

Il seguente file costituisce esclusivamente un supporto alla preparazione dell'esame, al fine unico di ripasso generale: si raccomanda di studiare dalle slide del docente dagli appunti presi a lezione, unico materiale valido per la corretta preparazione dell'esame. Il riassunto è stato redatto da Florio Vincenzo Pio, con l'aiuto di Savoia Davide e di Mignogna Giovanni (che ha gentilmente fornito i codici svolti a lezione).

---

## Introduzione (pdf 1)

L'immagine può essere:

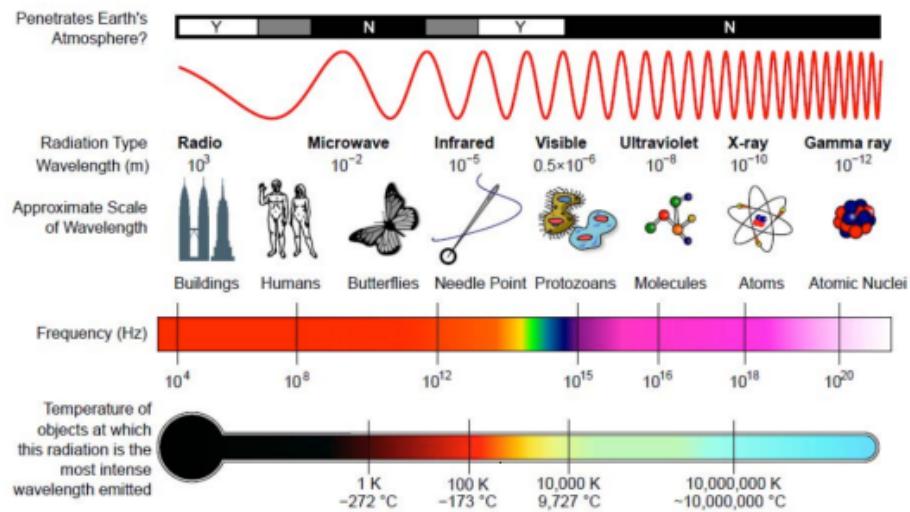
### Analogica:

- E' la **rappresentazione bidimensionale** di un segnale luminoso, impresso direttamente sul rullino
- La **sensibilità** è dettata dal **rullino** (ASA, "guadagno", al pari degli ISO)

### Digitale

- Formata da un **numero finito di pixel**, il segnale luminoso (analogico) viene convertito in digitale tramite un sensore
- La **sensibilità** è dettata dal **sensore** (ISO)
- Ogni immagine è una matrice **bidimensionale** di valori di colore (8-10-12 bit) o di grigi

## Lunghezze d'onda della luce



Dato che la luce ha varie lunghezze d'onda, sia i sensori fotografici che il nostro occhio riescono ad essere particolarmente sensibili soltanto a determinate lunghezze d'onda:

## Raggi gamma

- Raggi elettromagnetici ad **alta energia e frequenza**
- Utilizzati comunemente in medicina nucleare per imaging
- **Molto penetranti**, attraversano facilmente materiali densi
- Possono essere **dannosi** per i tessuti viventi e richiedono precauzioni di sicurezza

## Raggi X

- Raggi elettromagnetici di **alta energia**, ma inferiori rispetto ai raggi gamma
- Ampiamente utilizzati in radiografia medica e industriale
- Possono penetrare attraverso materiali più spessi, ma con minore capacità di penetrazione rispetto ai raggi gamma
- Possono causare danni biologici e richiedono precauzioni

## Luce ultravioletta

- Frequenza superiore alla luce visibile, ma inferiore ai raggi X
- Utilizzati in applicazioni come l'analisi forense, la sterilizzazione e la misurazione della fluorescenza
- Possono danneggiare la pelle umana e richiedono protezione durante l'esposizione

## Luce infrarossa

- Frequenza inferiore alla luce visibile

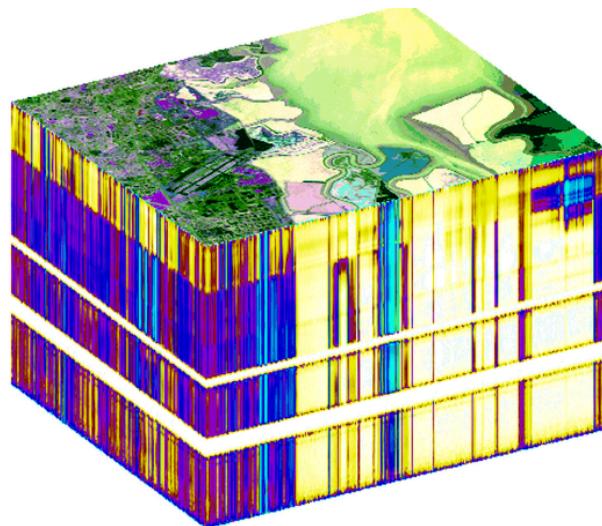
- Utilizzato in telecamere termiche, sorveglianza notturna e sensori di movimento
- Non dannoso per la salute umana
- Penetra facilmente attraverso nebbia e fumo

## Luce visibile

- La porzione dello spettro elettromagnetico percepita dall'occhio umano
- Utilizzata comunemente nell'elaborazione delle immagini, fotografia e visione artificiale
- Suddivisa in colori (rosso, verde, blu) e rappresentata da lunghezze d'onda specifiche
- Non dannosa per la salute umana

## Immagini multispettrali (e iperspettrali)

Le immagini multispettrali sono insiemi di immagini acquisite in più di tre bande spettrali, spesso al di là delle bande visibili (rosso, verde e blu) dello spettro elettromagnetico. Questo approccio consente di raccogliere informazioni dettagliate su un'area di interesse da diverse prospettive spettrali, ampliando così le possibilità di analisi e interpretazione delle immagini. L'esempio che viene fatto più frequentemente è quello di una matrice tridimensionale, ovvero una serie di immagini (matrici bidimensionali) che possiedono (una ad una) le informazioni di un gruppo.



# Occhio umano (pdf 2)

## Anatomia dell'occhio

Prima di esaminare il processo di acquisizione visiva, è importante avere una comprensione generale dell'anatomia dell'occhio umano. L'occhio è un organo complesso che svolge diverse funzioni essenziali per la visione. Tuttavia, ci concentreremo principalmente sugli aspetti relativi all'acquisizione delle informazioni visive.

## Il processo di acquisizione visiva

L'occhio funziona come una macchina fotografica biologica, catturando i raggi luminosi provenienti dall'ambiente circostante e trasformandoli in segnali elettrici che possono essere interpretati dal cervello. Questo processo avviene attraverso diverse fasi:

### Cornea e cristallino

La luce proveniente da una fonte luminosa passa attraverso la cornea trasparente e il cristallino, che si trovano all'avanti dell'occhio. Questi elementi focalizzano la luce sul retina, la superficie sensibile alla luce dell'occhio.

### Retina

La retina è composta da fotorecettori chiamati coni e bastoncelli, che convertono la luce in segnali elettrici. I coni sono responsabili della visione dei colori e della percezione dei dettagli, mentre i bastoncelli sono più sensibili alla luce e consentono la visione in condizioni di scarsa illuminazione.

### Trasduzione elettrochimica

Quando la luce colpisce i fotorecettori nella retina, si verifica una reazione elettrochimica che genera impulsi elettrici. Questi impulsi rappresentano l'intensità luminosa e vengono trasmessi attraverso il sistema nervoso ottico.

### Nervo ottico e cervello

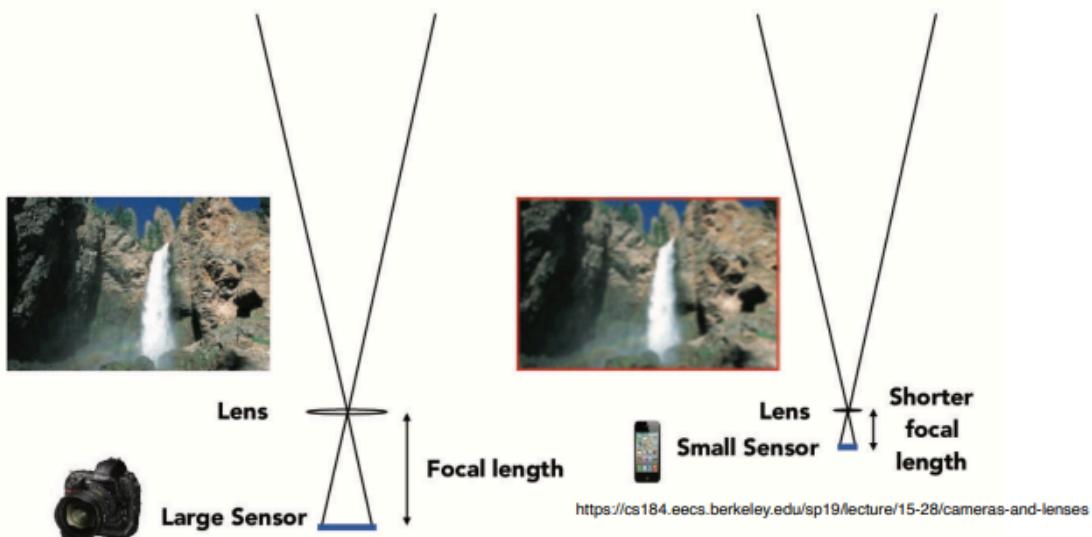
Gli impulsi elettrici generati nella retina vengono trasmessi al cervello attraverso il nervo ottico. Il cervello elabora quindi questi segnali per creare la percezione visiva dell'ambiente circostante.

## Campo visivo

Il campo visivo (FOV) rappresenta l'area dell'ambiente che può essere vista contemporaneamente senza spostare gli occhi. L'occhio umano ha un campo visivo di circa 180 gradi orizzontalmente e 120 gradi verticalmente. Tuttavia, la massima acuità visiva si concentra in una piccola area chiamata "fovea", che corrisponde al centro del campo visivo. In generale il FOV dipende dalla grandezza del sensore e dalla lunghezza focale secondo questa relazione:

$$FOV = 2 \arctan\left(\frac{h}{2f}\right)$$

dove  $f$  è la lunghezza focale della lente e  $h$  la dimensione del sensore (generalmente la diagonale).



## Retinal Sampling

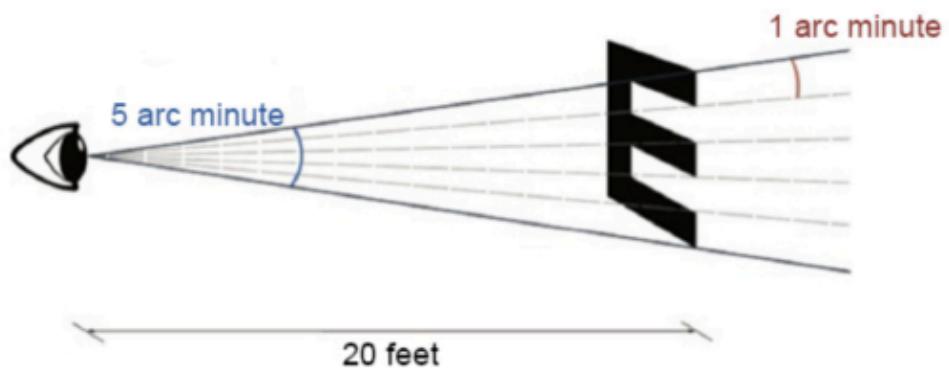
Il processo di campionamento retinico si riferisce alla discretizzazione delle informazioni visive acquisite dalla retina. La retina è composta da una griglia di fotorecettori, e il campionamento retinico determina la risoluzione spaziale dell'occhio umano. La densità dei fotorecettori varia in diverse parti della retina, con la massima densità nella fovea, che consente una maggiore acuità visiva in quella regione.

## Acutanza visiva

L'acutanza visiva è una misura della capacità dell'occhio umano di distinguere i dettagli fini. Può essere valutata attraverso la risoluzione spaziale o la capacità di discriminare gli oggetti.

separati da una certa distanza. La risoluzione spaziale dipende dalla densità dei fotorecettori nella retina e dalla capacità del cervello di elaborare i segnali visivi:

- Spiegazione matematica: L'acutanza visiva può essere misurata utilizzando il concetto di frequenza spaziale. La frequenza spaziale si riferisce alla variazione di luminosità in un'immagine rispetto alla posizione spaziale. Viene descritta utilizzando la funzione di trasferimento del sistema visivo umano, che rappresenta la relazione tra la frequenza spaziale dell'immagine in input e la risposta del sistema visivo. Questa funzione di trasferimento dipende da vari fattori, come la densità dei fotorecettori, la sensibilità alla luce e i processi di elaborazione nel cervello.



## Teorema di Nyquist e occhio umano

Il teorema di Nyquist afferma che per acquisire correttamente un segnale, è necessario campionarlo almeno al doppio della sua frequenza massima. Applicando questo concetto all'occhio umano, possiamo affermare che la risoluzione spaziale massima dell'occhio è limitata dalla frequenza massima che può essere campionata in modo adeguato. Questa frequenza massima è determinata dalla densità dei fotorecettori nella retina e dalla capacità del sistema visivo di elaborare i segnali visivi.



## Movimenti degli occhi

Gli occhi umani non sono completamente statici, ma effettuano movimenti costanti, come saccadi, fissazioni e movimenti di inseguimento. Questi movimenti sono essenziali per esplorare l'ambiente visivo e concentrare l'attenzione su determinate regioni. Durante i movimenti degli occhi, il sistema visivo integra le informazioni visive acquisite in diverse posizioni per creare una visione unificata e coerente del mondo circostante:

### Saccadi

- Movimenti rapidi degli occhi
- Permettono di spostare l'attenzione da un punto all'altro dell'ambiente visivo
- Esplorano l'ambiente in modo rapido e mirato
- Caratterizzati da brevi periodi di movimento degli occhi seguiti da brevi periodi di fermo degli occhi

### Movimenti di vergenza (Vergence movements)

- Cambio di angolazione degli occhi
- Si verificano quando guardiamo oggetti a diverse distanze
- Convergenza degli occhi quando un oggetto si avvicina
- Divergenza degli occhi quando un oggetto si allontana
- Consentono una visione binoculare e la percezione della profondità

### Movimenti vestibolo-oculari (Vestibulo-ocular movements)

- Risposta riflessa a movimenti della testa o del corpo
- Mantengono una visione stabile durante il movimento
- Movimenti compensatori degli occhi nella direzione opposta al movimento della testa o del corpo
- Consentono di mantenere lo sguardo su un oggetto specifico durante il movimento

### Fissazione

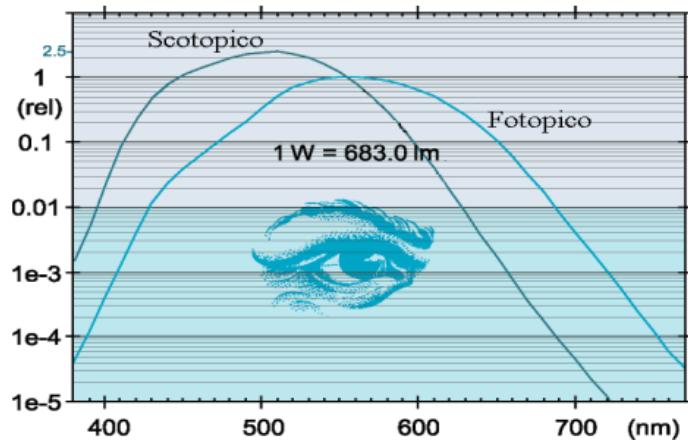
- Periodo in cui gli occhi sono relativamente fermi
- Puntano su un oggetto specifico nell'ambiente visivo
- Permette di acquisire dettagli e informazioni precise sull'oggetto
- Importante per la percezione visiva dettagliata e il mantenimento dell'attenzione

# Effetti ottici

(pdf 3, 4) non molto utile, l'ho fatta per completezza

## Funzione di luminosità

- Descrive la sensibilità dell'occhio umano alla luce in funzione della sua intensità
- Corrisponde alla risposta dello spettro di luminosità dell'occhio umano



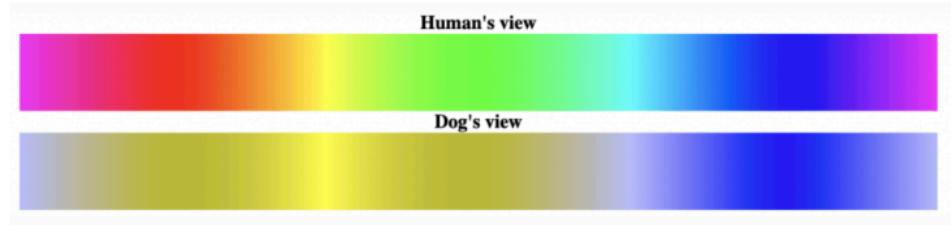
## Effetto Purkinje

- Fenomeno in cui la percezione dei colori cambia in base alle condizioni di illuminazione
- Durante la visione notturna, i colori blu-verdi appaiono più luminosi rispetto ai colori rossi



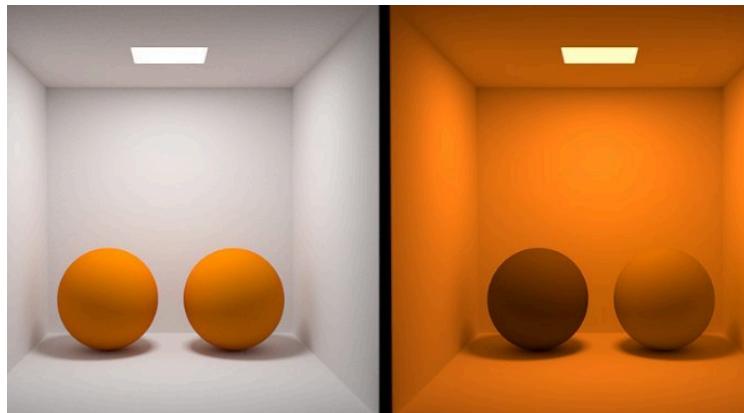
## Visione del colore

- Capacità dell'occhio umano di distinguere e percepire i diversi colori
- Teoria del colore: spiega la percezione del colore in base alla combinazione di lunghezze d'onda e alla risposta dei recettori nel sistema visivo



## Metamerismo

- Fenomeno in cui due oggetti hanno spettri di riflessione diversi ma appaiono identici per il sistema visivo
- È dovuto alla limitata sensibilità dei recettori del colore nell'occhio umano



## Costanza del colore

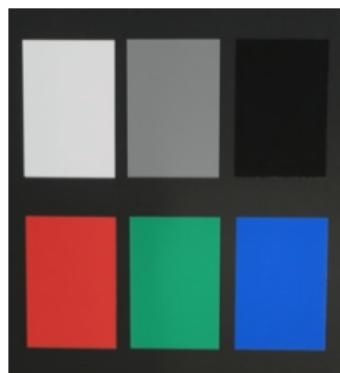
- Capacità del sistema visivo di mantenere la percezione del colore stabile nonostante le variazioni dell'illuminazione
- Il cervello adatta la percezione del colore in base al contesto luminoso per mantenere la stabilità del colore

## Teoria del retinex

- Teoria che spiega la percezione del colore e della luminosità basandosi sull'elaborazione dell'immagine retinica
- Propone che la percezione del colore sia il risultato di elaborazioni neurali complesse nel sistema visivo

## Esperimento di Land

- Esperimento condotto da Edwin Land per dimostrare la teoria del retinex
- Involge l'osservazione di immagini di oggetti con diverse illuminazioni per mostrare come la percezione del colore si mantenga stabile



## Spettrofotometro e colorimetro

- Strumenti utilizzati per misurare e caratterizzare lo spettro di luce e il colore di oggetti:
  - Spettrofotometro: misura l'intensità della luce in funzione della lunghezza d'onda
  - Colorimetro: misura i valori di colore come tonalità, saturazione e luminosità

## Dischromatopsia

- Condizione in cui una persona ha una percezione alterata dei colori
- Può essere causata da difetti congeniti o acquisiti nel sistema visivo

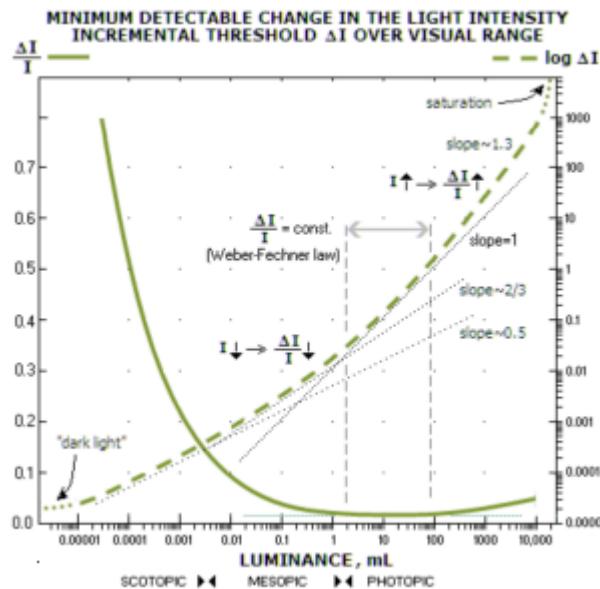
## Test di Ishihara

- Test utilizzato per diagnosticare la dischromatopsia
- Consiste in piastre con punti colorati che devono essere identificati correttamente  
Luminosità soggettiva:
- La percezione della luminosità di un oggetto dipende dal suo contesto e dalle condizioni di illuminazione circostanti

- La luminosità soggettiva può essere influenzata da fattori come il contrasto e l'adattamento visivo

## Rapporto di Weber

- Misura la sensibilità del sistema visivo ai cambiamenti di luminosità
- Esprime la minima differenza di luminosità percepibile rispetto all'intensità di base



## Effetto Cornsweet

- Illusione ottica in cui la percezione della luminosità di un'area dipende dal contrasto dei confini circostanti
- Anche se i gradienti di luminosità sono discontinui, l'occhio li interpreta come continui, creando una percezione distorta

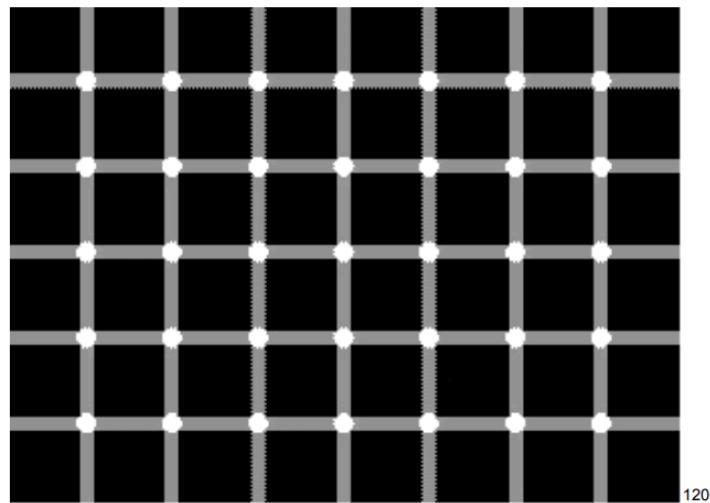


## Contrasto simultaneo

- Fenomeno in cui un colore appare diverso a seconda del colore circostante
- Il contrasto simultaneo può alterare la percezione del colore e la luminosità di un oggetto

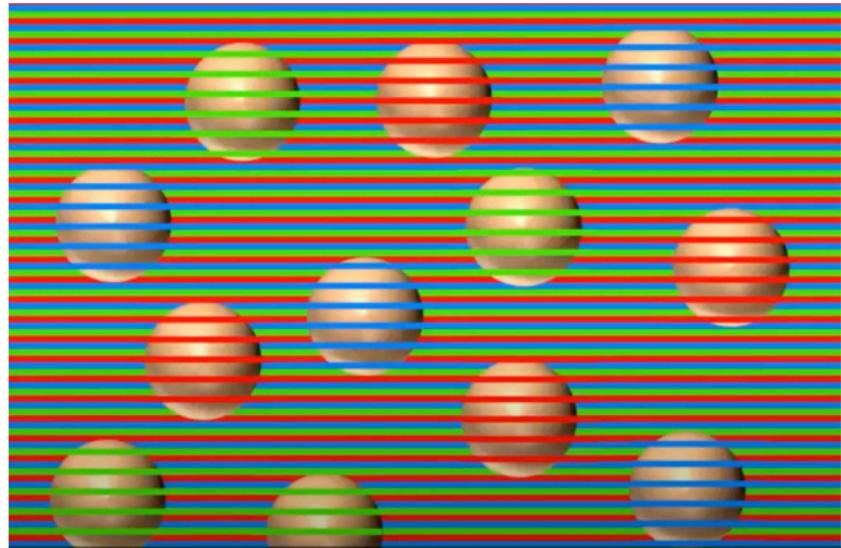
## Inibizione laterale

- Processo in cui le cellule del sistema visivo inibiscono l'attività delle cellule vicine per migliorare il contrasto e la definizione dell'immagine
- Contribuisce alla percezione del contrasto e alla nitidezza dell'immagine



## Assimilazione del colore

- Fenomeno in cui un colore circostante può influenzare la percezione del colore di un oggetto
- Le sfere in realtà hanno tutte lo stesso colore
- L'occhio tende ad adattare il colore di un oggetto per farlo corrispondere al colore circostante

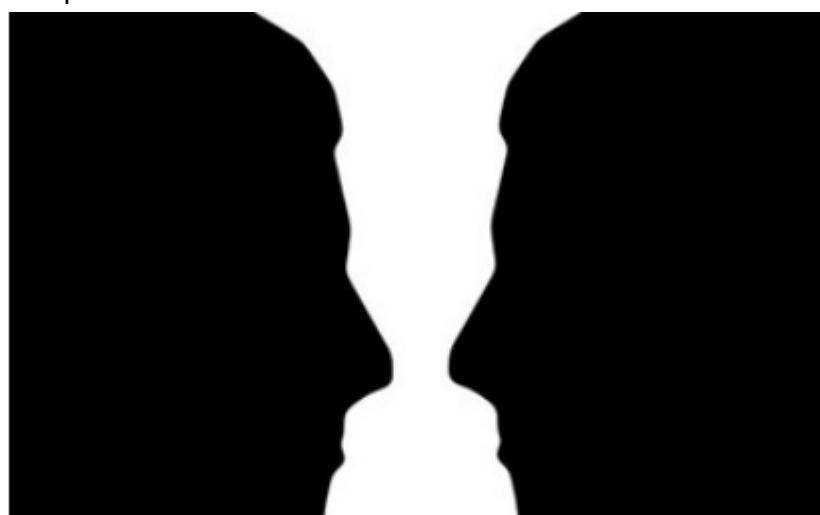


## Formulazione del contrasto del colore di Kirschmann

- Formulazione matematica che descrive il contrasto dei colori nella percezione visiva
- Prende in considerazione fattori come la luminosità, la saturazione e la tonalità per calcolare il contrasto del colore

## Illusione ottica

- Fenomeno in cui l'occhio interpreta erroneamente un'immagine o una situazione
- Le illusioni ottiche possono ingannare la percezione visiva e creare effetti visivi apparentemente impossibili



## Illusione letterale

- Illusione in cui la percezione visiva è distorta a causa di fattori come la prospettiva o la disposizione degli oggetti
- Può portare a una percezione inaccurata delle dimensioni, della forma o della disposizione degli oggetti



## Dissolvenza di Froxler

- Illusione in cui un oggetto fisso e stabile appare gradualmente sbiadito o scompare completamente dalla vista
- Non è correlata a un difetto dell'occhio, ma piuttosto a un effetto di adattamento visivo



## Pareidolia

- Fenomeno in cui il cervello individua pattern familiari o volti in oggetti casuali o astratti
- È la tendenza del cervello a trovare significato o familiarità anche in stimoli ambigui o casuali



## Allucinazione

- Esperienza soggettiva di percepire qualcosa che non è presente nella realtà
- Può coinvolgere la percezione di colori, forme o oggetti che non esistono effettivamente

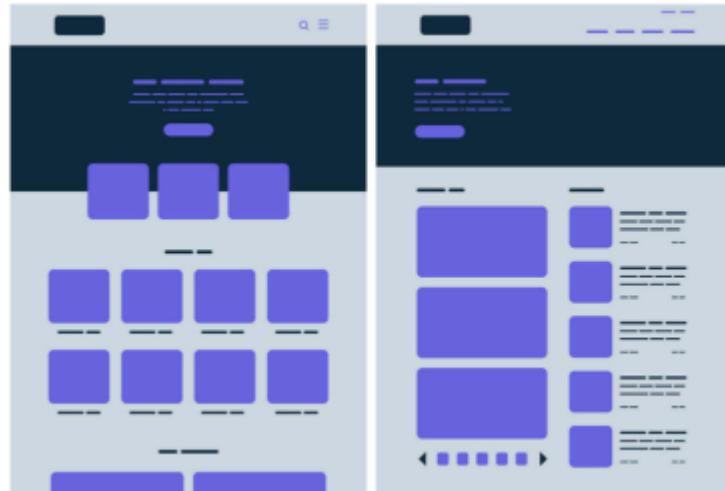


## Teoria della Gestalt della percezione

- Approccio psicologico che studia come il cervello organizza le informazioni sensoriali per creare una percezione significativa del mondo circostante
- Sottolinea l'importanza delle configurazioni e delle relazioni tra gli elementi nella percezione visiva

## Prossimità

- Principio secondo cui gli oggetti che sono vicini tra loro sono percepiti come parte di un gruppo o di un insieme
- La prossimità spaziale tra gli elementi influenza la loro percezione come una singola entità



## Similarità

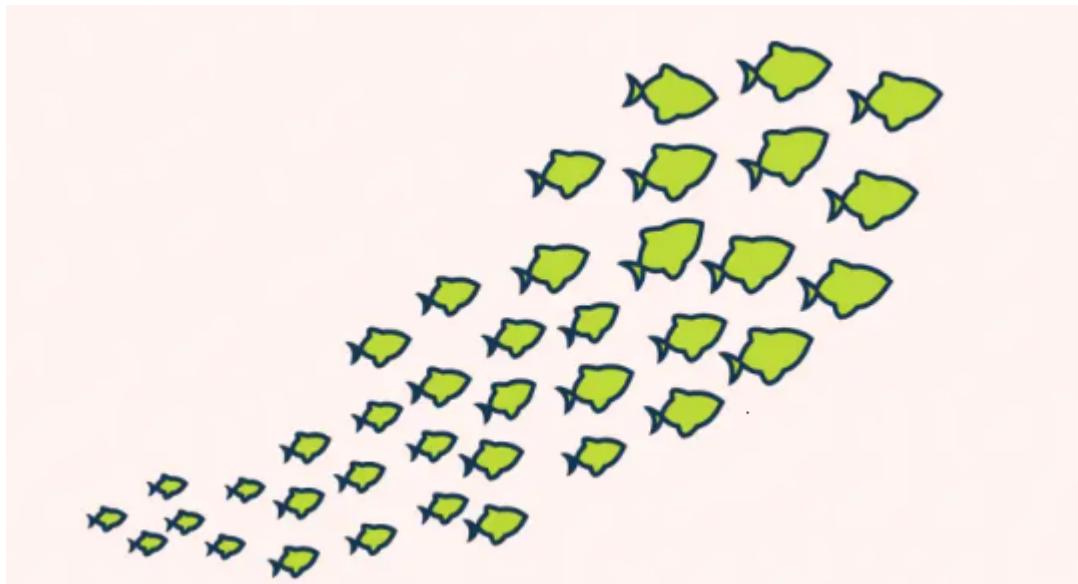
- Principio secondo cui gli oggetti che condividono caratteristiche simili, come forma, colore o dimensione, sono percepiti come parte di un gruppo o di un insieme
- La similitudine tra gli elementi influenza la loro percezione come una singola entità



## Destino comune (Common fate)

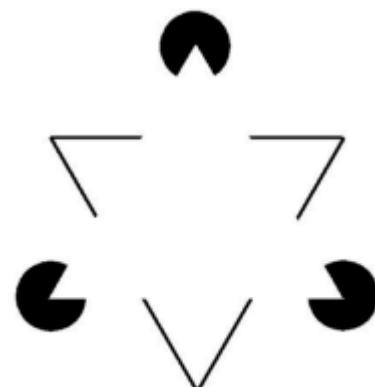
- Principio secondo cui gli oggetti che si muovono nella stessa direzione o seguono un modello di movimento comune sono percepiti come parte di un gruppo o di un insieme

- Il destino comune dei movimenti degli elementi influisce sulla loro percezione come una singola entità



### Legge della chiusura

- Principio secondo cui il cervello tende a completare le figure o le forme mancanti per creare una figura chiara e definita
- Anche se le informazioni sono incomplete o interrotte, il cervello riempie le lacune per percepire un oggetto completo



### Figura e sfondo (figure-ground)

- Principio secondo cui il cervello organizza le informazioni visive in una figura distintiva rispetto a un background

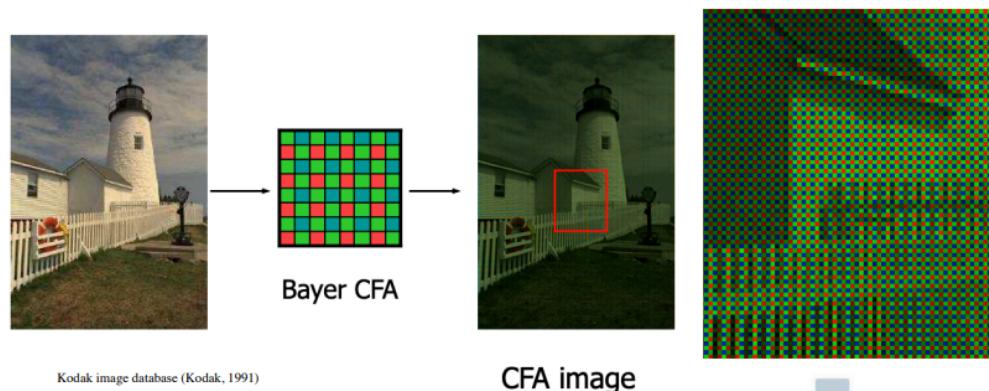
- La figura è l'oggetto principale di interesse, mentre lo sfondo è l'area circostante che fornisce il contesto

## Sensori (pdf 5)

### Filtri

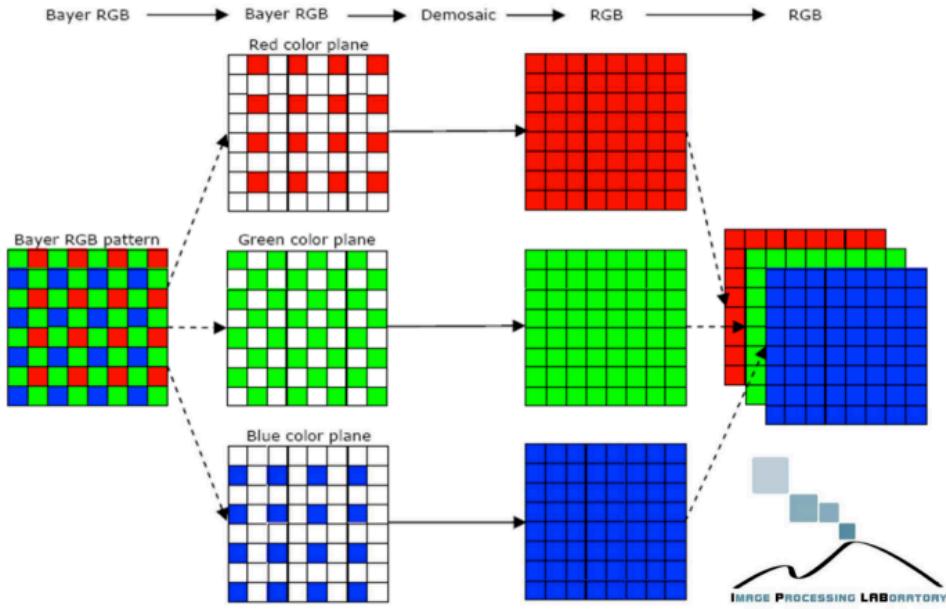
#### Color Filter Array (CFA)

- Matrice di filtri colorati, disposti secondo una configurazione a mosaico, che viene posizionata davanti al sensore dell'immagine.
- I filtri colorati più comuni utilizzati nel CFA sono rosso (R), verde (G) e blu (B), che rappresentano i tre canali primari di colore.
- Ogni sensore dell'immagine cattura solo una parte dell'informazione sul colore a causa della presenza del CFA.



### Demosaicing

- Processo di ricostruzione delle informazioni sul colore mancanti per ottenere una rappresentazione a colori completa dell'immagine.
- Utilizzando l'informazione parziale acquisita da ciascun sensore dell'immagine, l'algoritmo di demosaicing interpola i valori dei pixel mancanti per produrre una rappresentazione completa dell'immagine a colori.
- Esistono diversi algoritmi di demosaicing, come l'interpolazione bilineare, l'interpolazione direzionale e l'interpolazione adattiva, che cercano di bilanciare la nitidezza dell'immagine e la precisione del colore.



## Effetto Zipper

- Artefatto visivo che può verificarsi nelle immagini catturate utilizzando sensori con CFA.
- Appare come una serie di linee verticali o orizzontali sottili e colorate, causate dalla differenza di posizionamento dei filtri colorati nella matrice del CFA.
- Può essere ridotto utilizzando algoritmi di demosaicing avanzati e tecniche di post-processing.

## Sensori Foveon vs Sensori Bayer

### Sensori Foveon

- Utilizzano una tecnologia di acquisizione dell'immagine che sfrutta il principio di assorbimento differenziale della luce da parte dei fotodiodi in funzione della loro profondità all'interno del sensore.
- I fotodiodi sono organizzati in modo che ognuno di essi catturi l'informazione completa sui tre canali di colore (R, G e B).
- Poiché ogni fotodiodo cattura l'informazione completa sui tre canali di colore, i sensori Foveon tendono a fornire una maggiore risoluzione del colore rispetto ai sensori Bayer.
- Tendono ad avere una maggiore sensibilità alla luce rispetto ai sensori Bayer, grazie alla loro capacità di catturare l'informazione completa sui tre canali di colore.

- Possono essere più suscettibili al rumore dell'immagine rispetto ai sensori Bayer, a causa della complessità della tecnologia utilizzata.

## Sensori Bayer

- Sono basati sulla tecnologia di acquisizione dell'immagine a matrice di filtri colorati, in cui ogni fotodiode cattura solo un canale di colore specifico.
- I fotodiodi sono organizzati in una matrice secondo una configurazione a mosaico, con filtri colorati (R, G, B) posizionati in modo alternato.
- Poiché ogni fotodiode cattura solo un canale di colore, i sensori Bayer possono presentare una minore risoluzione del colore rispetto ai sensori Foveon.
- Possono avere una sensibilità alla luce leggermente inferiore rispetto ai sensori Foveon, poiché l'informazione sul colore viene acquisita in modo indiretto attraverso l'interpolazione dei valori dei pixel.
- Tendono ad avere una migliore gestione del rumore dell'immagine rispetto ai sensori Foveon, grazie alla loro struttura più semplice.

# Sensori

## Sensori CMOS

- Basati sulla tecnologia dei transistor MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) complementari, che consente di integrare circuiti di lettura elettronica direttamente sul chip del sensore.
- Ogni pixel dei sensori CMOS contiene un fotodiode che converte la luce in una carica elettrica. Questa carica viene quindi convertita in una tensione attraverso un transistor di conversione elettronica, permettendo la lettura del valore del pixel.
- Caratteristiche principali:
  - Consumo energetico inferiore rispetto ai sensori CCD, grazie alla possibilità di integrare circuiti di lettura direttamente sul chip del sensore.
  - Raggiungono velocità di lettura più elevate rispetto ai sensori CCD, grazie alla possibilità di leggere ciascun pixel in modo indipendente.
  - Tendono ad avere un rumore dell'immagine leggermente superiore rispetto ai sensori CCD, a causa della presenza di transistor di conversione elettronica sul chip del sensore.
  - Meno sensibili alla luce rispetto ai sensori CCD, a causa della presenza di transistor di conversione elettronica che possono attenuare il segnale.
  - Maggiore integrabilità con altri circuiti elettronici, consentendo soluzioni di sistema più compatte e complesse.

## Front-Illuminated CMOS

Tipologia di sensori in cui i fotodiodi sono posizionati nella parte anteriore del sensore. Consentono una maggiore efficienza di raccolta della luce, in quanto la luce incidente può raggiungere direttamente i fotodiodi senza ostacoli. Sono comunemente utilizzati nelle fotocamere digitali e offrono una buona sensibilità alla luce. Tuttavia, a causa della presenza di strati elettroottici e circuiti di lettura tra i fotodiodi e la superficie anteriore del sensore, possono verificarsi fenomeni di riflessione interna che riducono la quantità di luce utile raccolta.

## Back-Illuminated CMOS

Tipologia di sensori dell'immagine in cui i fotodiodi sono posizionati nella parte posteriore del sensore. La luce incidente di raggiunge direttamente i fotodiodi senza attraversare strati elettroottici o circuiti di lettura aggiuntivi, dunque si riduce la possibilità di riflessioni interne che possono causare dispersione della luce e riduzione della qualità dell'immagine. Offrono vantaggi significativi in termini di sensibilità alla luce e riduzione del rumore pertanto sono particolarmente vantaggiosi in situazioni di scarsa illuminazione o quando è necessario catturare immagini ad alta sensibilità. Vengono utilizzati in applicazioni fotografiche professionali, come fotografia astronomica o fotografia a bassa luminosità.

## Sensori CCD

- Basati sulla tecnologia dei dispositivi a carica accoppiata, in cui la carica accumulata viene spostata attraverso una serie di condensatori accoppiati.
- Ogni pixel dei sensori CCD contiene un fotodiodo che converte la luce in una carica elettrica. Questa carica viene successivamente spostata attraverso i condensatori accoppiati fino a raggiungere una sezione di lettura esterna, dove viene convertita in una tensione per la lettura del valore del pixel.
- Caratteristiche principali:
  - Consumo energetico più elevato rispetto ai sensori CMOS, a causa della necessità di spostare la carica attraverso i condensatori accoppiati.
  - Più lenti rispetto ai sensori CMOS, poiché la carica deve essere spostata attraverso i condensatori accoppiati prima di essere letta.
  - Tendono ad avere un rumore dell'immagine inferiore rispetto ai sensori CMOS, grazie alla struttura interna dei condensatori accoppiati che riduce il rumore termico.
  - Più sensibili alla luce rispetto ai sensori CMOS, grazie alla struttura interna dei condensatori accoppiati che consente di accumulare una maggiore quantità di carica.
  - Maggiore affidabilità nel mantenere una risposta uniforme e stabile nel tempo.

## Dark current nei CCD

La dark current è una corrente elettrica che fluisce attraverso i fotodiodi del sensore CCD anche in assenza di luce incidente. È dovuta alla generazione termica di cariche all'interno dei fotodiodi stessi. Il rumore causato dalla dark current può essere considerato come un segnale di fondo indesiderato che può degradare l'immagine catturata. Durante l'acquisizione dell'immagine, i fotodiodi raccolgono le cariche generate dalla luce incidente e le immagazzinano in una struttura di accumulo a potenziale variabile chiamata potenziale di accumulo. Successivamente, queste cariche vengono trasferite da un fotodiode all'altro all'interno del sensore CCD utilizzando una serie di elettrodi di trasferimento e una tensione di clock.

Tuttavia, anche in assenza di luce, i fotodiodi generano cariche termiche dovute all'agitazione termica delle particelle. Queste cariche termiche si accumulano nel potenziale di accumulo insieme alle cariche generate dalla luce incidente, contribuendo alla dark current.

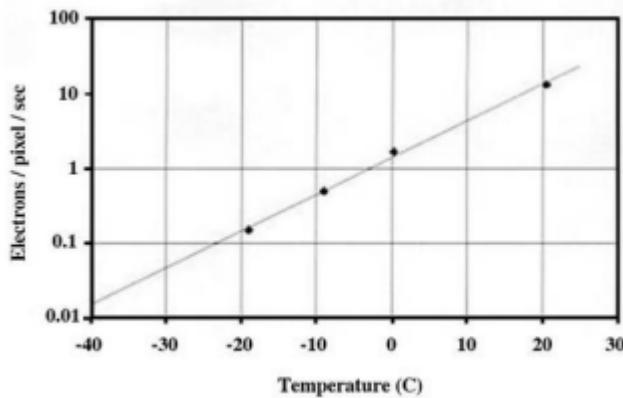
Viene modellata matematicamente utilizzando l'equazione di Shockley-Read-Hall (SRH), che descrive il processo di generazione di cariche nel fotodiodo.

$$I_D = q \times A \times n_i^2 \times \frac{n_i p_0 + p_0 n_0}{n_0 + n_i + p_0 + p_1} \times e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

Dove:

- $I_D$  è la dark current
- $q$  è la carica elementare
- $A$  è l'area del fotodiodo
- $n_i$  è la concentrazione intrinseca di portatori di carica
- $n_0$  e  $n_1$  sono le concentrazioni di portatori di carica per gli stati intrappolati nello stato fondamentale e nello stato eccitato, rispettivamente
- $p_0$  e  $p_1$  sono le concentrazioni di portatori di carica per gli stati intrappolati p nello stato fondamentale e nello stato eccitato, rispettivamente
- $E_g$  è la larghezza della banda proibita del materiale del fotodiodo
- $k$  è la costante di Boltzmann
- $T$  è la temperatura assoluta

Questa equazione mostra come la dark current dipenda dalla temperatura, dalle proprietà del materiale del fotodiodo e dalle concentrazioni di portatori di carica intrappolati. Dimezza ogni  $6^\circ\text{C}$ .



## DPAF

Il DPAF, o autofocus a doppio pixel, è una tecnologia utilizzata nei sensori CMOS per migliorare le prestazioni dell'autofocus nelle fotocamere digitali. Ciascun pixel è diviso in due fotodiodi indipendenti, consentendo la misurazione della fase del segnale proveniente da diverse parti dell'obiettivo. Questa tecnologia permette una misurazione precisa della distanza di messa a fuoco, consentendo un'operazione di autofocus più rapida ed accurata. Sono anche in grado di rilevare la direzione e la distanza del movimento dell'oggetto, consentendo una tracciatura del fuoco più efficiente durante il riprendere di oggetti in movimento. Chiaramente funziona soltanto con le lunghezze d'onda a cui il sistema è sensibile, ignorando totalmente le altre.

## Rumore e problemi correlati (pdf 6-7)

### Dark Current

Il dark current, o corrente oscura, è una corrente elettrica che fluisce attraverso un sensore dell'immagine anche quando non è esposto alla luce. È causato dalla generazione termica di cariche all'interno del sensore. La presenza del dark current può introdurre un'immagine di fondo indesiderata nelle immagini acquisite, specialmente durante esposizioni lunghe. La quantità di dark current dipende dalla temperatura del sensore e può essere ridotta tramite il raffreddamento del sensore stesso o mediante algoritmi di correzione.

### Thermal Current

Il thermal current, o corrente termica, è una componente della corrente oscura (dark current) che è direttamente proporzionale alla temperatura del sensore. È causato dalla generazione

di cariche termiche all'interno dei fotodiodi del sensore. Aumentando la temperatura del sensore, la corrente termica aumenta, introducendo rumore nell'immagine acquisita. Il raffreddamento del sensore può ridurre l'effetto del thermal current e migliorare la qualità dell'immagine.

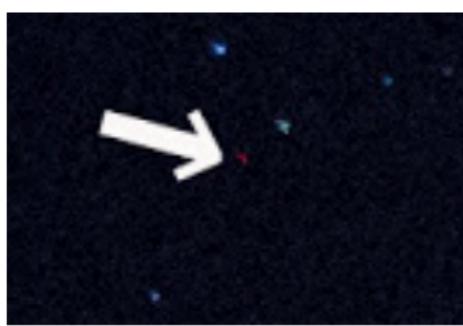
$$Dark\ Noise = \sqrt{(dark\ current) \times (tempo\ di\ integrazione)}$$

## Dark Noise

Il dark noise, o rumore oscuro, è un tipo di rumore presente nelle immagini acquisite a causa della presenza del dark current. È causato dalla variazione casuale del numero di cariche generate termicamente all'interno del sensore. Il dark noise può degradare la qualità dell'immagine, specialmente nelle zone scure o nelle esposizioni lunghe. Ridurre il dark noise può essere ottenuto tramite il raffreddamento del sensore o mediante algoritmi di correzione del rumore.

## Dark Frame

Il dark frame, o frame oscuro, è un'immagine acquisita con lo stesso tempo di esposizione e le stesse condizioni di temperatura della fotografia reale, ma senza la presenza di luce. Viene utilizzato come riferimento per rimuovere il rumore oscuro (dark noise) dalle immagini effettive acquisite. Sottraendo il dark frame dalla fotografia reale, è possibile ridurre l'effetto del dark current e ottenere un'immagine corretta.



Without Dark Frame Subtraction  
Red Dot is Generated From Camera



With Dark Frame Subtraction  
Red Dot removed

## Readout Noise

Il readout noise, o rumore di lettura, è un rumore introdotto durante il processo di lettura del segnale dal sensore. È causato dalle variazioni indesiderate nel circuito di lettura elettronica,

come il rumore termico nei transistor di conversione elettronica. Il readout noise può influire sulla qualità dell'immagine, specialmente nelle aree con basso livello di segnale. Minimizzare il readout noise può essere ottenuto attraverso una progettazione ottimizzata del circuito di lettura elettronica e l'uso di tecniche di raffreddamento.

## Image Stacking

L'image stacking, o sovrapposizione di immagini, è una tecnica utilizzata per migliorare la qualità dell'immagine combinando più immagini dello stesso soggetto. Durante l'acquisizione di più immagini, il rumore casuale presente in ciascuna immagine può variare in modo casuale, ma il segnale desiderato rimane costante. Sovrapponendo e combinando le immagini, il rumore casuale può essere ridotto attraverso una mediazione dei valori dei pixel, migliorando così il rapporto segnale-rumore complessivo dell'immagine finale.

Nel caso di un solo scatto:

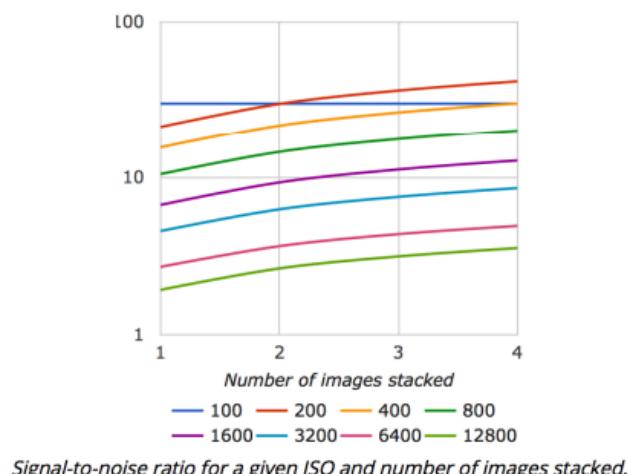
$$SNR = \frac{IQEt}{\sqrt{IQEt + N_d t + N_r^2}}$$

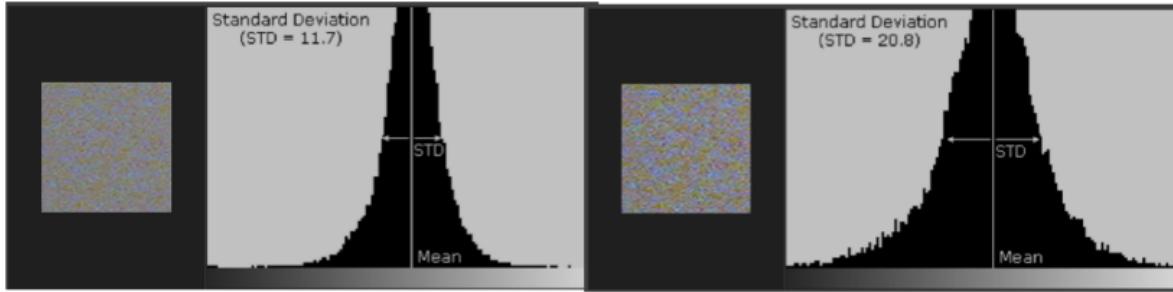
Nel caso di più scatti:

$$SNR = \frac{\frac{IQEt}{F}}{\sqrt{\frac{IQEt}{F} + \frac{N_d t}{F} + N_r^2}} = \frac{IQEt}{\sqrt{IQEt + N_d t + FN_r^2}}$$

ISO	1	2	3	4
100	30.24			
200	21.45	30.14	36.66	41.98
400	15.66	21.86	26.52	30.34
800	10.56	14.66	17.72	20.27
1600	6.71	9.34	11.30	12.89
3200	4.57	6.29	7.55	8.59
6400	2.71	3.67	4.37	4.93
12800	1.93	2.64	3.15	3.56

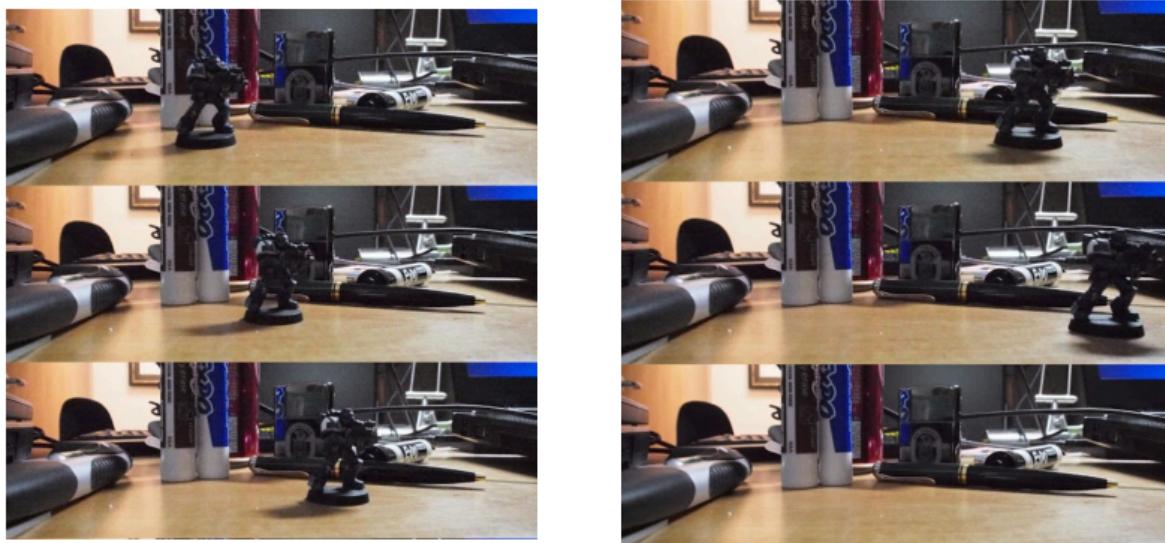
Signal-to-noise ratio for a given ISO and number of images stacked. The first averaged image that has better signal-to-noise ratio than a single photo with one step lower ISO is marked in green.





## Median Stacking

Il median stacking, o sovrapposizione mediana, è una variante della tecnica di sovrapposizioni di immagini. Invece di calcolare la media dei valori dei pixel, viene calcolato il valore mediano per ciascun pixel dalle immagini sovrapposte. Questo approccio può essere efficace per ridurre il rumore causato da outlier o disturbi presenti in alcune delle immagini acquisite. Il median stacking può migliorare la qualità dell'immagine finale, preservando al contempo i dettagli desiderati.



## Dynamic Range e ENOB

Il dynamic range, o gamma dinamica, si riferisce alla capacità di un sensore di catturare e rappresentare una vasta gamma di livelli di luminosità, dal più scuro al più luminoso. È un parametro importante per valutare la capacità di un sensore di registrare dettagli sia nelle zone scure che in quelle luminose di un'immagine. Poiché la conversione da raggio luminoso a segnale digitale avviene sfruttando un ADC, ci sono una serie di considerazioni da fare, in particolar modo riguardo i problemi sulla quantizzazione:

Definiti la potenza del segnale  $P_x$  e la potenza del rumore di quantizzazione  $P_{eq}$  (indico con  $M$  il numero di passi di quantizzazione e con  $Q$  il passo di quantizzazione)

$$P_x = \sigma_x^2 = \frac{x_{FS}^2}{4 \times 2} = \frac{(MQ)^2}{8} = \frac{M^2 Q^2}{8}$$

$$P_{eq} = \sigma_{eq}^2 = \frac{Q^2}{12}$$

Posso procedere dunque a calcolare il rapporto tra segnale e rumore nel caso ideale

$$\begin{aligned} SNR_{dB} &= 10 \log \frac{P_x}{P_{eq}} = 10 \log \frac{\frac{M^2 Q^2}{8}}{\frac{Q^2}{12}} = 10 \log \left( \frac{P_x}{P_{eq}} \right)^2 = \\ &= 10 \log \left( \frac{\frac{MQ}{\sqrt{8}}}{\frac{Q}{\sqrt{12}}} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{\frac{M}{\sqrt{8}}}{\frac{1}{\sqrt{12}}} \right) = 20 \log \left( \frac{\sqrt{3} \times M}{\sqrt{2}} \right) = \\ &= 20 \log(M) + 10 \log \left( \frac{3}{2} \right) = \frac{20}{\log_2(10)} (\log_2 M) + \frac{10}{\log_2(10)} \left( \log_2 \frac{3}{2} \right) = \\ &= 6.02 \times n + 1.76 \end{aligned}$$

Questo, chiaramente, nel caso ideale, ovvero quello in cui abbiamo soltanto errori di "ampiezza" e non anche errori di temporizzazione, in quel caso il numero di bit effettivo (ENOB) diventa minore di quello dichiarato di una certa costante. Questo spiega il fatto che spesso si usano convertitori che hanno più bit di quelli necessari a rappresentare il massimo range del sensore

## Acquisizione delle immagini (pdf 8-9)

### Global Shutter vs Rolling Shutter

#### Global Shutter

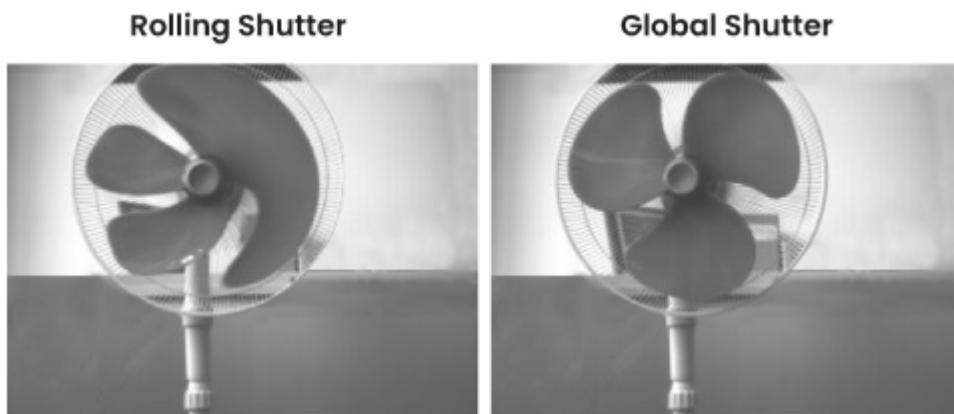
Tecnica di acquisizione dell'immagine in cui tutti i pixel del sensore vengono esposti contemporaneamente per un breve periodo di tempo. Durante l'esposizione, viene catturata un'immagine istantanea di tutta la scena. Questa tecnica è simile a come funzionano le fotocamere tradizionali con pellicola, in cui l'intero fotogramma viene esposto contemporaneamente.

#### Rolling Shutter

Tecnica di acquisizione dell'immagine utilizzata in molti dispositivi digitali, come

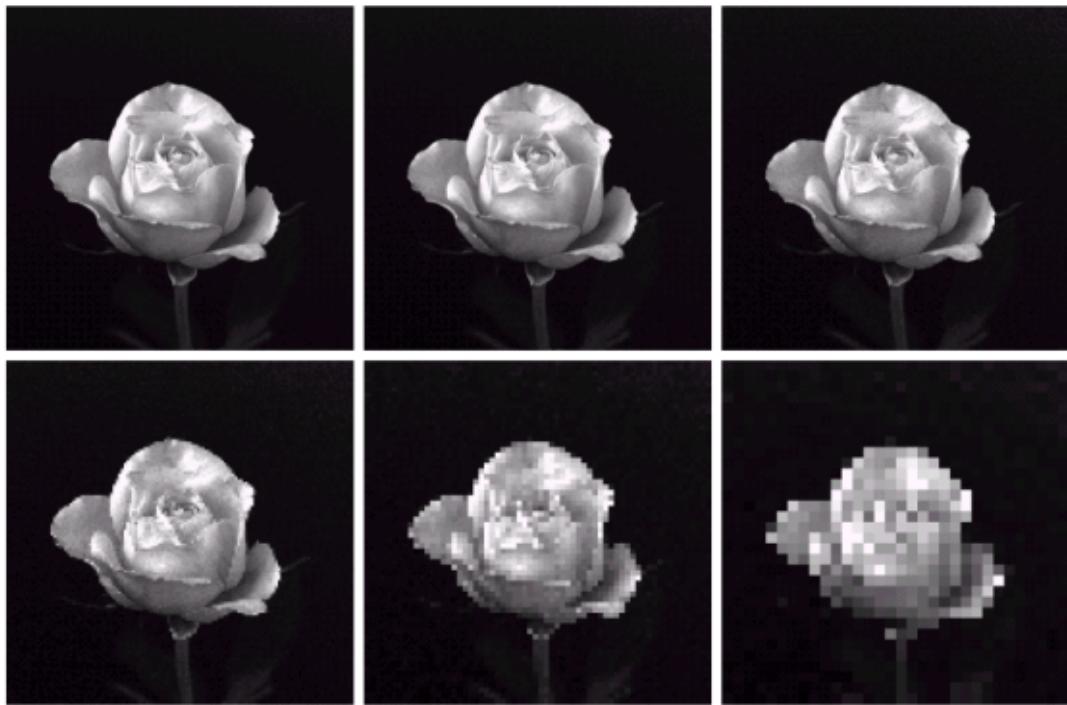
telefoni cellulari e videocamere digitali. Invece di esporre tutti i pixel contemporaneamente, il rolling shutter esegue l'esposizione linea per linea o blocco per blocco. Ciò significa che l'immagine viene acquisita progressivamente, iniziando dall'alto e procedendo verso il basso o da sinistra a destra.

La differenza chiave tra global shutter e rolling shutter risiede nel modo in cui l'immagine viene catturata temporalmente. Il rolling shutter può introdurre un tipo di rumore noto come artefatto di rolling shutter. A causa della natura sequenziale dell'acquisizione, oggetti in movimento o rapidi cambiamenti nella scena possono apparire distorti o deformi nell'immagine. Questo è dovuto al fatto che l'acquisizione di ciascuna linea o blocco avviene in tempi leggermente diversi, introducendo una discrepanza temporale che può causare distorsioni.



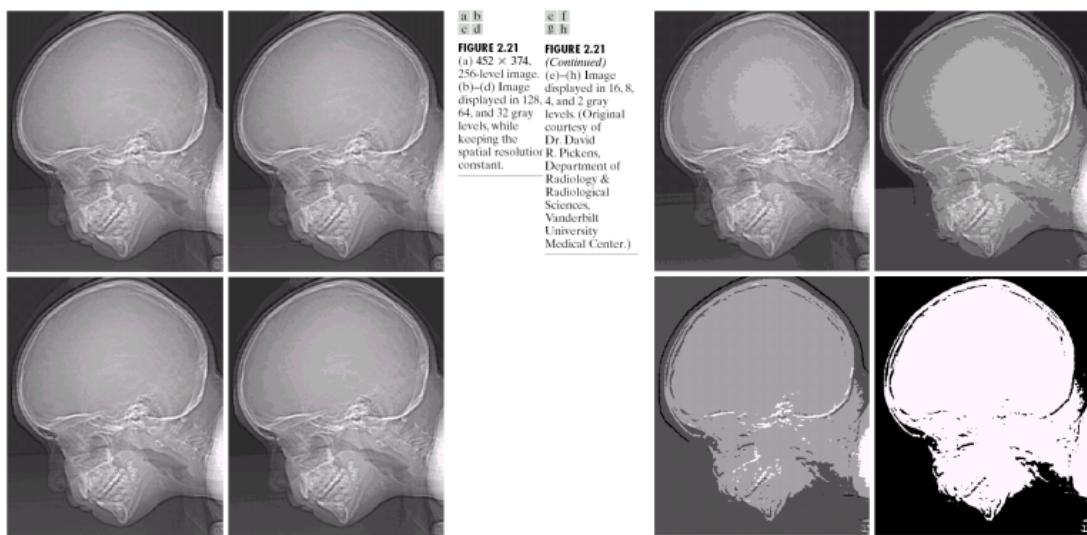
## Risoluzione Spaziale

Capacità di un sistema di acquisizione dell'immagine di distinguere dettagli fini o strutture sottili presenti nella scena. Misurata in pixel per unità di lunghezza (ad esempio, pixel per pollice o pixel per metro). Una maggiore risoluzione spaziale corrisponde a una capacità maggiore di distinguere dettagli fini.



## Livello di Grigio

Quantità di luminosità o intensità di un dato pixel nell'immagine. espresso come un valore numerico in scala di grigi, dove 0 rappresenta il nero e il valore massimo rappresenta il bianco. Il numero di livelli di grigio possibili dipende dalla profondità di bit dell'immagine.

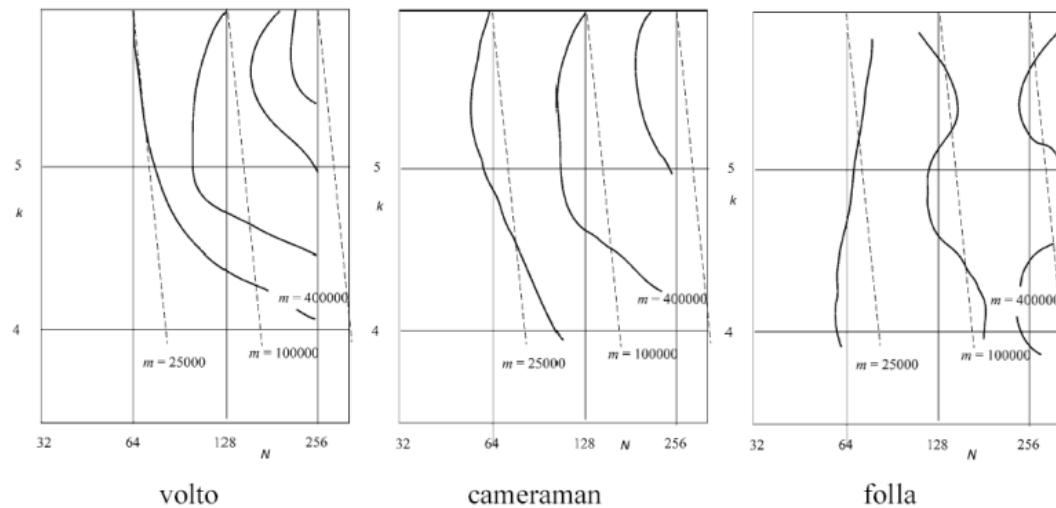


## Quantizzazione

Processo di mappatura delle intensità dell'immagine in un numero discreto di livelli di grigio. Ad esempio, in un'immagine 8-bit, l'intervallo di intensità viene mappato in 256 livelli di grigio possibili. La quantizzazione può introdurre un certo livello di rumore nell'immagine a causa della perdita di informazioni dettagliate.

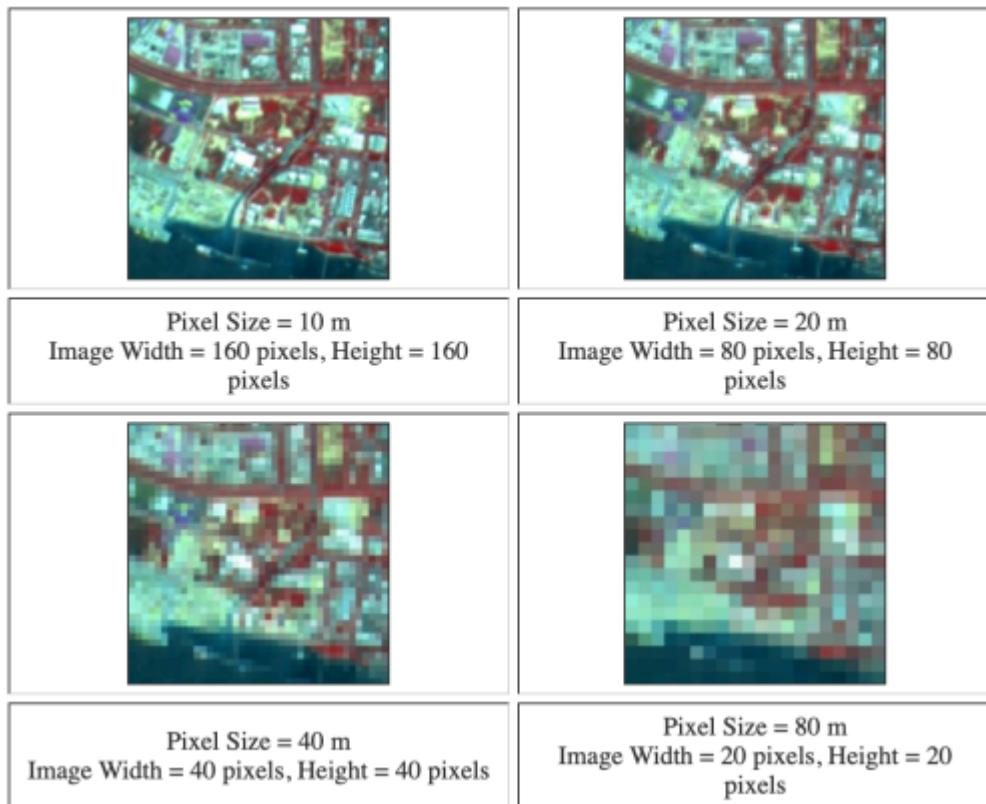
## Curve di Isopreference

Sono utilizzate per rappresentare la sensibilità del sistema visivo umano a diverse intensità luminose. Descrivono come l'occhio umano percepirà le differenze di luminosità in base a una scala di grigi e sono utilizzate per definire le trasformazioni di gamma durante la rappresentazione delle immagini digitali.



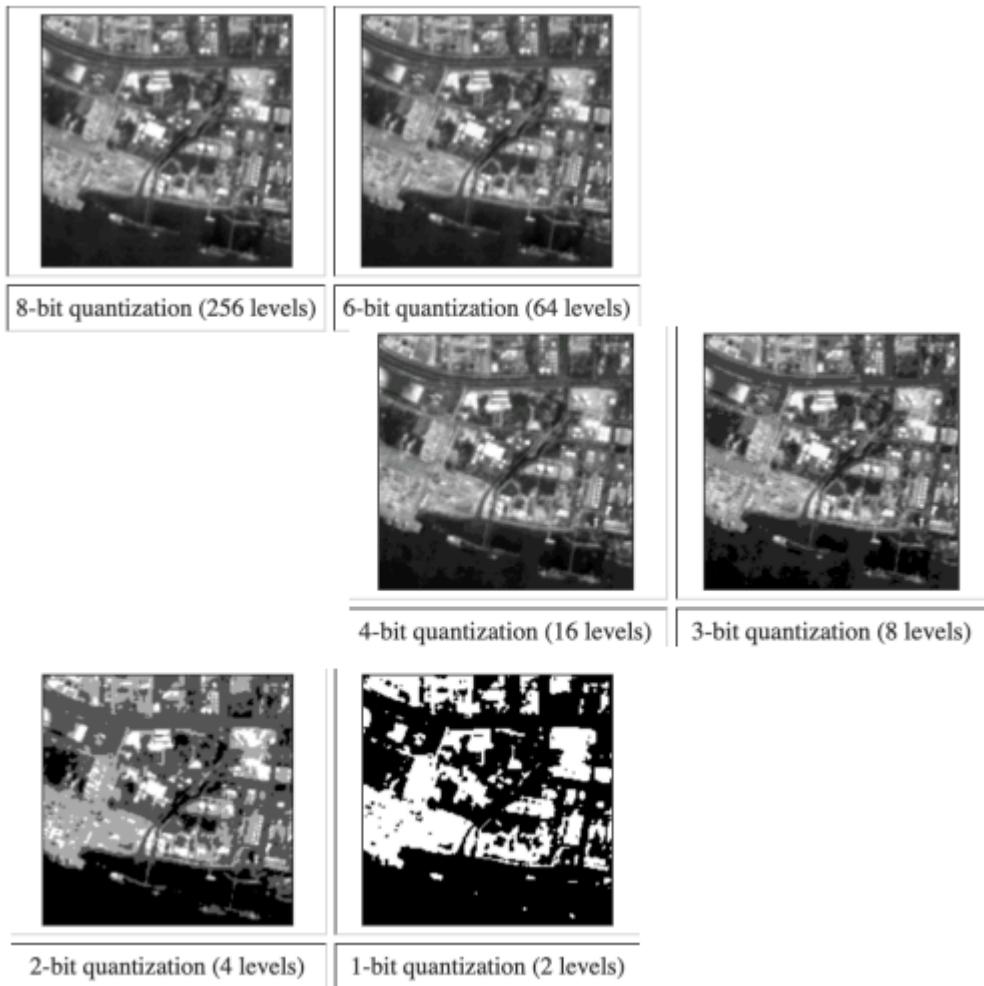
## Dimensione del Pixel e Risoluzione dell'Immagine

La dimensione del pixel si riferisce alle dimensioni fisiche di ciascun singolo elemento fotosensibile nel sensore dell'immagine. Viene misurata in unità di lunghezza, come micron o millimetri. La risoluzione dell'immagine, invece, è una misura del numero totale di pixel presenti nell'immagine. La risoluzione dell'immagine dipende dalla dimensione del pixel e dalle dimensioni fisiche dell'area del sensore. È spesso espressa come il numero di pixel in orizzontale per il numero di pixel in verticale (ad esempio, 1920x1080).



## Risoluzione Radiometrica

Numero di livelli di intensità che possono essere rappresentati in un'immagine digitale. Viene determinata dalla profondità di bit dell'immagine, che indica il numero di bit utilizzati per rappresentare l'intensità di ciascun pixel. Ad esempio, un'immagine 8-bit può rappresentare 256 livelli di grigio, mentre un'immagine 12-bit può rappresentarne 4096.



## Rappresentazione delle Immagini Digitali

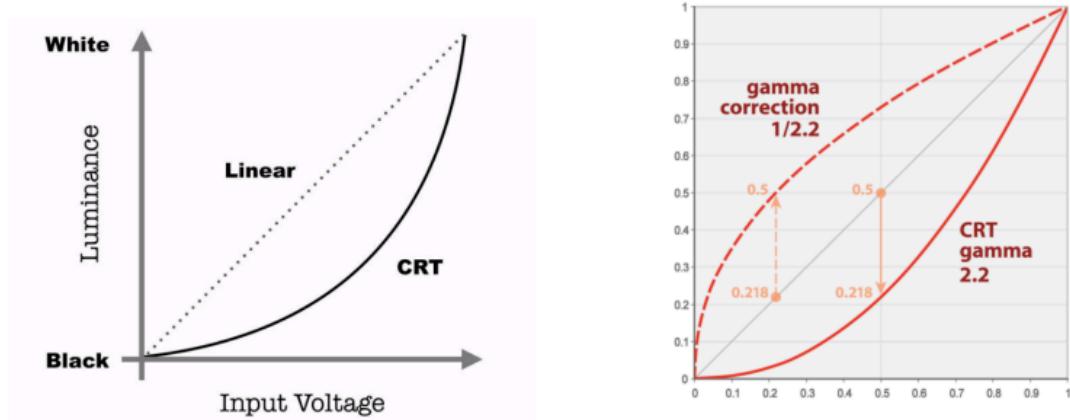
Le immagini digitali sono rappresentate come matrici di pixel, in cui ciascun pixel contiene informazioni sull'intensità luminosa o sul colore. Nelle immagini in scala di grigi, ogni pixel è rappresentato da un singolo valore di intensità. Nelle immagini a colori, ogni pixel può essere rappresentato da tre componenti di colore (ad esempio, rosso, verde e blu) o da altri spazi di colore come l'SRGB o il CMYK.

### Intensità

Quantità di luce o energia presente in un dato punto dell'immagine. È spesso rappresentata come un valore numerico che indica la luminosità o l'oscurità di un pixel.

## Correzione Gamma

Operazione di elaborazione delle immagini che regola la relazione tra l'intensità luminosa dell'immagine acquisita e quella visualizzata sullo schermo o su un dispositivo di output. Viene utilizzata per adattare l'immagine al sistema visivo umano e compensare le non-linearità nella percezione umana dell'intensità luminosa.

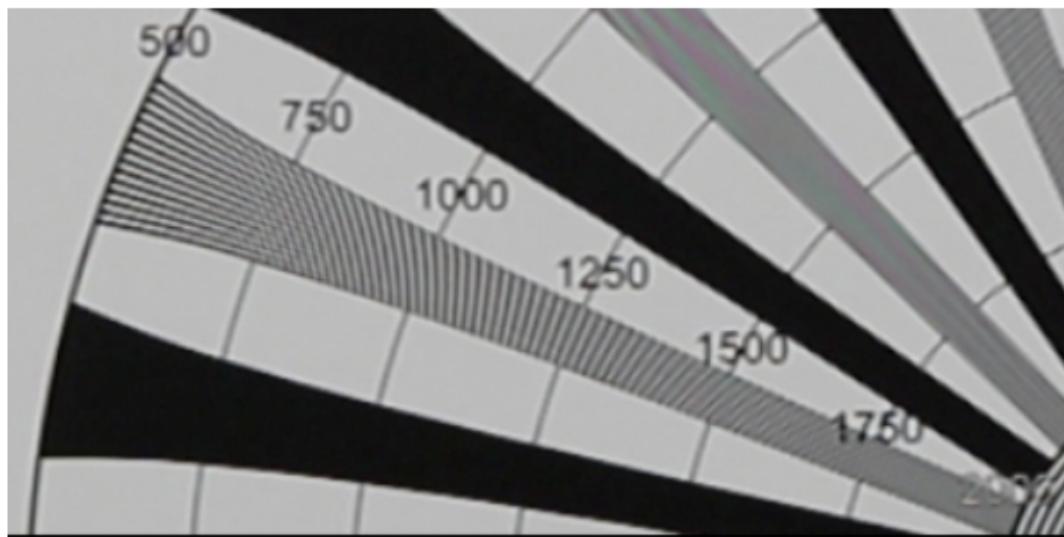


## Aliasing

Fenomeno in cui frequenze superiori alla frequenza di campionamento vengono riprodotte come frequenze più basse, generando artefatti nell'immagine finale. Si verifica quando l'informazione spaziale o temporale dell'immagine viene sottocampionata o campionata in modo non adeguato. Si verifica nello spazio bidimensionale dell'immagine, mentre l'aliasing temporale si verifica nel tempo, ad esempio durante la riproduzione di video.

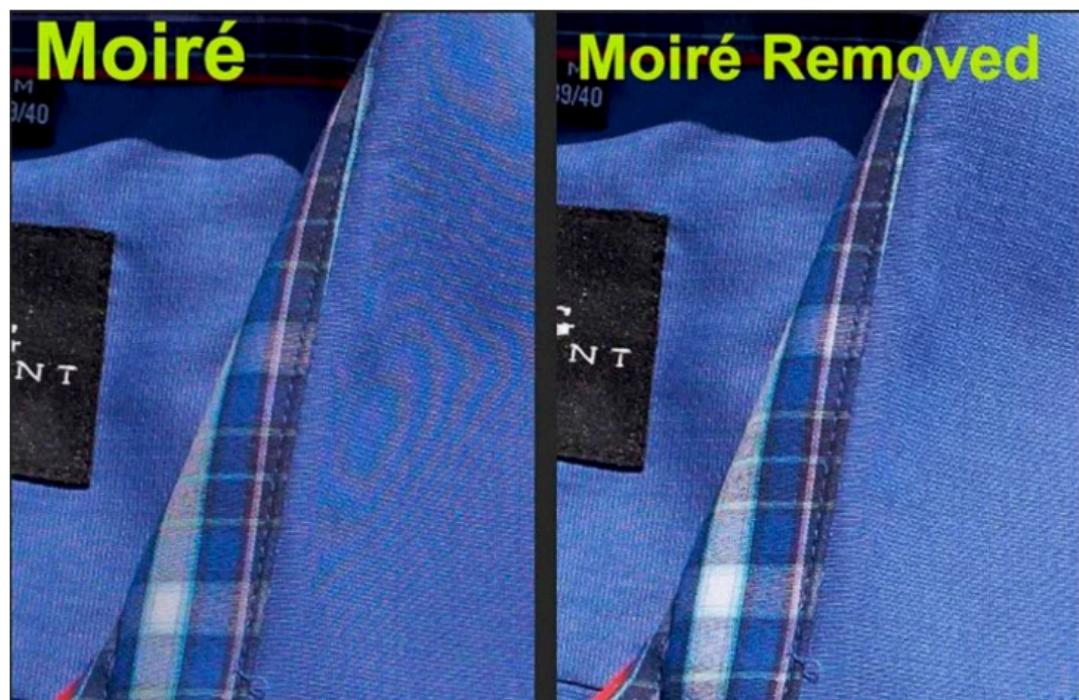
## Aliasing Spaziale

Si verifica quando l'informazione dettagliata dell'immagine viene persa a causa di un sottocampionamento inadeguato. E' particolarmente evidente quando la frequenza dei dettagli fini supera la frequenza di campionamento. Ad esempio, se una griglia sottile viene acquisita con una risoluzione insufficiente, può verificarsi aliasing spaziale e la griglia può apparire distorta o creare artefatti a zigzag.



## Effetto Moiré

Fenomeno indesiderato che si verifica quando le strutture periodiche o le trame presenti nell'immagine si sovrappongono o interferiscono con la griglia dei pixel del dispositivo di visualizzazione o di acquisizione. Ciò può causare la formazione di modelli di interferenza, che possono essere visivamente disturbanti. E' spesso osservato quando si fotografano oggetti con pattern regolari come tessuti o reti metalliche.



## Aliasing Temporale

Si verifica durante la riproduzione di sequenze video o immagini in movimento, quando la frequenza dei fotogrammi o l'intervallo di campionamento temporale non è sufficientemente elevato per catturare i dettagli in rapido movimento. Ciò può portare a effetti indesiderati come lo sfarfallio dell'immagine o la distorsione dei movimenti. Per evitarlo è necessario utilizzare un'adeguata frequenza di fotogrammi e tecniche di interpolazione per riprodurre correttamente le transizioni di movimento. Per esempio, se si osserva un elicottero attraverso la fotocamera di uno smartphone sembrerà che questo stia facendo girare le proprie pale a velocità molto più bassa

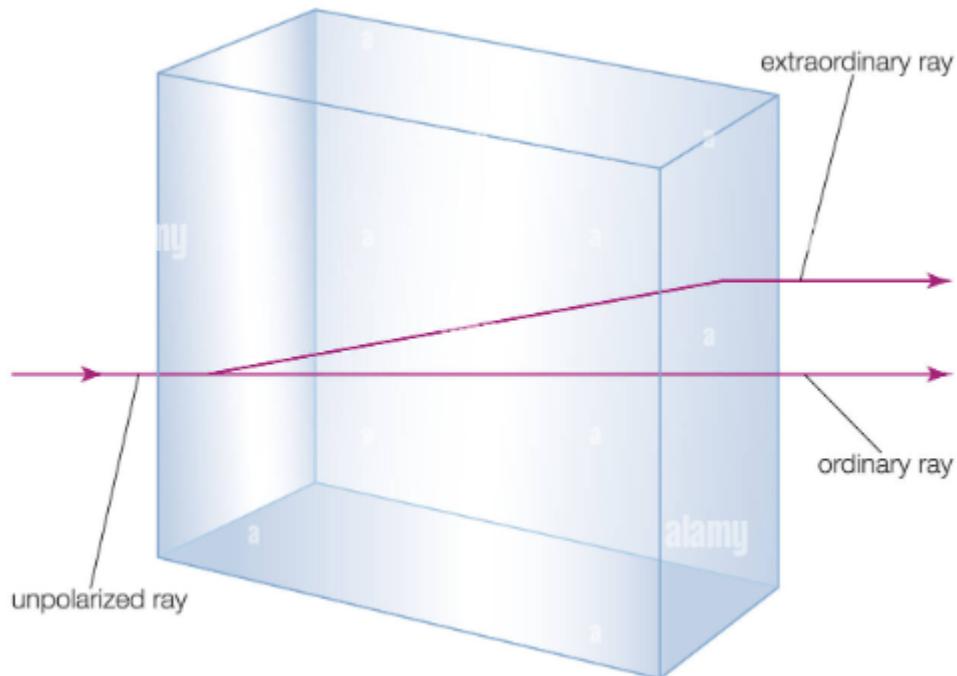


## Antialiasing

Tecnica utilizzata per ridurre o prevenire l'aliasing spaziale. Viene comunemente applicata prima del processo di campionamento per evitare che le frequenze superiori alla frequenza di campionamento vengano riprodotte erroneamente come frequenze più basse. Può coinvolgere l'applicazione di filtri passa-basso o la riduzione della risoluzione dell'immagine prima del campionamento.

## Birefringenza dei Cristalli di Calcite

La birefringenza è un fenomeno ottico in cui un materiale, come il cristallo di calcite, ha un indice di rifrazione diverso per le onde luminose polarizzate in direzioni diverse. Questo fenomeno può essere sfruttato per creare filtri utilizzati per antialiasing



## Filtro OLPF (Optical Low Pass Filter)

Il filtro OLPF è un componente ottico utilizzato in alcune telecamere e sensori per ridurre l'aliasing spaziale. Questo filtro attenua le frequenze elevate prima che l'immagine venga acquisita, limitando l'effetto dell'aliasing e riducendo la comparsa di artefatti, sfruttando la proprietà di diffusione della luce per ottenere un effetto di sfocatura controllata. Nonostante migliori la situazione riducendo l'aliasing, peggiora la risoluzione. Quando si acquista una fotocamera (per i modelli high-end) è possibile scegliere la configurazione con o senza OLPF: tra queste due versioni cambierà soltanto il filtro presente in prossimità del sensore (da una parte si riportano i raggi ad un solo pixel, dall'altra si sdoppiano su più pixel).



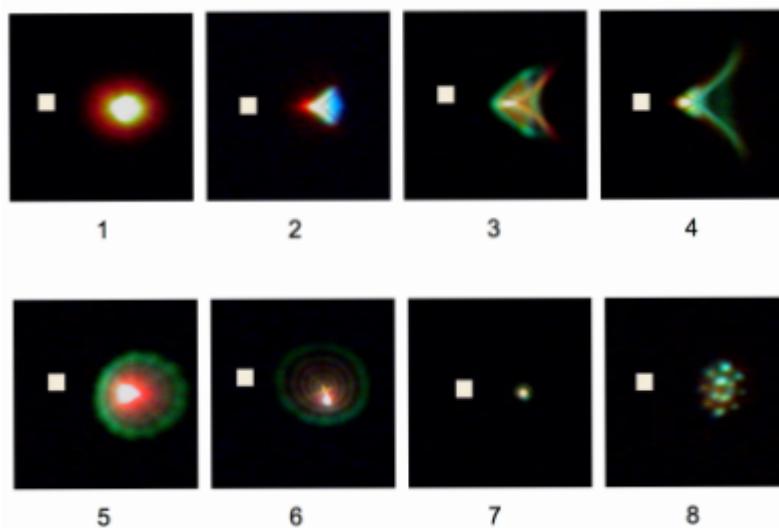
## Risoluzione (pdf 10)

## Risoluzione

Capacità di un sistema ottico o di acquisizione di riprodurre dettagli fini nell'immagine. È determinata da diversi fattori, tra cui la qualità delle lenti, la dimensione dei pixel dell'immagine e la capacità di distinguere dettagli vicini. Una maggiore risoluzione consente di catturare o visualizzare dettagli più fini, mentre una risoluzione più bassa può portare alla perdita di dettagli importanti.

## Diffrazione delle Lenti

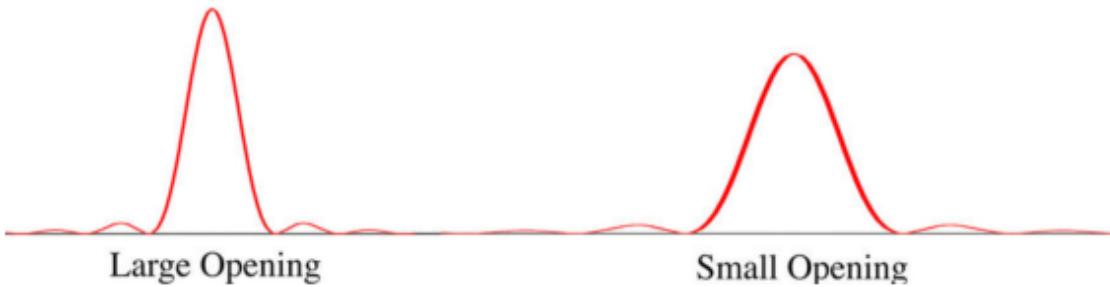
Fenomeno ottico che si verifica quando la luce attraversa un'apertura o passa attraverso un ostacolo, come una lente. Quando la luce si diffonde, si verifica una deviazione dalla propagazione rettilinea e si formano modelli di interferenza. Nelle lenti, la diffrazione può causare la formazione di strutture a forma di anelli intorno ai punti di luce, noti come dischi di Airy.



## Point Spread Function

- Rappresenta la risposta di un sistema ottico a un punto di luce puntiforme.
- Dipende dalle caratteristiche del sistema ottico, come le proprietà delle lenti, l'apertura numerica e la lunghezza d'onda della luce.
- Descrive la distribuzione spaziale dell'intensità luminosa attorno a un punto nell'immagine.
- Descritta matematicamente come una funzione che prende in input le coordinate spaziali dell'immagine e restituisce l'intensità luminosa corrispondente.
- È solitamente gaussiana o a forma di disco (come il disco di Airy).

- La larghezza e la forma influenzano direttamente la risoluzione dell'immagine.
- Se è più stretta indica una migliore risoluzione e la capacità di distinguere dettagli più fini.
- Può presentare effetti di diffrazione e aberrazione, limitando la risoluzione massima del sistema ottico.
- Utilizzata per valutare la risoluzione di un sistema ottico e per applicare correzioni o algoritmi di elaborazione delle immagini.

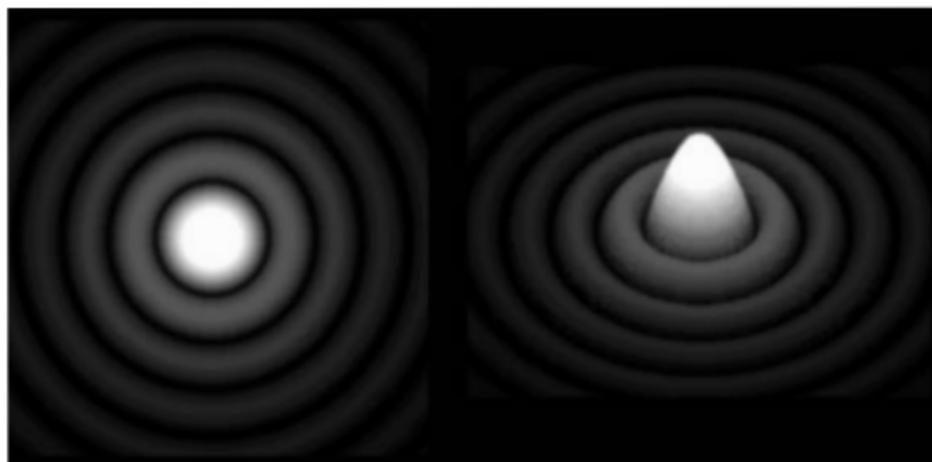


## Disco di Airy e il suo Impatto sulla Risoluzione

Modello di diffrazione che descrive la forma del punto di luce che appare quando la luce passa attraverso una lente o un'apertura circolare. Consiste in un disco centrale luminoso circondato da una serie di anelli concentrici. La dimensione dipende dalla lunghezza d'onda della luce e dal diametro dell'apertura. Può influenzare la risoluzione dell'immagine, poiché i dettagli fini possono essere confusi o sovrapposti a causa del disco di Airy.

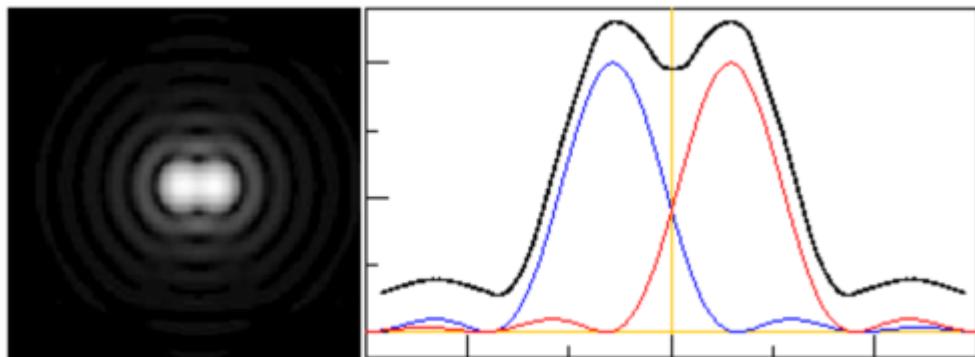
$$I(\theta) = \left( \frac{2J(k \sin \theta)}{k \sin \theta} \right)^2$$

In cui J è una funzione di Bessel e k vale  $2\pi/\lambda$



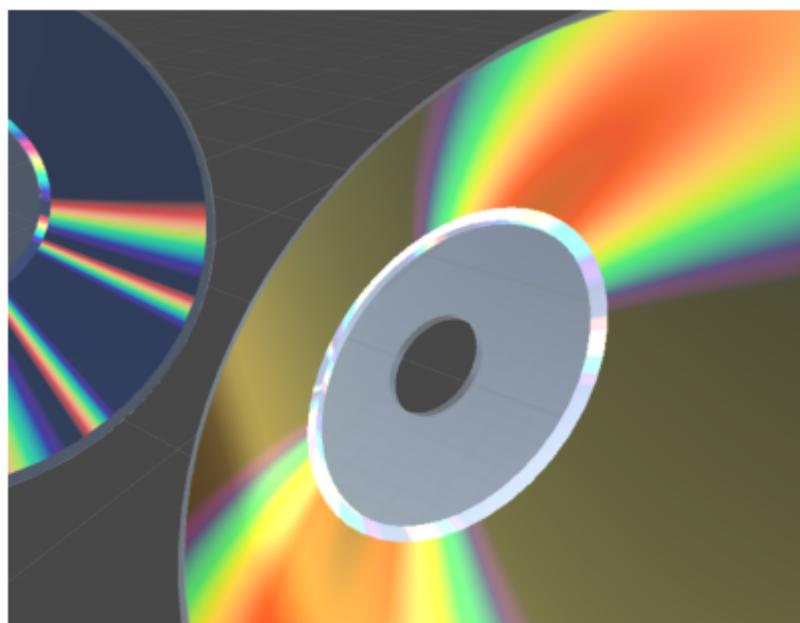
## Criterio di Rayleigh

Regola empirica utilizzata per determinare la risoluzione limite di un sistema ottico per il quale due punti luminosi sono appena risolvibili se la luce proveniente da un punto cade sul primo minimo dell'interferenza del disco di Airy generato dal secondo punto. Questo criterio è basato sulla capacità del sistema ottico di distinguere dettagli vicini senza che si sovrappongano o si confondano.



## Riflessi Iridescenti

Si verificano quando la luce viene riflessa da una superficie e si osserva un effetto di colore arcobaleno. Questo fenomeno è dovuto all'interferenza costruttiva e distruttiva delle onde luminose riferate o riflesse. Si possono riscontrare con materiali che hanno una superficie liscia e trasparente, come le bolle di sapone o gli oli sulla superficie dell'acqua.



## Interferenza a Singola Fessura

Fenomeno in cui la luce che passa attraverso una fessura stretta produce un modello di interferenza. E' caratterizzato da una serie di bande chiare e scure che si formano sulla superficie di proiezione o di rilevamento la cui ampiezza e la forma dipendono dalla larghezza della fessura e dalla lunghezza d'onda della luce

