un serio problema de uniformidad de los píxeles (por variaciones en la tensión de offset y en la ganancia de los amplificadores debido al desapareamiento).



Figura 3-14. Estructura básica de un sensor CMOS de píxel activo.

En la Figura 3-15 se muestra una estructura *photogate*, que es un caso particular de píxel activo. Se basa en la celda CCD y funciona como sigue: la señal detectada es almacenada bajo la puerta PG (*PhotoGate*), la cual está polarizada a nivel alto para crear el pozo de potencial durante el tiempo de integración. Una vez finalizado éste, se polariza la puerta TG (*Transfer Gate*), y la carga pasa al diodo, que cambia su tensión en proporción a la carga detectada (previamente el diodo es reseteado a V_{dd}). Como buffer de esta tensión se usa un seguidor por fuente formado por los transistores M_1 y M_2 (*driver* y *load*, respectivamente). *MR* es un selector de filas.

Pero no todo son ventajas: el rango dinámico de un sensor CMOS suele ser peor que el de un CCD, en parte porque son más ruidosos por el aumento considerable de circuitería on - chip. Ya se ha hablado de la no uniformidad de los píxeles en ausencia de luz; y otra desventaja importante es que para conseguir que todos los píxeles sean expuestos al mismo tiempo, necesita circuitería adicional en el píxel; y esto es a costa de área activa, y por tanto, de sensibilidad (ver tipos de *Shutter* en el Apéndice A, apartado A.2).

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 3-15. Esquema con la estructura básica de un píxel en tecnología CMOS.

Actualmente, el mercado está dominado por la tecnología CCD, aunque, poco a poco la CMOS va teniendo más presencia en determinadas aplicaciones por su compacidad, velocidad, bajo consumo y bajo precio.

4 Sistema de adquisición de imágenes.

Como ya se expuso en el capítulo 2, para demostrar la viabilidad del sistema, se realizarán ensayos sobre muestras de láminas en laboratorio y sin movimiento, pero atendiendo en lo que es previsible a las condiciones reales que se pueden dar en el entorno de un prototipo real instalado en la línea AP2. Así, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos en la adquisición de las imágenes:

- Resolución mínima necesaria: atendiendo al tamaño mínimo de las manchas de cascarilla, determinar qué longitud del plano objeto (plancha) debe captar un píxel de la cámara.
- Aspectos ópticos: en este caso se han de cubrir aspectos como la distancia física entre la cámara y la plancha de acero, la distancia focal, la profundidad de campo, el ángulo de observación, etc.
- Tiempo de exposición máximo: puesto que realmente las planchas se desplazan a la velocidad indicada en el apartado 2.4 (1m/s), se hace necesario utilizar tiempos de exposición suficientemente cortos para evitar que las imágenes puedan resultar difuminadas.
- Tipo de iluminación: si ha de ser pulsante o continua, intensidad necesaria, direccional o no, ángulo de incidencia, etc.
- Mecanismos de sincronización en caso de iluminación pulsante.

Para cada uno de estas cuestiones se presentarán dos apartados, uno en el que se explica como se han solucionado en el trabajo de laboratorio de la fase I, y otro en el que se anticipan las tareas que se han de realizar, y los problemas que pueden aparecer en fases posteriores. La diferencia entre ambos casos es que en el primero se utilizará un equipo doméstico, y en el segundo se contará con uno especializado de visión artificial.

De los resultados de este capítulo se obtendrán datos para realizar una propuesta del sistema de adquisición de imágenes del prototipo a realizar en la Fase II; dicha propuesta se desarrolla en el capítulo 6.

4.1 Resolución.

En el apartado 2.4 se vio que el tamaño mínimo de una mancha ha de estar entre 0.05 y 0.1mm. Por otro lado, para que el procesado sea adecuado es conveniente que en las imágenes que se tomen haya varios píxeles por mancha. En principio se ha asumido que son suficientes 4 píxeles por mancha (2x2), asumiendo que si al diseñar los algoritmos se llega a la conclusión de que realmente no lo son, habrá que aumentar ese número.

Con estos datos se puede calcular cuanto mide un píxel en el plano de la plancha (plano del objeto), o, equivalentemente, la densidad de píxeles por milímetro (*PPM*) necesaria para esta aplicación:

$$PPM = \frac{NUM}{TAM_{mancha}} \tag{4.1}$$

Donde *NUM* es el número de píxeles por mancha en cada dirección, y TAM_{mancha} el tamaño mínimo detectable de mancha. Por tanto, para el intervalo de tamaños mencionado en párrafos anteriores, *PPM* ha de tener un valor de entre 20 y 40pixeles/mm.

Obviamente, la inversa de *PPM* es el tamaño del píxel en el plano objeto, el cual pertenece, por tanto, al intervalo [0.025, 0.050]*mm*.

4.1.1 Resolución en la Fase I.

La cámara utilizada para la toma de imágenes en esta fase ha sido una cámara de vídeo doméstico digital que permite la adquisición de fotografías digitalizadas y

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

su posterior volcado a un ordenador. La resolución de estas imágenes (en términos de número de píxeles) es VGA, es decir, 640x480 puntos, y se codifican con $n = 8bits^{12}$.

El procedimiento será tomar una imagen de un recuadro de acero cuyo tamaño sea adecuado para obtener resoluciones dentro del intervalo de *PPM* calculado en el apartado anterior. Esto se consigue con un sencillo cálculo.

En la dirección horizontal, el mencionado cuadro ha de medir:

$$HOR = \frac{640}{PPM} \tag{4.2}$$

Y en la dirección vertical:

$$VER = \frac{480}{PPM} \tag{4.3}$$

Lo que resulta es: $HORxVER = 16x12mm^2$ para $TAM_{mancha} = 0.05mm$ y $HORxVER = 32x24mm^2$ para $TAM_{mancha} = 0.1mm$.

Todo esto se trata de explicar en la Figura 4-1 de forma gráfica.

Aunque se han alcanzado valores dentro del intervalo previsto, no ha sido posible alcanzar la densidad de píxeles por milímetro más alta requerida en esta fase (que permite observar un tamaño de mancha mínimo de 0.050*mm*). El problema es que la óptica de la cámara usada, al no estar diseñada para estos fines, no permite enfocar cuadros del tamaño necesario a una distancia apropiada que permita una buena iluminación. Esto, sin embargo, no es crítico en esta fase, ya que es solucionable en fases posteriores; si en éstas se llega a la conclusión de que es necesario detectar manchas de 0.050*mm* o incluso menores, no habrá más que adquirir una cámara con mayor resolución o una óptica adecuada para fotografíar un área más pequeña (puede parecer que cambiar la óptica es mucho más barato que cambiar la cámara, pero captar un área muy pequeña puede dar problemas de iluminación como se verá al final de este mismo capítulo).

 $^{^{12}}$ De aquí en adelante, se supondrá, a menos que se indique lo contrario, que todas las imágenes que aparecen en esta memoria son de tamaño 640x480pixeles y 8 *bits*, con lo que sus valores estarán comprendidos entre 0 (negro) y 255 (blanco).

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Volviendo al tema que nos ocupa, para la toma de las imágenes se han cubierto las muestras con cartulina negra en la que se han abierto ventanas de $32x24mm^2$ (correspondiente a un tamaño de mancha mínimo de 0.1mm), para conocer adecuadamente el área fotografiada. Así, el procedimiento ha sido tomar la imagen de una región lo más pequeña posible que estuviera contenida en ese cuadro, sabiendo que no iba a poder ser tan pequeña como para alcanzar el *PPM* máximo. Por tanto, se verifica:

$$(20 < PPM_{REAL} < 40)$$
 pixeles / mm $\Leftrightarrow (0.025 < Tamaño de pixel < 0.050)$ mm (4.4)



Figura 4-1. Resolución en la toma de imágenes para el estudio de viabilidad.

En particular, en las imágenes tomadas se ha obtenido un valor mínimo de *PPM* de alrededor de 30 *píxeles/mm*.

Con todo ello, el tamaño mínimo detectable obtenido en esta fase está entre 0.067 y 0.1mm.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

4.1.2 Resolución en fases posteriores.

En este caso, se procederá en la manera inversa: se impondrá la densidad de píxeles deseada, y se calculará el área abarcada con una resolución dada. Este es el procedimiento lógico, que se puede llevar a cabo en este caso puesto que con equipo especializado se pueden controlar todos los parámetros deseables en la toma de una imagen.

En el análisis que se va a realizar, se buscará un cubrimiento completo de la plancha, para ver la dimensión del sistema que se está tratando.

Si se asume un tamaño de mancha mínimo detectable igual a 0.05mm, o equivalentemente, un PPM = 40pixeles/mm, y se usa una cámara con sensor de área de 1024x1024 píxeles de resolución (que es un valor medio – alto), se abarca en cada dirección:

$$l = \frac{resolucion}{PPM} = 25.6mm \tag{4.5}$$

Una cámara de alta gama con esa resolución puede llegar a captar unos 40 *frames* por segundo (veáse [27]), o lo que es lo mismo, un *frame* cada 25*ms*; en ese tiempo, sabiendo que la plancha tiene una velocidad de 1*m/s*, ésta avanza 25*mm*. Por tanto, se sensa un cuadrado de 25.6*mm* de lado cada 25*mm* (ver la Figura 4-2). Luego se consigue un cubrimiento completo en la dirección de movimiento de la plancha (en adelante, dirección longitudinal). Sin embargo, en la dirección transversal al movimiento el cubrimiento es sólo del 1.6% (asumiendo la máxima anchura, que, se recuerda, es 1600*mm*), con lo que serían necesarias 63 cámaras para cubrir el área completa de la plancha.



Figura 4-2. Cubrimiento logrado con una cámara de 1024 x 1024 píxeles a una velocidad de captura de 40 fr/seg.

Si se considera 0.1 mm como tamaño mínimo de mancha, la mejora en todos estos resultados es de al menos el doble: en ese caso, l = 51.2mm, y se cubre un 3.2% de la anchura de la plancha, con lo que hacen falta 30 cámaras para completar el cubrimiento en la dirección transversal. Y se mejora aún más en dirección longitudinal, puesto que en este caso hay un solapamiento en la toma de las muestras de alrededor de un 50%. Esto permite pensar en esquemas de muestreo como el que aparece en la Figura 4-3. En ese caso, el área procesada con una sola cámara es aproximadamente el 7.5 % de la plancha completa. Este tipo de muestreo requiere movimiento de la cámara en la dirección transversal al de las planchas, por lo que será necesario un sistema mecánico con varios grados de libertad que se encargue de esta tarea.

Hay que resaltar que se puede disponer de cámaras de mucha más resolución, pero, por una parte, el número de *frames/s* disminuye, y por otra, el precio de éstas aumenta exponencialmente, alcanzando cifras de alrededor de $35.000\mathcal{E}$, frente a los $6.000\mathcal{E}$ que cuesta la cámara con la que se han realizado los cálculos.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 4-3. Esquema de muestreo en zig-zag con cámara de 1024 x 1024 y 40*fr/seg*. PPM = 20*píxeles/mm*.

Si la cámara cuenta con un sensor lineal¹³, los resultados mejoran: un sensor de resolución media-alta en este caso puede ser de 4096 píxeles, y en ese caso (PPM = 20 pixeles/mm):

$$l = \frac{resolution}{PPM} = 204.8mm$$

Con lo que se tiene un cubrimiento del 12.8 % en dirección transversal, y un 100 % en dirección longitudinal, si la velocidad de la cámara es suficiente; para que lo sea, la frecuencia de adquisición y volcado de línea ha de ser [28]:

$$f_{scan} = v_{lam} \cdot PPM = 20kHz$$

¹³ Ver el apéndice Apéndice A para obtener más información sobre los sensores lineales.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

que es un valor que se puede cubrir con cámaras lineales existentes en el mercado (por ejemplo, [29]). En este caso, un array de 1 x 8 cámaras es suficiente para llevar a cabo un cubrimiento completo de la plancha.

Desgraciadamente, para la sincronización de la adquisición con el movimiento de la lámina, haría falta un encoder de alta precisión (recordar que la velocidad de las planchas es muy variable). Este aumento de complejidad, y sobre todo, la necesaria intervención en la línea de producción, no parecen justificables en las fases de estudio y demostración de viabilidad.

Aunque se ha hecho este estudio para conseguir un cubrimiento completo de la plancha, como parte de los objetivos de fases posteriores está el determinar si un muestreo es suficiente para obtener resultados fiables, como todo parece indicar. No obstante, en el capítulo 6, se incluirá el cubrimiento completo como alternativa, y su coste.

4.2 Aspectos ópticos.

4.2.1 Aspectos ópticos en la Fase I.

Como se ha descrito en el apartado anterior, en esta primera fase las imágenes se tomaron con una cámara digital estándar. Por cuestiones prácticas, las imágenes fueron tomadas usando el enfoque automático del que dispone la cámara y fijando la distancia más cercana posible que permitiera una iluminación adecuada. Como grado de libertad, se usó el *zoom* óptico.

4.2.2 Aspectos ópticos en fases posteriores.

Con vistas a demostrar la viabilidad del proyecto global, es preciso demostrar que se pueden adquirir imágenes razonablemente adecuadas en las condiciones en las que se habrán de tomar en la factoría de ACERINOX.

Se partirá de una distancia focal común para este tipo de aplicaciones (f = 55mm) y se obtendrá la distancia al objeto (*DO*) usando la ecuación (3.6).

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Si en el plano objeto ha de haber 40pixeles/mm (para un tamaño de mancha de 0.05mm), en dicho plano un píxel mide 0.025mm. Luego se puede extraer el factor de magnificación (*M*, ver la ecuación (3.5)) de la relación entre el valor anterior y el tamaño físico de un píxel, que será tomado igual a $10\mu m$ (valor medio de las cámaras comerciales estudiadas). Así:

$$M = 0.4$$

Con lo que, introduciendo f y M en (3.6)
$$DO = 192.5 mm$$
 (4.6)

Es conveniente que la distancia al objeto sea de alrededor de 300 mm, luego si se toma un tamaño mínimo de mancha de 0.05 mm, se habrá de acudir a ópticas con distancia focal de al menos 85 mm.

Si se repiten los cálculos para $TAM_{mancha} = 0.1mm$, se obtiene un factor de magnificación de 0.2 y una distancia al objeto con f = 55mm de 330mm, valor que sí entra en las especificaciones.

Para calcular la profundidad de campo, se introducen los valores que ya se han usado para calcular los anteriores parámetros y un F/# de 16^{14} en la ecuación (3.17), y se obtiene un resultado de 9.6*mm*.

Esto puede ser problemático debido a las ondulaciones laterales en las planchas. No obstante, en nuestra visita a las instalaciones de ACERINOX se propuso la instalación del prototipo en un rodillo de la línea AP2, lo que elimina en gran parte este problema, al pasar la plancha pegada a él.

 $^{^{14}}$ F/16 es un valor elevado, aunque existen ópticas cuyo F/# máximo es 32, e incluso superior. Sin embargo, si se reduce en exceso la apertura, comienzan a aparecer efectos de segundo orden en la toma de las imágenes (difracción, entre otros) y se produce pérdida de luz. Es una práctica habitual usar en la adquisición al menos, la mitad de la apertura máxima. Es decir, para sensar imágenes con F/16, se ha de adquirir una óptica de F/32.

4.3 Tiempo de exposición.

Es intuitivo que el tiempo de exposición necesario en esta aplicación esté relacionado con la velocidad de la plancha y con alguna longitud característica del problema. Inicialmente, para poder anticipar un orden de magnitud en el que se ha de mover dicho tiempo, se tomará como una estimación inicial de éste

$$T_{\exp} = \frac{TAM_{pixel}^{objeto}}{v_{lam}} = 25\mu s$$
(4.7)

siendo TAM_{pixel}^{objeto} el tamaño del píxel en el plano objeto, el cual es, para un tamaño de mancha mínimo detectable de 0.05*mm* igual a 0.025*mm*. Se recuerda que v_{lam} es como máximo 1*m/s*.

No obstante, ese tiempo puede ser restrictivo en las cámaras actuales; y por otro lado, se necesitaría una potencia luminosa elevada. En el apartado 4.3.2 se estudiará este tema con mucha más profundidad para comprobar si la estimación realizada es correcta y si se puede aumentar este tiempo con garantías.

4.3.1 Tiempo de exposición en la Fase I.

No es posible alcanzar los valores deseables de dicho tiempo con la cámara usada en la Fase I. Como se ha podido ver anteriormente, éste ha de ser lo suficientemente pequeño como para que las manchas no se vean difuminadas (en parte o totalmente) debido al movimiento de la plancha. Sin embargo, como las imágenes se tomaron a plancha parada, el tiempo de exposición fue usado para aprovechar todo el rango dinámico de la cámara. Es decir, se permitió a la cámara integrar luz el tiempo necesario para que los píxeles del fondo (acero limpio) alcanzaran un valor cercano a la saturación.

4.3.2 Tiempo de exposición en fases posteriores.

La elección del tiempo de exposición, como ya sabemos de apartados anteriores, es una cuestión de la mayor importancia en este proyecto, ya que la plancha se mueve a considerable velocidad y el objeto a sensar es de muy reducido

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

tamaño; y esto, como también se sabe, puede llevar a que las manchas se vean difuminadas, o incluso a que no aparezcan en la imagen.

Por tanto, a continuación se muestra un estudio teórico acerca de cómo afecta el movimiento de una mancha en la toma de la imagen. El objetivo será calcular la cantidad de luz integrada por un píxel en función del tiempo de exposición (T_{exp}), para poder seleccionar el óptimo.

Haciendo uso de la Figura 4-4 se definen los convenios y la notación que se empleará en el desarrollo:

El extremo izquierdo de la mancha, *z_m(t)*, asumiendo que la lámina avanza
 a una velocidad constante igual a *v_{lam}* en dirección *z* > 0, vendrá dado por:

$$z_m(t) = z_{m0} + v_{lam}t$$
(4.8)

donde z_{m0} es la posición de la mancha en t = 0.

Es obvio, por tanto, que el derecho estará en $z_m(t) + l_m$, donde l_m es la longitud de una mancha de cascarilla en la dirección z.

En principio z_{m0} será un parámetro libre. Posteriormente se usará para extender el estudio a más de un píxel.

- Igualmente, el extremo izquierdo del área del plano objeto correspondiente a un píxel será z_p y el derecho $z_p + l_p$.
- La luz captada por el sensor será caracterizada por la excitancia del objeto. Cada punto de éste emitirá luz con una excitancia diferente y constante según sea fondo o mancha en cada instante (por tanto, L_s no depende ni de x ni de y; sólo de la dirección de movimiento). Se define la función excitancia para todo z como:

$$L_{s}(z,t) = \begin{cases} L_{s1} & si \ z \in (z_{m}(t), z_{m}(t) + l_{m}) \\ L_{s2} & e.o.c \end{cases}$$
(4.9)



Con $L_{s1} < L_{s2}$ (mancha más oscura que el fondo). L_s , como se sabe del apartado 3.3, tiene dimensiones de potencia por unidad de área.

Figura 4-4. Notación usada en el estudio teórico del tiempo de exposición.

- Aunque el que una mancha ocupe al menos dos píxeles en la imagen es una especificación, también se tendrá en cuenta en el estudio el caso l_p > l_m.
- El estudio supone un caso ficticio en el que los rayos de luz salen de la plancha (tanto si es mancha como fondo) perpendiculares a ésta. Para ser rigurosos, habría que tener en cuenta el ángulo sólido de la plancha al píxel, e integrar la radiancia, no la excitancia. Pero eso añade complejidad matemática al estudio, y no afecta a las conclusiones cualitativas que se pretenden extraer de él.

Una vez definido el problema, es fácil formular que el valor del píxel una vez pasado un tiempo de exposición es:

$$V_{pixel} = \int_{0}^{T_{exp}} \int_{z_{p}}^{z_{p}+l_{p}} \int_{0}^{l_{p}} L_{S}(z,t) \, dy \, dz \, dt \tag{4.10}$$

El valor calculado es la energía colectada por el píxel: Wseg.

Para reducir el problema a una sola dimensión espacial, puesto que L_S no depende de y, se puede resolver la primera integral y escribir:

$$V_{pixel} = \int_{0}^{T_{exp}} \int_{z_{p}}^{z_{p}+l_{p}} L(z,t) dz dt$$
(4.11)

donde

$$L(z,t) = l_p L_s(z,t) = \begin{cases} l_p L_{s1} & si \ z \in (z_m(t), z_m(t) + l_m) \\ l_p L_{s2} & e.o.c \end{cases} = \\ \begin{cases} L_1 & si \ z \in (z_m(t), z_m(t) + l_m) \\ L_2 & e.o.c \end{cases}$$
(4.12)

Nótese que L(z,t) tiene dimensiones de potencia por unidad de longitud.

A continuación, para facilitar el desarrollo se aplicará el teorema de superposición (el problema que se está tratando es lineal), de forma que se buscarán dos funciones adecuadas, L_{fondo} y L_{mancha} , tales que verifiquen $L(z,t) = L_{fondo}(z,t) + L_{mancha}(z,t)$, con lo que (4.11) quedará:

$$V_{pixel} = \int_{0}^{T_{exp}} \int_{z_{p}}^{z_{p}+l_{p}} L_{fondo}(z,t) dz dt + \int_{0}^{T_{exp}} \int_{z_{p}}^{z_{p}+l_{p}} L_{mancha}(z,t) dz dt = V_{pixel}^{fondo} + V_{pixel}^{mancha}$$
(4.13)

Las mencionadas funciones en que se descompone la función excitancia son

$$L_{fondo} = L_2 \quad \forall z$$

$$L_{mancha} = \begin{cases} L_1 - L_2 & si \ z \in (z_m(t), z_m(t) + l_m) \\ 0 & e.o.c \end{cases}$$

$$(4.14)$$

Como $L_1 < L_2$, L_{mancha} tendrá un valor negativo si z pertenece a la mancha. Así, de forma "ficticia", L_{mancha} restará señal luminosa del píxel (La Figura 4-5 muestra una representación de L, L_{fondo} y L_{mancha} .).

Esta descomposición no es única; se han escogido esas funciones porque, además de verificar que su suma es igual a L(z,t), simplifica el problema: L_{fondo} es constante en z, y por tanto su contribución al valor del píxel es inmediata:

$$V_{pixel}^{fondo} = L_2 l_p T_{exp} \tag{4.15}$$

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 4-5. Descomposición de la excitancia en las componentes de mancha y fondo.

Además, aunque el cálculo de la contribución de la mancha es un poco más engorroso, y similar al problema completo, tiene la ventaja de que si un punto z no pertenece a la mancha, su excitancia es 0.

Para calcular V_{pixel}^{mancha} es necesario definir una serie de intervalos temporales, y en cada uno de ellos el píxel "verá" algo diferente, en función del avance de la plancha. En la Figura 4-6 se muestran gráficamente estos intervalos para $l_p > l_m^{15}$, y están definidos matemáticamente de la siguiente forma:

Intervalo 1. En él, la mancha aún no ha entrado en el campo de visión del píxel (Figura 4-6. (a)):

$$z_m(t) + l_m \le z_p \tag{4.16}$$

¹⁵ Puesto que una mancha de cascarilla ha de estar compuesta por, al menos, 2x2 píxeles, se ha de verificar en el caso que nos ocupa $l_m \ge 2l_p$. Sin embargo, se pretende que el estudio sea general; de hecho, se puede extender a cualquier objeto oscuro sobre fondo claro asumiendo las suposiciones realizadas al principio de este estudio.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 4-6. Intervalos temporales en el estudio teórico del tiempo de exposición (a) Mancha no ha llegado al píxel (b) Mancha antes de ser vista completamente (c) Mancha vista completamente (d) Mancha después de ser vista completamente. (e) Mancha no es vista por el píxel.

Teniendo en cuenta (4.8) y despejando t:

$$t \le \frac{z_p - z_{m0} - l_m}{v_{lam}} = t_1 \tag{4.17}$$

Para simplificar la notación, se introducirá un nuevo parámetro:

$$\Delta = z_p - z_{m0} \tag{4.18}$$

Así, Δ es el "desfase" entre el borde izquierdo del píxel y el borde izquierdo de la mancha cuando comienza la exposición; t_1 resulta, con la nueva notación:

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

$$t_1 = \frac{\Delta - l_m}{v_{lam}} \tag{4.19}$$

- Intervalo 2. La mancha ha entrado en el campo de visión del píxel, pero no completamente (Figura 4-6. (b)). De forma más resumida:

$$z_m(t) + l_m > z_p z_m(t) \le z_p$$

$$\Rightarrow \begin{cases} t > t_1 \\ t \le \frac{z_p - z_{m0}}{v_{lam}} = \frac{\Delta}{v_{lam}} = t_2 \end{cases}$$
 (4.20)

 t_2 puede expresarse en función de t_1 :

$$t_2 = t_1 + \frac{l_m}{v_{lam}} = t_1 + t_{man}$$
(4.21)

donde t_{man} es el tiempo que tarda la mancha en "pasar" completamente por un punto. Puesto que t_l es el instante en el que la mancha entra dentro del campo de visión del píxel, t_{man} unidades de tiempo más tarde se pasa al siguiente intervalo, ya que la mancha comienza a ser vista completamente por el píxel.

Intervalo 3. La mancha está dentro del campo de visión del píxel (Figura 4-6.(c)):

$$z_{m}(t) > z_{p} z_{m}(t) + l_{m} \leq z_{p} + l_{p}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} t > t_{2} \\ t \leq \frac{\Delta + l_{p} - l_{m}}{v_{lam}} = t_{3} \Rightarrow t_{3} = t_{2} + t_{pix} - t_{man} \end{cases}$$

$$(4.22)$$

En la anterior ecuación se introduce t_{pix} , que es el tiempo que tarda un punto de la lámina en "pasar" por el píxel. Es fácil ver que $t_{pix} - t_{man}$ es el tiempo que la mancha está completamente dentro del campo de visión del píxel.

 Intervalo 4. La mancha comienza a salir del campo de visión del píxel. (Figura 4-6.(d)):

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

$$\begin{aligned} z_m(t) + l_m > z_p + l_p \\ z_m(t) \le z_p + l_p \end{aligned} \} \Rightarrow \begin{cases} t > t_3 \\ t \le \frac{\Delta + l_p}{v_{lam}} \le t_4 \Rightarrow t_4 = t_3 + t_{man} \end{aligned}$$
(4.23)

Por tanto, t_4 es t_3 más el tiempo que tarda la mancha en "salir", que obviamente es t_{man} .

 Intervalo 5. La mancha está de nuevo fuera del campo de visión del píxel (Figura 4-6.(e)):

$$z_m(t) > z_p + l_p \Longrightarrow t > t_4 \tag{4.24}$$

Una vez definidos los intervalos, se puede integrar en la dimensión espacial el segundo sumando de (4.13); por supuesto, el resultado dependerá del intervalo en el que se esté en cada momento:

$$\frac{\partial V_{pixel}^{mancha}}{\partial t} = \int_{z_p}^{z_p+l_p} L_{mancha}(z,t) dz = \begin{cases} 0 & t \le t_1 \\ L'[z_m(t)+l_m-z_p] & t_1 < t \le t_2 \\ L'l_m & t_2 < t \le t_3 \\ L'[z_p+l_p-z_m(t)] & t_3 < t \le t_4 \\ 0 & t > t_4 \end{cases}$$
(4.25)

L' es, por simplificar la formulación, $L_1 - L_2$.

No hay que olvidar que se está buscando el valor del píxel en función del tiempo de integración, por lo que se tendrán cinco casos dependiendo de en que intervalo se encuentre T_{exp} . Seguidamente se estudiará caso por caso:

1.
$$T_{\exp} \le t_1$$

 $V_{pixel}^{mancha} = \int_0^{T_{\exp}} \left[V_{pixel}^{mancha}(t) \right]_{t \le t_1} dt = 0$

$$(4.26)$$

2. $t_{1} < T_{\exp} \le t_{2}$ $V_{pixel}^{mancha} = \int_{0}^{T_{\exp}} V_{pixel}^{mancha}(t) dt =$ $= \int_{0}^{t_{1}} \left[V_{pixel}^{mancha}(t) \right]_{t \le t_{1}} dt + \int_{t_{1}}^{T_{\exp}} \left[V_{pixel}^{mancha}(t) \right]_{t_{1} < t \le t_{2}} dt =$ $= L' \int_{t_{1}}^{T_{\exp}} [z_{m}(t) + l_{m} - z_{p}] dt =$ $= L' [(z_{m0} - z_{p} + l_{m})(T_{\exp} - t_{1}) + \frac{v_{lam}(T_{\exp}^{2} - t_{1}^{2})}{2}]$ (4.27)

Teniendo en cuenta (4.18) y (4.19) y operando:

$$V_{pixel}^{mancha} = L' \left[\frac{v_{lam} T_{exp}^2}{2} + v_{lam} t_1 T_{exp} + \frac{v_{lam} t_1^2}{2} \right] = L' \frac{v_{lam}}{2} \left(T_{exp} - t_1 \right)^2$$
(4.28)

3.
$$t_{2} < T_{\exp} \le t_{3}$$

$$V_{pixel}^{mancha} = L' \left[\int_{t_{1}}^{t_{2}} \left[z_{m}(t) + l_{m} - z_{p} \right] dt + \int_{t_{2}}^{T_{\exp}} l_{m} dt \right] =$$

$$= L' \left[(l_{m} - \Delta)(t_{2} - t_{1}) + \frac{v_{lam}(t_{2}^{2} - t_{1}^{2})}{2} + l_{m}(T_{\exp} - t_{2}) \right]$$
(4.29)

Agrupando:

$$V_{pixel}^{mancha} = L' \left[l_m (T_{exp} - t_2) + \frac{l_m^2}{2v_{lam}} \right]$$
(4.30)

4.
$$t_{3} < T_{\exp} \le t_{4}$$

 $V_{pixel}^{mancha} = L' \Big[\int_{t_{1}}^{t_{2}} \Big[z_{m}(t) + l_{m} - z_{p} \Big] dt + \int_{t_{2}}^{t_{3}} l_{m} dt + + \int_{t_{3}}^{T_{\exp}} \Big[z_{p} + l_{p} - z_{m}(t) \Big] dt \Big]$

$$(4.31)$$

Directamente se obtiene, tras sustituir $z_m(t)$, resolver las integrales y reorganizar:

$$V_{pixel}^{mancha} = L' \left[-\frac{v_{lam}}{2} \left(T_{exp} - t_3 \right)^2 + l_m \left(T_{exp} - t_3 \right) + \frac{l_p l_m}{v_{lam}} - \frac{l_m^2}{2v_{lam}} \right]$$
(4.32)

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

5.
$$t_4 < T_{exp}$$

 $V_{pixel}^{mancha} = L' \Big[\int_{t_1}^{t_2} \Big[z_m(t) + l_m - z_p \Big] dt + \int_{t_2}^{t_3} l_m dt + \int_{t_3}^{t_4} \Big[z_p + l_p - z_m(t) \Big] dt \Big]$

$$(4.33)$$

Y operando:

$$V_{pixel}^{mancha} = L' \frac{l_p l_m}{v_{lam}}$$
(4.34)

Con lo cual, sin más que sumar (4.15) a V_{pixel}^{mancha} se tiene el valor del píxel para cualquier valor de T_{exp} . A continuación se presenta dicho valor (V_{pixel}) de forma resumida y para los distintos intervalos de T_{exp} :

1.
$$T_{exp} \le t_1 \implies V_{pixel} = L_2 l_p T_{exp}$$
 (4.35)

2.
$$t_1 < T_{exp} \le t_2 \Longrightarrow V_{pixel} = (L_1 - L_2) \frac{V_{lam}}{2} (T_{exp} - t_1)^2 + L_2 l_p T_{exp}$$
 (4.36)

3.
$$t_2 < T_{exp} \le t_3 \Longrightarrow V_{pixel} = (L_1 - L_2) \left[l_m (T_{exp} - t_2) + \frac{l_m^2}{2v_{lam}} \right] + L_2 l_p T_{exp}$$
 (4.37)

4.
$$t_{3} < T_{exp} \le t_{4} \Longrightarrow V_{pixel} = (L_{1} - L_{2}) \left[-\frac{v_{lam}}{2} (T_{exp} - t_{3})^{2} + l_{m} (T_{exp} - t_{3}) + \frac{l_{p}l_{m}}{v_{lam}} - \frac{l_{m}^{2}}{2v_{lam}} \right] + L_{2}l_{p}T_{exp}$$

(4.38)

5.
$$T_{exp} \ge t_4 \Longrightarrow V_{pixel} = (L_1 - L_2) \frac{l_p l_m}{v_{lam}} + L_2 l_p T_{exp}$$
 (4.39)

Para comenzar a obtener conclusiones, se representará en una gráfica V_{pixel} en un caso particular: $\Delta = l_m$ (o lo que es lo mismo, $t_l = 0$) y $L_1/L_2 = 1/20$. Este es el caso en que el borde derecho de la mancha coincide con el borde izquierdo del píxel. En la Figura 4-7 se encuentran representados V_{pixel}^{fondo} , V_{pixel}^{mancha} y V_{pixel} en el mencionado caso. Como se puede ver en ella, el resultado es lógico; mirando a V_{pixel}^{mancha} por simplicidad se puede observar:

- La máxima pendiente (negativa, puesto que V_{pixel}^{mancha} tiene valores negativos ó 0) se encuentra en el intervalo (t_2, t_3) , que es cuando la mancha es vista completamente por el píxel.
- En el intervalo (t_1, t_2) la pendiente de V_{pixel}^{mancha} decrece al mismo "ritmo" con la que crece en el (t_3, t_4) , ya que la mancha "entra y sale" del píxel a la misma velocidad v_{lam} .
- A partir de t_4 la curva no decrece más, puesto que en L_{mancha} el fondo no emite luz. Si se mira a V_{pixel} , lo que ocurre es que a partir de este punto el crecimiento se debe al fondo y no a la mancha, por lo que cuanto mayor sea T_{exp} con respecto a t_4 más "oculta" quedará la información de la mancha.



Figura 4-7. Representación del valor del píxel en función del tiempo de exposición ($\Delta = l_m$).

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

El desarrollo en caso de que $l_p < l_m$ es similar. Realizando un análisis idéntico al ya visto para definir los extremos de los intervalos (ecuaciones (4.16) a (4.24)), se llega a los mismos tiempos de separación, pero en este caso $t_1 < t_3 < t_2 < t_4$. Así, V_{pixel} es, sin repetir aquí el desarrollo:

1.
$$T_{\text{exp}} \le t_1 \Longrightarrow V_{pixel} = l_p L_2 T_{\text{exp}}$$
 (4.40)

2.
$$t_1 < T_{exp} \le t_3 \Longrightarrow V_{pixel} = (L_1 - L_2) \frac{v_{lam}}{2} (T_{exp} - t_1)^2 + L_2 l_p T_{exp}$$
 (4.41)

3.
$$t_3 < T_{exp} \le t_2 \Longrightarrow V_{pixel} = (L_1 - L_2) \left[l_p (T_{exp} - t_3) + \frac{l_p^2}{2v_{lam}} \right] + L_2 l_p T_{exp}$$
 (4.42)

4.
$$t_{2} < T_{exp} \le t_{4} \Rightarrow V_{pixel} = (L_{1} - L_{2}) \left[-\frac{v_{lam}}{2} (T_{exp} - t_{2})^{2} + l_{p} (T_{exp} - t_{2}) + \frac{l_{p} l_{m}}{v_{lam}} - \frac{l_{p}^{2}}{2v_{lam}} \right] + L_{2} l_{p} T_{exp}$$

$$(4.43)$$

$$t_4 < T_{\text{exp}}$$
 $V_{pixel} = (L_1 - L_2) \frac{l_p l_m}{v_{lam}} + L_2 l_p T_{\text{exp}}$ (4.44)

En la Figura 4-8 se encuentran representadas varias curvas de V_{pixel} para varios valores de l_m (y con la misma posición inicial que anteriormente). En esta figura, el eje de tiempo ha sido dividido en unidades de t_{pix} , debido a que los tiempos característicos de separación de los intervalos cambian con l_m^{-16} .

La línea punteada es la curva de carga de un píxel que sólo "ve" fondo. Se puede comprobar en la mencionada figura que cuanto más pequeña es l_m para una curva, más se va pareciendo ésta a la punteada. El motivo es muy fácil de entender: a menor tamaño de mancha, más dificultad para distinguirla del fondo. La curva magenta corresponde al caso en que la mancha tiene un tamaño igual a un tercio del tamaño del píxel, y como se puede apreciar en la figura, en ella casi no se nota el efecto de la mancha.

¹⁶ De aquí en adelante se cambiará la notación que se refiere a los tiempos: en lugar de hablar de t_1 , t_2 , etc., se hablará en términos de t_{pix} y t_{man} , ya definidos en este mismo apartado.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

La curva negra es el caso $l_m = 2l_p$ (caso concreto de este proyecto), y se ve en ella que hay un intervalo de T_{exp} ([t_{pix} , $2t_{pix}$]) en el que el valor del píxel aumenta debido únicamente a la mancha. La pendiente es muy pequeña, ya que $L_1 \ll L_2$.



Figura 4-8. Contribución de la mancha al valor del píxel para distintos tamaños de l_m ($\Delta = l_m$).

El siguiente paso es introducir en el estudio a más de un píxel. Efectivamente, si la posición inicial de la mancha es tal que está "a punto de ser vista por un píxel", si hubiera un píxel adyacente al estudiado hasta ahora, en el instante inicial estaría "viendo a la mancha". Obviamente, éste será el caso. Pero no hay que repetir ningún cálculo, ya que éste es el mismo caso anterior pero con diferente z_{m0} , o, lo que es lo mismo, Δ . Se ha tomado $l_m = 2l_p$ para particularizar en el caso concreto de este proyecto, en el que, se recuerda, una mancha ha de tener al menos 2 píxeles en cada dirección.

En la Figura 4-9 se encuentra representada la situación inicial para *n* píxeles, que se nombrarán en adelante como $P_1, P_2, ..., P_n$.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 4-9. Situación inicial de la mancha en la extensión del estudio a varios píxeles $(l_m = 2l_p)$.

El valor de Δ para cada uno de los píxeles será:

$$\Delta_{1} = 0$$

$$\Delta_{2} = l_{p}$$

$$\Delta_{3} = 2l_{p}$$

$$\Delta_{4} = 3l_{p}$$

$$\vdots$$

$$\Delta_{n} = (n-1)l_{p}$$

Si se representan los valores de los píxeles en una misma gráfica (Figura 4-10), se pueden extraer ya conclusiones del estudio:

- Conforme mayor es el tiempo de exposición mayor será el valor que alcanzará cada píxel. Realmente, esta no es una conclusión del estudio, pero sí se puede ver en sus resultados. Nótese que V_{píxel} no puede crecer indefinidamente; realmente se producirá un fenómeno de saturación, que será tenido en cuenta más adelante.
- Otra consecuencia de permitir un tiempo de exposición elevado es que la mancha en la imagen ocupará más píxeles de los que debería ocupar por su tamaño. Idealmente (plancha parada) la mancha sólo debería ser vista por los píxeles P₁ y P₂ (ver Figura 4-9); sin embargo, si el tiempo de exposición es por ejemplo t_{pix} (y con la plancha en movimiento), P₃ tendrá el mismo valor que P₁, y P₂ un valor menor que ambos. Por tanto, habrá tres píxeles que no serán fondo (posteriormente, serán interpretados como fondo o mancha dependiendo del procesado).



Figura 4-10. Valores de los píxeles P_1 , P_2 , ... P_n en función del tiempo de exposición.

 La diferencia entre el píxel de menor valor y el de mayor es la misma independientemente del tiempo de exposición, si éste es mayor que el t_{man} + t_{pix}.

Las conclusiones anteriores han sido extraídas suponiendo una iluminación constante e independiente del tiempo de exposición. En la práctica, de tratará de ajustar la intensidad luminosa para que los píxeles más brillantes queden cerca de la saturación, aprovechando así todo el rango dinámico del sensor. Por tanto, a continuación se normalizarán las ecuaciones (4.40) a (4.44) respecto al píxel que alcance mayor valor. El factor de normalización será:

$$g_{norm} = \frac{V_{saturacion}}{V_{pixel}\Big|_{maximo}}$$
(4.45)

Nótese que $V_{pixel}\Big|_{maximo}$ es función del tiempo de exposición, como se puede apreciar en la Figura 4-10. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, el máximo

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

siempre corresponde a píxeles de fondo, y por tanto teniendo en cuenta (4.15), (4.45) es equivalente a:

$$g_{norm} = \frac{V_{saturacion}}{V_{pixel}^{fondo}} = \frac{V_{saturacion}}{L_2 l_p T_{exp}} = \frac{255}{L_2 l_p T_{exp}}$$
(4.46)

Por conveniencia, $V_{saturacion}$ ha sido tomada igual a 255 (ya que más adelante se realizará una simulación en la que se representarán los valores de los píxeles obtenidos de las ecuaciones como imágenes¹⁷).

El resultado de escalar V_{pixel} (para cada píxel analizado) con g_{norm} se encuentra en la Figura 4-11. Ahora las conclusiones son diferentes: viendo la Figura 4-10 parecía que el tomar el tiempo de exposición pequeño era una desventaja, dado que el contraste era peor cuando éste disminuye. Después del ajuste, se puede apreciar que eso no es cierto; idealmente, lo óptimo es tomar $T_{exp} \rightarrow 0$, como indica el sentido común. Por supuesto, en la práctica esto no es viable, puesto que para saturar los píxeles de fondo con $T_{exp} \rightarrow 0$ se necesitaría una fuente luminosa de potencia infinita.

También hay que resaltar que el contraste disminuye en general con el aumento del tiempo de exposición. Sin embargo, no es el contraste entendido como diferencia de niveles de gris del píxel más claro y del más oscuro lo que interesa en este caso, sino la diferencia entre niveles próximos; por ejemplo, entre P_2 y P_1 (ó P_3) en t_{pix} y entre P_2 (ó P_3) y P_1 (ó P_4) en t_{man} . Se puede comprobar en la Figura 4-11 que el contraste entre los píxeles (o conjunto de píxeles) mencionados permanece aproximadamente constante entre t_{pix} y t_{man} . En la Tabla 2 se muestran los valores normalizados de los píxeles para diferentes tiempos de exposición, de forma que se puedan realizar cálculos.

Es importante mencionar que éste es un caso particular en el que los bordes de la mancha coinciden con el de un píxel (es decir, el valor de Δ_1 es 0). El peor caso

¹⁷ El valor de píxel calculado (V_{pixel}) tiene, como se ha visto, unidades de energía. La energía luminosa de cada píxel ha de ser convertida a tensión en el sensor, y esta tensión debe ser digitalizada para ser procesada por un ordenador. Todo este proceso (energía – señal de tensión digital) es llevado a cabo aquí por la normalización. Así, los valores posibles de V_{pixel} se restringen al intervalo [0, 255] en la normalización (255 es el valor máximo en una codificación de 8 bits).

sería que un píxel viera la mitad de una mancha; así, incluso con $T_{exp} \rightarrow 0$, habría tres píxeles con $V \neq 0$. No obstante, la posición inicial de las manchas cuando comienza la exposición es completamente aleatoria, y no se tiene ningún control sobre ella.



Figura 4-11. Valores normalizados de los píxeles $P_1, P_2, ..., P_n$ en función del tiempo de exposición.

			Valores normalizados de los píxeles						
			<i>P</i> ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
Tiempo de	exposición	<i>t</i> _{pix}	133	12	133	255	255	255	255
		t _{man}	194	73	73	195	255	255	255
		$t_{pix} + t_{man}$	214	133	93	134	215	255	255
		$t_{pix} + 2t_{man}$	224	164	133	133	164	225	255

Tabla 2. Valores normalizados de los píxeles para varios tiempos de exposición.

A la vista de la Figura 4-11, parece claro que el tiempo de exposición óptimo ha de ser $T_{exp} \leq t_{pix}$. Sin embargo, y por lo mencionado en el párrafo anterior, este tiempo podría ser aumentado hasta $T_{exp} = t_{man} \simeq 2t_{pix}$ sin pérdida significativa de prestaciones.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.
Para apreciar todo lo mostrado de forma lo más parecida posible a como se verá realmente, se han representado los valores de los píxeles obtenidos con las ecuaciones calculadas como si fueran una imagen. La imagen de referencia es una matriz de 7x4 como la que se muestra en la Figura 4-12; en ella, las dos filas centrales son dos arrays de siete píxeles idénticos a los que se han analizado anteriormente, y las dos restantes están formadas íntegramente por píxeles de fondo.



Figura 4-12. Imagen de referencia para la representación de los valores obtenidos de las ecuaciones como una imagen.

Con esto, en la Figura 4-13 se muestran las mencionadas imágenes, a plancha parada y en movimiento, para distintos valores del tiempo de exposición. En ella se puede comprobar visualmente el efecto del movimiento en la toma de una imagen: pérdida de contraste y aumento del tamaño del objeto en la dirección del movimiento.

Como conclusión, se puede afirmar que es un buen compromiso el tomar un tiempo de exposición igual a t_{pix} , (aunque sería razonable hacer pruebas empíricas tomando t_{man}). Así, teniendo en cuenta que se han de abarcar tamaños mínimos de mancha desde 0.05*mm* hasta 0.1*mm* (que corresponden a un intervalo de tamaños del píxel en el plano objeto de 0.025*mm* hasta 0.05*mm*), el tiempo de exposición ha de ser

$$T_{\exp} \in \left[\frac{l_p^{\min}}{v_{lam}}, \frac{l_p^{\max}}{v_{lam}}\right] \Leftrightarrow T_{\exp} \in [25, 50] \,\mu s \tag{4.47}$$



Figura 4-13. Simulación de imágenes. (a) T_{exp} = t_{pix} (b) T_{exp} = t_{man} (c) T_{exp} = t_{man} + t_{pix}
(d) T_{exp} = t_{man} + 2 t_{pix}. La columna de la izquierda es a plancha parada. La de la derecha con la plancha en movimiento. El cálculo ha sido realizado con l_m = 2l_p y Δ = 0.

4.4 Tipo de iluminación.

En este apartado se tratará la importancia del sistema de iluminación. A continuación se explicarán las alternativas existentes en el campo de la visión artificial en cuanto a tipos de iluminación. Para cada uno de ellos, se comentarán los pros y contras, y se mostrará una imagen que ilustre su funcionamiento.



- Direccional: la producida, por ejemplo, por una bombilla de incandescencia. Produce sombras y normalmente es de alta intensidad. Sus ventajas son sencillez y bajo coste, y sus aplicaciones suelen ser realce de bordes y texturas.
- Anillos: con éstos se reducen en gran medida las sombras, y se puede conseguir una iluminación más o menos constante en un área determinada. Pueden ser LEDs, fibra óptica, o como es más común, fluorescentes.





- Iluminación Darkfield: aumenta fuertemente el contraste de características de superficie, mediante una iluminación cuasi-lateral con simetría axial, como se puede ver en la imagen adjunta.
- Iluminación difusa: en este tipo de iluminación no hay direcciones privilegiadas, y precisamente se usa para eliminar sombras, deslumbramientos, y reflejos. Suele ser difícil conseguir intensidades luminosas elevadas.





- Backlight: en este caso el objeto se sitúa entre la fuente luminosa y la cámara. Esto se usa para resaltar los bordes del objeto, aunque como es de esperar, se pierde toda la información visual del resto.
- Generación de patrones luminosos: se generan estructuras luminosas, generalmente usando luz láser, y con ellas se logra resaltar la forma de un objeto. La imagen adjunta es muy ilustrativa: en ella se ha usado un patrón lineal que logra "siluetear" la forma de las figuras geométricas presentes en ella.



4.4.1 Tipo de iluminación en la Fase I.

En la fase I, puesto que es un proyecto de viabilidad, se tratará de alcanzar una solución sencilla y de muy bajo coste. Por tanto, se usarán fuentes lo más asequibles posible para las pruebas de iluminación sobre las muestras de acero proporcionadas por ACERINOX.

Las muestras de las que se disponía en un principio eran únicamente dos: una en la que el acero tenía un granulado prácticamente inexistente y de acabado mate, y otra cuyo grano era grueso y de acabado brillante. Las pruebas preliminares sobre estas muestras ya mostraron qué tipo de iluminación se había de usar.

En la Figura 4-14 se puede apreciar una imagen tomada con la cámara especificada en el apartado 4.1.1. La iluminación usada ha sido direccional, conseguida con un simple flexo de oficina, y corresponde a la muestra mate y de grano fino. En esta imagen se puede comprobar que las manchas de cascarilla son perfectamente visibles¹⁸ La razón es que las sombras que arroja el grano fino de la

¹⁸ Confirmado por el Departamento de Metalurgia de ACERINOX en la reunión mantenida en su factoría de Los Barrios, Cádiz, el 29 de Mayo de 2002.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

muestra fotografiada no interfieren en la visión de las manchas de cascarilla. Desgraciadamente, como ya se sabe por el apartado 2.5, el tamaño del grano es variable de una plancha a otra, y no se podrán realizar, por tanto, suposiciones en este aspecto. También favorece en este caso el hecho de que el acabado de la plancha sea mate, ya que esto minimiza los deslumbramientos.



Figura 4-14. Imagen tomada con iluminación estándar de una plancha de grano fino y acabado mate.

En cambio, si se observa la Figura 4-15, la situación es diferente. La muestra fotografiada en este caso es la de aspecto brillante y grano grueso; como se puede comprobar, este granulado provoca sombras que son indeseables y que se pueden confundir fácilmente con manchas de cascarilla. De hecho, en la imagen sólo se identifica claramente una mancha de cascarilla de gran tamaño; pero se sabe por otros métodos que hay varias más, invisibles en la imagen debido a las mencionadas sombras.

Este problema afecta de forma decisiva en la selección del sistema de iluminación, porque la necesidad de procesar planchas de grano grueso obliga a

abandonar la iluminación estándar (la más sencilla), y fuerza la adopción de una que evite la formación de sombras.



Figura 4-15. Imagen tomada con iluminación estándar de una plancha de grano grueso y acabado brillante.

Para conseguir la máxima uniformidad, se pensó inicialmente en usar un tubo fluorescente con forma toroidal, como el que se muestra en la Figura 4-16. Se puede demostrar que, suponiendo que la irradiancia es constante en todos los puntos del toro, se consigue una región circular alrededor del eje de simetría en la que la iluminación es aproximadamente uniforme, que se haría coincidir con la zona de observación. Esto es lo deseable en el caso que nos ocupa, pero la potencia luminosa que suelen dar este tipo de fuentes es muy baja, y para conseguir imágenes adecuadas es necesario acercar el tubo demasiado a las planchas, perdiendo la condición de uniformidad.



Figura 4-16. Fluorescente toroidal.

De modo que la elección final ha sido utilizar dos lámparas fluorescentes con forma cilíndrica situadas de forma paralela. La uniformidad es menor en este caso (se consigue la eliminación de sombras en una sola dirección), pero como se verá un poco más adelante, suficiente. En la Figura 4-17, se encuentra una fotografía de una de las fuentes usadas en el sistema de iluminación durante la Fase I, y en la Figura 4-18 un esquema del montaje.



Figura 4-17. Una de las fuentes utilizadas en el sistema de iluminación durante la fase de viabilidad.



Figura 4-18. Esquema de la colocación de los fluorescentes.

A continuación se mostrará visualmente que el hecho de usar una o dos fuentes en el sistema, influye notablemente en la calidad de las fotografías que se obtienen. Esto se puede observar en la Figura 4-19, en la que se muestran dos imágenes de aproximadamente la misma región, tomadas con distinto número de fuentes.

En 4–18 (a), se puede comprobar que la imagen se ve afectada por una importante variación espacial de la luminosidad, y que una región considerable de la misma exhibe las sombras que produce el granulado; ambas cosas ocurren en menor medida en 4–18 (b).

En resumen, se puede concluir que iluminación más apropiada para esta aplicación es una que produzca luz lo más difusa posible, para conseguir eliminar la formación de sombras producidas por el grano presente en las muestras de acero.



(b)

Figura 4-19. Sistema de iluminación en la Fase I. (a) Imagen tomada de una de las planchas de muestra con una sola fuente de luz. (b) Imagen de la misma región tomada con ambas fuentes.

Esta solución adoptada en la Fase I es equivalente a usar un anillo de luz, sólo que la eliminación de sombras se produce, como ya se ha mencionado, en una sola dirección. También se puede simular un difusor con técnicas "caseras" (los difusores que se pueden encontrar en el mercado tienen un coste normalmente elevado) usando una sola fuente y papel blanco.

En la Figura 4-20 se pueden observar dos configuraciones que llevan a cabo el efecto deseado, y en la Figura 4-21 una imagen tomada con la configuración (a) de la figura anterior.

En esta imagen se puede comprobar que el efecto de las sombras es menor, pero es demasiado oscura, ya que se ha eliminado un fluorescente y a que parte de luz que ilumina la plancha es luz reflejada.



Figura 4-20. Configuraciones usando papel blanco como difusor. (a) Parte de la luz de la fuente incide directamente sobre la plancha. (b) La luz que incide en la plancha es sólo luz reflejada en el papel.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 4-21. Imagen tomada con la iluminación de la configuración (a) de la Figura 4-20.

4.4.2 Iluminación en fases superiores.

Ya se vieron al inicio de este apartado los tipos de iluminación básicos, y en el 4.4.1 que los que son de utilidad en este proyecto son, fundamentalmente, dos: anillos de luz e iluminación difusa. Sólo con éstos, el número de alternativas es grande, incluso considerando un único fabricante. En la Figura 4-22 se muestra un ejemplo de cada tipo de fuente de dos grandes fabricantes, Stoker & Yale y Nerlite. Como características adicionales deseables está el que la potencia luminosa de la fuente fuese controlable, y sobre todo elevada, ya que ante el bajo tiempo de exposición que se ha de usar (apartado 4.3.2), la luz proveniente de las mencionadas fuentes podría ser insuficiente.



Figura 4-22. (a) Anillo de luz de Stoker & Yale. (b) Difusor CDI de Nerlite.

Otra solución sería usar un tipo especial de iluminación colimada (iluminación direccional en la que el haz de luz está formado por rayos paralelos), y es conocida como iluminación en la óptica [30]. Consiste en acoplar directamente el extremo de una fibra óptica al objetivo, de forma que la luz está colimada con el ángulo de observación y se consigue minimizar las pérdidas desde la fuente de luz hasta la cámara. La Figura 4-23 ilustra esquemáticamente esta forma de iluminación.



Figura 4-23. Iluminación en la óptica.

Es un problema el que no sea una iluminación difusa. No obstante, es de esperar que sea útil en este caso, debido a que la luz incide sobre la plancha de forma totalmente perpendicular, lo que también minimiza la formación de sombras.

Para tener una idea aproximada de los órdenes de magnitud con los que se está tratando, se introducirán valores concretos en la ecuación (3.20), que, recordemos, permitía calcular la potencia luminosa que llega al sensor; éstos valores se muestran a continuación:

 $A_{objeto} = 2.5 x 2.5 cm^{2}$ $A_{lente} = 2\pi (1.5 cm)^{2} = 14.14 cm^{2} \text{ (circulo de radio 1.5 cm)}$ d = 30 cm

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

 $L = 1 W/m^2$ (la iluminación usual en una habitación iluminada artificialmente es de este orden).

Así, la ecuación (3.20) da un resultado de: $\varphi_0 = 1.56 \mu W$.

Es sencillo obtener el número de electrones detectados en cada píxel una vez conocida la potencia que llega al sensor y usando conceptos introducidos en el capítulo 3.

Suponiendo que la luz que ilumina el objeto es monocromática y de color verde ($\lambda = 555nm$), la energía de un fotón es, usando la ecuación (3.21):

$$\varepsilon_{foton} = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda} \tag{4.48}$$

Introduciendo los valores de las constantes (dados en el apartado 3.4), $\varepsilon_{foton} = 3.61E-19J.$

Así, es inmediato obtener el número de fotones por segundo que alcanzan el objetivo (y por tanto, el sensor):

$$n_{foton} = \frac{\varphi_0}{\varepsilon_{foton}} = 4.33E + 12\,ph/s \tag{4.49}$$

Suponiendo que el sensor es de 1000x1000pixeles, el número de fotones por segundo que alcanza a un píxel es¹⁹:

$$n_{foton}^{pixel} = \frac{n_{foton}}{1000x1000} = 4.33E + 6\,ph/s \tag{4.50}$$

Puesto que el sensor integrará luz durante el tiempo de exposición, el número de fotones que alcanzan un píxel durante dicho tiempo (que se tomará igual a $25\mu s$) será:

¹⁹ En este cálculo habría que incluir también el fill-factor, que es la fracción de área del píxel que es activa en cuanto a la detección de luz. Sin embargo, en los sensores CCD, el fill-factor suele ser la unidad. Por tanto, se asumirá que el sensor que se va a usar es CCD. Esto es apropiado, puesto que hasta el momento dominan el mercado de los sensores de imagen.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

$$N_{ph}^{pixel} = n_{ph}^{pixel} T_{exp} = 108.1ph$$
(4.51)

Por último, el número de electrones colectados por un píxel se puede calcular haciendo uso de la eficiencia cuántica, definida en el apartado 3.4. Un valor común para dicho parámetro es 1/3, y por tanto:

$$N_e^{pixel} = \eta N_{ph}^{pixel} = 36.1e^-$$
(4.52)

Para hacer comparaciones, se tomarán como representativos los datos que Fairchild Imaging proporciona acerca de sus sensores [31]:

- Sensibilidad (S_V) = $3\mu V/e^-$
- Tensión de saturación (V_{SAT})= 600mV

Así, la tensión producida por N_e^{pixel} es:

$$V_0 = N_e^{pixel} S_V = 108.1 \mu V \tag{4.53}$$

Como se puede comprobar, no se alcanza ni un 1% de la tensión de saturación. Este es un serio problema, puesto que las especificaciones sitúan a la aplicación cerca de un límite físico en cuanto a iluminación.

Estos cálculos confirman que será necesario usar una fuente de luz de alta potencia.

En este sentido, se perfila también como alternativa el uso de una fuente de luz pulsante, que emite una alta potencia luminosa durante cortos periodos de tiempo. Además, sirve de ayuda al shutter electrónico de la cámara que se use, ya que gracias a esos pulsos de luz, se "congela" el movimiento.

La intermitencia de la lámpara ha de estar sincronizada con la adquisición de las imágenes. Es normal en las cámaras dedicadas a la inspección que sean muy versátiles en cuanto a la temporización. Como mínimo disponen de un "trigger" que dispara la adquisición de una imagen, y que controla el número de frames por segundo que la cámara vuelca al exterior. Es esta misma señal la que será necesario enviar a la circuitería que controla la intermitencia de la fuente de luz.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Es obligado antes de concluir el apartado relativo a la iluminación, aludir al tema de la resolución (en el sentido de densidad de píxeles por milímetro), ya que la disponibilidad de potencia luminosa es un grave problema para construir un sistema que permita captar imágenes con una resolución muy variable (esto es una especificación, como se puede recordar acudiendo al apartado 2.4). El motivo es el siguiente: si se pretende, por ejemplo, tomar imágenes con resoluciones que vayan de 20 hasta 200pix/mm (tamaño mínimo detectable entre 0.01 y 0.1mm con una cámara de 1024x1024 píxeles), se han de fotografiar cuadros cuyos lados miden desde 50 hasta 5mm. El lado del menor es 10 veces más pequeño, pero su área lo es 10^2 veces; además, puesto que las distancias en la dirección del movimiento se ven reducidas por el mismo factor, se ha de reducir igualmente el tiempo de exposición.

En total, se necesita $10^3 = 1000$ veces más iluminación para "ver" manchas de 0.010mm que para verlas de 0.1mm. Por tanto, se concluye de difícil realización dicha tarea, y se coloca el límite de observación en manchas de 0.05mm en fases posteriores.

5 Algoritmos de procesamiento de la Fase I.

Este capítulo está dedicado al diseño de los algoritmos de procesamiento de imagen necesarios en este proyecto, tanto de preprocesado (o mejora) como de procesado propiamente dicho.

Previamente, se comenzará con una introducción teórica al procesado digital de imágenes, donde se explican básicamente los tipos de filtrado que se llevan a cabo en el preprocesamiento y el tipo de segmentación que se efectúa en este proyecto. Acto seguido, se desarrollan los algoritmos necesarios usando los conocimientos anteriormente introducidos.

En este nivel se pueden cumplir los objetivos con aplicaciones matemáticas de propósito general, que contengan librerías específicas para el procesamiento de imágenes. En concreto, las pruebas realizadas se han hecho usando *MATLAB 6.0*.

5.1 Fundamentos teóricos del procesado digital de imágenes.

El procesado de imágenes trata de conseguir unos objetivos previamente establecidos realizando operaciones matemáticas sobre una imagen. Normalmente, la imagen es codificada en el dominio digital, siendo las operaciones efectuadas en dicho dominio.

Existen campos bien diferenciados dentro del procesado digital de imágenes:

 Preprocesado o mejora de imagen: consiste en procesar una imagen dada, de forma que el resultado sea más apropiado para una aplicación específica. Esto último es importante, ya que estas técnicas están muy orientadas a problemas particulares.

- Segmentación: es la separación de los elementos de interés en la imagen (objetos) de los superfluos.
- Representación y clasificación: una vez los objetos han sido detectados, han de ser englobados dentro de cierta clase. En el contexto del proyecto, correspondería a, por ejemplo, una vez eliminado el fondo, decidir de entre todos los objetos, qué es una mancha y qué otro tipo de errores. En este caso no tiene sentido, puesto que en principio se pretende que el resultado de la segmentación sea únicamente la separación de cascarilla y fondo. En fases posteriores, con vistas a determinar criterios analíticos de clasificación (ver apartado 2.4), sí será necesario caracterizar más a fondo el aspecto y la aparición de cascarilla, y proporcionar información adicional como número de manchas, tamaño o posición de las mismas, tarea que sí se incluye dentro de este campo.

Esta división no es única, pero es adecuada para el propósito de este proyecto. En los siguientes apartados se desarrollarán cada uno de estos campos, explicando lo necesario para entender los algoritmos que se han diseñado.

5.1.1 Operaciones de mejora. Preprocesado.

Como se ha explicado, las técnicas de preprocesamiento son muy específicas para cada aplicación, y consecuentemente, aquí se tratarán solamente las que se han usado en la resolución de la Fase I, que son el filtrado y la detección de variaciones en la iluminación.

5.1.1.1 Filtrado.

El filtrado de una imagen se puede llevar a cabo tanto en el dominio del espacio como en el de la frecuencia, usando fundamentalmente la transformada de Fourier. La inmensa mayoría de los sistemas de visión artificial usan algoritmos basados en estas aproximaciones como parte del preprocesado en cada aplicación concreta.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Los métodos de preprocesado en el dominio espacial operan directamente sobre el valor de los píxeles. Una operación en este dominio puede ser expresada como:

$$g(x, y) = T[f(x, y)]$$
 (5.1)

donde f(x,y) es la imagen de entrada, T un operador y g(x,y) la imagen resultado de aplicar T a f(x,y). Es posible que T opere sobre un conjunto de imágenes, como en el promediado de múltiples imágenes para reducir el ruido [32]. Estos casos corresponden a un procesado global, ya que el operador afecta a todos los píxeles de la imagen de la misma forma.

Las operaciones pueden ser también locales; en este caso, para obtener el valor de un píxel en la imagen de salida, sólo se tienen en cuenta los píxeles que se encuentran dentro de un vecindario alrededor de dicho píxel. Esto es apropiado cuando se quieren resaltar detalles en áreas pequeñas, ya que los píxeles de estas áreas no influirán computacionalmente en un procesado global.

Una de las técnicas de procesado espacial local más usada se basa en el uso de *máscaras de convolución* (también llamadas *templates*, *ventanas*, o *filtros*). Una máscara es una pequeña matriz W cuyos elementos ($w_{i,j}$, i=1,...,M, j=1,...,M, donde M es el orden de la máscara) se eligen de forma que se pueda realzar una propiedad dada en una imagen.

Por otro lado se define el vecindario de orden *M* alrededor de un píxel (x,y) $(N_M(x,y))$ como los elementos de una submatriz de la imagen de orden *MxM* centrada en el píxel (x,y). Estas definiciones son necesarias, puesto que el filtrado espacial es una operación local.

Así, la operación se lleva acabo como sigue: se toma un píxel (x,y) de la imagen original (cuyo tamaño, en número de píxeles es NxN), y se calcula un vecindario de orden M, que operará con la máscara (también de orden M)de la siguiente forma:

$$g(x, y) = T[f(x, y)] = \sum_{(i,j) \in N_M(x,y)} w_{i,j} f(i,j) \qquad x = 1, ..., N \quad y = 1, ..., N$$
(5.2)

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Viendo la ecuación (5.2), y su parecido con la expresión de una operación de convolución discreta, es fácil entender por qué W es llamada máscara de convolución.

A continuación se describen los dos tipos de filtrado espacial (ambos paso de baja) que se han usado en el Proyecto, y que por otra parte son los más corrientes.

✓ Filtrado de media:

Dada una imagen de tamaño NxN f(x,y), se pretende obtener una imagen suavizada, cuyos píxeles tienen un nivel de gris igual al valor medio en un vecindario determinado. Es decir:

$$g(x,y) = \frac{1}{M^2} \sum_{(i,j) \in N_M(x,y)} f(i,j) \qquad x = 1,...,N \quad y = 1,...,N$$
(5.3)

En la Figura 5-1 se puede comprobar el efecto de este tipo de filtro; se ha empleado una máscara de orden 5 sobre una imagen de tamaño 640x480*pixeles*. Como puede observarse, se uniformizan los niveles de gris de la imagen original, a costa de una reducción del contraste.



Figura 5-1. Filtrado de media. (a) Imagen original. (b) Imagen filtrada con un vecindario de 5x5. Ambas imágenes tienen una resolución de 640*x*480*pixeles*.

La ecuación (5.3) es un caso particular de filtrado con máscaras de convolución; es inmediato demostrar que las ecuaciones (5.2) y (5.3) son equivalentes para M = 3 si la máscara W en (5.2) es:

$$W = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Actualmente existen algoritmos rápidos de cálculos estadísticos locales [33] cuya filosofía puede extenderse a estos filtros y a los de mediana, que se estudian a continuación.

✓ Filtrado de mediana:

Es también una operación local, pero en este caso el valor de cada píxel es la mediana²⁰ de los niveles de gris de los píxeles que pertenecen al vecindario. Esto es:

$$g(x, y) = Med(i, j)|_{(i,j) \in N_M(x,y)}$$
(5.4)

donde Med es el operador mediana.

En la Figura 5-2 se muestra el resultado de aplicar un filtro de mediana de vecindario 5x5 a la imagen original de la Figura 5-1, cuya resolución es 640x480.



Figura 5-2. Filtrado de mediana. (a) Imagen original. (b) Imagen filtrada con un vecindario de 5 x 5. Ambas imágenes tienen una resolución de 640x480*píxeles*.

²⁰ La mediana *m* de un conjunto de números $\{C_i\}$ es aquel valor que pertenece al conjunto tal que la mitad de los elementos de $\{C_i\}$ son mayores o iguales que *m*, y la otra mitad menores.

Como se puede observar en las figuras de ejemplo, el filtro de mediana conserva mejor el contraste de los bordes que el de la media.

Ambos filtros suelen usarse para reducir el ruido de alta frecuencia.

Los métodos basados en el dominio de la frecuencia trabajan con la transformada de Fourier de la imagen [34]. Estos métodos se basan en el teorema de convolución: básicamente, éste dice que a la convolución de dos funciones bidimensionales en el dominio del espacio le corresponde el producto de las transformadas de Fourier de dichas funciones en el dominio de la frecuencia. Es decir

$$h(x,y) * f(x,y) \Leftrightarrow \mathcal{F} \{h(x,y) * f(x,y)\} = H(u,v)F(u,v)$$
(5.5)

donde "*" es el operador convolución (ver su definición en [34]) y H(u,v) y F(u,v) son las transformadas de Fourier de h(x,y) y f(x,y), respectivamente.

En una aplicación típica de mejora de imagen, f(x, y) es una imagen dada, y el objetivo es encontrar H(u,v) tal que se obtenga otra imagen g(x,y) usando la ecuación (5.5):

$$g(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\left\{F(u,v)H(u,v)\right\}$$
(5.6)

Esta nueva imagen exhibe determinadas características de f(x,y) realzadas o atenuadas por H(u,v).

El procesar en el dominio del tiempo o de la frecuencia dependerá de cada aplicación en concreto. Es más eficiente realizar el filtrado en el dominio de la frecuencia si la máscara de convolución supera un determinado número de puntos. En este sentido, en [36] se demuestra para el caso unidimensional que es más eficiente llevar a cabo las convoluciones en el dominio de la frecuencia si el número de puntos es mayor que 32. Hay que mencionar que existen métodos para obtener máscaras de convolución de procesado espacial de bajo orden que se aproximen a una H(u,v) dada según un determinado criterio, con objeto de acortar el tiempo de proceso [37].

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

El próximo paso es el cálculo de la función H(u,v). Para ello, en este Proyecto se ha usado una aproximación Butterworth.

✓ Filtros Butterworth. La función de transferencia de un filtro Butterworth paso de alta de orden *n* y con lugar de frecuencia de corte a una distancia D_0 del origen se define con la expresión:

$$H(u,v) = \frac{1}{1+0.414 \left[\frac{D_0}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right]^{2n}}$$
(5.7)

En la Figura 5-3 se muestra una vista en 3-D de este filtro y una sección radial del mismo.

Con este tipo de filtrado, viendo el espectro de la imagen original, se pueden eliminar frecuencias correspondientes a variaciones espaciales por debajo de un radio determinado, que será D_0 . Los efectos serán, entre otros, realce de bordes y aumento de contraste.

5.1.1.2 Eliminación de variaciones en la iluminación.

Es relativamente normal que las imágenes que se toman en líneas de producción similares a las que estamos tratando (telas, papel, maderas, etc) presenten no uniformidades en la iluminación, por mucho empeño que se ponga en evitarlas. Los motivos son variados: ondulaciones de la línea de producción, curvatura de rodillos o tensores (si la inspección se lleva a cabo en ellos), no uniformidad de la excitancia de la fuente, el uso de elementos difusores, etc.

Por tanto, es conveniente diseñar un algoritmo que atenúe los efectos de este fenómeno con vistas a usarlo en fases posteriores.

El algoritmo efectúa básicamente un filtrado paso de alta; sin embargo se ha decidido estudiar aparte debido a que la finalidad que persigue es muy concreta.



Figura 5-3. Filtro Butterworth de 64x64 puntos de orden 5 y radio 8. (a) Vista 3-D. (b) Sección radial.

El método se basa en el filtrado homomórfico [38], aunque en este caso se realizará un procesado no lineal local. Dicho método trata de detectar el fondo para estimar la superficie de variación espacial de la iluminación para, posteriormente, restársela a la imagen original. El procedimiento se muestra en forma de diagrama de flujo en la Figura 5-4, y se explica a continuación:



Figura 5-4. Diagrama de flujo del algoritmo de eliminación de variación de la iluminación.

 En primer lugar se fragmenta la imagen en bloques, cuyo tamaño ha de ser lo suficientemente grande como para que las manchas no afecten en demasía en el posterior procesado de bloque (puesto que se pretende detectar el fondo),

pero lo suficientemente pequeño para seguir las variaciones de la iluminación. Por tanto ha de ser definido en fases superiores, cuando se disponga de imágenes tomadas en campo en las que se pueda estimar el periodo de dichas variaciones.

Para las pruebas que se mostrarán más adelante, se ha tomado como adecuado un tamaño de bloque de 16x16.

- Posteriormente se efectúa el procesado en cada bloque, siendo el objetivo de éste estimar el fondo; se han probado dos posibilidades:
 - ✓ Cálculo del máximo: puesto que tanto las manchas como las sombras son oscuras (niveles de gris bajos), el píxel cuyo valor sea máximo en el bloque pertenecerá al fondo, obteniéndose una estimación de éste, y por tanto, de la iluminación.
 - Cálculo de la media: es también una forma de obtener el fondo, puesto que en un bloque, la mayoría de píxeles pertenecen a éste. En este caso es de esperar una mayor uniformidad en la estimación.

Más adelante se expondrán los criterios mediante los cuales se ha seleccionado uno de estos métodos. Tanto la fragmentación en bloques de la imagen del paso 1 como el procesado se llevan a cabo con una función de *Matlab* llamada *blkproc*.

- 3. La imagen obtenida con *blkproc* es de tamaño *N*/16*xM*/16, siendo *NxM* el tamaño de la imagen original. Por tanto, se realizará una interpolación para obtener el resultado de la estimación del fondo en tamaño *NxM*. Para ello, se ha utilizado la función de *Matlab resize*. En concreto, se ha implementado para que efectúe una interpolación *bilineal*.
- 4. Una vez obtenida la estimación de la iluminación, ésta se resta a la imagen original, resultando una nueva imagen sin la variación en la iluminación.
- Como consecuencia de las operaciones matemáticas sobre la imagen, la matriz resultado del paso anterior tendrá algunos de sus elementos fuera del intervalo [0, 255]. Por tanto, se usa la función de *Matlab mat2gray*, para mapear el

intervalo de valores existente entre los valores máximo y mínimo de la imagen resultado dentro de otro normalizado $[0,1]^{21}$.

El algoritmo descrito en la Figura 5-4 supone que el efecto de la iluminación es aditivo (se resta la iluminación detectada a la imagen). Sin embargo, si se recuerda el apartado 3.1, y en particular la ecuación (3.2), se concluye que esa suposición no es cierta: el modelo adecuado es multiplicativo.

Añadiendo sencillas modificaciones al algoritmo descrito se puede adaptar para ser usado con este modelo. En efecto; tomando logaritmos en la mencionada ecuación (3.2), se obtiene una expresión aditiva de los efectos de la iluminación y reflectivos de la escena:

$$\log f(x, y) = \log i(x, y) + \log r(x, y) \Leftrightarrow f(x, y) = \tilde{i}(x, y) + \tilde{r}(x, y)$$
(5.8)

Así, si al inicio del algoritmo se toma el logaritmo de la imagen leída, la curva de iluminación calculada será una estimación de $\tilde{i}(x, y)$, que llamaremos $\hat{i}(x, y)$, y por tanto, la operación que se lleva a cabo en el nuevo algoritmo es:

$$\hat{f}(x,y) = \tilde{i}(x,y) + \tilde{r}(x,y) - \hat{i}(x,y) = \Delta(x,y) + \tilde{r}(x,y)$$
(5.9)

con lo que el resultado es independiente de la iluminación, salvo el error $\Delta(x, y)$. Obviamente, es necesario deshacer la transformación efectuada con el logaritmo:

$$f_{resultado}(x, y) = r(x, y)e^{\Delta(x, y)} = r(x, y)\xi(x, y)$$
(5.10)

Finalmente, como se puede comprobar, el resultado definitivo es la componente reflectiva afectada por un error, $\xi(x, y)$, que depende de la bondad de la estimación de la iluminación.

Así, el algoritmo definitivo de eliminación de iluminación no uniforme se encuentra en la Figura 5-5.

 $^{^{21}}$ El uso de *mat2gray* hace que las imágenes con las que se trabaja estén normalizadas entre 0 y 1, y no entre 0 y 255 como es usual. Esto afecta directamente a los histogramas, que es donde aparece explícitamente el intervalo de codificación de los niveles de grises de una imagen. Por tanto, el hecho de que en los histogramas aparezcan niveles entre 0 y 1 ó entre 0 y 255 sólo indica si la imagen asociada ha sido procesada con *mat2gray* o no.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 5-5. Diagrama de flujo del algoritmo definitivo de eliminación de no uniformidades en la iluminación.

Para ilustrar todo lo anterior, se contaminará una imagen tomada de una de las muestras con otra imagen, que simulará una iluminación no uniforme. Se tendrán en cuenta los dos modelos, el aditivo y el multiplicativo.

Modelo aditivo

En este caso, a la imagen original, f(x,y), se le sumará la función senoidal que aparece en la siguiente ecuación:

$$i(x, y) = 128 \left[1 + sen\left(\frac{2\pi}{N}x\right) \right] x = 1, ..., N \quad y = 1, ..., M$$
(5.11)

i(x, y) oscila entre 0 y 255, con lo que, tras una adaptación de nivel, se obtendrá la imagen con iluminación no uniforme, f'(x,y). En la

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Figura 5-6 se puede observar f(x,y), y en la Figura 5-7 f'(x,y).



Figura 5-6. Imagen a procesar, tomada en laboratorio a plancha parada.



Figura 5-7. Imagen con iluminación variable espacialmente generada por software (modelo aditivo).

A continuación se mostrará una colección de imágenes en las que aparecen resultados de aplicar los anteriores algoritmos a la imagen de la Figura 5-7.

Tras fragmentar la imagen y aplicar el algoritmo del máximo, se obtiene la imagen representada en la Figura 5-8, representada como una superfície para tener una mejor percepción de la información extraída en el proceso. Nótese que esta imagen es de tamaño N/16xM/16.

Al igual que ocurre con los filtros de media y de mediana, el cálculo de máximos y mínimos está muy extendido, y hay algoritmos que lo efectúan muy eficientemente [39].



Figura 5-8. Superficie resultado de extraer el fondo de la Figura 5-7 con el algoritmo del máximo (antes de interpolar).

El fondo de las planchas tiene una variabilidad elevada, que hace que la iluminación detectada no sea suave (como se puede comprobar en la figura). Estas componentes de alta frecuencia espacial provocan "lóbulos" en la imagen resultado, que pueden verse (suavizadas por la interpolación) en la Figura 5-9.



Figura 5-9. Resultado de restar el fondo obtenido con el algoritmo del máximo a la imagen original.

No ocurre lo mismo si se usa el algoritmo de la media, como se aprecia en las Figura 5-10 y 5–11.



Figura 5-10. Superficie resultado de extraer el fondo de la imagen de la Figura 5-7 con el algoritmo de la media (antes de interpolar).



Figura 5-11. Resultado de restar el fondo obtenido con el algoritmo de la media a la imagen original.

A la vista de la Figura 5-11, parece que el resultado que se obtiene con el algoritmo de la media es mucho mejor que el del máximo. Realmente, la diferencia entre las dos soluciones no es grande, en contra de lo que pueda parecer visualmente.

Para demostrarlo, se ha calculado la diferencia entre la senoide original con lo cual se contaminó la imagen original (ecuación (5.11)) y la que se detecta con cada algoritmo. Esta imagen, que se denominará $f_{diff}(x,y)$, es representativa del error cometido con cada aproximación. Por analogía con el procesamiento digital de señales discretas unidimensionales, se ha realizado una estimación de la potencia media del error.

La potencia media (o valor *rms*) de una señal discreta unidimensional x[n] es [40]:

$$\wp = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| x[i] \right|^2}$$
(5.12)

Por tanto, por extensión directa al caso bidimensional, se estima la potencia del error como:

$$\zeta = \sqrt{\frac{1}{N \, x \, M} \sum_{x=1}^{N} \sum_{y=1}^{M} \left| f_{diff}(x, y) \right|^2} \tag{5.13}$$

Los resultados obtenidos en las simulaciones demuestran que el algoritmo de la media es mejor en este sentido, pero no de forma significativa. En el caso de la simulación concreta de la que se han extraído las figuras anteriores, se obtiene:

$$\zeta_{maximo} = 43.4505$$
$$\zeta_{media} = 15.4708$$

Si se calcula la potencia media de la señal, se tiene: $\zeta_{señal} = 401.37$. Así, se tienen unos errores relativos de aproximadamente el 11% para el algoritmo del máximo y del 4% para el de la media.

Por otro lado, el algoritmo del máximo presenta algunas ventajas sobre el de la media, que se exponen a continuación:

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

- El resultado en su caso es independiente de la densidad de cascarilla presente en el bloque, a menos que una mancha de cascarilla ocupe todo el bloque; sin embargo, esto va en contra de las premisas tenidas en cuenta en la elección del tamaño del mismo.
- El algoritmo del máximo es alrededor de un 67% más efectivo en tiempo de ejecución que el de la media para las pruebas realizadas.

Por último, hay que decir que la dificultad a la hora de separar fondo y cascarilla es similar en ambos casos: en las dos figuras siguientes se han representado los histogramas de las imágenes resultado obtenidas con los algoritmos que se están estudiando, y se puede observar que en ambos hay dos picos diferenciados: el mayor corresponde al fondo²² (ya que hay muchos más píxeles que pertenecen a éste) y el otro a las manchas de cascarilla. En el siguiente apartado se verá la separación de diferentes objetos mediante umbralización.

Resumiendo, el algoritmo del máximo presenta un error ligeramente mayor en la detección que el de la media, pero es más efectivo computacionalmente y no depende de la densidad de cascarilla en el bloque. Además, ambas imágenes resultado presentan histogramas similares. Por todo ello, se selecciona para usar en adelante el algoritmo del máximo como proceso de bloque en el algoritmo de eliminación de variaciones en la iluminación.

 $^{^{22}}$ Nótese que ambos histogramas se muestran con el eje y truncado.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 5-12. Histograma de la imagen resultado obtenida con el algoritmo del máximo.



Figura 5-13. Histograma del resultado obtenido con el cálculo de la media en cada bloque.
Todo lo anterior se ha mostrado para el modelo aditivo, en el que las operaciones efectuadas son más intuitivas. No obstante, ya se ha visto que el modelo adecuado es el multiplicativo, representado por la ecuación (3.2). Así, a continuación se expondrán los resultados de aplicar el algoritmo descrito por el diagrama de flujo mostrado en la Figura 5-5, que asume el modelo multiplicativo en la formación de la imagen.

Modelo multiplicativo

En este caso, la función senoidal que simula las no uniformidades en la iluminación es:

$$i(x, y) = \frac{1}{4} \left[3 + sen\left(\frac{2\pi}{N}x\right) \right] x = 1, ..., N \quad y = 1, ..., M$$
(5.14)

Esta función seno varía entre $\frac{1}{2}$ y 1, de forma que la región en que se oscurece la imagen al realizar el producto no llegue a ser totalmente negra (como ocurriría si *i*(*x*,*y*) valiese en algún punto cero).

De la Figura 5-14 en adelante se muestra el mismo proceso usado anteriormente (con el cálculo del máximo como procesado de bloque), y el resultado que se obtiene. Obviamente, tras el procesado habrá que deshacer la transformación de la ecuación (5.8).



Figura 5-14. Imagen a procesar, tomada en el laboratorio a plancha parada.



Figura 5-15. Imagen con iluminación variable espacialmente generada por software (modelo multiplicativo).



Figura 5-16. Superficie resultado de extraer el fondo de la Figura 5-15 con el algoritmo del máximo (antes de interpolar).



Figura 5-17. Imagen resultado del algoritmo, tras deshacer la trasformación logarítmica.

Con lo cual, vista la Figura 5-17, se puede concluir que el método de detección de variaciones en la iluminación cumple su cometido.

Puede parecer que el hecho de tener que aplicar logaritmos a toda la imagen aumentará el tiempo de procesado de forma significativa, pero se pueden usar sendas LUTs²³ para hacer y deshacer la transformación.

5.1.2 Segmentación.

De los variados métodos de segmentación, aquí se tratará sólo la umbralización (Ver el resto de métodos en, por ejemplo, [41]).

La umbralización es una de las técnicas de segmentación más usadas en los sistemas de visión automática para la detección de objetos, especialmente en aplicaciones que requieran el procesado de una gran cantidad de datos.

Si se observa el histograma representado en la Figura 5-18, recordando el apartado 3.1.2, se puede suponer que corresponde a una imagen f(x,y) en la que hay un objeto oscuro sobre un fondo claro. Una forma obvia de separar el objeto del fondo es seleccionar un nivel de gris *T* que separe los dos niveles dominantes. Así, un punto (x,y) para el cual f(x,y) < T será un punto del objeto; en caso contrario, éste pertenecerá al fondo.

Esto se puede extender a varios objetos; en la Figura 5-19, se puede observar un histograma con tres niveles dominantes (se supondrá que corresponde a un fondo claro y dos objetos más oscuros). En este caso, el procedimiento será similar: un punto (x,y) será clasificado como perteneciente a un objeto si $f(x,y) < T_1$, perteneciente al otro si $T_1 < f(x,y) \le T_2$ y será fondo si $f(x,y) > T_2$. Los procedimientos que usan este *umbral múltiple* suelen ser menos fiables, debido a la dificultad de establecer umbrales que separen efectivamente regiones de interés.

²³ Una LUT (*Look-Up Table*) es una tabla de 2^n elementos (*n* número de bits) en la que cada uno contiene una transformación de su índice. Si, como ejemplo, se quiere usar una LUT para calcular el logaritmo de una imagen de 8 bits, se habrá de obtener una tabla de 256 elementos en la que el elemento *i*-ésimo contenga el *log i*. De esta forma, el cálculo del logaritmo para cada píxel se ve sustituido por un acceso a esta tabla, reduciendo significativamente el tiempo de procesado.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.



Figura 5-18. Histograma de dos niveles dominantes. Umbral simple.



Figura 5-19. Histograma con tres niveles dominantes. Umbral múltiple.

Los dos casos antes mencionados corresponden a técnicas globales de umbralización. Sin embargo, se puede pensar en extender más su uso, por ejemplo, usando técnicas locales; así, de forma general se puede definir un umbral de la siguiente forma:

$$T = T[x, y, p(x, y), f(x, y)]$$
(5.15)

donde p(x, y) es alguna propiedad local de f(x,y).

Así, si *T* depende sólo de f(x,y), el umbral se llama global; si depende tanto de f(x,y) como de p(x,y), será local. Adicionalmente, si depende de las coordenadas espaciales *x* e *y*, entonces es llamado umbral dinámico. En [42] se pueden encontrar ejemplos de aplicación de los tipos de umbral descritos.

Como ejemplo, se usará una umbralización global con la imagen de la Figura 5-20, de la que se pretende extraer el objeto cámara. Observando el histograma (Figura 5-21), se puede encontrar:

- Un gran número de píxeles de nivel de gris V cercano a cero, que corresponden a las partes más oscuras de la cámara.
- Un intervalo de niveles bajos/medios, que se asocian a reflejos y a partes grises de la cámara (desde V = 10 hasta V = 110 aproximadamente).



Figura 5-20. Ejemplo. Objeto predominantemente oscuro sobre fondo claro.

- Un intervalo de valores de V con muy poca representación en la imagen (desde V = 110 a V = 240).
- El pico más grande del histograma se encuentra en V = 255, y corresponde con los píxeles de fondo, que son blancos.

Con todo ello, parece lógico situar el umbral en 200, que separa los píxeles asociados al nivel dominante más claro (fondo) del resto (cámara). El resultado se muestra en la Figura 5-22.



Figura 5-21. Histograma de la imagen de la Figura 5-20.



Figura 5-22. Resultado de umbralizar con T=200 la imagen de la Figura 5-20.

5.2 Algoritmos de proceso en la Fase I.

Una vez definidas unas bases teóricas fundamentales, será muy rápido y sencillo definir el procesado que se va a llevar a cabo para detectar la cascarilla.

Aquí se mostrará el resultado de procesar cuatro imágenes que se han considerado representativas dentro de los conjuntos de muestras que se han recibido de ACERINOX. Estas imágenes aparecen representadas en las figuras de las páginas 5-117 y 5-118.

- Figura 5-23 y Figura 5-24: Las manchas de cascarilla en estos casos son claramente visibles.
- Figura 5-25: En esta imagen hay ausencia teórica de cascarilla, y se ha incluido para comprobar como reaccionan los algoritmos ante este caso.
- Figura 5-26: Por último, se representa en esta figura una imagen con una alta densidad de manchas de cascarilla de pequeño tamaño.

Hay que resaltar que el tamaño e incluso el número de píxeles por milímetro de estas imágenes pueden ser diferentes entre sí. El motivo es que las pruebas fueron realizadas con un equipamiento inadecuado, con el que era difícil conseguir una buena repetitividad. Por supuesto, las condiciones en que se tomaron las distintas imágenes fueron lo más similares posibles de una a otra, y esto es suficiente para lo que se pretende demostrar en este proyecto.



Figura 5-23. Imagen original de una muestra de la bobina Nº 0280P8 ACX 171/01.



Figura 5-24. Imagen original de una segunda muestra de la bobina Nº 0280P8 ACX 171/01.



Figura 5-25. Imagen original de una muestra de la bobina Nº 0479K2 ACX 500/01.



Figura 5-26. Imagen original de una muestra de la bobina Nº 0280N7 120/01.

En la Figura 5-27 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo general, y a continuación se justifica, cada operación:



Figura 5-27. Diagrama de flujo del algoritmo de detección de cascarilla.

- 1. Eliminación de no uniformidades en la iluminación. algoritmo desarrollado en el apartado 5.1.1.2.
- 2. Filtrado paso de alta: se lleva a cabo para realzar el contraste fondomancha. Es realizado en el dominio de la frecuencia, en el que se tiene más control de las características del filtro. Esto es deseable en esta fase de pruebas, aunque probablemente, una vez conocidas las características necesarias sobre imágenes tomadas en campo se implemente en el dominio del tiempo. Las características del filtro que mejores resultados han dado son: radio 17 y orden 2. En la Figura 5-28 se muestra el espectro

de una de las imágenes analizadas, representada como una imagen. Como se puede observar, su contenido es fundamentalmente de baja frecuencia. En ella se ha superpuesto una circunferencia de radio 17.



Figura 5-28. Fragmento central del espectro de una de las imágenes procesadas mostrado como una imagen. El círculo azul superpuesto tiene un radio de 17 píxeles.

3. Filtrado de mediana: puesto que la cascarilla se aloja en el grano, los niveles de gris de las manchas no son uniformes, y obviamente los del fondo tampoco, debido mayormente al grano. Por tanto, se produce un solapamiento en los niveles dominantes del histograma, de forma que un número elevado de niveles de grises pertenece a fondo y a cascarilla al mismo tiempo. Así, con este filtrado se pretende hacer que los niveles de fondo se uniformicen hacia niveles más claros y los de cascarilla hacia niveles más oscuros. Puesto que las manchas han de contar con, al menos, cuatro píxeles ($2x^2$), es adecuado que ése sea el tamaño del vecindario usado en el filtrado; si fuera mayor, podrían perderse las manchas de tamaño mínimo.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

 Umbralización: para lograr la separación entre fondo y cascarilla. El algoritmo de cálculo automático de umbral no ha sido desarrollo en la Fase I descrita en esta memoria.

Para cada imagen se muestra una colección de figuras en la que se pueden apreciar los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo que se ha indicado. De cada una se mostrará:

- ✓ Histograma de la imagen original. Todos los histogramas que se muestran están truncados a 200*píxeles* en el eje de ordenadas, y en la abcisa se representan valores de V en un intervalo normalizado [0,1] (ver la nota al pie de la página 5-99).
- ✓ Imagen post-procesado.
- ✓ Histograma de la imagen post-procesado.
- ✓ Imagen umbralizada.



Figura 5-29. Histograma de la imagen de la Figura 5-23.



Figura 5-30. Imagen que se obtiene como resultado tras pasar la batería de algoritmos a la imagen de la Figura 5-23.



Figura 5-31. Histograma de la imagen de la Figura 5-30.



Figura 5-32. Cascarilla detectada en la imagen de la Figura 5-23 con umbral T = 0.7.



Figura 5-33. Histograma de la imagen de la Figura 5-24.



Figura 5-34. Imagen que se obtiene como resultado tras pasar la batería de algoritmos a la imagen de la Figura 5-24.



Figura 5-35. Histograma de la imagen de la Figura 5-34.



Figura 5-36. Cascarilla detectada en la imagen de la Figura 5-24 con umbral T = 0.65.



Figura 5-37. Histograma de la imagen de la Figura 5-25.



Figura 5-38. Resultado de aplicar la batería de algoritmos a la imagen de la Figura 5-25.



Figura 5-39. Histograma de la imagen de la Figura 5-38.



Figura 5-40. Cascarilla detectada en la imagen de la Figura 5-25.



Figura 5-41. Histograma de la imagen de la Figura 5-26.



Figura 5-42. Resultado de aplicar la batería de algoritmos a la imagen de la Figura 5-26.



Figura 5-43. Histograma de la imagen de la Figura 5-42.



Figura 5-44. Cascarilla detectada en la imagen de la Figura 5-26 con umbral T = 0.51.

El tiempo de proceso hasta el momento es de varios segundos en un Pentium III a 1*GHz* y con imágenes de tamaño algo menor que VGA, aunque éste está lejos de ser el valor definitivo:

- ✓ Los algoritmos no están en absoluto optimizados, ya que seguramente sufrirán cambios (posiblemente sustanciales) en fases posteriores.
- ✓ *Matlab* es un lenguaje interpretado, no compilado.
- ✓ Hasta el momento, cuando se calcula el logaritmo o la exponencial de una imagen, se realiza la operación para cada píxel, y esto es muy costoso computacionalmente. En el sistema real se utilizarán LUTs, lo que reducirá de forma muy significativa el tiempo de proceso.
- ✓ De igual forma, la función de transferencia del filtro paso de alta se recalcula para cada imagen, cuando idealmente será la misma para todas ellas (en el peor caso, se calculará en una fase de calibración).
- ✓ En el análisis de viabilidad las operaciones han sido realizadas en coma flotante; en el sistema real se trabajará con números enteros, lo que también reduce de forma drástica el tiempo de ejecución de cada instrucción.

No obstante, aún sin tener en cuenta todo lo anterior, el tiempo del que se dispone para procesar es muy elevado, ante la escasa área que cubre actualmente el operario. Si finalmente, en campo se alcanzara un tiempo de proceso de 10 segundos (que es una cantidad realmente elevada para los sistemas de hoy día) se podrían tomar hasta 100 imágenes de cada bobina.

5.3 Conclusiones.

Las conclusiones que se pueden extraer de cada grupo de imágenes es distinta:

 ✓ Imágenes correspondientes a muestras de la bobina № 0280P8 ACX 171/01 (Figura 5-23 y Figura 5-24).

Los resultados obtenidos de procesar las muestras de esta bobina son satisfactorios. Una inspección visual de la muestra confirma que la cascarilla detectada lo es efectivamente y que no se han tomado como tal otros defectos presentes en dichas muestras. ✓ Imagen correspondiente a una muestra de la bobina № 0479K2 ACX 500/01 (Figura 5-25).

Con esta imagen se pretende comprobar el resultado del algoritmo al procesar una muestra de acero limpio (o con manchas indetectables). Esto se preveía un problema desde el principio, puesto que el algoritmo encargado de calcular el umbral queda "ciego" al no haber cascarilla en la imagen. Sin embargo, como se puede comprobar en las pruebas realizadas, los histogramas de muestras con y sin cascarilla son bien diferentes. En los primeros hay un pico indicativo del número de píxeles considerados cascarilla y en el segundo no existe tal pico. Es decir, la pendiente del histograma de una plancha limpia de cascarilla es aproximadamente creciente hasta alcanzar el pico correspondiente a los píxeles de fondo. Esta diferencia puede ser usada para decidir si una plancha está o no libre de cascarilla.

 ✓ Imagen correspondiente a una muestra de la bobina № 0280N7 ACX 120/01 (Figura 5-26).

Este es el caso más conflictivo. En principio, es imposible constatar que los puntos oscuros que aparecen en la imagen son cascarilla o sombras por falta de equipamiento (aunque la iluminación reduce gran parte de éstas, el reducido tamaño de las manchas hace que se vean más afectadas por las sombras).

Otro problema es que la resolución en el plano del objeto no ha podido ser aumentada hasta lo considerado necesario para "ver" manchas de ese tamaño, debido a que se necesita una distancia al objeto mínima para conseguir la iluminación apropiada. Esto hace que el contraste entre las manchas y el fondo sea muy bajo, por lo que el resultado de los algoritmos es peor. Como se puede comprobar en la Figura 5-43, el mínimo del valle del histograma es elevado, por lo que habrá un gran número de píxeles cuyo nivel de gris está presente tanto en fondo como en cascarilla. Se tiene la convicción de que estos problemas pueden ser evitados con el uso de equipamiento adecuado, ya que están provocados básicamente por falta de resolución (en términos de *píxeles/mm*).

Los resultados de estas pruebas fueron aprobados por el Departamento de Metalurgia de ACERINOX en la reunión mantenida el 5 de agosto de 2002 en sus instalaciones en San Roque, Cádiz.

6 Propuesta para la adquisición de equipamiento.

En este apartado se especificará el equipamiento que se tiene previsto adquirir para instalar un prototipo del sistema de detección de cascarilla en la línea AP2. El equipo consta de los siguientes componentes:

- ✓ Cámara
- ✓ Óptica
- ✓ Sistema de iluminación
- ✓ Frame Grabber
- ✓ Software
- ✓ Ordenador (sistema de cómputo convencional).

A continuación, se describe un modelo concreto para cada uno de los elementos anteriores y se definirán las características de cada uno de ellos, indicando además las prestaciones que se consiguen con su uso: área abarcada, resolución, tiempo de exposición, etc. En todos ellos se usarán expresiones mostradas en los capítulos 3 y 4.

6.1 Cámara.

La cámara seleccionada ha sido el modelo A1 de la compañía *Jai* [43]. Sus características más importantes son:

- Cámara CCD monocromo de escaneo progresivo.
- Resolución: 1392x1040 píxeles.

- Velocidad: hasta 16 *frames/s* (*frames* completos).
- Tiempo de exposición: programable desde 5µs hasta 62.5ms.
- Control de características remoto vía RS 232C.

Para un mejor conocimiento de la cámara, en la Figura 6-1 se incluye una fotografía de ésta, y se adjunta el manual de usuario en el apéndice Apéndice B.



Figura 6-1. Cámara A1 de Jai.

Con la resolución dada (en número de píxeles) y dado un *PPM* de 40*píxeles/mm* (tamaño mínimo de mancha de 0.05*mm*), se puede abarcar:

$$HOR = \frac{l_{HOR}}{PPM} = \frac{1392 \, pixeles}{40 \, pixeles / mm} = 34.8 mm$$

$$VER = \frac{l_{VER}}{PPM} = \frac{1040 \, pixeles}{40 \, pixeles / mm} = 26 mm$$

$$Area = 904.8 mm^{2}$$

$$(6.1)$$

El caso de la detección de manchas de 0.1*mm* como mínimo es más favorable que el presentado: el área abarcada se ve cuadruplicada.

La cámara permite además trabajar con los tiempos de exposición requeridos; éstos estaban entre 25 y $50\mu seg$, según se pensara detectar manchas de 0.05 ó 0.1mm, siempre asumiendo una velocidad de avance de la plancha no superior a 60m/min. El tiempo de exposición es controlable remotamente a través del puerto serie de un ordenador dentro de un conjunto de valores discretos del mismo. En concreto, es

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

posible seleccionar 1/40000 y 1/80000seg (entre otros), que corresponden a los 25 y $50\mu seg$ necesarios (ver el manual de la cámara en el apéndice B).

Su velocidad permitiría capturar y descargar 16 imágenes completas por segundo, lo que hace posible tomar al menos 16000 imágenes de cada plancha, suponiendo que la velocidad de ésta es menor o igual que 60m/min, y que la plancha mide alrededor de 1000m.

6.2 Óptica.

La óptica que se propone es especial para cámaras de alta resolución. Las lentes que montan son superiores en calidad a las lentes estándar. Son especialmente indicadas para cámaras con sensores de gran tamaño, suelen presentar un MTF^{24} superior a 120lp/mm, y presentan muy baja distorsión óptica. Estás características son adecuadas para el caso que se trata en esta memoria, ya que se tiene una alta densidad de píxeles por mm.

El modelo propuesto es el INHR35028 de Infaimon [44], cuyas características se resumen en la Tabla 3.

Modelo	Fabricante	Focal	Apertura	Distancia	Formato	Diámetro	Longitud
		(mm)	mínima	mínima		máximo	(mm)
			(mm)	(mm)		(mm)	
INHR35028	INFAIMON	50	2.8	200	2/3"	34	58.5

Tabla 3. Características de la óptica INHR35028 de INFAIMON.

Adicionalmente se propone adquirir un juego de anillos de extensión (específicos para esta óptica), que se utilizan para enfocar zonas más pequeñas a distancias menores de la que permiten ópticas estándar. En la Tabla 4 se muestran las conseguidas con el juego de tubos de extensión propuestos.

 $^{^{24}}$ El MTF (*Función de Modulación de Transferencia*) es una medida de calidad de una lente. Se mide en *pares de líneas por milímetro (lp/mm)* y es indicativo de la bondad de la transferencia de estructuras finas de la lente al sensor.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Tubos de extensión (mm)	Distancia de enfoque (cm)
1.5	178 a 68
5	60 a 41
10	34 a 26
15	26 a 23
20	22 a 20
25	19 a 18
30	17
35	16
40	15

Tabla 4. Distancias de enfoque conseguidas añadiendo los tubos de extensión.

6.3 Sistema de iluminación.

Como se demostró en el capítulo 4, será necesaria una iluminación lo más difusa posible. Para conseguirla, se ha seleccionado un modelo de difusor del fabricante Nerlite llamado SCDI (Square Continuous Diffuse Illumination) [45]. En la Figura 6-2 se muestra una fotografía del difusor y un esquema que ilustra su funcionamiento.



Figura 6-2. Difusor SCDI.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Esta solución es adecuada y económica, en comparación con otros difusores más eficientes. Se han efectuado pruebas, cuyos resultados se muestran en la Figura 6-3. La imagen (a) de la figura tiene una resolución de 200*pixeles/mm* (tamaño de mancha mínimo detectable 0.01*mm*), pero ha sido tomada usando un tiempo de exposición elevado, del orden de 5*ms*. El motivo es que la fuente de luz era en este caso fluorescente, que es de potencia media/baja; por otro lado, el difusor, por su modo de funcionamiento, dispersa la potencia luminosa.

También se han realizado pruebas usando fuentes láser, pero en cualquier caso la iluminación con tan cortos tiempos de exposición, a tan alta resolución y el difusor hacen que la luz provista sea insuficiente.

De los tres requisitos anteriores (tiempo de exposición, resolución y difusión de la luz), sólo la resolución puede ser relajada, ya que los otros dos afectan directamente a la viabilidad del sistema. Afortunadamente, es el parámetro óptimo para mejorar la iluminación: al final del apartado 4.4.2, se muestra que para aumentar *PPM* (densidad de píxeles por mm) un factor *a*, se necesita una iluminación aproximadamente a^3 veces más potente. Así, la Figura 6-3(b) muestra una imagen con una resolución de 40*píxeles/mm* (tamaño mínimo de mancha 0.05*mm*), tomada con una fuente pulsante, un difusor SCDI y un tiempo de exposición igual a 1/20000 *seg*.

Como se puede comprobar, la imagen es muy adecuada; las manchas se distinguen perfectamente del fondo, en el que apenas hay sombras.

La fuente pulsante es el modelo MV-2020 de *EG&G*, *Inc* [46], cuyas características se resumen en la Tabla 5.

Modelo	MV - 2020
Ancho de banda espectral (nm)	300 - 1100
Salida radiométrica (mJ)	50
Duración del pulso (µs)	10 - 100
Tasa máxima de pulso (pulsos/seg)	20

Tabla 5. Características de la fuente luminosa.



Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

Figura 6-3. Imagen de una plancha con (a) *PPM* = 200*píxeles/mm*. (b) *PPM* = 40*píxeles/mm*.

A continuación se hará una estimación del número de electrones que colecta el sensor con una fuente de estas características.

Del *datasheet* del fabricante [46] se puede extraer la información necesaria para saber que en un pulso de $20\mu s$, la fuente emite 2.5KW de potencia luminosa. Haciendo un cálculo similar al realizado en el apartado 3.3 es posible calcular la excitancia del área de acero vista por la cámara. En efecto:

$$L = \frac{\rho \varphi_i \Omega_{fuente-objeto}}{2\pi A_{objeto}} = \frac{\rho \varphi_i}{2\pi d_{fuente-objeto}^2} = 1.77W / cm^2$$
(6.2)

Y, cada parámetro es:

 ρ : coeficiente de reflexión del acero. Será tomado igual a uno, aunque realmente será algo menor.

 φ_i : potencia luminosa producida por la fuente.

 $\Omega_{fuente-objeto}$: ángulo sólido del difusor a la plancha.

 $d_{fuente-objeto}$: distancia del difusor al acero (15*cm*).

 A_{objeto} : área del acero vista por la cámara (2.5 x 2.5*cm*).

Una vez conocida la excitancia, se siguen los cálculos mostrados en los apartados 3.3 y 4.4.2; en primer lugar se calculan la potencia luminosa y el número de fotones por segundo que llegan al sensor:

$$n_{foton} = \frac{\varphi_0}{\varepsilon_{foton}} = \left[\varphi_0 = \frac{LA_{objeto}A_{lente}}{2\pi d^2} = 27.66 mW \right] = 7.66 E + 16 ph/s$$
(6.3)

Posteriormente, se obtienen el número de fotones que llegan durante el tiempo de exposición a un solo píxel:

$$n_{ph}^{pixel} = \frac{n_{foton}}{1300x1030} = 57.21E + 9\,ph/s \Longrightarrow N_{ph}^{pixel} = n_{ph}^{pixel} T_{exp} = 1.43E + 6\,ph \quad (6.4)$$

Finalmente, haciendo uso de la eficiencia cuántica se calculan el número de electrones colectados por un píxel, y con él, asumiendo una sensibilidad de $3\mu V/e^{-}$, la tensión de salida:

$$N_{e}^{pixel} = \eta N_{ph}^{pixel} = 0.48E + 5e^{-} \Longrightarrow V_{0} = S_{V} N_{e}^{pixel} = 1.43V$$
(6.5)

Que es más del doble de la tensión de saturación que se usó como referencia en el apartado 4.4.2. Por supuesto, no se han tenido en cuenta las pérdidas que introduce el difusor, que harán que no se alcance un valor tan alto de la tensión de salida. Este análisis justifica la necesidad de una fuente de gran potencia.

6.4 Frame graber.

El frame grabber es el dispositivo encargado fundamentalmente de generar la sincronización del sistema, del almacenaje o *buffering* de las imágenes y de la conversión analógico-digital (en caso de que sea necesaria). Además normalmente pueden realizar transformaciones sencillas sobre las imágenes (disponen de LUTs para este propósito) y llevar a cabo tareas de multiplexación y/o control simultáneo de múltiples cámaras.

El modelo seleccionado es uno de los recomendados por el fabricante de la cámara, el PCVision*plus* de *Coreco Imaging* [47]. En el apéndice Apéndice B se incluye el *datasheet* de este frame grabber, y seguidamente se proporciona un resumen de sus características más destacables:

- Conversión analógico-digital rápida y con precisión de hasta 12 bits.
- Compatible con escaneo progresivo.
- Control rápido de bus para adquisición y transferencia simultáneas de imágenes con un uso mínimo de CPU. Interfaz PCI de alta velocidad.

6.5 Software.

En principio, en la fase II las imágenes serán procesadas off-line, por lo que no será necesario de momento seleccionar un paquete de software comercial.

6.6 Resumen de la propuesta.

Para finalizar este capítulo, se resume en la Tabla 6 todo el equipamiento, su coste, y un resumen de características y prestaciones.

				Precio		
Equipo		Modelo	Prestaciones	sin		
				I.V.A.(€)		
			Resolución: 1300 x 1030 <i>píxeles</i>			
Cámara		Jai – A1	Tiempo de exposición mínimo 1/200000 <i>seg</i>	2914		
			Permite obtener resoluciones de 40 <i>pixeles/mm</i> (detectar manchas de hasta 0.05 <i>mm</i>), y usar un tiempo de exposición adecuado, que estará alrededor de 50µs.			
		Lente	Focal: 50mm			
Óptica		20110	Apertura mínima: 2.8mm	219		
		INHR35028	Es de formato ancho para aprovechar al máximo la luz.			
		Tubos de	Disminuyen la distancia de trabajo y el	91		
		extensión	campo de visión.	71		
	Fuente		Salida fotométrica: 6lux seg			
Iluminación		MV - 2020	Duración de los pulsos: 10 a 100µs	3873,91		
			Ayuda al shuttering y concentra una alta potencia en cortos pulsos de tiempo.			
	Difusor	SCDI	Produce una difusión de la luz que permite eliminar las sombras producidas por el granulado.	971,74		
Enome a smalele an		PCVision	Digitaliza la señal de vídeo, genera la	15(())		
Varios		Plus	sincronización y sirve de interfaz con el PC.	1766,30		
		Cable 3m				
		Dsub 26 a 1	Cable cámara – frame grabber	108		
		Hirose 12 y	Cuore cumura mane gradder.	170		
		1Hirose 6				
		Bundle, Dual,	Cable de Fibra óptica.	381,64		
		0,25" outputs		10.41 = 50		
Total						

Tabla 6. Resumen de la propuesta de adquisición del equipamiento necesario para la Fase II.

7 Conclusiones y resultado de la Fase I.

La conclusión esencial de este proyecto, o lo que es lo mismo, de la Fase I del Proyecto de Detección de cascarilla residual de laminación en caliente en la línea AP2 de Acerinox, es que la construcción de un sistema de inspección visual con adquisición y procesado de imágenes en tiempo real para la detección automática de cascarilla residual, es viable.

Durante este estudio de viabilidad se han empleado muestras de acero proporcionadas por Acerinox. Se han tomado imágenes de zonas con y sin cascarilla, y los algoritmos de procesamiento empleados han demostrado ser capaces de detectar correctamente las manchas, sin confundirlas con otros defectos presentes en las muestras.

A continuación se resumen los aspectos técnicos más relevantes, las dificultades previsibles, y las soluciones propuestas para la construcción de un prototipo en línea, como paso previo al diseño de un sistema industrial.

- La cota mínima en el tamaño de las manchas a detectar (50μm) y la conveniencia de que dicha mancha mínima contenga al menos 2x2 píxeles para hacer suficientemente robusta su detección por parte de los algoritmos de procesamiento, hace necesaria una resolución en el plano del objeto (lámina de acero) de al menos 40*píxeles/mm*, es decir, el píxel deberá tener un tamaño máximo en el acero de 25μm.
- El movimiento de la plancha de acero en el tren de laminación, a una velocidad máxima de 1m/s, obliga a utilizar tiempos de exposición suficientemente pequeños para evitar la difuminación de la imagen. Los

datos de tamaño máximo del píxel y de velocidad de la lámina nos llevan a unos tiempos de exposición del orden de $25\mu s$.

- El granulado presente en la superficie del acero, unido a la alta reflectividad del metal, provoca reflejos y sombras si la iluminación empleada es direccional. De esta manera, las sombras se confunden fácilmente con cascarilla. Por este motivo, se propone el uso de iluminación difusa.
- El corto tiempo de exposición necesario, unido al reducido tamaño del píxel en el plano del objeto, obligan a utilizar fuentes luminosas de alta potencia. La conveniencia de emplear iluminación difusa aumenta esta necesidad, ya que los difusores de luz, por su propia naturaleza, introducen pérdidas luminosas significativas. La posibilidad de acercar al acero tanto la fuente de luz como la cámara para aumentar la cantidad de luz disponible se ve limitada por consideraciones de seguridad del equipamiento ante eventuales problemas en el tren de laminación. La necesidad de una alta potencia luminosa, junto a la brevedad de los tiempos de exposición, conducen a la utilización de una fuente de luz pulsante de alta potencia.
- La utilización de un factor de magnificación relativamente pequeño (0.4 tomando un tamaño habitual de píxel en el plano de la imagen de 10µm), la conveniencia de situar la cámara relativamente cerca del acero para aprovechar la energía luminosa, así como la conveniencia de utilizar una apertura elevada por el mismo motivo, llevan a profundidades de campo reducidas. La existencia de posibles ondulaciones en la lámina de acero, y en cualquier caso las fluctuaciones en el grosor de la lámina (de varios mm), podrían requerir ajustes de la distancia de enfoque durante el proceso de inspección. Estos factores llevan a una cuidadosa elección de la óptica a emplear, y posiblemente, al empleo de un objetivo motorizado controlable por el algoritmo de procesamiento.

Como consecuencia de estos resultados, Acerinox S.A. ha aprobado la continuación del trabajo contenido en este proyecto en una segunda fase consistente en la instalación de un prototipo en la línea de producción. Eventualmente, a esta

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.
segunda fase le seguirá una tercera, consistente en la construcción e instalación en la factoría de un sistema industrial de detección de cascarilla residual.

Apéndice A. Estudio de cámaras con aplicaciones científicas e industriales. Características y prestaciones.

A.1 Introducción.

En este apéndice se pretende hacer un acercamiento a conocer el amplio abanico de cámaras para aplicaciones científicas e industriales que se pueden encontrar hoy día en el mercado. Para realizarlo se han seleccionado varios fabricantes en la web, y de ellos se han escogido algunos modelos cuyas prestaciones aportan algo novedoso respecto a los de otras empresas.

El apéndice se organiza como sigue: en primer lugar se enuncian las características que se estudiarán para cada cámara, haciendo una breve explicación de ellas; posteriormente se tratarán de forma independiente las características de ruido, debido a la variedad (y en algunos casos escasez) de información obtenida de los distintos fabricantes; por último, se presentará una tabla en la que se muestran los resultados. Uno de los campos de dicha tabla es de comentarios, y también se dedicará un apartado especial a este campo por falta de espacio en la tabla.

A.2 Listado y explicación de características a estudiar.

Junto a las características, se encuentran también los valores que puede tomar en la tabla el campo asociado. 1. Compañía: fabricante de la **cámara**. En la bibliografía complementaria se mostrará una lista con las direcciones web de cada fabricante para una búsqueda de información más exhaustiva.

2. Modelo: modelo de la cámara.

3. Sensor: modelo del **sensor** y fabricante de éste, en caso de que sea diferente del de la cámara.

4. Tecnología: indica si el sensor es CCD o CMOS.

5. Matriz: este campo diferencia entre sensores de área o lineales. En los primeros se tiene una matriz de píxeles de dos dimensiones, y los segundos disponen de una única fila de píxeles. En un sensor lineal, una imagen bidimensional se forma provocando un movimiento relativo entre cámara y objeto, como se muestra en la Figura 7-1.



Figura 7-1. Escaneado con cámara lineal.

6. Transferencia: este campo contiene información acerca del transporte de la carga de los píxeles a donde se efectúa la conversión carga-tensión. Realmente sólo

tiene sentido estricto en los sensores CCD, ya que en los CMOS la conversión se lleva a cabo en el propio píxel (CMOS de píxel activo). *Transferencia* tendrá diferentes valores en función de las características del mencionado transporte de carga. A saber:

- Frame
- Interline.
- Frame-interline
- SSC: sin sentido en CMOS.
- SSL: sin sentido en lineal

En el apartado 3.4.1 se encuentra una breve explicación acerca de los tipos de transferencia de carga en un sensor CCD.

7. Scanning: en este campo se indica cómo se lee la imagen. Puede tomar dos valores:

- Progresivo: se leen secuencialmente todas las líneas de la imagen.
- Entrelazado: para reducir el ancho de banda se escanea la imagen en dos pasadas. Se envía en primer lugar las filas impares, para después proceder con las pares²⁵. Si la tecnología es CMOS, esto no es problema ya que simplemente se leen las filas del sensor alternativamente. Sin embargo, si es CCD no se puede proceder de esa forma, y se producen problemas evidentes en la toma de imágenes en movimiento.
- SSL.

8. Resolución: tamaño de la matriz en número de píxeles. Se expresa en *nfil x ncol* (siendo *nfil* el número de filas y *ncol* el número de columnas) si el sensor es de área y en *ncol* x 1 si es lineal. En este último caso, es posible que para un mismo modelo se disponga de diferentes números de columnas; siendo así, se expresa como ncol1/ncol2/.../ncoln x 1.

9. Tamaño físico de píxel: contiene la medida del píxel, en μm^2 .

²⁵ Cuando el escaneo es entrelazado, el conjunto de las líneas pares o impares se llama campo. Así, una trama o frame está formada por dos campos.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

10. Digital: puede contener los valores Sí/No, en función de si la cámara dispone de salida digital.

11. Número de bits del bus de salida (en caso de cámara digital).

12. Velocidad: indica el número máximo de cuadros, o *frames* por segundo (*fps*) que es capaz de transmitir la cámara si su sensor es de área. Si es lineal, indicará el número máximo de líneas por segundo (*lps*) que envía al exterior.

13. Tasa de salida: expresada en *Megapíxeles/seg*. Si se dispone de *n* canales de *T Megapíxeles/seg*, se expresará como *nxT*.

14. Rango dinámico: puede ser especificado de dos formas: rango dinámico óptico y eléctrico. El rango dinámico óptico es el cociente entre la mínima intensidad luminosa que produce saturación a la salida y la intensidad que produce una salida igual al ruido medido en la salida en ausencia de luz. El rango dinámico eléctrico es el cociente entre el voltaje de saturación y el voltaje de ruido en la salida en ausencia de luz.

15. Responsividad: Tensión en la salida producida por la unidad de intensidad luminosa durante un cierto intervalo de tiempo. Puesto que este parámetro depende de la longitud de onda de la luz incidente en el sensor, en este campo aparecerá el valor máximo de la responsividad. Si el sensor es analógico, las unidades son $V/(\mu J/cm^2)$. Si es digital, se mide en $DN/(nJ/cm^2)^{26}$.

16. Control de obturación (*shuttering*): indica qué tipo de control tiene el usuario sobre el tiempo de exposición, en caso de tenerlo; el campo obturación puede tomar los siguientes valores:

- Señal: la exposición está gobernada por una o más señales de control que han de ser generadas por el usuario.
- Valor numérico (*seg*): la cámara dispone de un conjunto finito de tiempos de obturación, entre los que el usuario puede elegir.

 $^{^{26}}$ DN: Digital Numbers. Indica un valor relativo a 2^N-1, donde N es el número de bits del bus de salida (cámaras digitales).

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

- Automático: el usuario no dispone de control sobre el tiempo de exposición, quedando éste gobernado por la cámara de forma autónoma.
- Fijo: sólo hay un tiempo de exposición. En estos casos, normalmente es el tiempo entre frames (cámaras de área) o entre líneas (cámara lineal).
- 17. Tipo de obturación: señala una de las dos formas siguientes de shuter:
- *Rolling* shutter: todos los píxeles están expuestos el mismo tiempo de exposición, pero no simultáneamente. Funciona como sigue:

En la matriz de píxeles habrá dos punteros que se van desplazando a lo largo de una dirección (supongamos que apuntan a filas) y que están separados un número fijo de ellas. El primero es el puntero de integración y el segundo el de lectura. Así, una fila se ve expuesta a la luz desde que pasa por ella el puntero de integración hasta que pasa el de lectura, momento en el que se conecta ésta al bus de salida. En la Figura 7-2 se muestra de forma esquemática. Este shutter es inherente a los chips CMOS, ya que en la explicación se asume el acceso aleatorio. Teniendo en cuenta lo explicado y vista la figura, el tiempo de integración estará entre 1 y 1/*m* tiempos de *frame*, donde *m* es el número de filas (aunque la mayoría de sensores CMOS ofrecen tiempos mayores). En el caso de una matriz de 2056 *x* 1544 y 30*fps*, el intervalo será (16.1 μ s, 33*ms*). Los valores intermedios dependen de la separación (en filas) de los punteros.



Figura 7-2. Rolling Shutter.

Global shutter: en contraposición con el anterior, en este caso todos los píxeles están expuestos el mismo tiempo y simultáneamente. Este es normalmente el shutter usado en sensores CCD, aunque casi todos los CMOS lo permiten (a costa de fill factor, ya que se necesita en ese caso circuitería adicional en píxel) además del *rolling*; y es que éste presenta un problema cuando el objeto está en movimiento, al no exponer todas las filas a la vez. En la Figura 7-3 se muestran dos imágenes de un ventilador en funcionamiento, tomadas usando un shutter tipo *rolling* (Figura 7-3 (a)) y otro tipo *global* (Figura 7-3 (b)).



Figura 7-3. Tipo de shutter. Imagen de un ventilador en funcionamiento tomada con (a) *Rolling* shutter (b) *Global* shutter.

18. Ganancia: ganancia del amplificador de salida expresada en decibelios.

19. Antiblooming: este campo contiene Sí/No, en función de que el sensor disponga de algún mecanismo para evitar el *blooming*. Este fenómeno se produce cuando un píxel sobrepasa su capacidad para almacenar carga, yendo la carga sobrante a los píxeles vecinos y provocando efectos de deslumbramiento en la imagen. En la Figura 7-4 se puede apreciar una fotografía tomada con un sensor CCD en la que se ha producido blooming; la luz debería estar confinada en un área determinada, pero debido a este efecto, se produce la línea vertical que puede verse en la figura.



Figura 7-4. Blooming.

20. *Binning*: es un mecanismo para aumentar la sensibilidad del sensor. Consiste en sumar la carga de píxeles adyacentes, reduciendo la resolución.

En este campo aparecen las dimensiones de una matriz que contiene los píxeles cuya carga suma el sensor. Como ejemplo, si se dispone de un sensor de 1024x1024 y el campo Binning contiene el valor 2x2, la imagen de salida será de 512x512 y cada píxel contendrá la suma de la carga de cuatro píxeles adyacentes de la imagen original. En la Figura 7-5 se puede apreciar una explicación gráfica de este último caso. Todo lo mencionado es para sensores CCD. En los CMOS no es tan sencillo, ya que, al ser la conversión carga-tensión en píxel, el unir varios píxeles para sumar la carga, suma también las capacidades, por lo que la tensión producida será la misma. En los sensores CMOS se ha de añadir circuitería adicional para conseguir el binning.



Figura 7-5. Binning.

21. Comentarios: debido a la variedad de cámaras que existen en el mercado, y sobre todo a la variedad de datos que dan las empresas sobre ellas, las características aquí presentadas son incompletas en muchas casos, quedando fuera de la tabla prestaciones importantes de algunas de las cámaras. Este campo pretende añadir esa información, en los casos en que se disponga de ella. Dentro del campo comentarios se puede encontrar:

- NC: la cámara no tiene características destacables aparte de las especificadas en la tabla.
- Comentario.
- Ver Modelo de cámara: esto es una llamada al apartado A.5 en el que se desarrollan los comentarios cuando son demasiado extensos para ser incluidos directamente en la tabla..
- 22. Precio: precio aproximado de la cámara, en dólares americanos (\$).

A.3 Características de ruido.

El ruido en los sensores de imagen se suele separar en dos categorías:

- Ruido temporal: es dependiente del tiempo, y por tanto varía de frame a frame. Se puede reducir promediando varios frames sucesivos.
- Ruido espacial o de patrón fijo: es aproximadamente invariante frame a frame. Se puede dividir en dos componentes:
- ✓ FPN (*Fixed Pattern Noise*): es una medida de las diferencias entre píxeles en ausencia de luz.
- ✓ PRNU (*Photo Response Non Uniformity*): ídem pero es dependiente de la señal. Es decir, se miden las diferencias entre píxeles con una iluminación uniforme en todo el array.

Ambas magnitudes se miden como una relación entre la dispersión entre píxeles (*pico a pico* o *rms*) y un valor medio de referencia, que normalmente será la carga de saturación o la tensión de saturación (en función de si las medidas son en carga o en tensión, respectivamente).

De las empresas que facilitan estos datos, sólo *Dalsa* y *Fairchild Imaging* facilitan las condiciones en que se obtienen, y a continuación se resumen.

DALSA:

En todas sus medidas de test Dalsa usa una fuente halógena de tungsteno de 3200*K*. Se supone que el tiempo de integración es lo suficientemente corto para que el ruido provocado por la corriente oscura sea despreciable.

- El ruido temporal, si el sensor es lineal, se mide para cada canal la desviación estándar de un píxel a lo largo de al menos 512*muestras*. El resultado se mide en *DN rms*.

Si el sensor es de área, el ruido se toma como la diferencia entre dos imágenes tomadas en la oscuridad siguiendo la siguiente expresión:

$$ruido(rms) = \frac{\sqrt{2}}{2} DesvEst(imagen1 - imagen2)$$
(A.1)

- Para medir el PRNU, si el sensor es lineal, éste se ilumina de forma que alcance el 50% de saturación en la salida, y se miden las diferencias entre píxeles (*pico-pico*) de forma independiente para cada canal (si hay varios). Si el sensor es de área, se llevan acabo las siguientes medidas:
- ✓ Desviación estándar de la imagen (σ) con una iluminación uniforme que produzca en la salida un 50% de la saturación.
- ✓ Media de la imagen (Med) medida con la iluminación de saturación.
- ✓ Offset (*Off*) de la imagen en ausencia de luz.

El PRNU se calcula usando la siguiente fórmula:

$$PRNU(\%rms) = \frac{\sigma}{Med - Off} \times 100$$
(A.2)

- En el caso del FPN, también se distingue entre sensores lineales y de área.
 Si es lineal, el FPN se define como la diferencia *pico-pico* entre el máximo y el mínimo del array en oscuridad. Si el sensor es de área, se mide:
- ✓ Desviación estándar de una imagen digital (σ).
- ✓ Ruido aleatorio (Rui) de una imagen.

El FPN se calcula como

$$FPN \ (rms)in DN = \sqrt{\sigma^2 - Rui^2 (rms)}$$
(A.3)

FAIRCHILD IMAGING:

En este caso, las medidas del PRNU se tomaron con una fuente de 2854K y con una intensidad tal que se alcance en la salida el 80% de la tensión de saturación. El tiempo de integración es de 10*ms*.

A.4 Tablas.

En las páginas siguientes se muestran las tablas creadas con datos obtenidos de información disponible en la web. Hay dos grupos de tablas; en el primero, etiquetado con el epígrafe *Características de cámaras*, se encuentran todas las características estudiadas menos las de ruido, que se pueden observar en el segundo grupo, etiquetado como *Características de ruido*.

Estudio de cámaras con aplicaciones científicas e industriales.

				Ca	ıracterísticas de	e cámaras				
Compañía		Jai	Dalsa	Dalsa	Fairchild Imaging	Dalsa	Dalsa	Fairchild Imaging	Dalsa	Jai
Modelo		CV-M1	CA-D4	6M3		SP-11-XXX40	CT-P1		Eclipse	CV-M40
Sensor		QN	Dalsa IA-D4	DN	CCD595	Dalsa IL-CC	Dalsa IT-P1	CCD191	Dalsa IT-F7	
Tecnología		CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD
Matriz		Área	Área	Área	Área	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Área
Transferencia		INTERLINE	FRAME	FRAME	FRAME	TSS	SSL	SSL	ISS	FRAME
Scaning		Progresivo	Progresivo	Progresivo	Progresivo	TSS	STS	SSL	TSS	Progresivo
Resolución		1300x1030	1024x1024	3072x2048	9216x9216	512/1024/2048x1	1024/2048/4096x1	6000x1	512/1024/2048x1	659x494
Tamaño físico de píxel	(mu x mu)	6.7x6.7	12x12	12x12	8.75x8.75	14x14	10x10	10x10	13x13	9.9x9.9
Digital		No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí	No
N° de bits			8	12		8	8		8	
Velocidad	Área (fps)	12	40	2.75	DN					60
	Lineal (lps)					70.4/36.8/18.8	79/43/23	ND	64.1/34.8/17.4	
Tasa de salida (MHz)		20.25	2x25	20	8x25	40	4x25	ND	40	24.54
Rango Dinámico (ratio)		ND	500	3200	ND	480 (Gan. Mín)	496	15000	500 (Gan. Mín)	ND
Responsividad	Digital (DN/(nJ/cm ²))		2.9	19		40	4.12		1950	
	Analógica (V/(µJ/cm ²))	ND			ND			5		ND
Control de obturación		2s to 0.1ms	Señal	Señal	ND	Señal	Señal	Señal	Fijo	1/250 to 1/12000
Tipo de obturación		Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global
Ganancia (db)		-3/18	ND	0 ó 6	DN	6/0	ND	ND	DN	0/12db
Mecanismo antibloomir	ng?	ND	ND	ΟN	ND	Sí	Sí	Sí	ND	No
Binning		2x1	2x2	2x2 / 8x8	ND	1x2	ND	No	Sí	2x1
Comentarios		Ver M1.1	Ver CA-D4	Dispon. Color	Ver CCD595	Ver SP-11	NC	NC	Sólo requiere una fuente de alimentación. Ver Eclipse.	Escaneo parcial Ver M-40
Precio (\$)		ND	5900	29550	ND	2096	5355	ND	3835	Ŋ

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

A-158

- · ·	industriales.
	O
	cientificas
•	aplicaciones
	con
	camaras
-	ge
:	Estudio

Compañía		Jai	Dalsa	Dalsa	Dalsa	Dalsa	Dalsa	Jai	Jai	Jai	Jai
Modelo		CV-M50	64K1M	CA-D1	4M15	BT-25	CT-P4	CV-L103	CV-M4	CV-M50ir	CV-M90
Sensor			Dalsa ILT	Dalsa IA-D1	ND	Ŋ	Dalsa IT-P4	QN	DN	EXview HAD	QN
Tecnología		CCD	ccD	ccD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD
Matriz		Área	Área	Área	Área	Área	Lineal	Lineal	Área	Área	Área
Transferencia		ND	QN	FRAME	FRAME	FRAME	SSL	SSL	ND	ND	DN
Scaning		Entrelazado	QN	Progresivo	Progresivo	Progresivo	SSL	TSS	Progresivo	ND	Entrelazado
Resolución		752x768	240x240	256x256	2048x2048	658x490	8192x1	2048x1	1300x1030	752x582	752x582
Tamaño físico de píx	xel (µmxµm)	8.6x8.3	56x56	16x16	14x14	14x14	7x7	14x14	6.7x6.7	8.6x8.3	6.5x6.25
Digital		No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
N° de bits			12	8	12	12	~	8	8		
Velocidad	Área (fps)	25	10 ⁶	203	15	25			24	ND	25
	Lineal (lps)						11800	3445			
Tasa de salida (MHz	(2	ND	4x10	15	4x20	9.5	4x25	7.2	40.49	25	DN
Rango Dinámico (ra	tio)	ND	3200	496	3200	500	245	256	ND	ND	DN
Responsividad (DN/	'(nJ/cm2))	ND	QN	4.2	18	243	20.6	QN	ND	ND	QN
Control de obturació	u	1/60 to 1/10000	DN	Fijo	Señal	Señal	Señal	Señal	1/24 to 1/10000	1/100 to 1/10000	1/125 to 1/10000
Tipo de obturación		Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global
Ganancia (db)		ND	0 ó 6	QN	0 ó 6	QN	QN	QZ	0/12	0/15	0/18
Mecanismo antibloo	ming?	No	QN	ND	ND	ND	Sí	No	ND	ND	No
Binning		No	No	1x2 ó 2x2	4x4	No	No	No	2x1	No	No
Comentarios		NC	La velocidad efectiva es de 15 ráfagas/seg. de 17 frames.	Ver CA-D1.1.	Necesita shutter mecánico.	Pico de QE de 90%.	Sólo requiere una S fuente de alimentación.	Sensor indpte. para cada color. Ver CV-1103 para más detalles.	Permite scanning parcial.	Ver CV- M50ir	Sensor indpte. Para cada color
Precio (\$)		DN	47520	2950	21890	28529	6050	QX	ND	QN	QN

A-159

Compañía		Jai	Vision Components	Roper Scientific	Roper Scientific	Roper Scientific	Panasonic	Basler	Basler
Modelo		A-1	VC-38	MegaPlus: 1.6i/AB	MegaPlus: 1 16.8i	MegaPlus ES: 4.0	GP-MF130	A200	L200
Sensor		ND	Sony ICX084AL	Kodak KAF1601	Kodak I KAF16800	Kodak KAI- 4000	QN	Q	QN
Tecnología		CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD	CCD
Matriz		Área	Área	Área	Área	Área	Área	Área	Lineal
Transferencia		ND	FRAME	FRAME	FRAME	NTERLINE	INTERLINE	INTERLINE	SSL
Scaning		Progresivo	Progresivo	Progresivo	Progresivo	Progresivo	Progresivo	Progresivo	SSL
Resolución		1392x1040	640x480	1534x1024	4096x4096	2048x2048	768x494	1008x1018	4096x1
Tamaño físico de píxe	il (µm x µm)	4.65x4.65	7.4x7.4	9x9	. 6×6	7.4x7.4	QN	. 6x6	7×7
Digital		No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
N° de bits			8	10	∞	8/12		8/10	8
Velocidad Á	rea (fps	16	60	5.5	0,47	15	QN	30	
	ineal (lps)								500
Tasa de salida (MHz)		ND	25.175	10	10	2x40	QN	2x21	40
Rango Dinámico (ratio	(0	DN	Ŋ	1778	251 251	251/1259	ND	QN	ND
Responsividad (DN/(r	nJ/cm2))	ND	QN	Q	Q	ND	QN	QN	ND
Control de obturación		1/16 to 1/200000	20 to 1/10000	20 to 100000ms	10 to 100000ms	Señal	1/100 to 1/96000	Señal	Señal
Tipo de obturación		Global	Global	Q	QN	Global	Global	Global	Global
Ganancia (db)		-3 to 12db	Ŋ	0/24	DND	0/24	0/6	QN	ND
Mecanismo antibloom	uing?	DN	Ŋ	Si	No	No	No	Sí	Sí
Binning		2x2	QN	No	No	2x2	No	No	No
Comentarios		Shutter de alta velocidad. Circuito exclusivo para reducida dispersión con tiempos de exposición cortos.	No requiere ni sistema de proceso de imagen ni PC con Frame Grabber.	Incluye circuitería de mejora de imagen. Shutter macánico.	Shutter Mecánico.	Ver MegaPlus 4.0	Sólo requiere una fuente de alimentación. Ver GP-MF130	Sólo requiere una finente de alimentación. Programa de configuración Windows	Sólo requiere una fuente de alimentación. Programa de configuración Windows
Precio (\$)		2900	QN	QN	D DN	ND	Ŋ	QN	ND

Compañía	Kitsrus	Silicon Imaging	Kitsrus	Photonfocus	Photonfocus
Modelo	C-CAM8	SI-3170	C3188A	MV-D3000L	MV-D1024
Sensor	Omnivision OV7910	Photobit	Omnivision OV7620	Photonfocus	Photonfocus
Tecnología	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
Matriz	Área ,	Área	Área	Lineal	Área
Transferencia	SSC	SSC	SSC	SSC	SSC
Scaning	Entrelazado	Progresivo	Progresivo	SSL	Progresivo
Resolución	628x582	2056x1544	564x492	3072x1	1024x1024
Tamaño físico de píxel (µm x µm)	ND	3.3x3.3	7.6x7.6	6x6	10.6x10.6
Digital	No	Sí	Sí	Sí	Sí
N° de bits		10	8	8	8
Velocidad Área (fps)	50	30	Q	18000	27
Lineal (lps)					
Tasa de salida (MHz)	DN	100	QN	2x28	40
Rango Dinámico (ratio)	3981	1995	3981	1995	106
Responsividad (DN/(nJ/cm2))	QN	DN	DN	QN	Ŋ
Control de obturación	Automático	Señal	Señal	Señal	Señal
Tipo de obturación	DN	Rolling	DND	Global	Global
Ganancia (db)	QN	DN	DN	10	QN
Mecanismo antiblooming?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Binning	No	No	No	No	No
Comentarios	Ver C-Cam8	Ver SI-3170	Puede realizar procesamiento sencillo. También permite escaneo entrelazado.	Ver MV-D3000L	Ver MV-D1024
Precio (\$)	65	DN	85	DN	ND

		PRNU (DNp-p) ¹	6	
	Dalsa SP-11	FPN (DNp-p) ¹	5	
		Temp. (DNrms)	2	
	ging	PRNU (% p-p)	5	
uido	hild Ima CCD595	FPN	ND	
sticas de r	Fairc)	Temp. (mVp-p)	1	
aracterís	3	PRNU (%rms)	2	
C	Dalsa 6M	FPN	ŊŊ	
	Γ	Temp. DNrms	0.9	
	14	PRNU (%rms)	2	
	alsa CA-D	FPN (DNrms)	4	
	Δ	Temp.	ND	

¹Medido con control de exposición activado.

01	PRNU	(d-d %)	4	
Jalsa CA-I	FPN	(DNrms)	2	rrección.
I	Temp.	I	ND	nos de co
se	PRNU ²	(DNp-p)	4	os algoritn
Jalsa Eclip	FPN ²	(DNrms)	2	is usando l
Γ	Temp.	(rms)	1.4	obtenida
aging 1	PRNU	(mVp-p)	06	s han sido
ild Im CD19	FPN		ND	nedida
Fairch C	Temp.	(mVp-p)	1	casos las n
1	PRNU	(DNp-p)	8	En ambos
alsa CT-P	FPN	(DNp-p)	2	2
Δ	Temp.	(DNrms)	0.8	

um8	PRNU	ND
rus C-Ca	p) (% p- (%	0.03
Kits	Temp.	ND
0(PRNU (% p-p)	20
asler L20	FPN (% p- p)	2
B	Temp.	ND
)0	PRNU (% p-p)	10
asler A2(FPN	ND
Bá	Temp.	ΟN
4	PRNU (DNp-p)	15
alsa CT-P ²	FPN (DNp-p)	5
D	Temp.	ND

Ki	tsrus C318	5A	Photonfc	ocus MV-L	01024	Photonfoc	cus MV-	D3000L		SI-3170	
Temp.	FPN	PRNU	Temp.	FPN	PRNU	Temp.	FPN	PRNU	Temp.	FPN	PRNU
1	(DNp-p)		(DNrms)	(DNrms)		(mVrms)			(mVp-p)	_	
ND	0.03	ND	0.5	2.5	ND	0.8	ND	ND	1.4	ND	ND

A.5 Comentarios.

Como ya se indicó en la introducción, en este apartado se destacarán algunas características extraordinarias de las cámaras que son difíciles de incluir en las tablas. Está estructurado de la siguiente forma: Modelo de la cámara. – Comentarios.

M1.1.- El binning vertical permite aumentar la velocidad al doble: 24*fps*. Junto con esto último, el shutter, la ganancia y el tipo de control (local o vía *RS232C*) son seleccionables.

CA-D4.- Es posible seleccionar uno ó dos canales de salida. Si se usan dos, en el sensor se divide la imagen en dos partes, y se leen ambas simultáneamente. En este caso, el orden de lectura de las columnas será 0 a 511 en el canal 1, y 1023 a 512 en el canal 2. Esto produce una inversión especular de la mitad de la imagen, como se puede ver en la Figura 7-6.



Figura 7-6. Cambios en la imagen de salida en sensor de dos canales de la cámara CA-D4 de Dalsa.

SP-11.- Se puede disponer de un modelo que sólo requiere una fuente de alimentación²⁷.

²⁷ Por lo general, las cámaras CCD requieren de dos a cuatro fuentes de alimentación.

Estudio sobre la metodología a emplear para la construcción de un sistema de detección y clasificación de cascarilla residual.

CV-M40.- La velocidad de esta cámara se ve afectada por el binning y por el escaneo parcial. En el primer caso la velocidad es el doble que en el modo normal: 120*fps*.

El escaneo parcial consiste en leer un número menor de filas de las que dispone el sensor. En este caso, en lugar de las 492 de las que dispone el sensor, se pueden leer 240, 120, 60 y 30, lo que aumenta la velocidad a 106, 157, 201 y 234*fps* respectivamente.

Eclipse.- La característica más importante de esta cámara es su elevada responsividad, obtenida gracias a una tecnología especial que lleva implementada el sensor, llamada tecnología TDI (*Time Delay & Integration*). Este tipo de sensores lineales tienen varias filas de píxeles (son llamados sensores lineales de *n* etapas TDI), y funcionan como sigue: cuando una fila ha sido expuesta, la carga integrada se desplaza hacia la siguiente; una vez pasado el tiempo de exposición, la carga acumulada durante ese tiempo se sumará con la de la fila anterior. Este proceso se repite con las n etapas. Obviamente, el trasvase ha de estar en sincronía con el movimiento relativo sensor-objeto. El resultado es que el tiempo de exposición los sensores TDI tienen su mayor ventaja en aplicaciones donde el objeto esté en movimiento y la iluminación sea insuficiente.

Adicionalmente, esta tecnología permite que la cámara se pueda usar para aplicaciones en el infrarrojo cercano. Efectivamente, el pico de la responsividad (normalmente en situado en la zona visible del espectro) es tan alto, que en la banda mencionada aún se tiene un valor de aquella superior incluso al máximo de algunas cámaras en el visible. Como ejemplo, a una longitud de onda de 1050*nm* la responsividad es de alrededor $300DN/(nJ/cm^2)$.

Dispone de implementaciones de algoritmos de corrección de FPN y PRNU.

CA-D1.- La señal externa de sincronismo controla a la vez la velocidad de lectura y el shutter. Es decir, una vez programado un número de *frames* por segundo, queda automáticamente fijado el tiempo de exposición y viceversa.

La CA-D1 permite opcionalmente una señal de entrada para controlar la operación de varias cámaras conectadas a un bus de datos común.

CV-L103.- Esta cámara tiene un sensor CCD independiente para cada color. Los tres sensores están montados sobre una estructura de prismas que divide la luz de forma adecuada. En la Figura 7-7 se puede observar un esquema del mencionado montaje.

La obturación puede ser controlada independientemente para cada color.



Figura 7-7. Esquema del montaje de los tres sensores en la CV-l103

CV-M50ir.- El sensor que usa esta cámara mantiene una alta sensibilidad en el infrarrojo cercano. En la Figura 7-8 se puede observar una representación de la responsividad relativa de este modelo y de la CV-M50.

MegaPlus 4.0.- Para evitar un bajo *fill factor*, el sensor incluye un sistema de microlentes que focalizan la luz incidente en las zonas activas del chip.

GP-MF130.- Permite escaneo progresivo y entrelazado. Consecuentemente, se puede seleccionar integración de campos o de tramas.



Figura 7-8. Responsividad relativa de las cámaras M50 y M50ir.

SI-3170.- Con el sensor que monta esta cámara se puede acceder selectivamente a partes concretas de la imagen, aumentando la velocidad de salida (es inherente a la tecnología CMOS la posibilidad de implementar acceso aleatorio). Los tamaños de imagen permitidos y sus velocidades asociadas son:

2056 x 1544 @ 30fps 1600 x 1200 @ 38fps 1420 x 1080 @ 48fps 1280 x 720 @ 60fps 1024 x 768 @ 60fps 640 x 480 @ 100fps 640 x 240 @ 200fps 256 x 128 @ 360fps 24 x 6 @ 2500 fps

Incluye microlentes para aumentar el fill factor, que llega a ser con éstas del 80%.

C-CAM8.- Se puede utilizar para aplicaciones muy sencillas. Sólo dispone de entrada de alimentación y salida de vídeo analógico. Realiza de forma automática procesamiento de imagen sencillo: control de exposición, compensación de *back light*, corrección de gamma, control de ganancia y balance de blanco.

MV-D1024.- El rasgo más característico de esta cámara es su elevado rango dinámico. Éste es conseguido con una tecnología de Photonfocus, LINLOG, que permite que cada píxel de forma independiente tenga una respuesta lineal, logarítmica o una combinación de ambas. Cuando se usa la combinación, la respuesta es lineal para niveles bajos de luz y logarítmica para altos, como se puede apreciar en la Figura 7-9. Así, se pueden captar imágenes de muy alto contraste.



Figura 7-9. Tipos de respuesta en la MV-D1024 de Photonfocus.

MV-D3000L.- Leyendo sólo 512*píxeles* en lugar de los 3072 de que dispone el sensor, esta cámara puede aumentar su velocidad a 100000*lps*. Además puede disponer opcionalmente de interfaz digital *Fire Wire*, lo que facilita el uso de sistemas multicámara (hasta 63 cámaras en un mismo puerto).

Apéndice B. Manuales y hojas de especificaciones.

Referencias.

- [1] http://www.fairchildimaging.com/main/documents/ccd595.pdf.
- [2] http://vfm.dalsa.com/selector/prodinfo.asp?lbxProd_ID=DS-4x-64K1M.
- [3] Northon, L., Bradshaw, M. & Jewell, A.J. (1992) "Machine Vision Inspection of web textile fabric", *Proc. British Machine Vision Conference*, pp 217 – 216.
- [4] Mustafa, M., Bernard, R. & Rouse, M. (1995) "Real-Time detection of defects on high tension cables insulator", Proc. of The International Conference on Quality Control by Artificial Vision, QCAV95, June 1995, Le Creuset, France, pp. 215-219.
- [5] Roberts, J.W., Rose, S.D., Julien, G.A., Nichols, L., Jenkins, P., Chamberlain, S.G. & Maroscher, G. (1993) "PC based real-time defect imaging system for high speed web inspection", *Proc. SPIE*, **1907**: 164 176.
- [6] Brown, C.C., Olsson, O.J., Palmer, G.T., & Pennman, D.W. (1995) "On-line high resolution inspecton of multilayered plastic bags", Document N
 ^o AB0031-1.0 of Datacube, Datacube Inc., Danver, MA 01923, August, 1995.
- [7] Don, H.S., Fu, K.S., Liu, C.R. & Lin, W.C. (1984) "Metal surface inspection using image processing techniques", *IEEE Transaction on SMC*, Vol. SMC-14, Nº 1, pp. 139 – 146.
- [8] Penman, D., Olsson, O. & Bowman, C. (1992) "Automatic inspection of reconstituted wood panels for surface defects", *Proc. SPIE*, **1823**: 284 – 292.
- [9] Hoang, K., Wen, W., Nichimuthu, A. & Jiang, X.L. (1997) "Achieving automation in leather surface inspection", *Computer in industry*, **34**: 43 54.
- [10] Hajimowlana, S.H., Muscedere, R., Jullien, G.A. & Roberts, J.W. (1999) "An In-camera Data stream processing system for defect detection in web inspection tasks", *Real-Time Imaging*, 5: 23 – 34.
- [11] Sun, C. (1999) "Multi-resolution stereo matching using maximun-surface techniques", *Digital Image Computing: Techniques and Applications*, Perth, Australia, 7 – 8 December 1999, pp. 195 – 200.
- [12] Baykut, A., Atalay, A., Erçil, A. & Güler M. (2000) "Real-Time defect inspection of textured surfaces", *Real-Time Imaging*, 6: 17 – 27.
- [13] <u>http://www.parsytec.de</u>.
- [14] Roska, T., Rodríguez-Vázquez, A. *Towards the visual microprocessor*, Wiley, 2001, pp. 1-27.

- [15] http://home.nycap.rr.com/silicon/RGB%20Bayer.htm
- [16] González, R.,C., Digital Image Processing, 2nd edn, Adisson Wesley, 1991, pp 190 y 191.
- [17] Casas, J. *Óptica*, 7th edn, I.S.B.N.: 84–605–0062–4, pp 25 50.
- [18] Casas, J. *Optica*, 7th edn, I.S.B.N.: 84–605–0062–4, pp 7 8.
- [19] Kosava, R., Miksch, S., Hauser, H. "Semantic Depth of Field". In *Proc. of the IEEE Symposium on Information Visualization* 2001.
- [20] 2001 Optics and Optical Instruments Catalog, Edmond Industrial Optics, p. 247.
- [21] Rodríguez Danta, M. Vellver Cebreros, C. González Fernández, A. *Campos electromagnéticos*, Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones, 1998, pp 26 27.
- [22] Practical Radiometry, Document Nº 03-36-00008-00, http://www.dalsa.com.
- [23] Hornsey, R. Design and Fabrication of integrated Image Sensors. Apuntes de la Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá, 1999, pp 34 – 38.
- [24] Roska, T., Rodríguez-Vázquez, A. Towards the visual microprocessor, Wiley, 2001, pp. 185-186.
- [25] CCD Technology Primer, Document N° 03-36-00005-00, http://www.dalsa.com, p. 18.
- [26] Vernon, D., *Machine vision. Automated visual inspection and robot vision*, Prentice Hall, 1991, pp 20 – 21.
- [27] <u>http://vfm.dalsa.com/selector/prodinfo.asp?lbxProd_ID=DS-2x-01M40</u>
- [28] *Line scan/TDI line scan calculation worksheet*. Document N° 03-36-00085-00, <u>http://www.dalsa.com</u>.
- [29] <u>http://vfm.dalsa.com/selector/prodinfo.asp?lbxProd</u> ID=P2-4x-04k40
- [30] <u>http://www.thales-optem.com/illum.html</u>
- [31] http://www.fairchildimaging.com/main/documents/ccd442a.pdf
- [32] Vernon, D., Machine vision. Automated visual inspection and robot vision, Prentice Hall, 1991, pp 51 – 52.
- [33] Chamgming, S. (2001) "Fast algorithm for local statistics calculation for Ndimensional images", *Real – Time Imaging*, 7: pp 519 – 527.
- [34] González, R.,C., Woods, R., E., Digital Image Processing, Adisson Wesley, 1991. pp 84 – 128.

- [35] González, R.,C., Digital Image Processing, 2nd edn, Adisson Wesley, 1991. pp 82 – 89.
- [36] Brigham, E.O. *The Fast Fourier Transform*. Englewood Cliffs, N.J.:Prentice-Hall, Inc, 1974.
- [37] González, R.,C., Digital Image Processing, 2nd edn, Adisson Wesley, 1991. pp 186 – 190.
- [38] González, R., C., Woods, R., E., Digital Image Processing, Adisson Wesley, 1992. pp 213 – 218.
- [39] Van Herk, M. (1992) "A fast algorithm for local minimum and maximum filters on rectagular and octagonal kernels". *Pattern Recognition Letters*, **13**: pp 517 – 521.
- [40] Oppenheim, A., V., Schafer, R., S., Discrete-Time signal processing, Prentice Hall, 1989.
- [41] González, R., C., Woods, R., E., Digital Image Processing, Adisson Wesley, 1992. pp 413 – 476.
- [42] González, R., C., Woods, R., E., *Digital Image Processing*, Adisson Wesley, 1992. pp 451 455.
- [43] <u>http://www.jai.com</u>
- [44] http://www.infaimon.es/ciencia/opticas/opticaindex.htm
- [45] <u>http://www.nerlite.com/products/scdi.html</u>
- [46] http://www.polytec-pi.fr/EGG/Machine Vision Strobe/MVS-2020Series.htm
- [47] <u>http://www.corecoimaging.com</u>

Bibliografía complementaria.

- González, R. C., Digital Image Processing, 2nd edn, Addison Wesley, 1991
- González, R., C., Woods, R., E., Digital Image Processing, Addison– Wesley, 1992.
- Boreman, G. D., *Basic Electro-Optics for Engineers*, Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT31, SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- Hornsey, R. Design and Fabrication of integrated Image Sensors.
 Apuntes de la Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá, 1999.

- De la Escalera, A. *Visión por computador. Fundamentos y métodos,* Prentice Hall, 2001.
- Ballard, D., H., Brown, C., M., Computer Vision, Prentice Hall, 1982.
- González, J., Visión por computador, Paraninfo, 2000.
- Dawson, B. *Applying Realtime machine vision*, Coreco Imaging. http://www.corecoimaging.com.
- Bouchard, Y. *Image adquisition: shaping the future*, Coreco Imaging. http://www.corecoimaging.com.
- Dechow, D., L. *Lighting: making the right choice in electronics applications*, Coreco Imaging. <u>http://www.corecoimaging.com</u>.
- http://www.dalsa.com
- <u>http://www.jai.com</u>
- http://www.fairchildimaging.com
- <u>http://www.vision-components.de</u>
- http://www.roperscientific.com
- <u>http://www.panasonic.com</u>
- <u>http://www.basler-mvc.com</u>
- http://www.siliconimaging.com
- <u>http://www.kitsrus.com</u>
- <u>http://www.photonfocus.com</u>
- <u>http://www.nerlite/science.html</u>
- <u>http://www.thales.optem.com</u>
- <u>http://www.fostec.com</u>
- <u>http://www.stockeryale.com</u>
- <u>http://www.corecoimaging.com</u>