

Métricas de evaluación para sistemas ópticos

Walter Torres, Alejandro Vélez
Óptica de Fourier y procesamiento de la información
19 de junio de 2021
Semestre 2021-1
Instituto de Física, Universidad de Antioquia

Contenido

- Introducción
- Métricas a partir del frente de onda
- Métricas a partir de la función de punto extendido: imagen de objetos puntuales
- Métricas en el dominio de Fourier: imagen de objetos tipo redes
- Métricas de desempeño visual
- Métricas de similaridad entre objetos e imágenes

Tipos de métricas usadas en ópticas

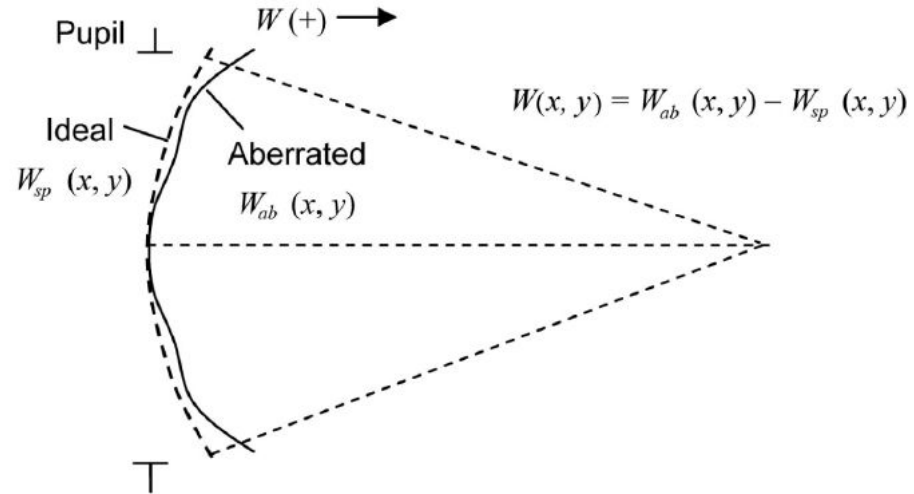
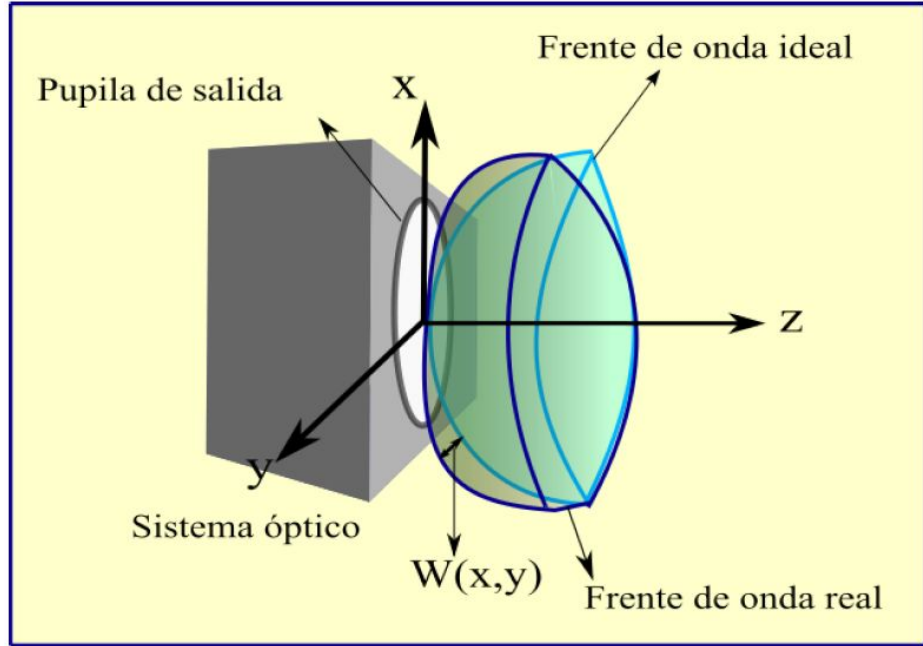
En general, la cuantificación de la calidad óptica de un sistema permite entender mejor el funcionamiento del sistema y mejorar los métodos de diagnóstico y corrección en los cuales el sistema óptico tiene su potencial. Este tipo de cuantificación se debe hacer a través de cantidad, objetivas, que permitan interpretar fácilmente las bondades y desventajas del sistema ópticos o de la metodología propuesta. En este sentido se tiene, principalmente, 4 tipos de métricas:

- Métricas del frente de onda
- Métricas en el plano de la PSF
- Métricas en el espacio de Frecuencias: OTF
- Métricas visuales
- Métricas de similaridad objeto-imagen

Tipos usadas

OPTICAL QUALITY (ABERRATION BASED)	IMAGE QUALITY OF THE PSF	IMAGE QUALITY, FOURIER DOMAIN
WA Zernike coefficients Seidel coefficients RMS Peak to valley Pupil fractions	Strehl ratio Intensity variance Peak autocorrelation Half width at half maximum $1/e^2$ width Width autocorrelation Half energy diameter D86 diameter Equivalent cylinder diameter Encircled energy Second moment Entropy	Contrast of grating image Two-point optical resolution Grating optical resolution Cutoff frequency MTF Hopkins ratio Frequency for which MTF = 0.1 or 0.5 Area MFT Area Hopkins ratio Pseudo Strehl ratio on MTF Volume OTF/volume MTF
VISUAL METRICS		SIMILARITY OBJECT AND IMAGE
Minimum angle of resolution Visual acuity Snellen fraction Maximum resolved frequency Threshold contrast CSF Area CSF Area MFT/NTF Subjective quality factor Area OTF/NTF Area OTF/area MTF neurally weighted Visual Strehl ratio Neural sharpness		Mean square error Peak signal-to-noise ratio Correlation coefficient Mutual information Receiver operator characteristic Structural similarity index

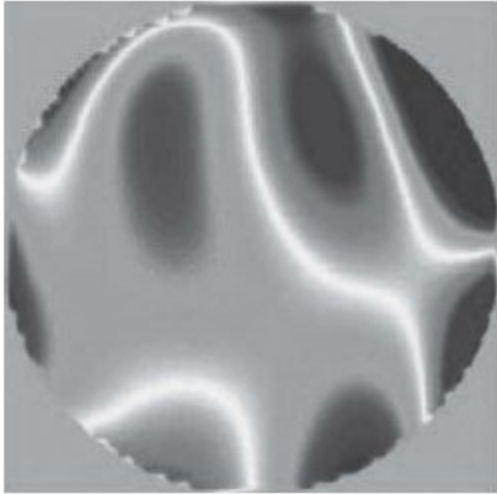
Métricas del frente de onda



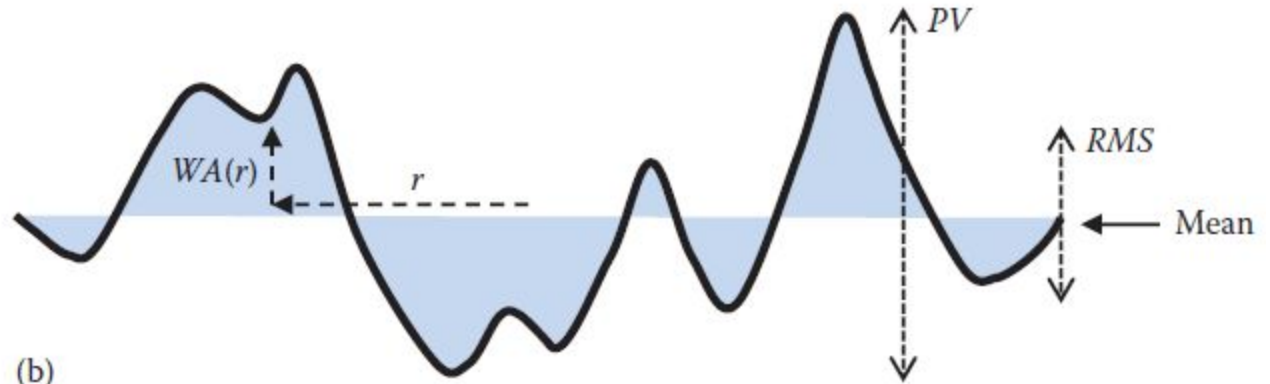
Métricas del frente de onda

- Coeficientes de aberración: $c_n^{\pm m}$

$$WA(\rho, \theta) = \sum_{n, \pm m} c_n^{\pm m} \cdot Z_n^{\pm m}(\rho, \theta)$$



(a)



(b)

Métricas del frente de onda

- Varianza:

$$\begin{aligned}\sigma_{WA}^2 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 [WA(\rho, \theta)]^2 \rho \, d\rho \, d\theta - \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 WA(\rho, \theta) \rho \, d\rho \, d\theta \right]^2 \\ &= \overline{WA^2} - (\overline{WA})^2\end{aligned}\quad (1)$$

- El root-mean-square (RMS):

$$RMS = \sigma_{WA} = \sqrt{\overline{WA^2}} \qquad RMS^2 = \sum_{n, \pm m} \left(c_n^{\pm m} \right)^2$$

- Distancia Pico-Valle:

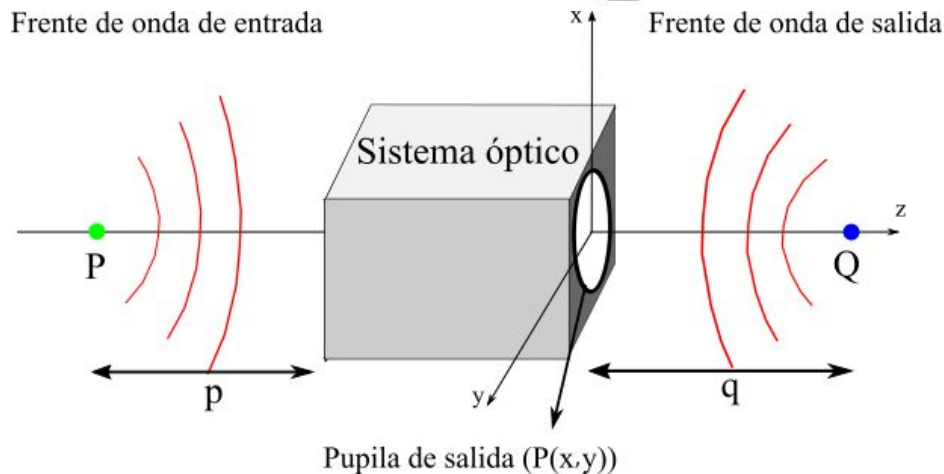
$$PV = \max(WA) - \min(WA)$$

Métricas a partir de la PSF

La función de punto extendido (PSF) se puede obtener como

$$PSF(x, y) = |\text{FT}(P(\rho, \theta))|^2$$

$$P(\rho, \theta) = A(\rho, \theta) \cdot \exp \left[\frac{2\pi i}{\lambda} W A(\rho, \theta) \right]$$



Métricas a partir de la PSF

- Razón de Strehl (SR):

$$SR = \frac{PSF(0,0)}{PSF_{d-l}(0,0)} \quad SR \approx e^{-\left(\frac{2\pi}{\lambda} RMS\right)^2} \approx 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} RMS\right)^2$$

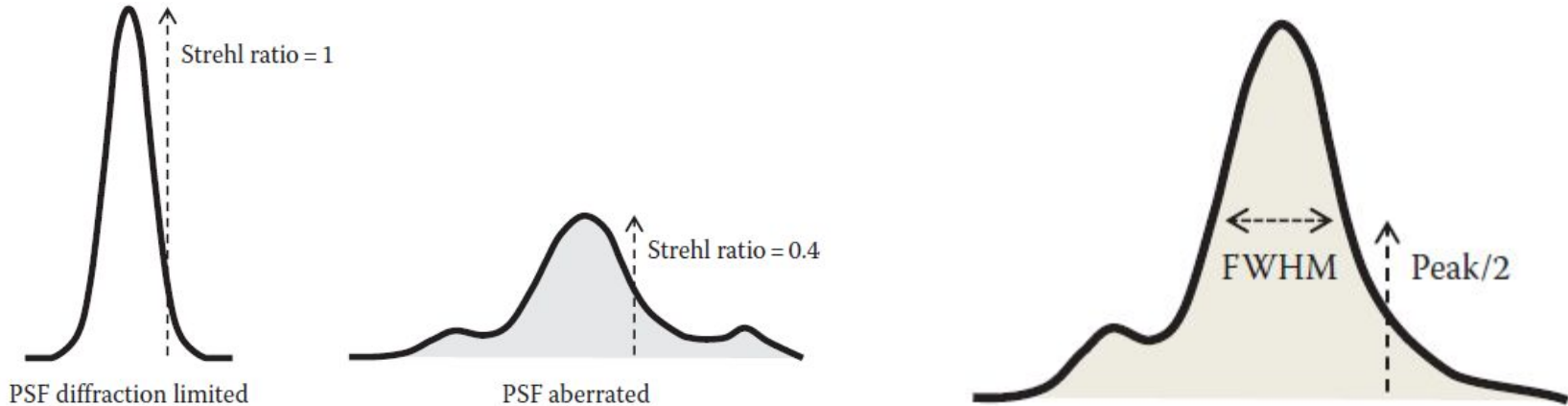
$$SR_{peaks} = \frac{\max(PSF)}{\max(PSF_{d-l})}$$

- Pico de la autocorrelación de la PSF

$$C(x, y) = PSF \otimes PSF = \iint_{image} PSF(s, t) PSF(s - x, t - y) ds dt$$

Métricas a partir de la PSF

- Ancho a la mitad del máximo (FWHM): es el ancho de la PSF entre dos puntos de la curva en la cuales el ancho cae a la mitad



- Mitad del ancho a la mitad del máximo (HWHM): es la mitad del FWHM
- Diámetro a la mitad de la energía:

$$\int_0^{D50} \int_0^{2\pi} PSF_N(r, \varphi) r dr d\varphi = 0.5$$

Métricas a partir de la PSF

- Entropía de la PSF: es una medida de la varianza espacial de la PSF, es decir, mide cómo se distribuye la energía en la imagen

$$H = - \sum_{x,y} PSF_N(x,y) \cdot \log PSF_N(x,y)$$

- Energía encerrada (EE): establece la cantidad de energía que hay en cierta región circular de la PSF

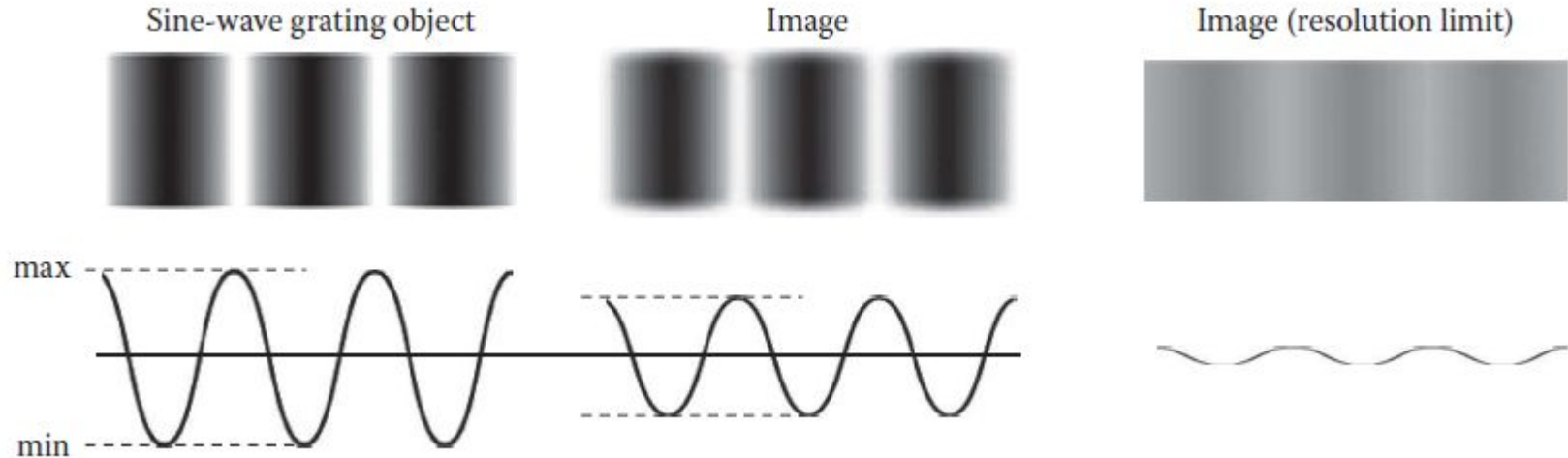
$$EE(R) = \int_0^R \int_0^{2\pi} PSF_N(r, \varphi) r \, dr \, d\varphi$$

Métricas en el dominio de Fourier: OTF

Contraste de Michelson (MC): también conocido como modulación, es la diferencia entre los valores extremos de intensidad

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Frecuencia espacial (f): es una medida de cada cuanto las componentes periódicas de un patrón se repiten por unidad de distancia o de ángulo



Métricas en el dominio de Fourier: OTF

Función de transferencia óptica (OTF): especifica la reducción de contraste de un patrón periódico después de pasar a través del sistema óptico, como una función de su periodicidad y orientación.

$$OTF(u, v) = FT(PSF(x, y))$$

$$OTF(u, v) = P \otimes P = \iint_{pupil} P(s, t) P^*(s - u, t - v) ds dt$$

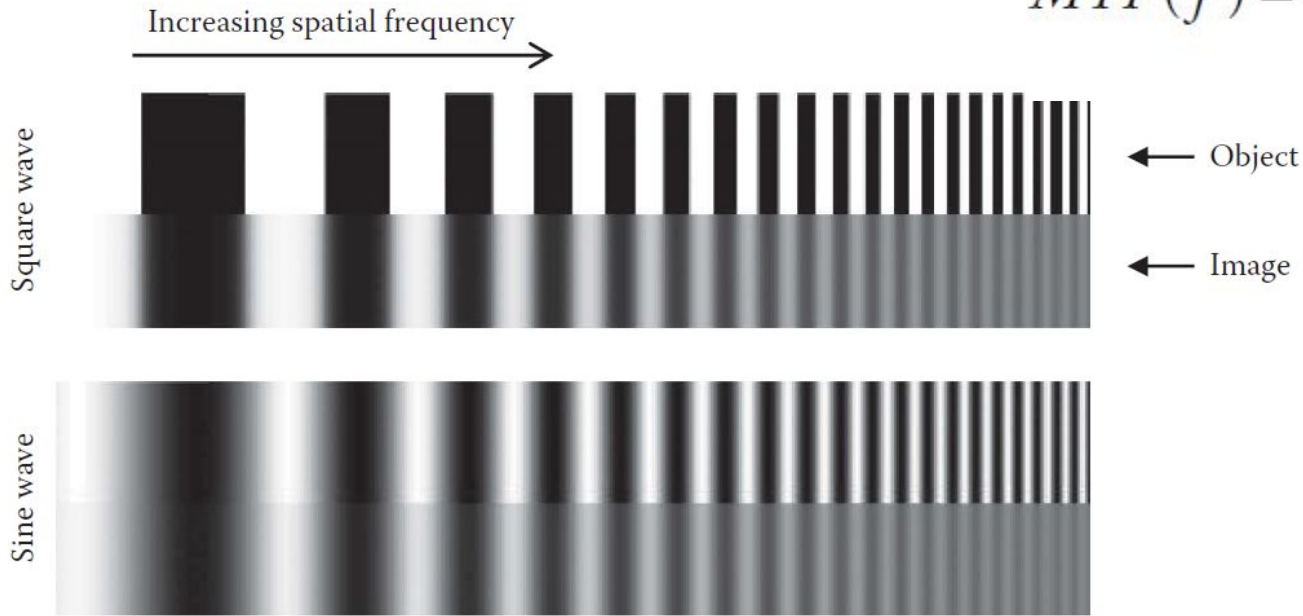
Función de transferencia de la modulación (MTF): es el valor absoluto de la MTF

$$OTF(u, v) = MTF(u, v) \cdot e^{iPTF(u, v)}$$

Métricas en el dominio de Fourier: OTF

- MTF: es la métrica de mayor importancia para la evaluación objetiva de los sistemas ópticos en formación de imagen. Esta función da cuenta del desempeño del sistema en una frecuencia particular, tomando como referencia el contraste

$$MTF(f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} MTF(f, \varphi) d\varphi$$

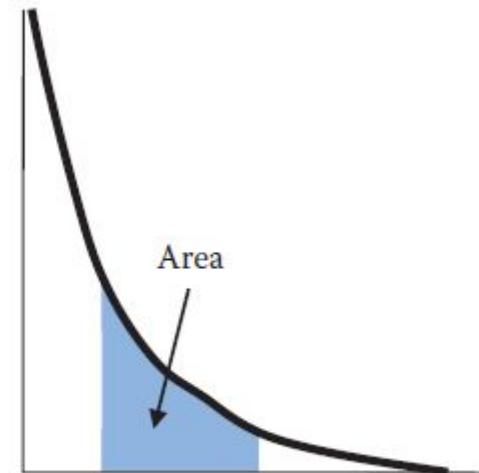
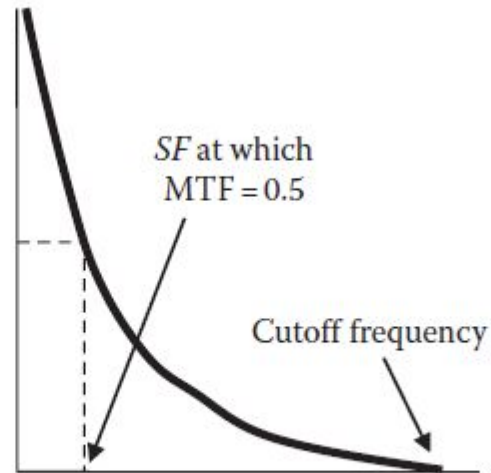
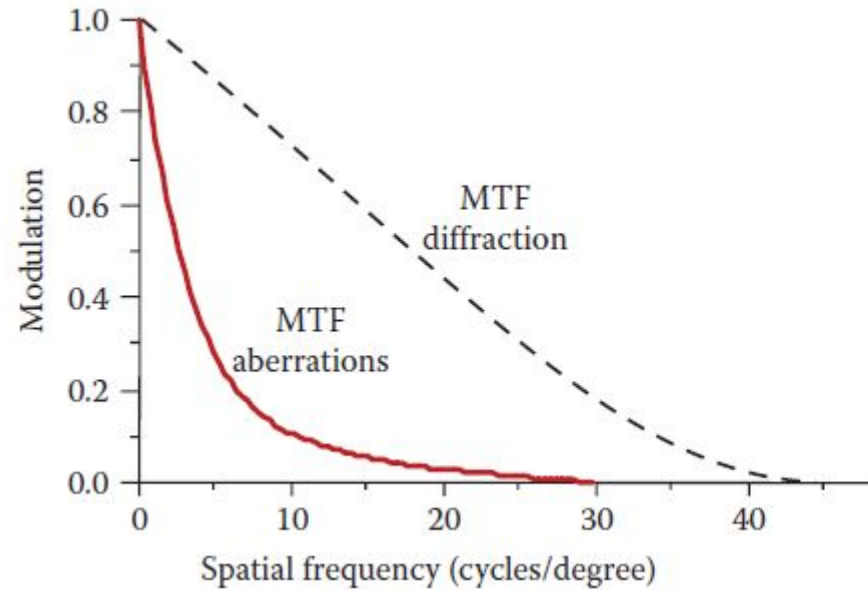


Métricas en el dominio de Fourier: OTF

- Razón de Hopkins (HR):

$$HR(f) = \frac{MTF(f)}{MTF_{d-l}(f)}$$

- Área bajo la MTF:



Métricas en el dominio de Fourier: OTF

- Razón de Strehl en el espacio de frecuencias (SR_{OTF}):

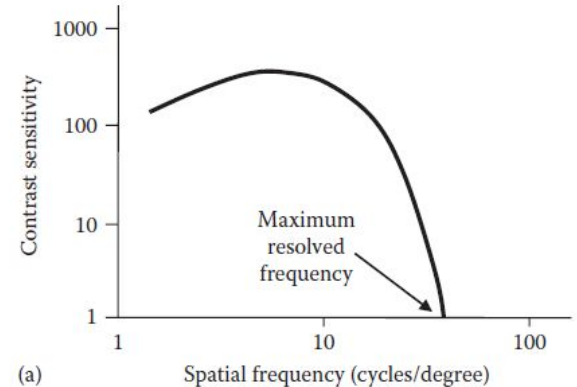
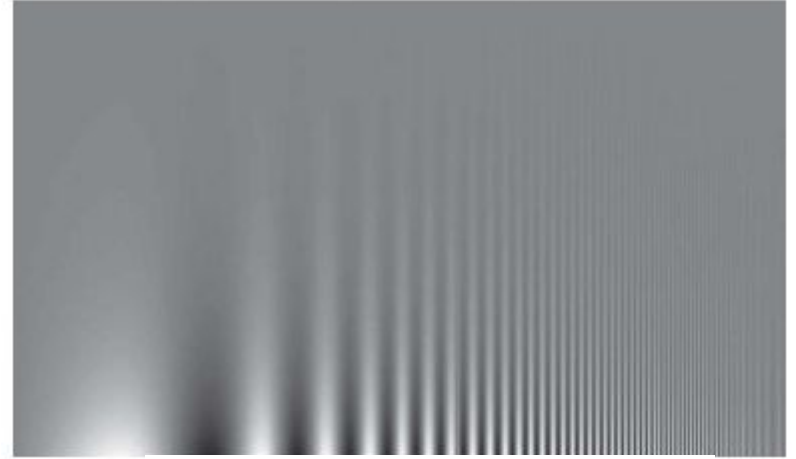
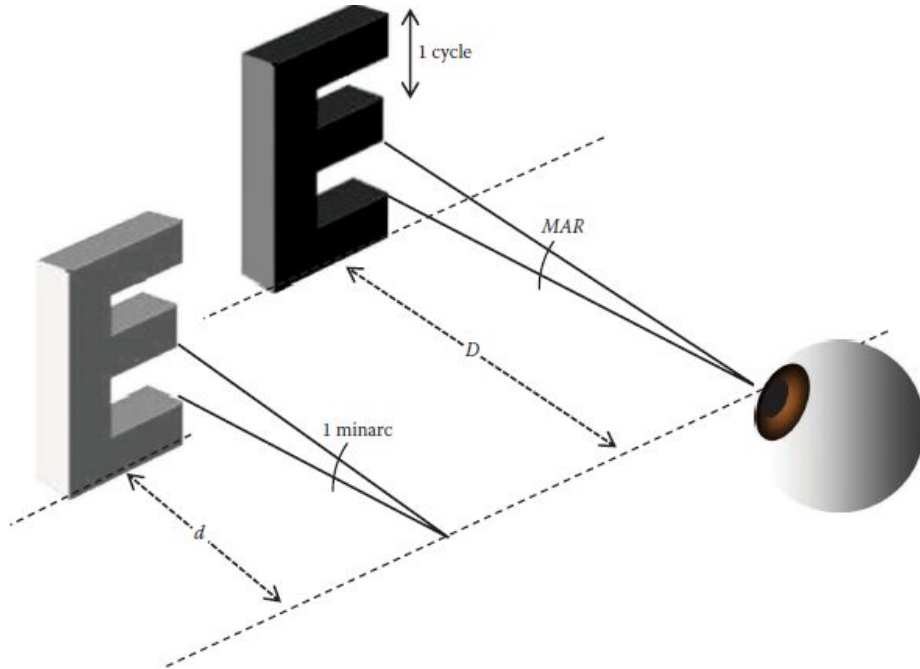
$$SR = \frac{PSF(0,0)}{PSF_{d-l}(0,0)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} OTF(u,v) du dv}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} OTF_{d-l}(u,v) du dv}$$

- Razón de Strehl en el espacio de frecuencias (SR_{MTF}):

$$\frac{Vol(OTF)}{Vol(MTF)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} OTF(u,v) du dv}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} MTF(u,v) du dv} \quad SR_{MTF} = \frac{\int_0^{\infty} MTF(f) df}{\int_0^{\infty} MTF_{d-l}(f) df}$$

Métricas o parámetros visuales

Métricas que permiten medir subjetivamente el desempeño visual de una persona



(a)

Métricas para comparar imágenes

- **Métodos píxel a píxel**

Son aquellos que comparan un píxel de una imagen con el mismo píxel de su referencia

- Error cuadrático medio (MSE)
- Relación pico señal ruido (PSNR)

- **Métodos globales**

Son los que comparan medidas de toda la imagen con su referencia.

- Coeficiente de correlación
- Similitud estructural

Error cuadrático medio (MSE)

Sea O el objeto y I su referencia, el error cuadrático medio está definido por

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (O_i - I_i)^2$$

donde i es un contador de píxeles y N el número total de píxeles.

- Extremadamente sensible a ruidos aleatorios.
- Prioriza las diferencias entre de intensidad sobre distorsiones geométricas.
- Es difícil establecer valores umbrales de calidad: mientras más cerca a cero mayor semejanza, pero cuanto es “cerca”?

Uso: cuando hay poco ruido aleatorio y la intensidad de las dos imágenes es igual.



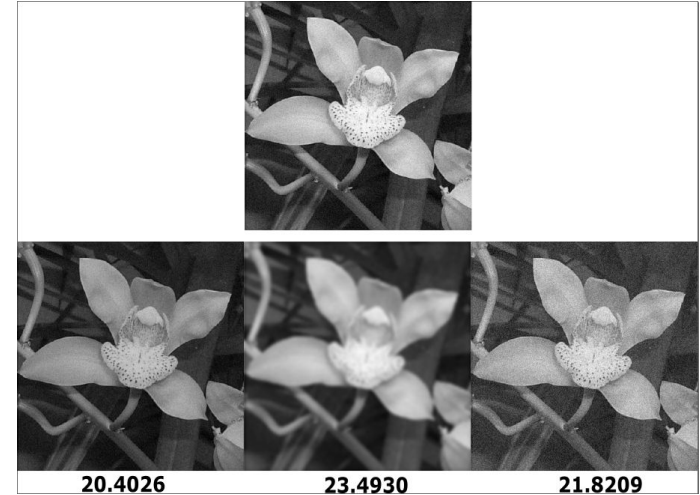
Relación pico señal ruido (PSNR)

El PSNR está definido como

$$20 \log_{10} \left(\frac{2^B - 1}{\sqrt{MSE}} \right)$$

donde B es la profundidad de bit (cuantos niveles de intensidad) tiene una imagen, y MSE es el error cuadrático medio.

Al ser derivado del MSE, tiene sus mismas ventajas, sin embargo, el uso de la profundidad de bit en el cálculo permite definir un valor referencia a partir del cual dos imágenes son una buena aproximación. Para imágenes de 8 bits, esto es aproximadamente 30 dB de PSNR.



Indice de Similitud estructural

Es una métrica compuesta, producto de un análisis de los factores que afectan la percepción humana. Es el producto de 3 términos

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma$$

l es el termino de luminancia, c, el de contraste y s el de estructura.

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1},$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2},$$

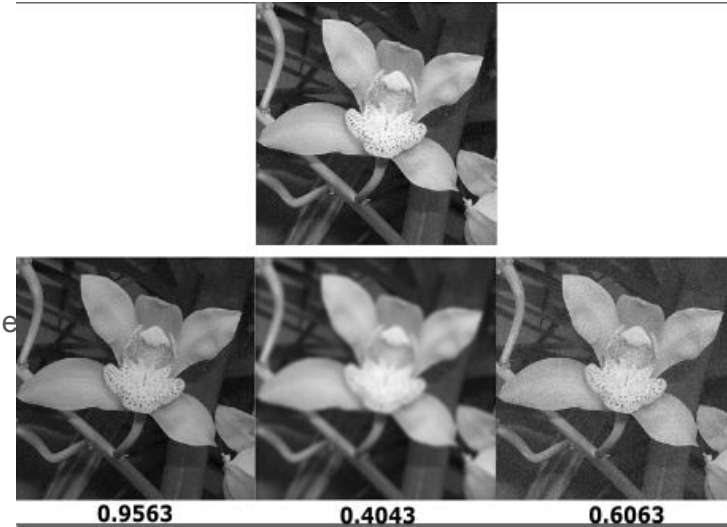
$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}$$

μ es el medio de la imagen, σ_x y σ_y su desviación estándar, σ_{xy} la covarianza entre las imágenes y C_1 , C_2 y C_3 son constantes que dependen del rango dinámico (profundidad de bit) de las imágenes. Note que el termino de estructura se reduce al CC mas las constantes.

-Se puede calcular globalmente o localmente (regiones de 8x8 pixeles)

-Ideal cuando la degradación en la imagen tiene varias formas.

-Es más sensible a cambios geométricos y de contraste que a cambios en la intensidad.



Entropía

Definida como

$$S = -\sum_{i=0}^N p_i \log_2(p_i)$$

donde p_i son las cuentas en el bin i , del histograma de intensidad de la imagen y N el número de bins en el histograma (niveles de intensidad)

Debido a que depende del histograma, los valores de entropía varían según la cantidad de posibles niveles de intensidad de la imagen (profundidad de bit). Para una imagen de 8 bits va desde 0 a 8, siendo 0 una imagen con un solo nivel de intensidad uniforme y 8 una imagen con una distribución aleatoria uniforme de intensidades.

La entropía es particularmente útil cuando hay ruido aleatorio en la imagen o pérdida de contraste. Además, al ser una propiedad de la imagen, no requiere comparación con otra imagen.



7.27



7.46



7.68