

# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA



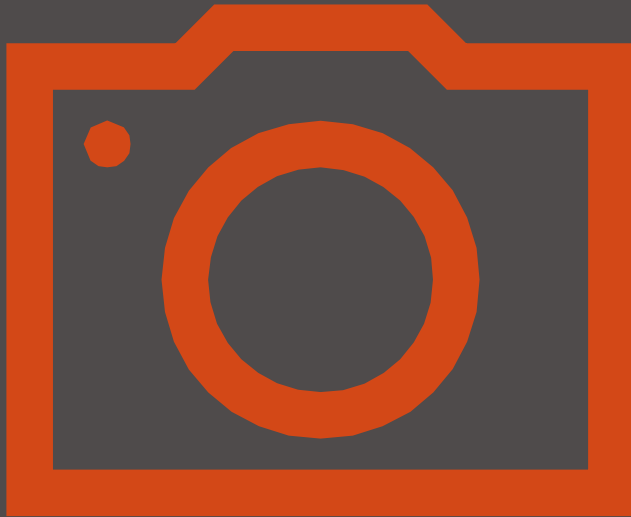
# CÁMARAS

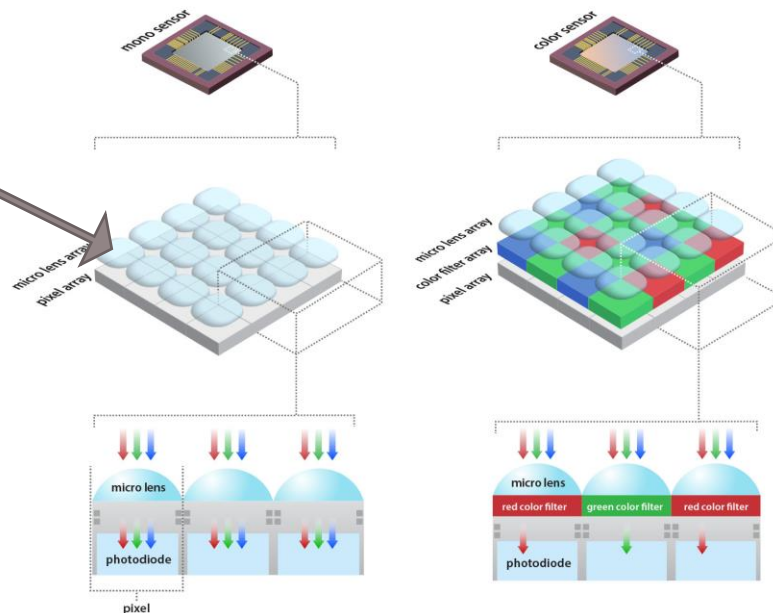
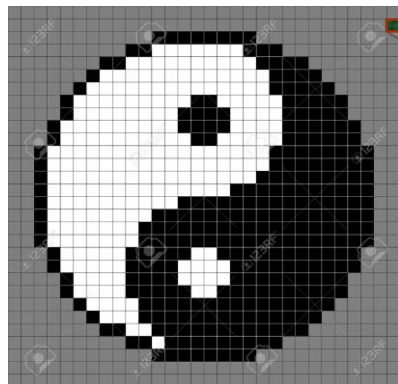
## ■ Tipos de cámaras

1. Cámaras de área (las más comunes)
2. Cámaras de línea
3. Cámaras termográficas (con microbolómetros)
4. Cámaras de TOF (Time Of Flight)
5. Cámaras inteligentes

## ■ ¿Qué cámara elijo?

1. Las piezas llegan individualmente o se transportan en cinta?
2. ¿Característica más pequeña a detectar?, ¿nivel de detalle?
3. ¿Cuántas imágenes/segundo o líneas/segundo deben tomarse?
4. ¿Qué tan buena debe ser la calidad de la imagen?
5. ¿Se puede resolver en escala de grises? ¿necesito color?
6. ¿Qué profundidad de píxel necesito (ADC)?
7. ¿La aplicación debe estar sincronizada a un proceso de planta?
8. ¿Qué interfaz de comunicación puedo/necesito utilizar?
9. ¿Necesito accesorios?
10. Capacidad de suministro, confiabilidad y soporte.





# RESOLUCIÓN








- Hoy en día, son habituales sensores con una resolución de 2, 5, 8 o 12 megapíxeles, aunque resoluciones superiores son posibles (usualmente con otra montura distinta de C-mount)
- Las cámaras lineales industriales tienen sensores que van de los 512 píxeles a los 12888 píxeles (12k) de manera estándar con una frecuencia de lectura de 23kHz

Nombre	Resolución	Nro. píxeles
VGA	640x480	0,3 MP (Megapíxel)
SVGA	800x600	0,48 MP (Megapíxel)
XGA	1024x768	0,78 MP (Megapíxel)
SXGA	1280x1024	1,3 MP (Megapíxel)
UXGA	1600x1200	1,9 (2) MP (Megapíxel)
SUXGA	2048x1536	3,1 MP (Megapíxel)
-	2048x2048	4,0 MP (Megapíxel)
-	2452x2054	5,0 MP (Megapíxel)
QUXGA	3200x2400	7,7 MP (Megapíxel)
HD	1280x720	0,92 MP (Megapíxel)
Full HD	1920x1080	2,1 MP (Megapíxel)





# TAMAÑO DE SENSOR Y DE PÍXEL

Formato: 1"	2/3"	1/1,8"	1/2"	1/2.5"	1/3"	1/4"
Diagonal: 16 mm	11 mm	9mm	8mm	7mm	6mm	4mm
						
12,8 x 9,3mm	8,8 x 6,6mm	7,2 x 5,4mm	6,4 x 4,8mm	5,8 x 4,3mm	4,8 x 3,6mm	3,2 x 2,4mm
119mm <sup>2</sup>	58mm <sup>2</sup>	39mm <sup>2</sup>	32mm <sup>2</sup>	25mm <sup>2</sup>	17mm <sup>2</sup>	8mm <sup>2</sup>

F-mount adapter (Nikon bayonet)  
for cameras with large sensors



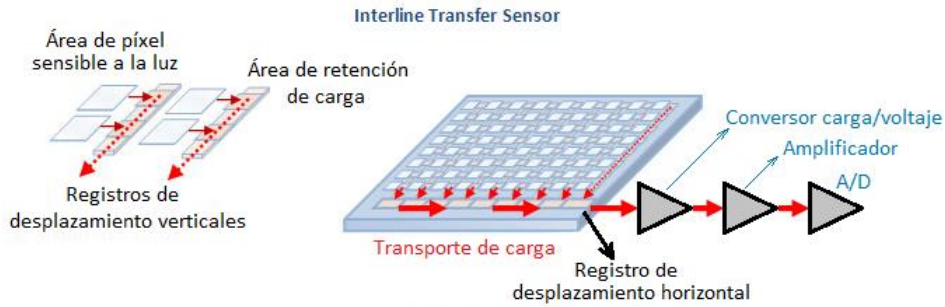
- El desarrollo tecnológico avanzado de los sensores CCD y CMOS permite la producción de estructuras de semiconductores cada vez más pequeños → Los tamaños de sensor y píxel se reducen → Solo posible porque la sensibilidad de los píxeles también mejora cada vez más, al igual que se optimiza el rendimiento de ruido de la electrónica.
- Los datos en pulgadas de los sensores CCD y CMOS tienen una explicación histórica: los tubos de captación de las cámaras de televisión se utilizaron hasta mediados de la década de 1980 y fueron por mucho tiempo superiores a los sensores CCD o CMOS que se inventaron a fines de la década de 1960.
- Hay que evaluar las condiciones de operación
  1. ¿Habrá poca luz?
  2. ¿se requiere poco ruido con alta respuesta dinámica?
  3. ¿se necesita realizar mediciones de precisión?En todos estos casos un sensor con píxeles más grandes suele ser la mejor opción.



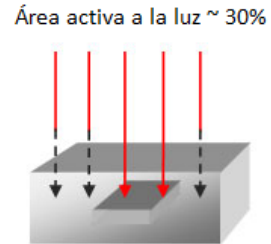
# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA



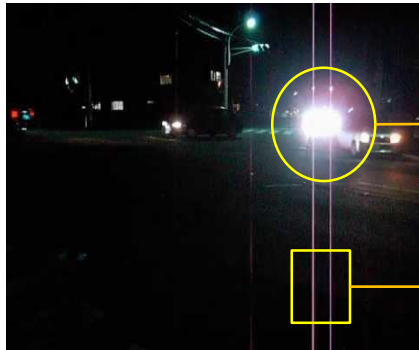
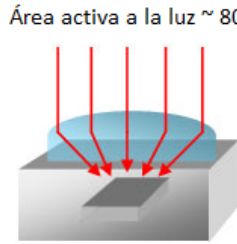
# SENSORES CCD



CCD sin microlente



CCD con microlente



Blooming

Smearing

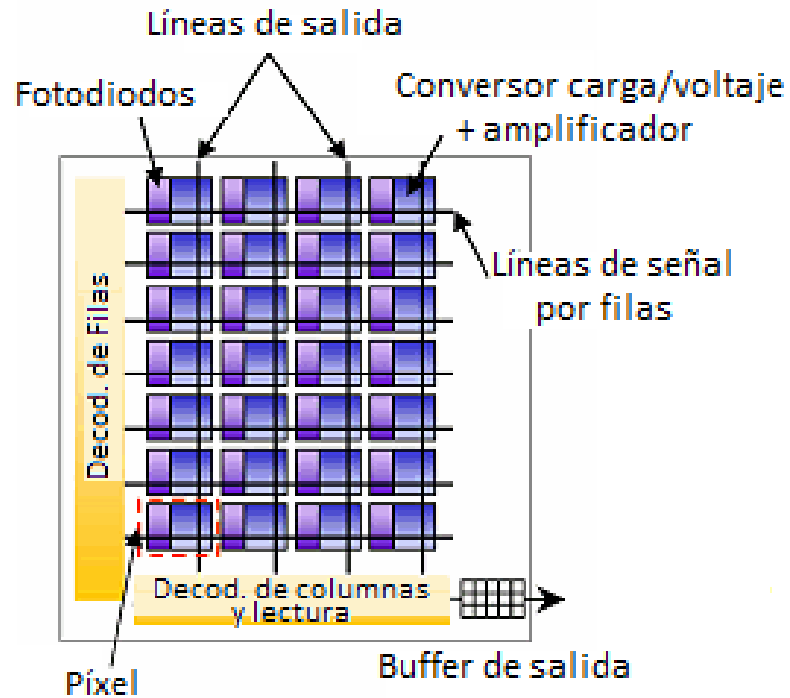
- CCD (charge-couple device): Inventado en 1969 en los Laboratorios Bell por Willard Boyle y George E. Smith puramente para almacenamiento de datos.
- Se terminó utilizando con éxito hasta hoy para transportar las cargas generadas al exponer un semiconductor debido al efecto fotoeléctrico por medio de una gran cantidad de pequeños pasos (registros de desplazamiento vertical y horizontal) a un convertor A/D central.
- Las frecuencias a las que funcionan los CCD hoy en día son de aproximadamente 20 a 75 MHz (frecuencia del A/D).
- Diseños típicos:
  1. **Interline transfer:** Diseño más utilizado. Área de guardado al lado de cada píxel. Altos fps.
  2. **Full frame transfer:** factor de ocupación ~ 100% - aplicaciones científicas y astronómicas. Muy bajo fps.
  3. **Frame transfer:** Doble cantidad de silicio, una expuesta al 100% y la otra oculta por detrás. Costosos y con bajo fps por smear vertical

Ventajas	Desventajas
Mayor sensibilidad, menor ruido (mayor factor de ocupación)	Lectura más lenta
Menos píxeles defectuosos (baja complejidad)	Sin acceso directo a píxeles
Mejor homogeneidad por presencia de un único A/D central	Necesidad de electrónica adicional al sensor (cámaras más caras y grandes)
	Mayor consumo de energía
	Efectos de manchas (smear) y blooming (floraciones) cuando se sobre-expone





# SENSORES CMOS



- CMOS (complementary metal oxide semiconductor). También se basan en el principio fotoeléctrico pero se diferencian del CCD en la manera de transmitir los datos.
- En sus inicios producían imágenes borrosas, con píxeles defectuosos y menos sensibles. Sin embargo muchos de esos problemas se fueron solucionando y hoy van ganando mercado en la visión industrial.
- Cada elemento de imagen (píxel) está asociado a un amplificador y puede leerse individualmente.

Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode

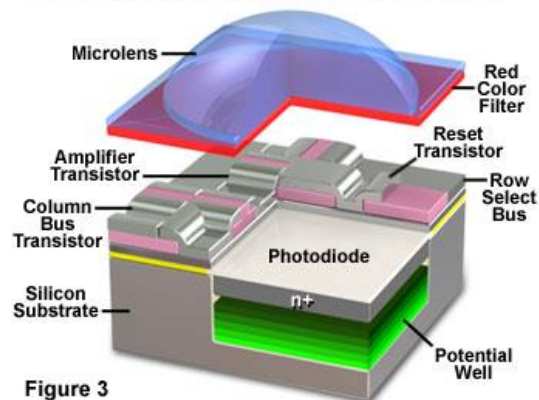


Figure 3

Ventajas	Desventajas
Menor consumo de energía	Diferencias de sensibilidad entre píxeles debido a tolerancias de construcción
Menor tamaño de cámaras	
Velocidad de cuadro más alta	Factor de relleno menor, por lo tanto menor sensibilidad a la luz
Lectura flexible (Binning, AOI)	
Floración reducida	
Mayor sensibilidad al NIR	

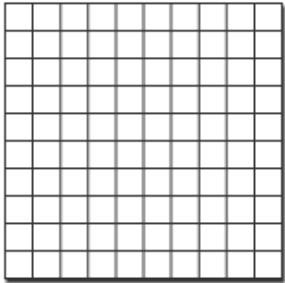


# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA

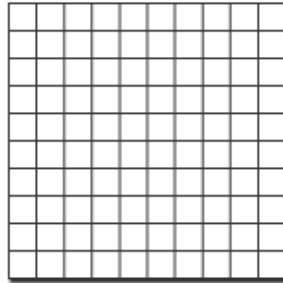




Rolling Shutter



Total Shutter



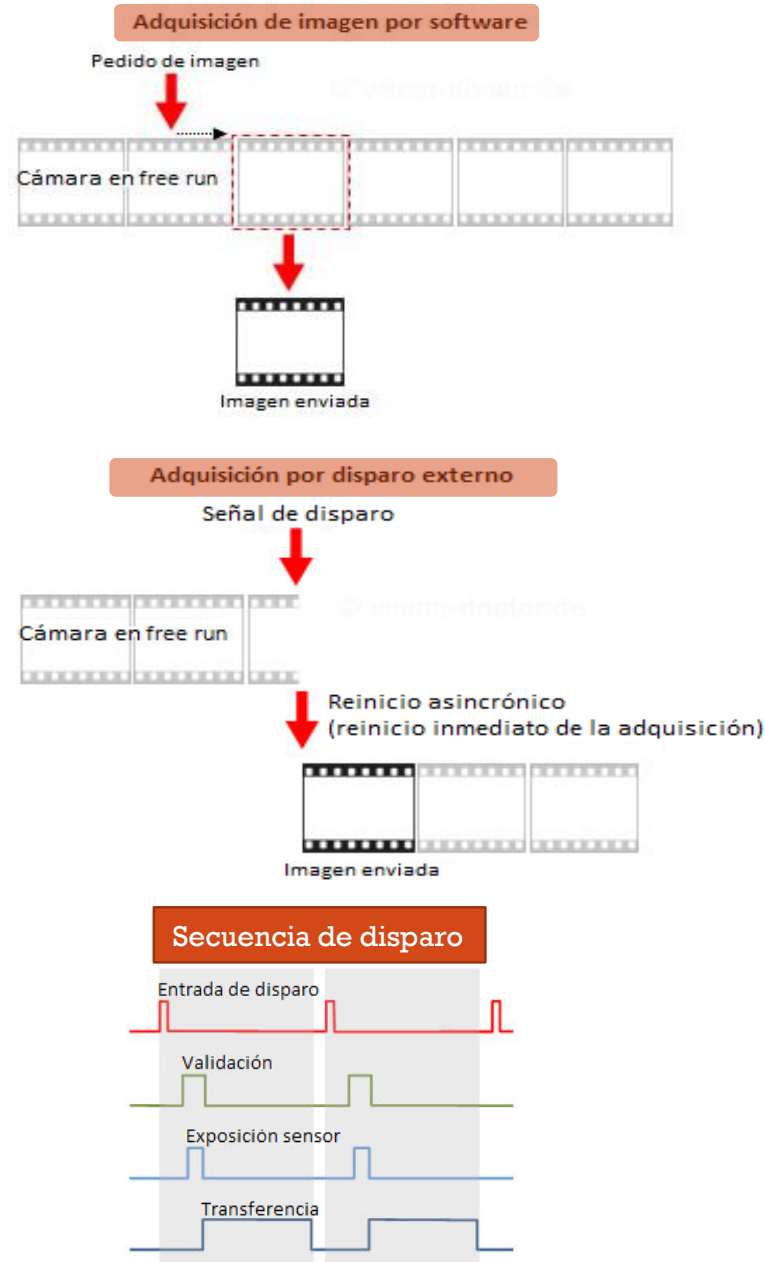
## Global shutter Vs. Rolling shutter



# TIPO DE OBTURADOR

- Las viejas cámaras analógicas con estándar de TV (RS170, CCIR, NTSC o PAL) capturaban el sensor de manera “entrelazada”. Dos medios cuadros par e impar.
- Las cámara industriales modernas tienen escaneo progresivo (no entrelazado). Dentro de este hay dos opciones:
  1. **Obturador global (global shutter):** Exposición de TODOS los píxeles al mismo tiempo (y posterior lectura)
    - a. El “obturador” global vacía simultáneamente todas las cargas de píxeles
    - b. La imagen de captura simultáneamente en todo el sensor y se almacena en líneas adicionales no expuestas. Fabricación más cara
    - c. Permite obtener imágenes nítidas y fijas
  2. **Obturador de persiana enrollable (rolling shutter):** Se expone (y se lee) línea por línea de arriba hacia abajo.
    - a. Método simple y barato para leer sensores CMOS
    - b. Menor costo de producción aunque la calidad de imagen puede ser mejor porque hay más espacio para área sensible
    - c. No se capturan bien imágenes con movimientos muy cortos.





# FUNCIONES DE DISPARO

- Las cámaras industriales no suelen tener disparador mecánico, el sensor está expuesto de manera continua:
  1. Disparo por hardware (externo: entrada digital, PLC, sensor, etc.)
  2. Disparo por software (programado en la aplicación de visión)
- En ambos casos todas las cargas se eliminan (limpian) inmediatamente después de la señal de disparo.
- En el caso de disparo externo hay también varios tipos de configuraciones:
  1. Trigger con tiempo de exposición fijo
  2. Control de ancho de pulso (cámaras analógicas)
  3. Multi-triggers y buffer de imágenes (con  $t_{exp}$  definidos)
  4. Post-triggers y buffer de imágenes (devuelve imágenes anteriores)

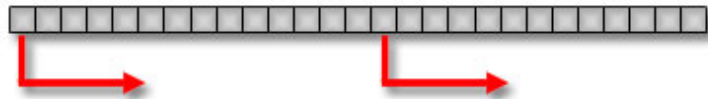


# FUNCIONES DE LECTURA I

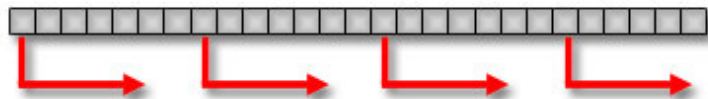
Lectura de canal simple - single-tap



Lectura de doble canal - Dual-tap



Lectura de cuádruple canal - Quad-tap



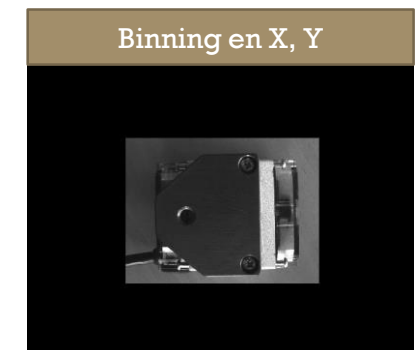
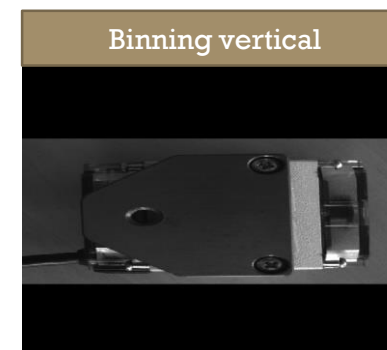
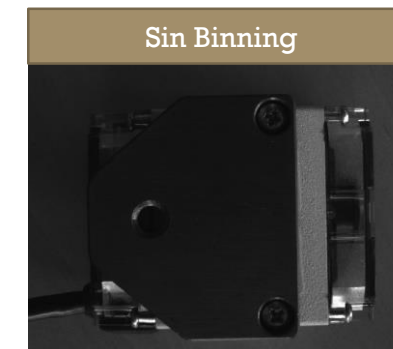
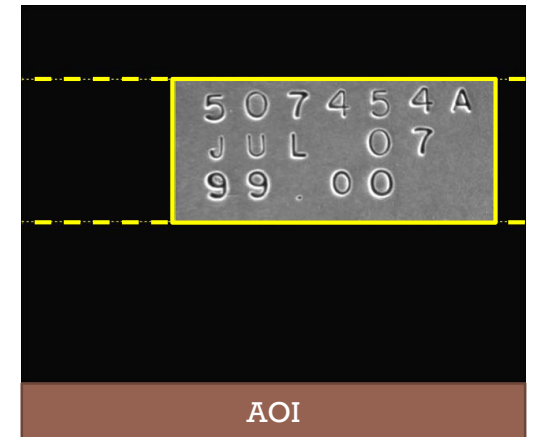
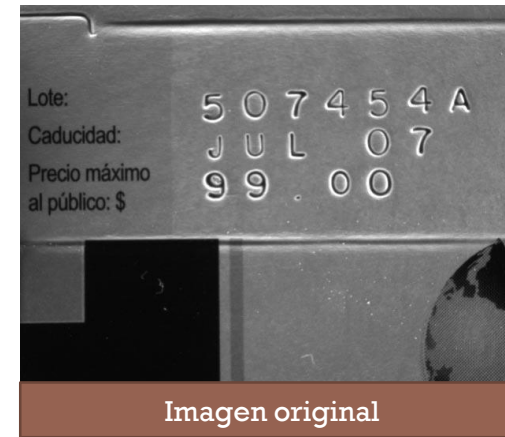
- Los sensores CCD de alta resolución (como los TrueSense de Kodak) leen varias porciones del sensor en paralelo para aumentar la velocidad de cuadro (Multi-tap)
- Es necesario calibrar la imagen en negro y en blanco dado que ningún A/D en cada canal de salida es idéntico al otro
- Los sensores de tipo CMOS en los que se puede leer cada píxel individualmente se puede decir que están “multi-tapeados” al extremo





# FUNCIONES DE LECTURA II

- AOI/ROI (Area of interest/Region of interest):  
Permite hacer lecturas parciales del sensor.
  - Recordar que en sensores CCD se debe leer toda la línea.
- Binning: Sumado de píxels vecinos.  
Dependiendo la cámara esto podrá realizarse: vertical, horizontal o ambos. Y en cantidad: x1, x2, x4, etc.
  - Como consecuencia baja la resolución, pero aumenta la sensibilidad equivalente del sensor (y aumentan los fps máximos)



# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA





# ELECTRÓNICA DE LA CÁMARA I

- A pesar de contar con dos cámaras con idéntico sensor, sus capacidades pueden ser muy distintas dependiendo de la electrónica que diseñe el fabricante para manejarlo. Esto redunda en dos consecuencias:

1. Mayor eficiencia del diseño → Menor temperatura → Menor ruido térmico
2. Capacidades y características diferentes

- **Rango dinámico**

- Los niveles de señal del sensor se miden en dB (Se duplica el rendimiento cada 3dB)
- Rango típico de CCDs: 50dB a 80dB

n-bits	Niveles de gris	dB
8 bits	256	48
10 bits	1024	60
12 bits	4096	72
14 bit	16386	84

- Relación señal ruido. El ruido puede provenir de:

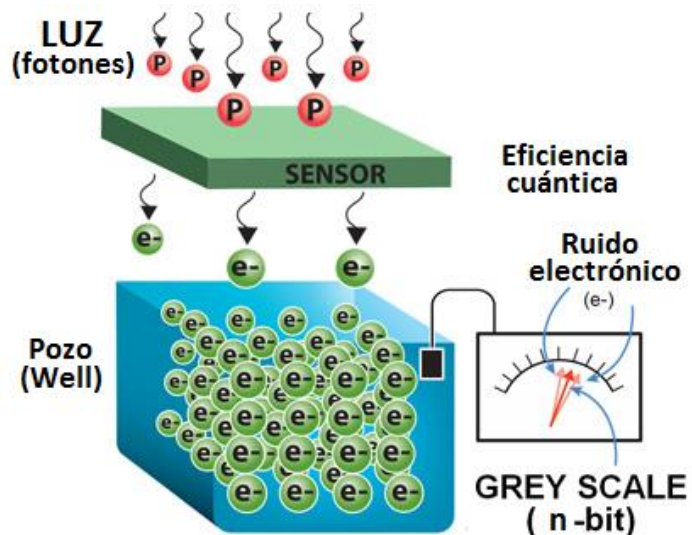
1. Agitación térmica de electrones en conductores eléctricos
2. Ruido de digitalización
3. Ruido del sensor
4. Ruido de los demás componentes electrónicos

$$SNR = 10 \log \left( \frac{S}{N} \right)$$

**NOTA:** El SNR en cámaras CCD industriales típicos es de **56dB**

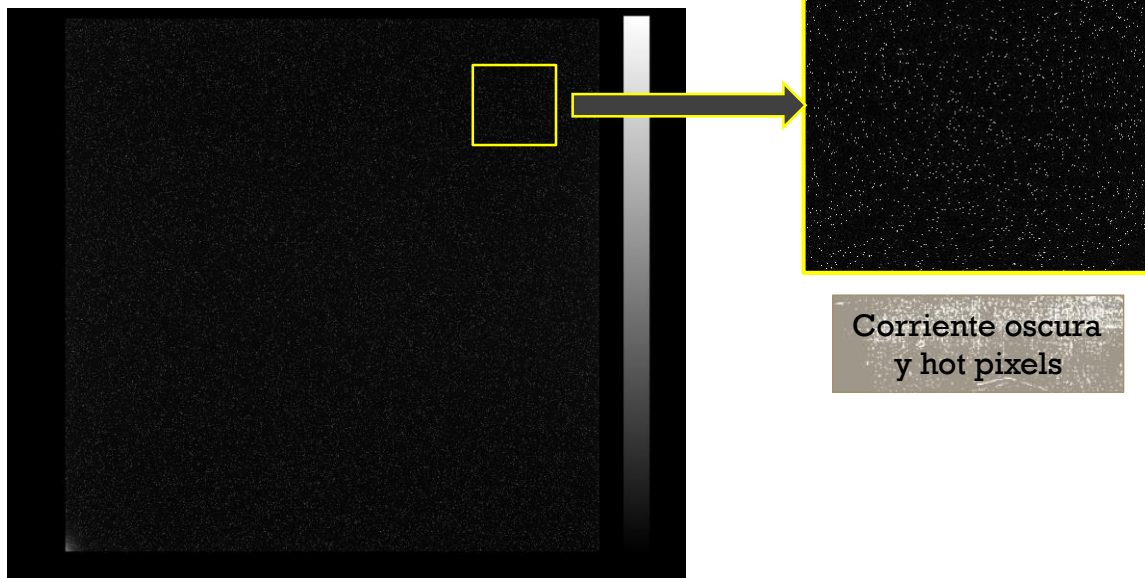






### Ejemplos:

- Píxel 1,7 $\mu$ m: 1000 e-
- Píxel 5 $\mu$ m: 20.000 e-
- Píxel 7,4 $\mu$ m: 40.000 e-



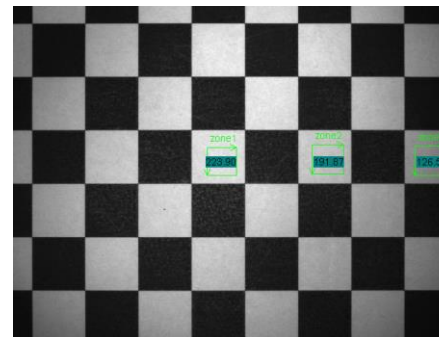
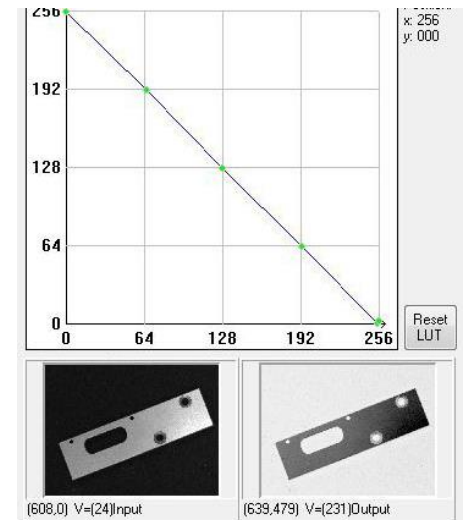
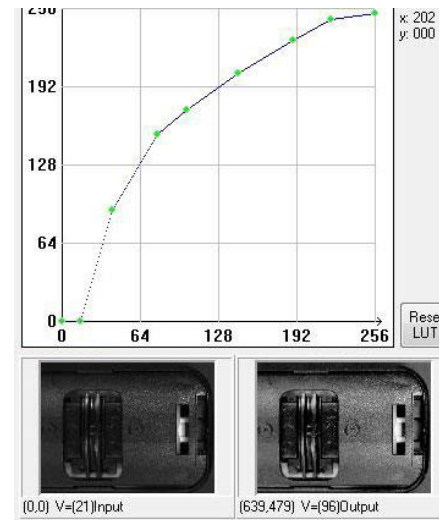
# ELECTRÓNICA DE LA CÁMARA II

- **Capacidad de pozo (full well capacity)**
  - Representa la cantidad de electrones que puede contener un elemento de píxel.
  - A mayor capacidad de pozo mejor relación señal/ruido
- **Eficiencia cuántica**
  - Indica con qué probabilidad se libera un electrón por efecto fotoeléctrico (de detecta un fotón). También se llama rendimiento cuántico. Depende de  $\lambda$ .
- **Corriente oscura y píxeles calientes**
  - Con el sensor tapado (sin estimulación de luz) igual aparecen señales débiles
  - Se debe a la formación de portadores libres de carga (corriente oscura)
  - Depende de la temperatura y se mitiga con enfriamiento
  - Los píxeles con corriente oscura alta se ven brillantes (hot pixels)
  - Se puede calibrar la cámara para homogeneizar o interpolar en caso de hot pixels
- **Estándar EMVA 1288 (European Machine Vision Association)**
  - Busca definir un método común para medir (y presentar) los parámetros de sensibilidad, SNR, ruido (corriente oscura, digitalización, etc.) que permita hacer una comparación directa entre fabricantes



# FUNCIONES DE PROCESAMIENTO

- Las cámaras USB, FireWire y GigE (y cámara inteligentes) no precisan una placa de adquisición especial para transferir sus datos, por los que muchas funciones que anteriormente se hacían ahí ahora se integran dentro de la misma cámara.
- LUT (Look Up Tables)**
  - Permiten definir una tabla de conversión para el nivel de brillo de los píxeles. Esto puede utilizarse para realizar correcciones, mejorar el contraste u obtener una imagen en negativo.
- Corrección de sombreado**
  - Se realiza de manera espacial en el sensor y permite corregir efectos de viñeteado, iluminación inhomogénea, sombreado relacionado con el ángulo de incidencia en micro-lentes.
- Corrección de error de píxel**
  - Para píxeles defectuosos (más brillantes u oscuros) se puede dar un valor por interpolación con vecinos. Esto suele hacerlo el fabricante (sin embargo el envejecimiento podría hacer aparecer nuevos)
- Conversión Bayer a RGB**
  - Para transmitir imágenes en color hay que previamente convertir la imagen desde la captada a través del filtro de Bayer a color.





# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA







Hasta hoy son el  
“caballito de batallas” de  
la visión industrial

Presentan alta resolución de sensor y  
por ende, de detalles

Cantidad de datos menor que  
cámaras color

Alta sensibilidad (toda la luz incide  
sin filtros)



La mayoría de los sensores son Sony. Las cámaras  
CCD especiales Kodak TrueSense



Los sensores CCD tienen alta linealidad y  
homogeneidad (especialmente en aplicaciones  
de medición e inspección)



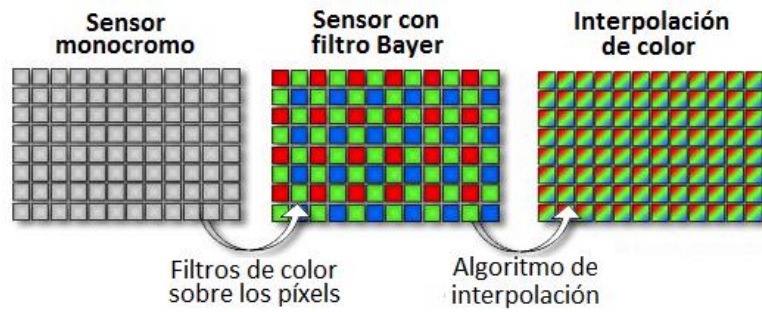
Los sensores CMOS son muy resistentes a la  
sobre-exposición (inspección de partes metálicas  
o con brillos) y entregan altos fps.



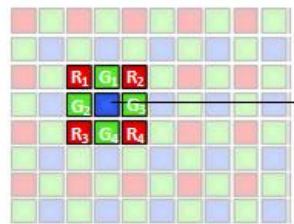
Como ya mencionamos, a pesar de idéntico  
sensor: *calidad de imagen, activación y  
procesamiento* dependen del fabricante.

## CÁMARAS MONOCROMÁTICAS





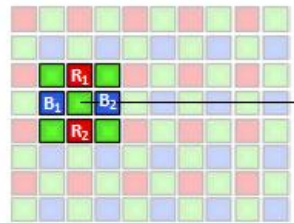
### Interpolación de Bayer



#### Píxel azul

Interpolación de valor verde y rojo

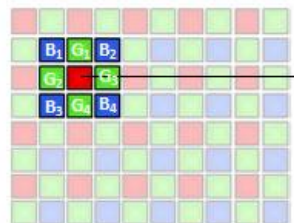
$$\begin{aligned} \text{Red} &= (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) / 4 \\ \text{Blue} &= \text{Blue} \\ \text{Green} &= (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) / 4 \end{aligned}$$



#### Píxel verde

Interpolación de valor azul y rojo

$$\begin{aligned} \text{Red} &= (R_1 + R_2) / 2 \\ \text{Blue} &= (B_1 + B_2) / 2 \\ \text{Green} &= \text{Green} \end{aligned}$$



#### Píxel rojo

Interpolación de valor azul y verde

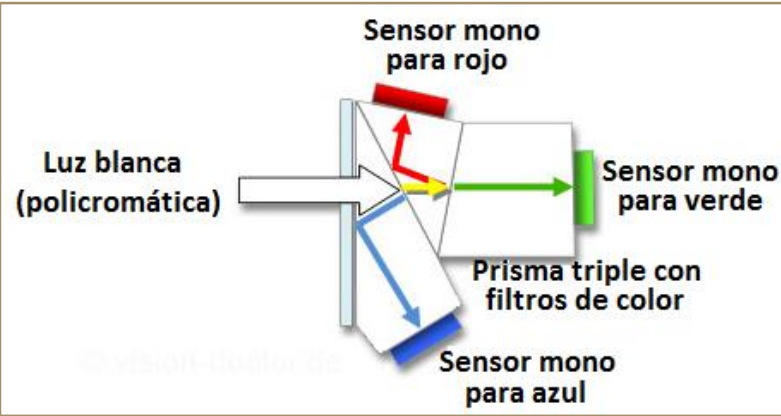
$$\begin{aligned} \text{Red} &= \text{Red} \\ \text{Blue} &= (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) / 4 \\ \text{Green} &= (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) / 4 \end{aligned}$$

# CÁMARAS COLOR

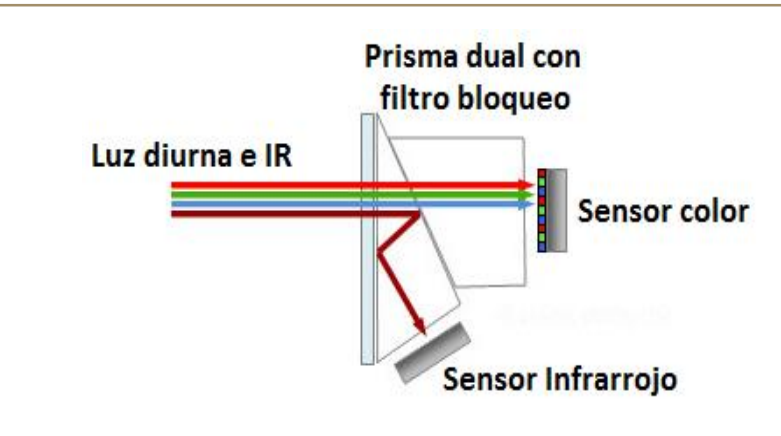
- Las cámaras color de un solo chip generan color RGB (3x8bits → 16,7 millones de colores) por medio de la utilización de un filtro tipo mosaico (**Filtro Bayer**)
  1. Los píxeles toman el valor de la componente según el filtro antepuesto (R, G, B). El valor de las otras dos componentes se realiza por interpolación con los píxeles vecinos (en núcleos de 2x2 ó 3x3)
  2. La interpolación de Bayer produce artefactos, efectos de borde y pseudo-colores. Para suprimir estos efectos se pueden realizar cálculos complejos (computacionalmente más pesados) y utilizar distintos algoritmos (vecino cercano, lineal, cúbico, etc.) para mitigar los efectos de borde
  3. Por la interpolación color se puede perder hasta un 30% de la resolución fina
  4. La cantidad de datos es 3 veces mayor a la de un sensor de igual resolución monocromático
  5. Los filtros de color Bayer reducen la sensibilidad en hasta un 75%
- Transmisión de la información color
  1. RGB: La conversión de Bayer se hace on-board (en gral con una FPGA) y se transmiten 24bits (en caso de cámara de 8bits)
  2. YUV: Solo requiere 16 bits
  3. Bayer Raw: Sin procesar. La conversión queda para una tarjeta de adquisición intermedia o la misma PC



Cámara de  
3 sensores



Cámara de  
2 sensores



Sensor de visión



Cámara inteligente



# CÁMARAS ESPECIALES I

## ■ Cámaras de tres chips

- Permiten una resolución completa en color

1. Mediciones de color de precisión industrial (contaminaciones, decoloración, pequeños cambios de color)
2. Tecnología médica, biológica, microscópica y endoscópica.
3. Broadcast (cine y televisión)

- Calidad y fidelidad en color. Sin artefactos ni efectos de borde

## ■ Cámaras de dos chips

- Aplicaciones especiales

1. Sensores monocromáticos con  $\neq t_{exp}$  (HDR)
2. Sensor color o monocromático + Sensor NIR

## ■ Sensores de visión

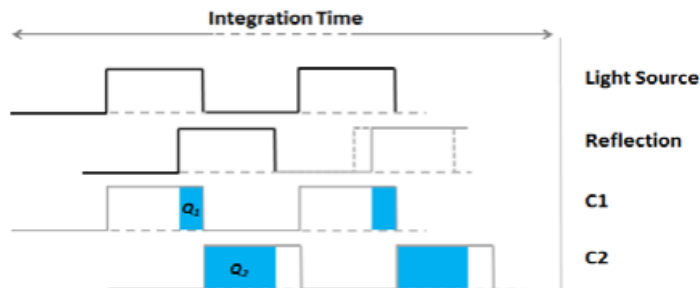
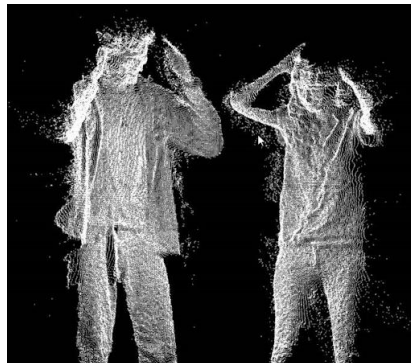
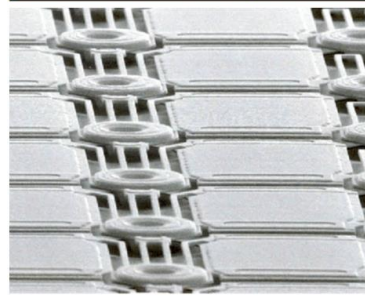
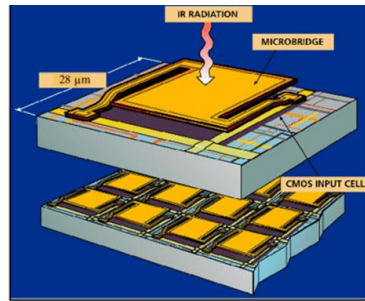
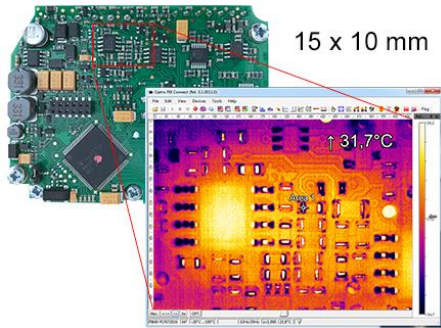
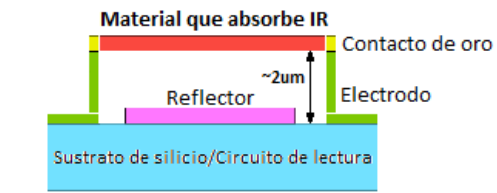
- Óptica e iluminación integradas. Software embebido y configurable. Tareas de identificación/medición simples. Verificaciones de presencia. Bajo costo (~1000 USD)

## ■ Cámaras inteligentes

- Con electrónica completa de adquisición y evaluación de imágenes integrada. Normalmente sin óptica ni iluminación. Paquetes de software de muy simple a muy complejo







# CÁMARAS ESPECIALES II

## ■ Cámaras térmicas con micro-bolómetros

- Sensor específico para medir radiación infrarroja
- Son sensores que no requieren de enfriamiento forzado
- Los materiales más comunes utilizados son silicio amorfo y óxido de vanadio
- Baja resolución (típico 320x240, 640x480)

## ■ Cámaras de tiempo de vuelo (TOF)

- Estiman distancias calculando el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de un haz de luz infrarrojo
- Este es el principio de funcionamiento que utilizan por ejemplo la Microsoft Xbox Kinect.
- Dos métodos de medición

1. Pulsado
2. Onda continua

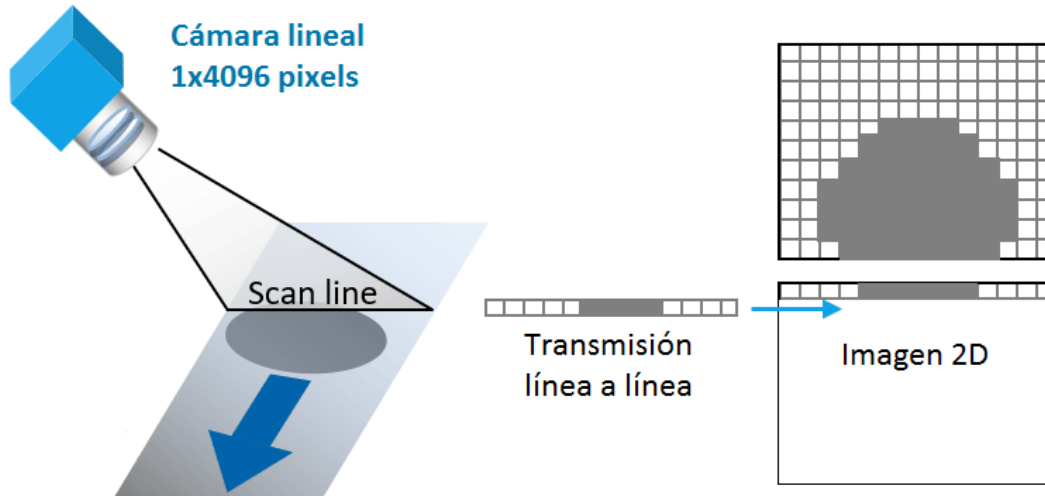
$$d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta_t \cdot \left( \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right)$$



# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA







# CÁMARAS DE LÍNEA

- Permiten realizar inspecciones sin interrupción y con alta resolución. Utilizadas en el caso de inspección de materiales continuos:
  1. Paneles planos, PCB largos, vidrio, madera, tela, acero, etc.
  2. Escaneo de documentos y películas
  3. Inspección de cuerpos redondos sin distorsión de perspectiva (girando el cuerpo)
  4. Relación costo/beneficio conveniente en casos de alta resolución
- Requiere el movimiento de la parte a inspeccionar. Cinta transportadora, rotador, etc.
- Resoluciones típicas de 512, 1k, 4k, 8k y 12k. Tamaños de píxel 5 x 5  $\mu\text{m}$ , 7 x 7  $\mu\text{m}$ , 10 x 10  $\mu\text{m}$  a 14 x 14  $\mu\text{m}$ .
- Para el caso de una resolución de 2048 píxels y 14 $\mu\text{m}$  el sensor tiene un ancho de 29mm → no se puede utilizar montaje C. En general F-mount.
- Se puede mejorar la sensibilidad agregando una (o más) líneas en el sensor
- La transmisión de imágenes para cámaras lineales se realiza casi exclusivamente a través de interfaces CameraLink (hasta 800MB/seg)





# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA





© vision-doctor.de

Movimiento en avance



Movimiento en retroceso



Píxeles cuadrados



Píxeles no cuadrados



# USO DE ENCODERS

- Necesarios para el sincronismo entre la línea de producción y la cámara, especialmente indispensable en el caso de cámaras lineales
- **Encoders rotatorios**
  - El movimiento rotatorio genera pulsos
  - Hasta 32,000 pulsos por revolución
  - En cámaras lineales suele configurarse para que cada pulso corresponda a un píxel
  - Las señales suelen ser TTL o diferenciales (de dos canales, en cuadratura → sentido de giro)
- **Encoders lineales**
  - Cabezal de lectura sin contacto + sensor magnético.
  - Una cinta magnética fija a la distancia de lectura de varios milímetros representa la contraparte del sistema.
  - Dependiendo del tipo, hasta 0.001mm / pulso.
  - Hay tipos programables → número definible de pulsos por distancia.
  - También señales diferenciales o TTL.





Analog

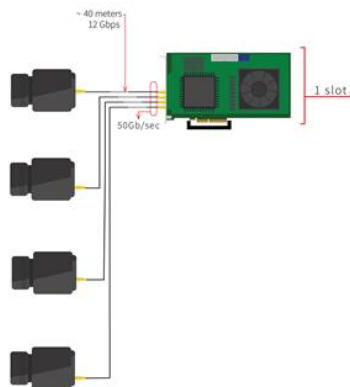


FireWire



LVDS

CXP-12  
CONFIGURATION  
1 Frame Grabber  
4 Cameras



# INTERFACES

- Hoy podemos elegir entre una gran cantidad de interfaces dependiendo de las condiciones de la aplicación particular:

1. Data rate necesario:  $BW = Prof. bits * fps * frame size$
2. Máximo número de cámaras que pueden conectarse en simultáneo
3. Longitud máxima de cable posible
4. Necesidad (o no) de utilizar placas de interfaz adicionales. Ventajas y desventajas.
5. ¿Existe un estándar sobre la interfaz para la transmisión de imágenes y el control de cámaras?

- Otras interfaces de comunicación

1. Entradas digitales: Activación de la cámara
2. Salidas digitales: Señal bueno/malo
3. Interfaz serie: Parametrización
4. Interfaz Fast Ethernet: Parametrización de cámaras inteligentes
5. Indicadores LED: Estado operativo (arranque, listo, ocupado, etc.)

	USB 2.0	USB 3.0	FireWire	Camera Link	GigE	CoaXPress
Interfaz	Master/Slave	Master/Slave	Peer to Peer	Point to Point	Point to Point	Point to Point
Data rate	480 Mbit/s	3200 Mbit/s	400 a 800 Mbit/s	> 2000 Mbit/s	1000 Mbit/s	960 a 28800 Mbit/s
Nº cámaras	127	255	16 a 63	1 a 2	Ilimitado	1 a 4
Estándar	No definido	USB3 Vision	DCAM/IIDC	CameraLink	GigE Vision	GenICam/IIDC
Interfaz	USB card	USB card	1394 card	Frame grabber	GigE card	Frame grabber
Long. cable	5m	100m	4,5m/100m (fibra)	10m	100m	68m a 212m

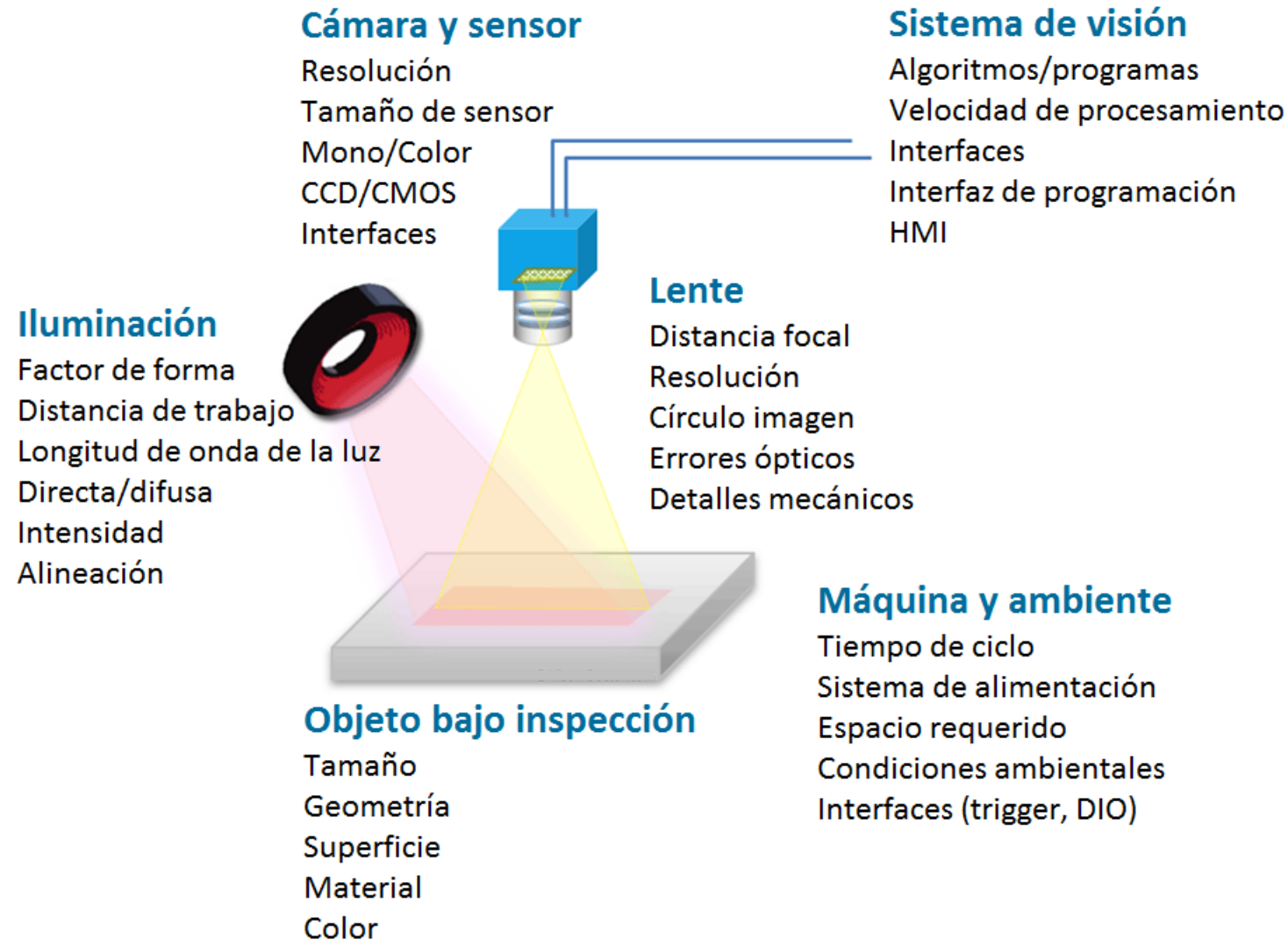




# FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE VISIÓN EN ROBÓTICA



# RESUMIENDO



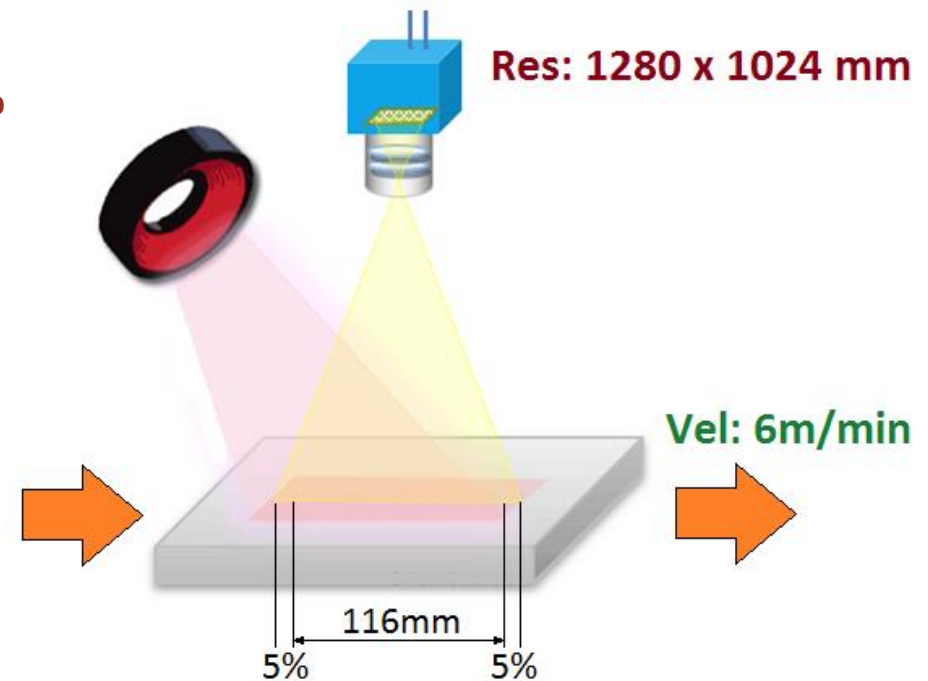
# EJERCICIO DE EJEMPLO 1

- Se debe inspeccionar una pieza de 116mm (máximo en una de sus dimensiones) que circula sobre un transportador a una velocidad de 6 metros por minuto. Se cuenta con una cámara de resolución 1280 x 1024 y se pide que el efecto de “difuminación de foco” máximo permitido no sea más de medio píxel. ¿Cuál es el tiempo de exposición a configurar en la cámara?

- Cámara:** 1280x1024; pieza 116mm; **margen 10%**  
→ Resolución: 10 píxeles/mm
- Transportador:** 6m/min → 100mm/seg;  
100mm → 1000 píxeles

## Tiempo de exposición:

- 1000 píxeles → 1 segundo
- 1 píxel → 1/1000 segundos
- $\frac{1}{2}$  píxel → 1/2000 segundos →  **$t_{exp} = 500 \mu s$**





# EJERCICIO DE EJEMPLO 2

- Se desea inspeccionar una pieza de 150mm de ancho y 80mm de alto. El proceso en el que se encuentra hace que la cámara no pueda colocarse a menos de 0.5m de la misma. La resolución de detalle mínima deseada es de 0,1mm/píxel. El sensor a utilizar tiene un tamaño de 1/3". ¿Qué distancia focal mínima debería tener la lente a utilizar? ¿Cuál es la resolución mínima que debería tener el sensor?.
- Lente:** Utilizando el modelo pinhole  $FOV = WD \frac{SensorSize}{f} \rightarrow f = WD \frac{SensorSize}{FOV}$

1/3"  4,8 x 3,6mm

$$f = 500mm \frac{4,8mm}{(150mm * 1,1)} = \mathbf{14,54mm} \text{ (12mm es valor comercial)}$$

$$\text{Con } f = 12mm \Rightarrow \mathbf{FOV = 200mm}$$

- Resolución:** Se desea 0,1mm/píxel  $\rightarrow$  En 150mm,  $\frac{150mm}{0,1mm/pix} = 1500 \text{ píxel}$

La proporción de objeto/FOV con la lente seleccionada es:  $\frac{150}{200} = 0,75$

$$\mathbf{Resolución} = \frac{1500 \text{ píxeles}}{0,75} = \mathbf{2000 \text{ pixels}} \rightarrow \text{Valor más cercano comercial } \mathbf{SUXGA(2048 \times 1536 / 3,1 \text{ MP})}$$

**BONUS:** ¿Tamaño de píxel?  $\mathbf{PixelSize} = \frac{4,8mm}{2048} = \mathbf{2,34\mu m}$

