

El sensor: atrapando fotones

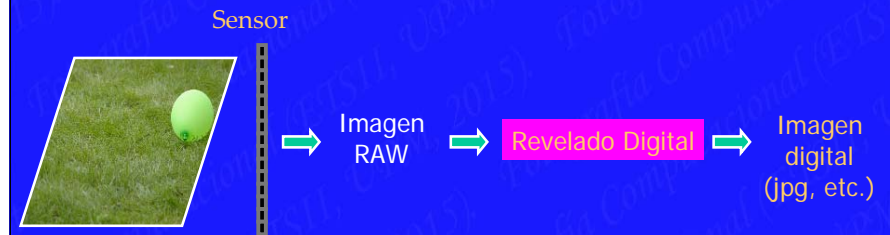


ANTONIO TABERNERO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

Captura de la imagen digital

¿Cómo capturar la imagen que hemos formado en el sensor?



En la charla de hoy:

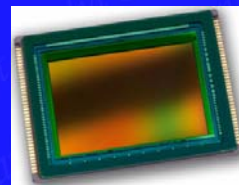
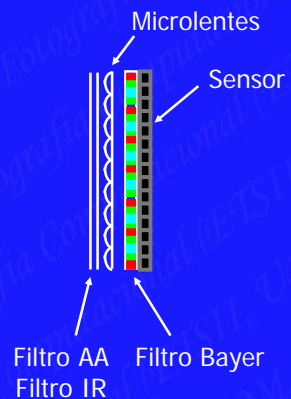
- Funcionamiento de un sensor: problemas asociados.
- Información capturada por el sensor: "imagen" RAW.
- "Revelado digital"

ANTONIO TABERNERO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

La pieza clave: el sensor

Antes de llegar al sensor propiamente dicho la luz tiene que atravesar varios filtros previos.

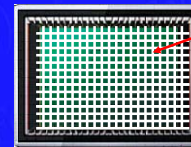


- Filtro AA (anti-aliasing): estropea (??) un poco la imagen que llega al sensor.
- Filtro IR: elimina/reduce luz infrarroja.
- Microlentes: optimizan la captación de luz.
- Filtro de Bayer: necesario para capturar el color porque el sensor es monocromo.

ANTONIO TABERNERO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

El sensor y los "sensels":



"Sensel": cada uno de los millones de elementos fotosensibles del sensor.

Normalmente se refieren como píxeles (sensor de 10 Megapíxeles)

Densidad de píxeles: desde unos 3 Mpix/cm² para full-frame hasta llegar a 100 Mpix/cm² en algunos teléfonos.

También expresada en píxeles/mm (medida lineal)

Su tamaño (inversa de densidad) oscila entre 1-6 μm .

No toda el área del "sensel" está dedicada a la captación de luz. Necesitamos espacio para la electrónica de lectura.

ANTONIO TABERNERO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

¿Qué está pasando en un sensor?

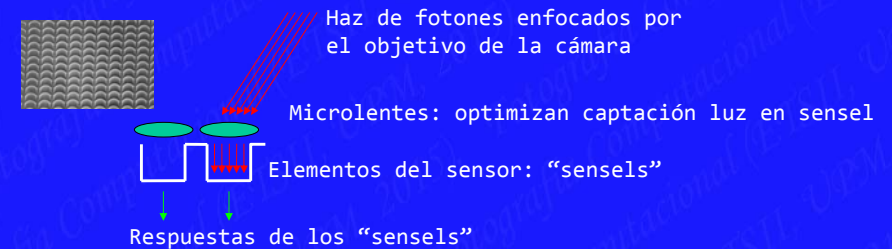
- Captura de luz: de fotones a electrones.
- Del voltaje a los números en una imagen RAW:

Amplificación, conversión AD (Analógica/Digital)

- El ruido en el proceso de captura:
 - Fuentes de ruido:
Shot noise, ruido de lectura, ruido térmico, etc
 - Técnicas para cuantificar nivel de ruido de un sensor.

Captación de luz en el sensor

- Cada "sensel" es un pequeño detector fotosensible.
- Mide el número de fotones recibido durante la exposición.



Las respuestas de todos los "sensels" del sensor forman la "imagen" RAW, el punto de partida de la imagen digital.

Proceso Físico

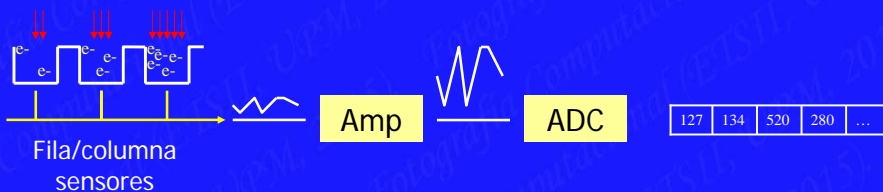
Los fotones al chocar con el sensor liberan foto-electrones.

Los e- liberados generan un voltaje proporcional.

El voltaje pasa a un amplificador y es cuantificado en un ADC.

El resultado final es un número (en unidades del AD o ADUs) cuyo rango que depende del número bits del cuantificador:

4096 niveles para 12 bits o 16384 para 14 bits.



La sensibilidad (ISO)

En fotografía tradicional podíamos comprar películas con diferente sensibilidad a la luz.

- Películas de ISO 100-200 eran las más habituales.
- ISOs mayores = más sensibilidad = mejor captura de luz (permiten tiempos de exposiciones menores).
- ISO más bajos = películas más lentas.

En fotografía digital el sensor tiene una sensibilidad fija (se dice por ejemplo que su ISO nativo es 100).

¿Qué cambia al cambiar el ISO en una cámara digital?

El factor de ganancia del amplificador del voltaje

La sensibilidad y el amplificador

Idealmente la salida del cuantificador (ADU) será proporcional al número de fotones recibidos:

$$\text{ADU} = (\# \text{ fotones}) \times G \text{ (ganancia)}$$

Si duplicamos G obtenemos una respuesta doble (ADU) para los mismos fotones (luz): equivalente a usar una película con el doble de ISO:



La ganancia G es directamente proporcional al número ISO

Fotones por ADU

$$\text{ADU} = (\# \text{ fotones}) \times G \Rightarrow (1/G) = (\# \text{ fotones}) / \text{ADU}$$

$(1/G)$ es el número de fotones necesario para provocar un salto de 1 en el ADC.



Es una propiedad importante de un sensor:

- Indica el nivel mínimo de luz necesario para apreciar cambios en la imagen capturada.
- Con $(1/G) + \text{rango del cuantificador}$ (4096, 16384) sabemos el número máximo de fotones que el sensor puede recibir antes de saturarse (llenar el cubo)

Saturación de los sensels

Cámara con:

- ADC de 12 bits (4096 niveles)
- ($1/G$) = 11 fotones/ADU.



Si caen más de $4095 \times 11 \approx 45000$ fotones en el sensel durante el tiempo de exposición, el ADC se satura a su valor máximo (4095).

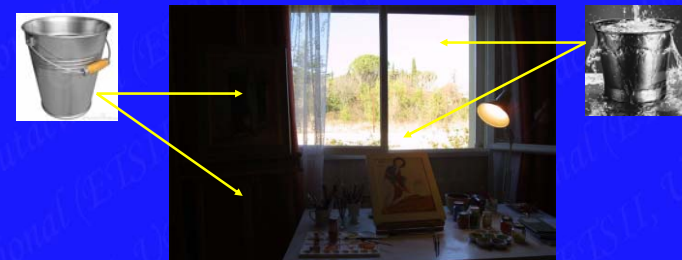
El número máximo de fotones antes de llegar a la saturación es la llamada profundidad del pozo.

Rango Dinámico

Debemos ajustar exposición para no exceder la capacidad de los sensels y poder ver detalle en las zonas claras.

También debemos preocuparnos de que las zonas oscuras reciban suficientes fotones para "mover" nuestro ADC.

El problema es que es fácil encontrarse con escenas naturales con un rango de luminosidad enorme ($> 1:10000$).



Soluciones

Hardware: usar píxeles con diferentes "profundidades"



Software: imagen HDR combinando diferentes exposiciones



ANTONIO TABERNEIRO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

Imagen HDR final



ANTONIO TABERNEIRO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

El ruido en un sensor

Cualquier sensor, además de la señal deseada captará ruido.

RUIDO = cualquier cosa que aparezca en la medida del sensor que no sea estrictamente debida a la luz recibida.

El ruido en fotografía puede tener numerosas fuentes:

- Ruido de lectura.
- "Shot" noise.
- Diferencias entre "sensels"
- Ruido térmico
- etc.



ANTONIO TABERNEIRO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

Ruido de lectura del sensor

Todos los errores acumulados en el proceso de "extraer" el voltaje del sensel, amplificarlo y llevarlo al convertor A/D.

¿Cómo medirlo?

- Tomar un "black frame": una foto con el objetivo tapado y una alta velocidad (exposición muy corta).
- Como no han llegado fotones al sensor, no deberíamos ver ningún voltaje y la salida del ADC debería ser 0 ADUs
- Todo lo que veamos en la "foto" tiene que ser ruido introducido durante el proceso de lectura.

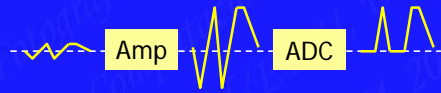
El ruido de lectura es independiente de la exposición pero aumenta si aumentamos el ISO (ganancia del amplificador).

ANTONIO TABERNEIRO GALÁN, 2015

FOTOGRAFÍA COMPUTACIONAL, ETSII, UPM

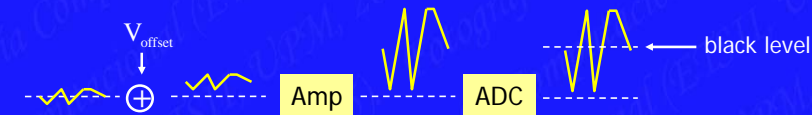
Sesgo en voltaje

Idealmente 0 fotones = voltaje 0. En la práctica hay un cierto nivel de ruido (positivo/negativo) que será amplificado.



El ADC sólo da números positivos al no esperar voltajes (luz) negativa. Nikon hace esto.

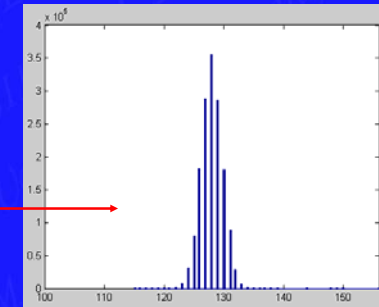
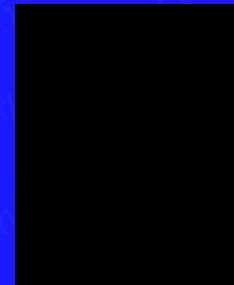
Otros fabricantes (p.e. Canon) introducen un pequeño voltaje base (offset) para registrar correctamente ese ruido.



Si se usa este “sesgo” hay que tenerlo en cuenta al “revelar”

Ejemplo de datos (black + histo)

Un black-frame y su histograma



Máquina con 12 bits:
Rango posible 0-4095

Media = 128 = sesgo introducido
Desviación standard $\sigma \cong 2$

Ruido lectura sistemático

Una parte del ruido de lectura es aleatorio, pero otra parte es repetitiva (“pattern noise”) y puede reducirse.

Este tipo de ruido suele manifestarse en regularidades por filas y/o columnas, debido al diseño de los “canales” para extraer los voltajes y llevarlos al amplificador/cuantificador.

Para detectar este patrón (si existe):

1. Tomar muchos “black-frames” y promediarlos.
2. La componente aleatoria se irá cancelando, mientras que las regularidades se acumularán.

El software de revelado pueden usar ese “black frame” medio para restarlo a la imagen RAW antes de hacer nada.

“Shot Noise”

Fluctuación aleatoria respecto al número medio de fotones.

Con una iluminación media de 1000 fotones por píxel durante la exposición, en una toma puedo recibir 990 y en otra 1015.

Lo mismo podría pasar en la misma toma para píxeles vecinos.

Iluminación constante



fotones = 10067 10152 10034 9987

Estadística del "Shot Noise"

Estadística de Poisson: las diferencias con la media siguen una distribución gaussiana con σ proporcional a \sqrt{N} .

Este tipo de ruido es más visible en las zonas oscuras:

- Si recibimos del orden de $N=40000$ fotones/píxel, la variación puede ser del orden de ± 200 (0.5%)
- En una zona oscura (con unos $N=100$ fotones/píxel), la posible variación es del 10% (± 10 fotones).

CONSEJO FOTOGRÁFICO: de cara a minimizar el ruido deberíamos apurar al máximo la exposición (sin saturar). En post-proceso ajustamos el nivel de luz deseado en escena.

No uniformidad entre píxeles (W)

Idealmente respuesta sensel = $k \times (\text{\#fotones})$

Debido a posibles diferencias individuales de eficiencia/área la respuesta de varios "sensors" al mismo número de fotones puede ser distinta (k varía ligeramente entre sensels)

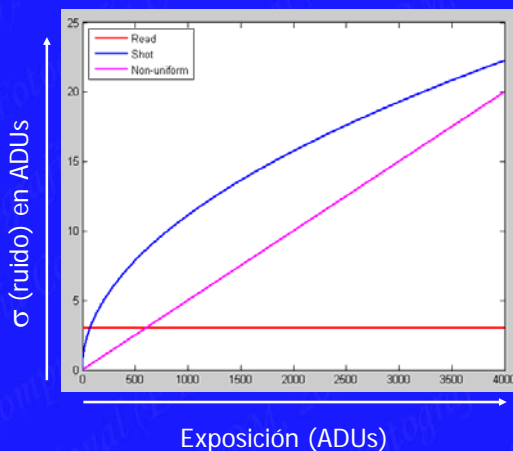
Si un sensel tiene una eficiencia de $(k+\delta k)$ que se aparta δk de la media k , los mismos fotones (N) darán una respuesta:

$$ADU = (k+\delta k) * N = (k * N) + (\delta k * N) = \text{Ideal} + W$$

El efecto de la no-uniformidad es equivalente a introducir un ruido W proporcional a la exposición (número de fotones).

Comparación entre tipos de ruido

$$\sigma_R = \text{cte} \quad \sigma_S = \sqrt{G \cdot E} \quad \sigma_W = K \cdot E$$



E = exposición (en ADUs)

Para exposiciones E bajas, el ruido de lectura R es el factor más importante.

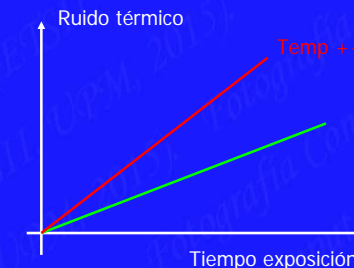
En la mayoría del rango de exposición, S (shot noise) es el ruido predominante.

Sólo en zonas de exposición alta la no uniformidad W empieza a compararse a S .

Ruido térmico

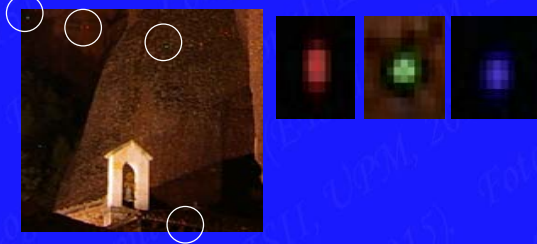
La agitación térmica puede liberar e^- que son indistinguibles de los "foto"electrones y contribuyen al voltaje final.

- El efecto es mayor si sube la temperatura del sensor.
- Para una temperatura dada, los e^- térmicos se liberan de forma constante en el tiempo: malo para exposiciones largas.



Ruido térmico

"Hot pixels": son sensels que exageran este efecto y se saturan con exposiciones largas.



El efecto de estos píxeles puede ser eliminado por el software de revelado si sabe dónde están (con una lista).

No confundir con "dead pixels": sensels "estropeados" que dan siempre el mismo valor, en cualquier situación.

f/8 T = 20 seg



Referencias

- Conceptos sobre ruido y rango dinámico en cámaras:
<http://theory.uchicago.edu/~ejm/pix/20d/tests/noise/>
- Artículos sobre sensores, medida del ruido, influencia en la fotografía:
http://www.clarkvision.com/articles/#part_4
- Software para acceder a los datos del sensor (RAW):
google dcraw
También puede usarse como software de "revelado".