



# Tecnologie digitali per il suono e l'immagine 2020/21

Vincenzo Lombardo  
Corso di Laurea in DAMS  
Università di Torino

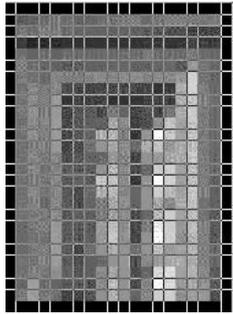
Mutuato in parte da Elaborazione audio e musica  
(Laurea Magistrale di Informatica)

# Le immagini digitali

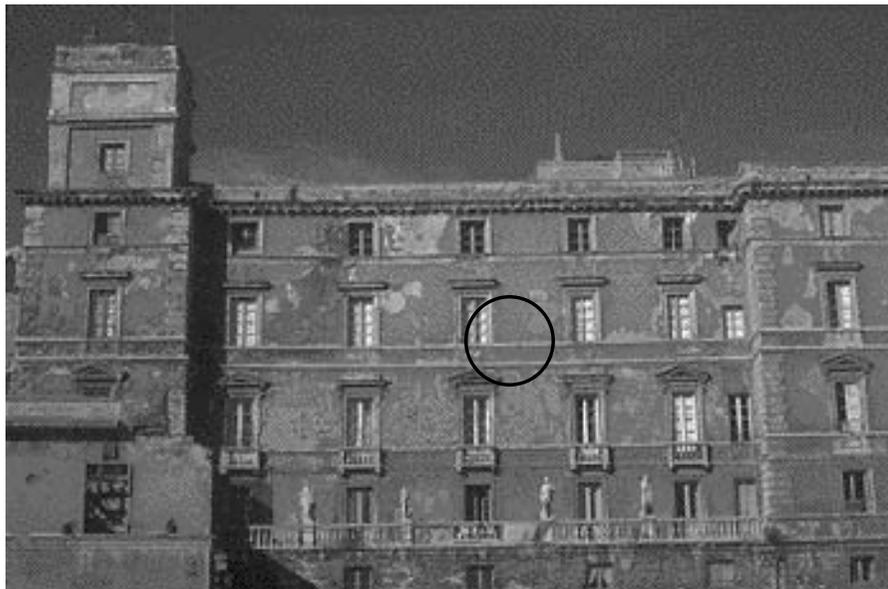
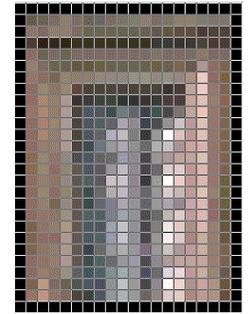
Immagini da (Coriasco et al.), (Gonzales, Woods) e [Wikipedia]

# Campionamento e quantizzazione

# I “punti” dell’immagine



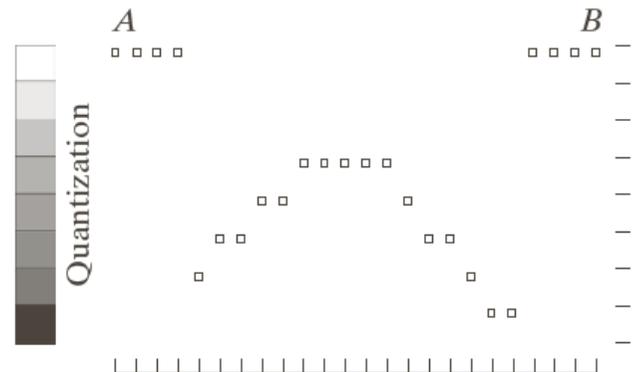
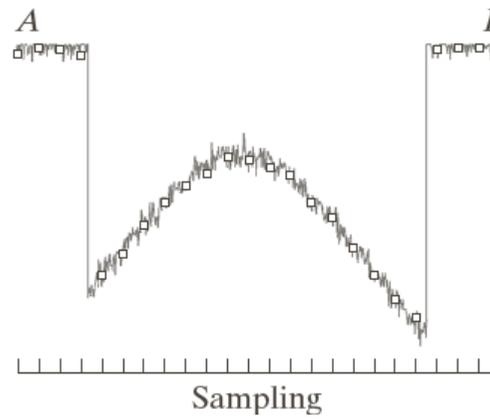
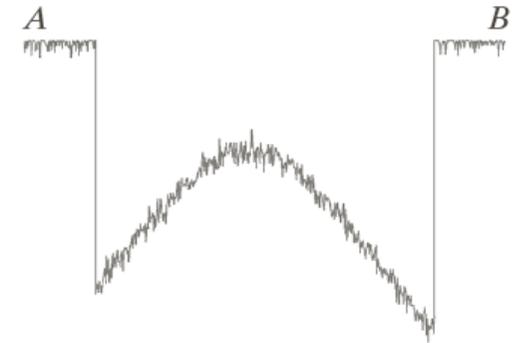
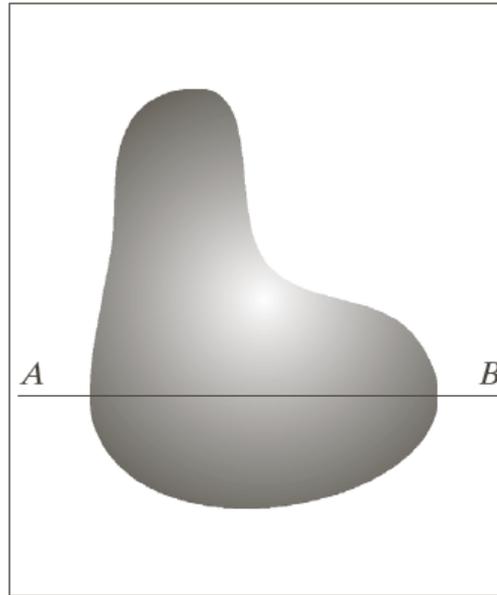
Ogni punto caratterizzato da intensità luminosa e “colore”



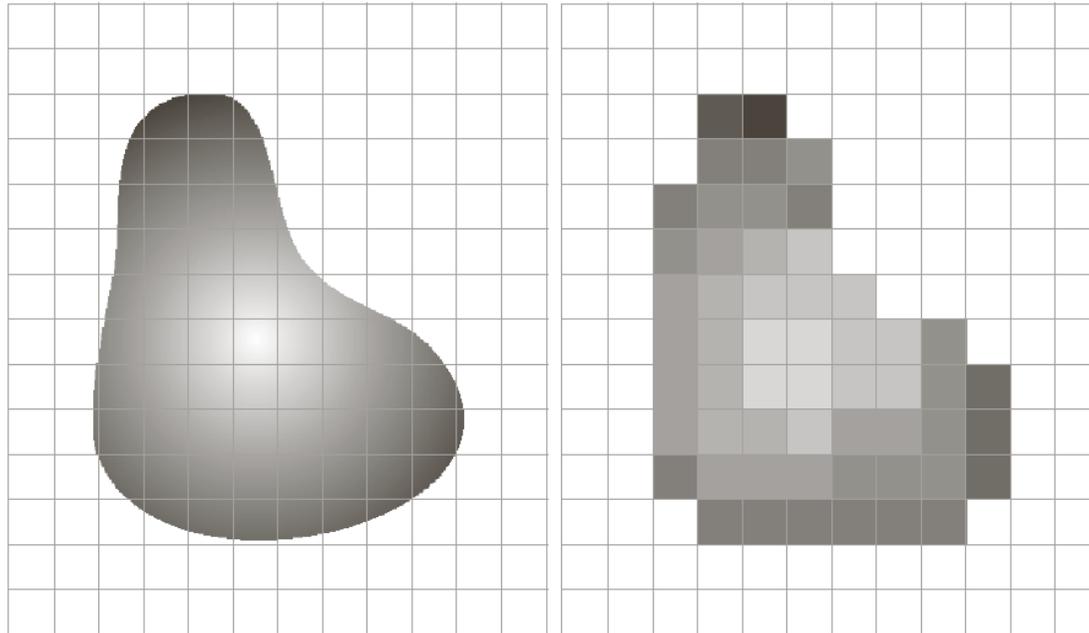
# Digitalizzazione

- Rappresentazione numerica di immagini
- Due fasi
  - Campionamento spaziale
  - Quantizzazione

# Campionamento



# Continua VS campionata/quantizzata

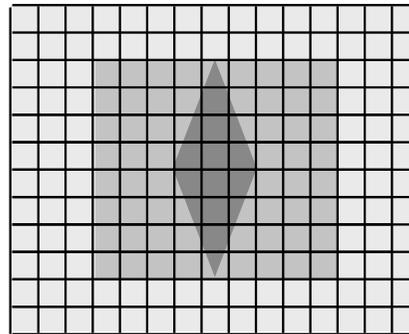


a b

**FIGURE 2.17** (a) Continuous image projected onto a sensor array. (b) Result of image sampling and quantization.

---

# Esempio di digitalizzazione



Campionamento  
15 x 12

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quantizzazione  
3 valori {0,1,2}

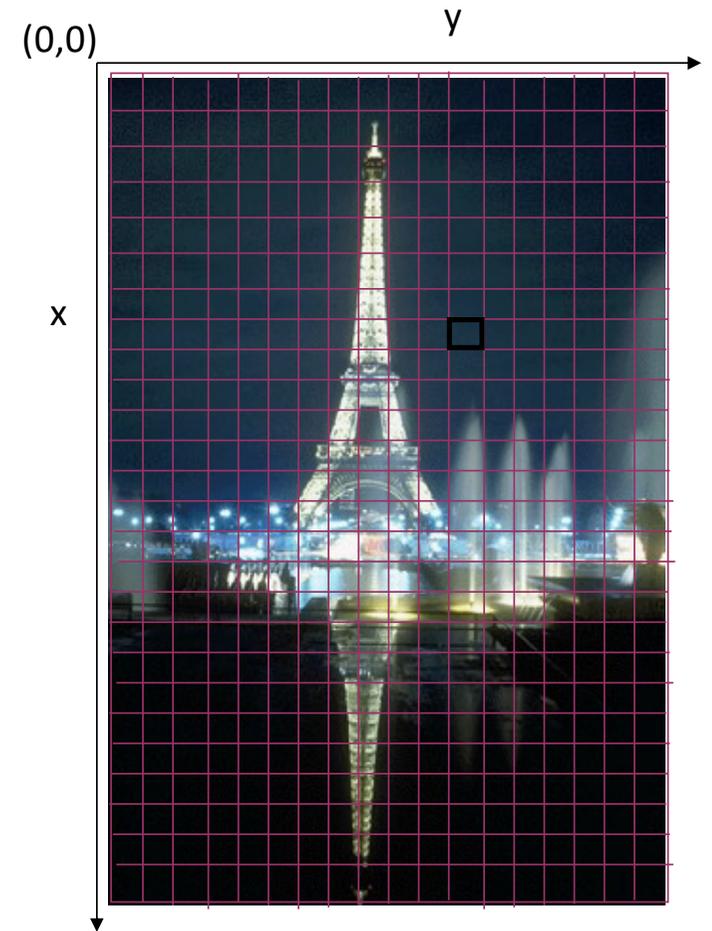


# Campionamento

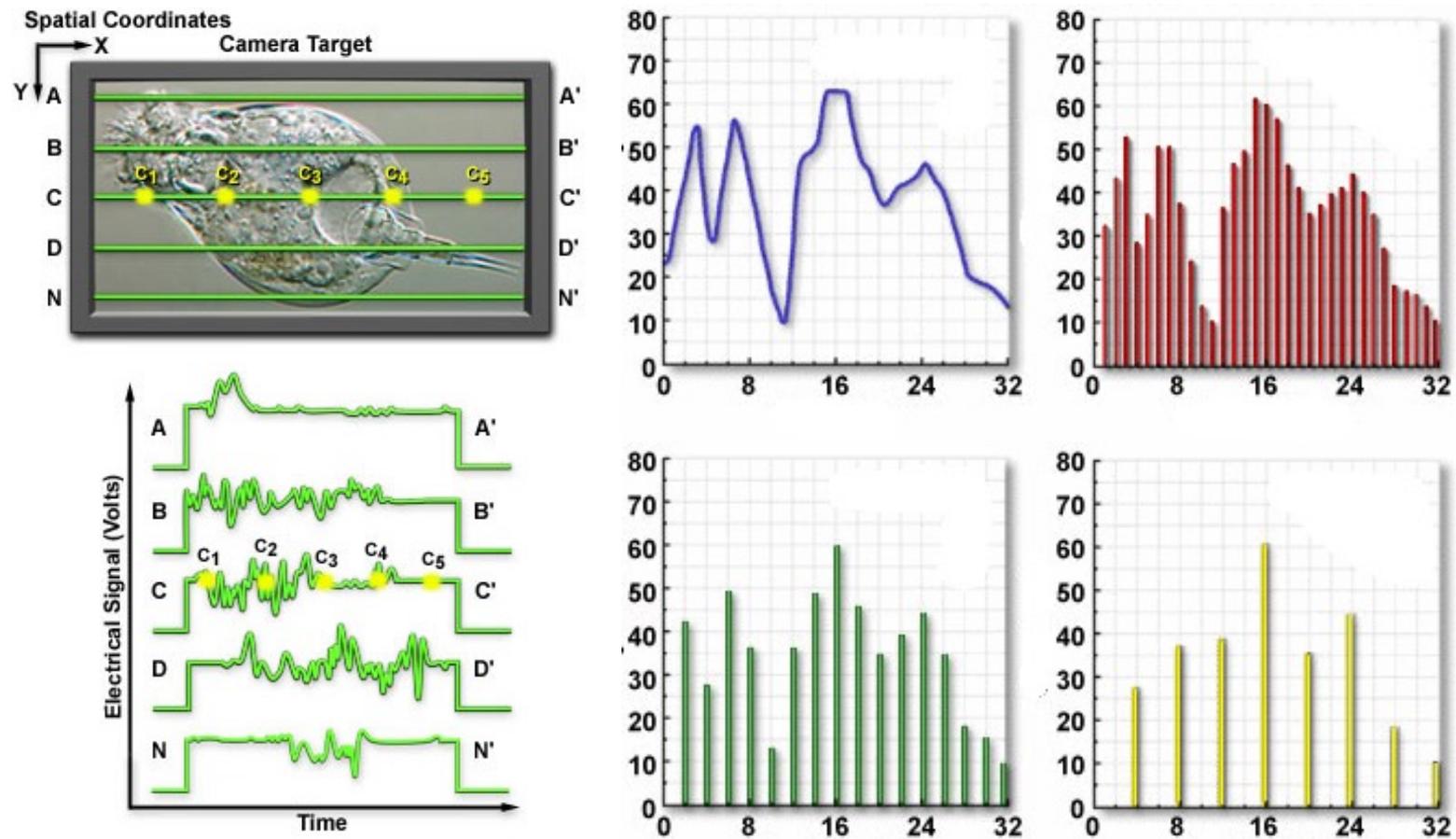
Risoluzione

# Campionamento spaziale

- Suddivisione immagine in rettangoli
- Pixel = picture element (x,y)



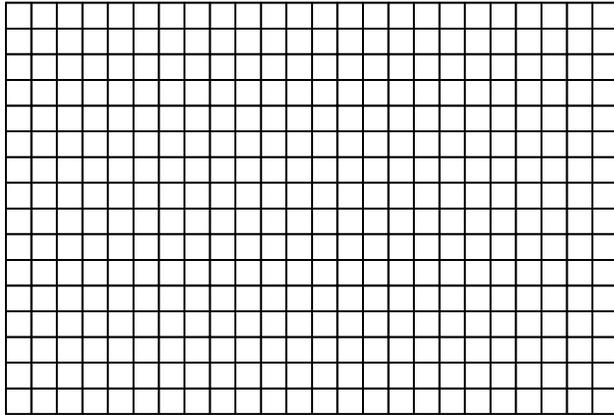
# Campionamento spaziale



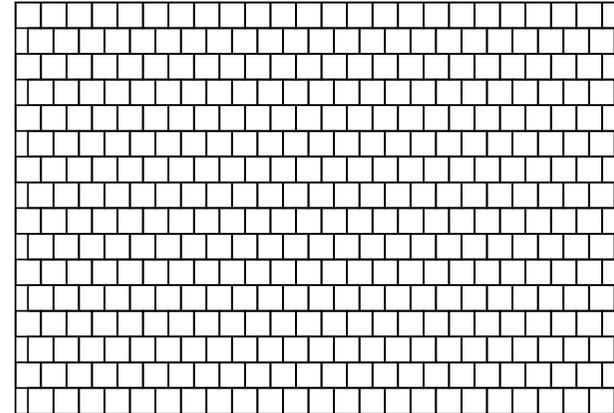
$f(x,y)$  nell'immagine  $N \times M$ : Matrice  $M \times N$

$f(0, 0)$	$f(0, N-1)$		$f(0, N-1)$
$f(1, 0)$	$f(1, 1)$		$f(1, N-1)$
...	...		...
$f(M-1, 0)$	$f(M-1, 1)$	...	$f(M-1, N-1)$

# Punti di campionamento



matrice rettangolare  
righe e colonne di campioni



matrice rettangolare  
righe sfasate di metà periodo  
(copertura più uniforme)

# Aspect ratio di un'immagine



1:1  
CCTV



1,33 : 1 (4:3)  
NTSC (3:2)  
PAL (5:4)

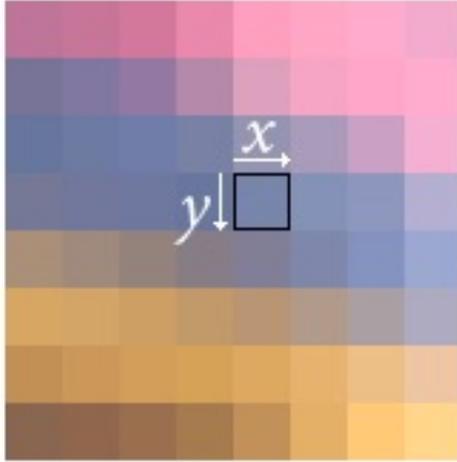


1,78 : 1 (16:9)  
HDTV



2,35 : 1  
Panoramico

# Pixel aspect ratio

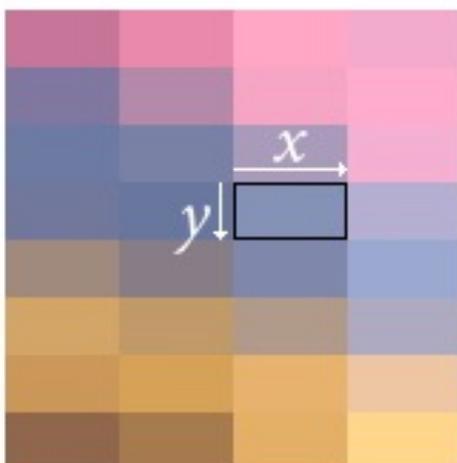


**Pixel Aspect Ratio**

$PAR = x/y = 1:1$

x = pixel width  
y = pixel height

Pixel aspect ratio 1:1



**Pixel Aspect Ratio**

$PAR = x/y = 2:1$

x = pixel width  
y = pixel height

Pixel aspect ratio 2:1

# Pixel aspect ratio



Con differenti PAR, immagini distorte

# PAR per DVD: video anamorfico

DVD PAL standard: PAR 1,066

DVD PAL anamorfico: PAR 1,422

Formato memorizzazione DVD = 720 x 576 pixel (SAR = 1,250 5:4) *Storage aspect ratio*

Widescreen = 16:9 (DAR = 1,778) *Display aspect ratio*

Formato anamorfico con PAR = DAR / SAR = 1,422 (1,778 / 1,250)

Video System	Picture Dimensions	Pixel Aspect Ratio		Pixel Aspect Ratio (Decimal)	
		Rec.601	Digital	Rec.601	Digital
Standard (4:3) PAL (e.g. 576i)	720x576	59:54	12:11	$1.0\overline{925}$	$1.0\overline{9}$
Widescreen (16:9) PAL	704x576	118:81	16:11	$1.4567\dots$	$1.4\overline{5}$
	352x288				
Standard (4:3) NTSC (e.g. 480i)	720x480	10:11		$0.9\overline{0}$	
Widescreen (16:9) NTSC	704x480	40:33		$1.2\overline{1}$	
	352x240				
HDV 1080i / HDCAM (16:9)	1440 x 1080	4:3		$1.\overline{3}$	



# Blu-ray disc

Blu-ray: SAR = 16:9 = 1,778 (1920\*1080 px)

DAR comuni al cinema: 1.85:1 and 2.39:1 (talvolta arrotondato 2.40:1)

Es. Blu-ray movie *Nine* (SAR 1.85:1), *Inception* (2.4:1)

→ Riproduzione con Sony PS3 su 16:9 HDTV



<http://www.pavtube.com/guide/play-2.4-anamorphic-bluray-on-16-by-9-hdtv.html>

# Dimensione/risoluzione delle immagini

- Larghezza/altezza espresse in numero di pixel
- Dimensioni visualizzate
  - dimensioni in pixel dell'immagine +
  - grandezza del monitor +
  - impostazione del monitor

# Risoluzione delle immagini: esempio

- immagine 800 x 600
- monitor da 15 pollici
- impostazione 800 x 600
  
- riempi tutto lo schermo



# Dimensione delle immagini: esempio

- immagine 800 x 600
- monitor 20 pollici
- impostazione 800 x 600

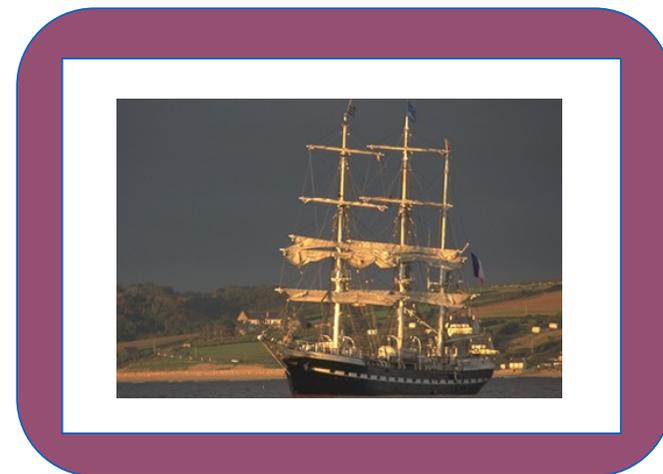
riempie tutto lo schermo  
singoli pixel più grandi



# Dimensione delle immagini: esempio

- immagine 800x600
- monitor 20 pollici
- impostazione 1024x768

singoli pixel più piccoli



# Dimensione delle immagini: riassumendo



# La risoluzione (?)

- ... di scansione
- ... ottica
- ... delle immagini
- ... del monitor
- ... di output finale
- ... della stampante
- ...

# Due misure

- dpi = dots per inch (punti per pollice)
  - per le periferiche (scanner, stampanti, ...)
  - Es.: risoluzione di scansione
- ppi = pixel per inch (pixel per pollice)
  - misura riferita all'immagine digitale
  - Es.: risoluzione immagine pronta per periferica

# Risoluzione di input

- Densità info catturate nella digitalizzazione
- Esempi
  - Scanner letto piano = risoluzione di scansione (es. 50 – 600 dpi)
  - Fotocamera digitale = pixel totali sul CCD (es. 3264x2448 - 8 Megapixel)
- Unità di misura: ppi = dpi

# Risoluzione di output finale

- Densità info richieste per l'output finale (per dispositivi di stampa o display)
- Dipende da ...
  - risoluzione stampante (frequenza di retinatura)
  - risoluzione del monitor
- Unità di misura: ppi = dpi

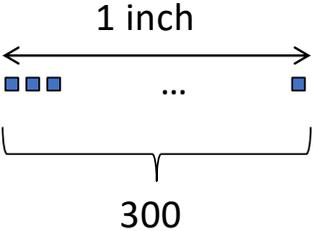
# Risoluzione delle immagini (ppi)

- Numero di pixel visualizzati per unità di lunghezza di un'immagine
- Dipende dal dispositivo su cui si opererà
- Unità di misura: ppi

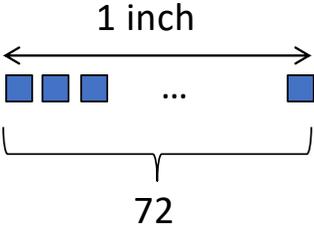
# Dimensioni e risoluzione

- Dimensioni in pixel determinano il livello di dettaglio (es. 620 x 431 pixel)
- Risoluzione determina la superficie su cui vengono impressi tali pixel (es. 72 ppi)

# Confronto tra due risoluzioni



300 ppi



72 ppi



# Risoluzione del monitor

- Punti visualizzati per unità di lunghezza del monitor (dpi)
- Dipende da
  - grandezza del monitor (in pollici)
  - dalle impostazioni (es. 1024 x 768)
- Standard: 72 dpi, 96 dpi

PPI/DPI calculator: <https://www.sven.de/dpi/>

# Dimensione immagini sul monitor

- Pixel convertiti in punti del monitor
- Esempio
  - Imm. 1x1 pollici, risol. 144 ppi, monitor 72 dpi
  - 2 x 2 pollici sullo schermo
  - 1 x 1 pollici sulla stampa

# Risoluzione della stampante

- Punti (dpi) di inchiostro delle stampanti
- Tipiche risoluzioni delle stampanti
  - getto di inchiostro: 150, 300 o 600 dpi
  - laser: 300 o 600 dpi
  - fotounità: 1200 dpi o superiore (2400 dpi)

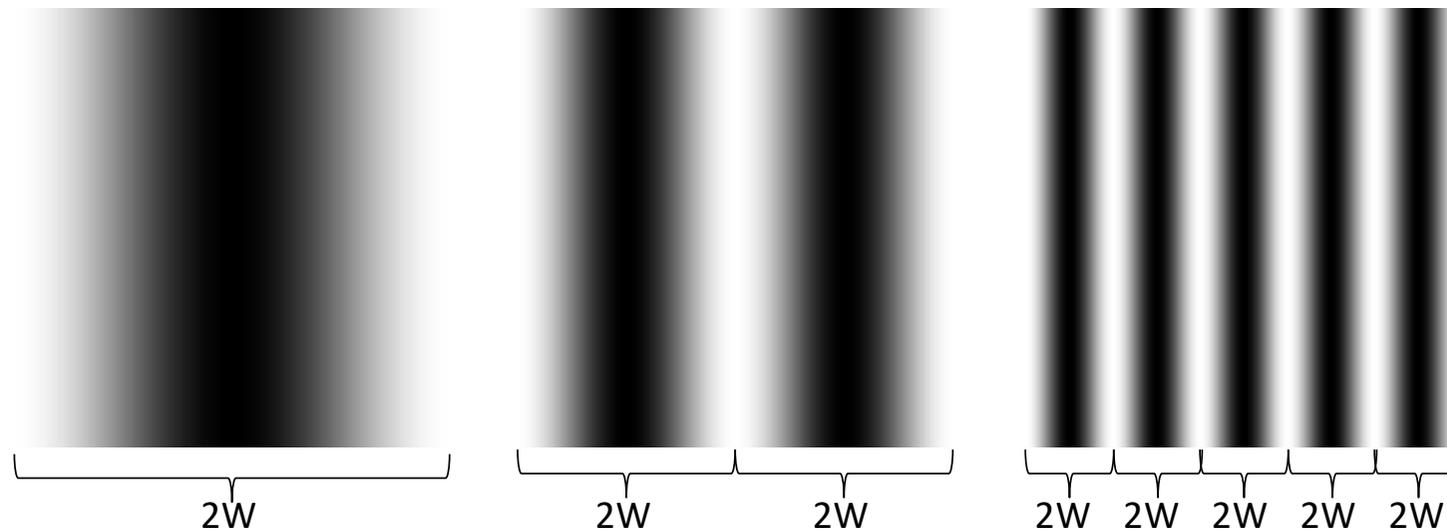
# Risoluzione spaziale

- Intuitivamente, misura dei più piccoli dettagli distinguibili in un'immagine
- Si esprime in due modi
  - Coppia di linee per unità di lunghezza
  - Punti (pixel o dot) per unità di lunghezza

# Coppie di linee

W ampiezza definita

Es.  $W = 0,1$  mm, allora 5 coppie di linee per mm



Risoluzione spaziale = numero max di coppie di linee distinguibili per unità di lunghezza

# DPI: misure adottate nell'editoria

<b>W x H in pixels</b>	<b>PPI ( or DPI)</b>	<b>Line Screen</b>	<b>Max. repro size in Inches</b>	<b>Example end uses</b>
2610 x 3900	300	150	8.7" x 13"	magazine, book, calendar
2610 x 3900	266	133	9.8" x 14.6"	magazine, book, calendar
2610 x 3900	170	85	15.3" x 22.9"	newsprint
2610 x 3900	20	10*	261" x 390" (32.5 ft)	billboard
3930 x 6000	300	150	13.1" x 20"	magazine, book, calendar, poster
* Line Screen used for this example is common but actual LPI may vary depending on printing method and viewing distance				

<http://myloupe.com/resources/dpi.php>

# Oltre il dettaglio e effetto pixel



1200 ppi

300 ppi



10 ppi



# Confronto

1250 dpi



300 dpi



150 dpi



75 dpi



320 x 210



160 x 105



80 x 52



40 x 26



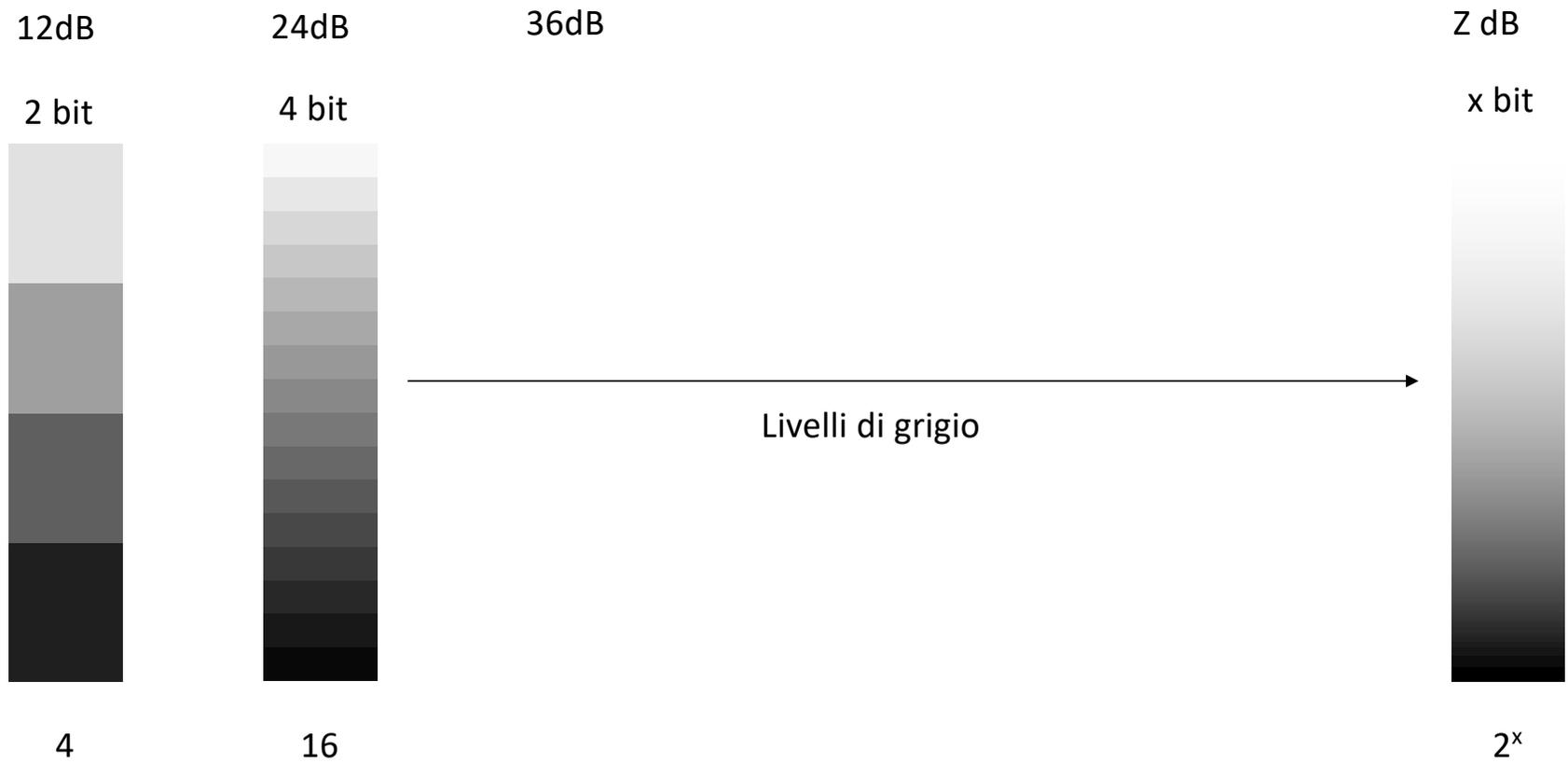
# Quantizzazione

Profondità di colore

# Quantizzazione

- Assegnazione ai pixel valori finiti di intensità luminosa
- Valori dipendono dal numero di bit: N bit,  $2^N$  valori

# Gamma dinamica (livelli di grigio)



# Esempio



8 bit



4 bit



2 bit

# Errore di quantizzazione

- Differenza valore quantizzato - intensità reale
- $\leq$  metà della regione di quantizzazione



# Risoluzione di contrasto o dell'intensità

- Il minimo cambiamento distinguibile nel livello di intensità
- Non siamo così bravi come nella risoluzione spaziale

# Just Noticeable Difference

- JND all'incirca al 2% (per scale di grigio)
- Monitor standard, si distinguono circa 50 livelli di grigio
- Min gamma dinamica 6-7 bit (64/128 livelli)
- Per elaborazione di immagini,  $\geq$  8-10 bit

# Posterization ai livelli bassi



6 Bit



5 Bit



4 Bit



3 Bit



2 Bit



1 Bit

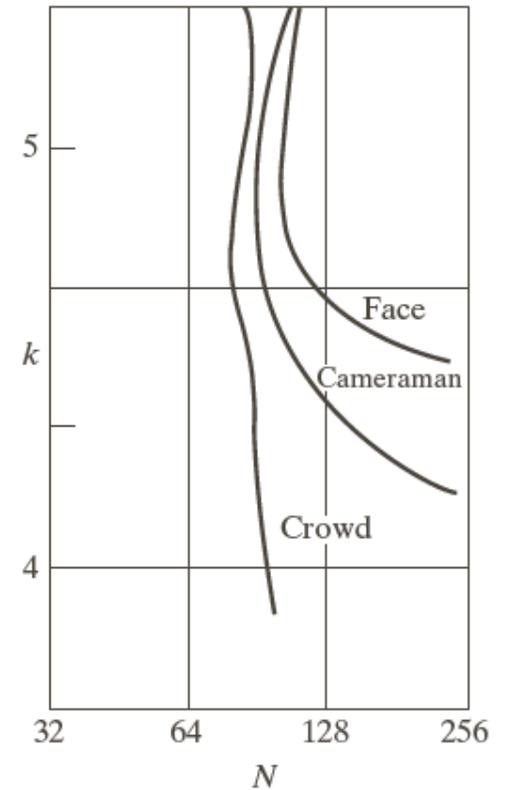
# Rapporto tra $N$ e $k$

Esperimenti di Huang (1965)



a b c

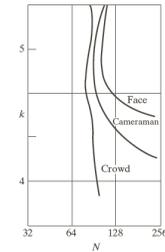
**FIGURE 2.22** (a) Image with a low level of detail. (b) Image with a medium level of detail. (c) Image with a relatively large amount of detail. (Image (b) courtesy of the Massachusetts Institute of Technology.)



La diminuzione di  $k$  fa aumentare il contrasto apparente  
Si percepisce un miglioramento della qualità

Curve di  
isopreferenza

# N e k



N = 85 pixel

k = 5 bit, 32 livelli di grigio

N = 170 pixel



24 livelli di grigio

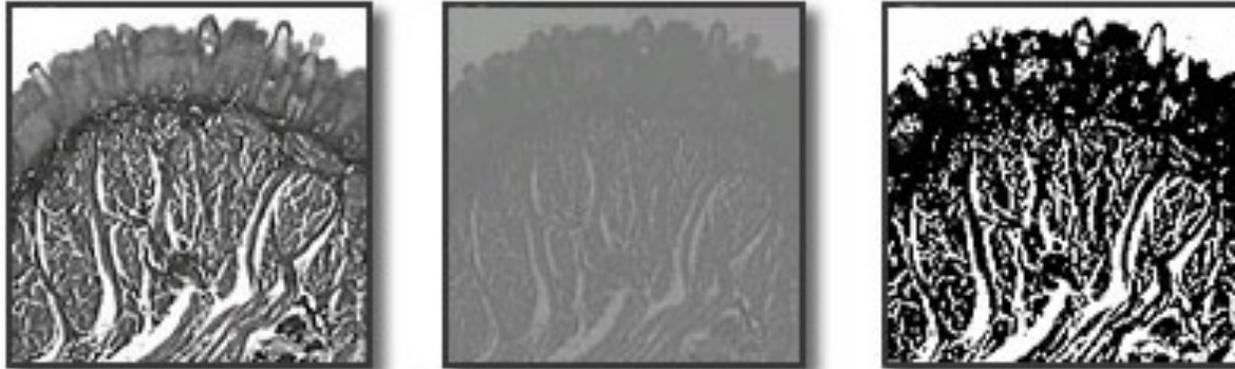


k = 4 bit, 16 livelli di grigio



## N, k e il contrasto

- Basso contrasto + alta risoluzione (N grande)  $\rightarrow$  k grande
- Alto contrasto + bassa risoluzione (N piccolo)  $\rightarrow$  k piccolo



## Esercizio occupazione di memoria

- Stampa 10x15 cm
- Risoluzione 300 dpi
- Profondità colore 24 bit

## Esercizio occupazione di memoria

- Stampa 10x15 cm
- Risoluzione 300 dpi
- Profondità colore 24 bit
  
- $10 \times 15 \text{ cm} = 3,94 \times 5,91 \text{ inch}$
- $300 \times 3,94 = 1182 \times 1773 \text{ punti}$
- $2.095.686 \text{ pixel} \times 3 \text{ byte} = 6.287.058 \text{ byte}$
- ... quasi 6 MB (5,9958 ...)

# Dimensione dell'immagine

$$b = M \times N \times k$$

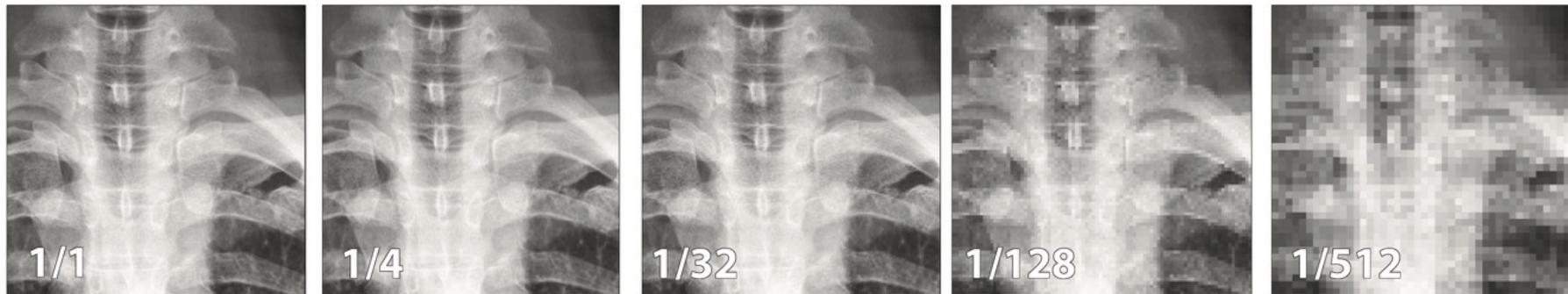
$$b = N^2 \times k$$

**TABLE 2.1**

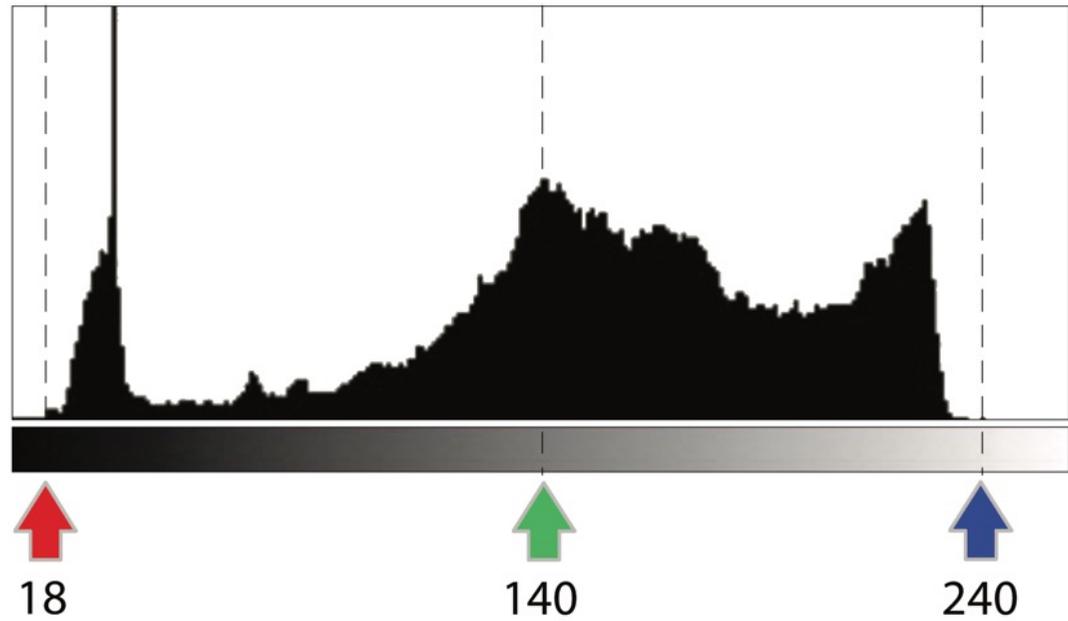
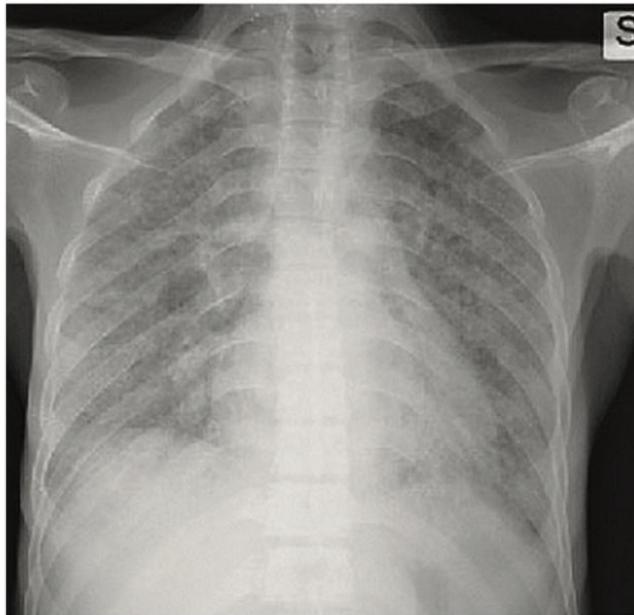
Number of storage bits for various values of  $N$  and  $k$ .

$N \backslash k$	1 ( $L = 2$ )	2 ( $L = 4$ )	3 ( $L = 8$ )	4 ( $L = 16$ )	5 ( $L = 32$ )	6 ( $L = 64$ )	7 ( $L = 128$ )	8 ( $L = 256$ )
32	1,024	2,048	3,072	4,096	5,120	6,144	7,168	8,192
64	4,096	8,192	12,288	16,384	20,480	24,576	28,672	32,768
128	16,384	32,768	49,152	65,536	81,920	98,304	114,688	131,072
256	65,536	131,072	196,608	262,144	327,680	393,216	458,752	524,288
512	262,144	524,288	786,432	1,048,576	1,310,720	1,572,864	1,835,008	2,097,152
1024	1,048,576	2,097,152	3,145,728	4,194,304	5,242,880	6,291,456	7,340,032	8,388,608
2048	4,194,304	8,388,608	12,582,912	16,777,216	20,971,520	25,165,824	29,369,128	33,554,432
4096	16,777,216	33,554,432	50,331,648	67,108,864	83,886,080	100,663,296	117,440,512	134,217,728
8192	67,108,864	134,217,728	201,326,592	268,435,456	335,544,320	402,653,184	469,762,048	536,870,912

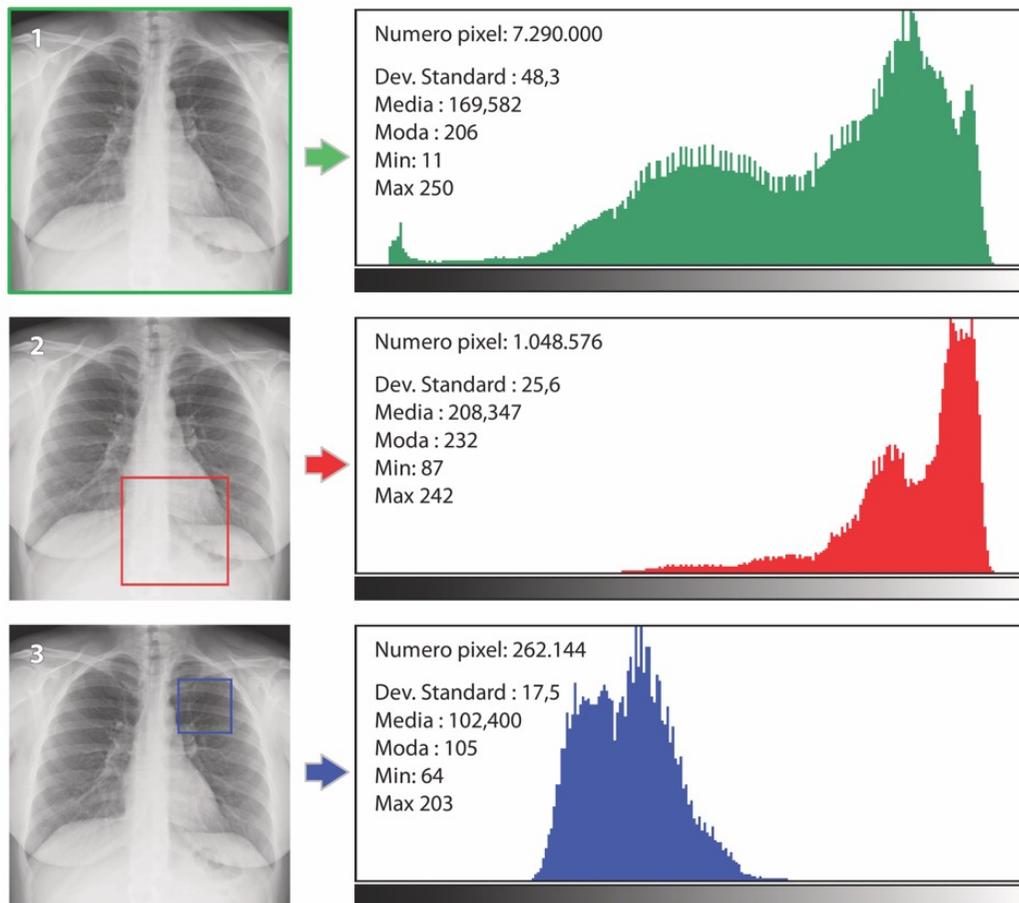
# Riduzione informazione



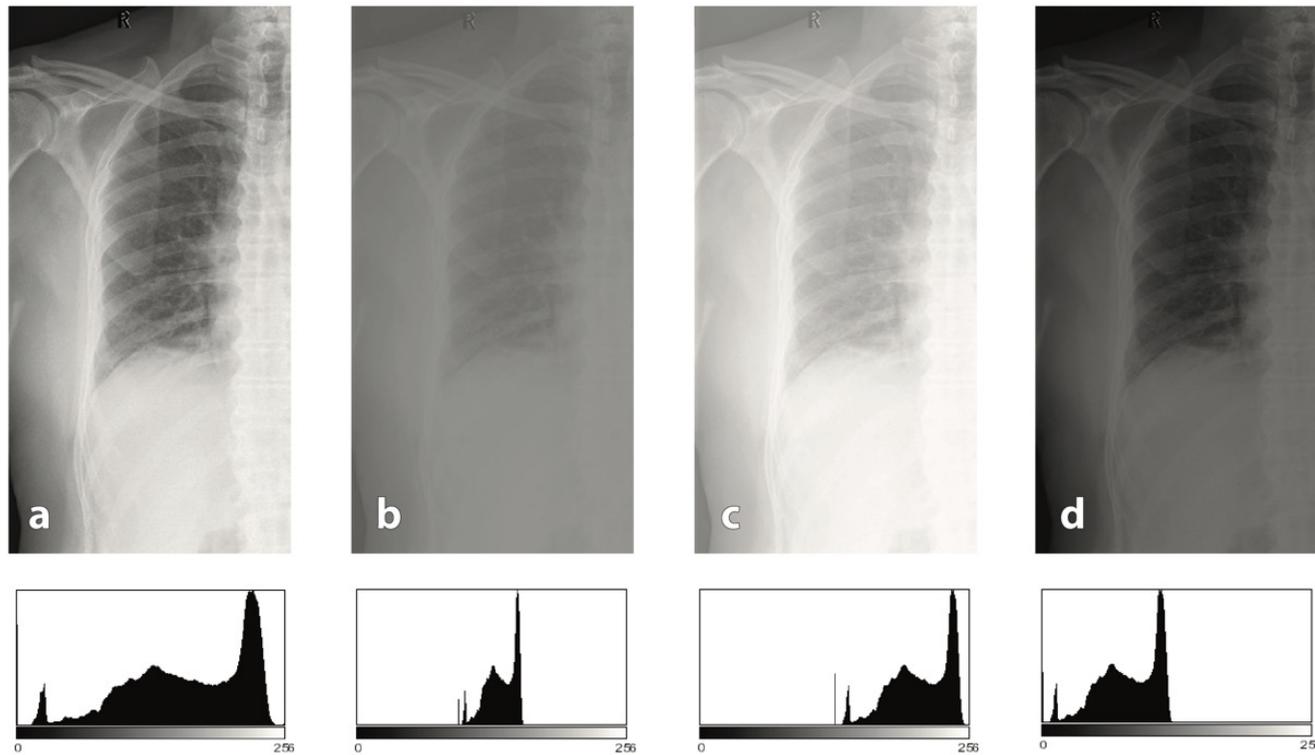
# Istogramma dei livelli di grigio



# Istogrammi di aree parziali



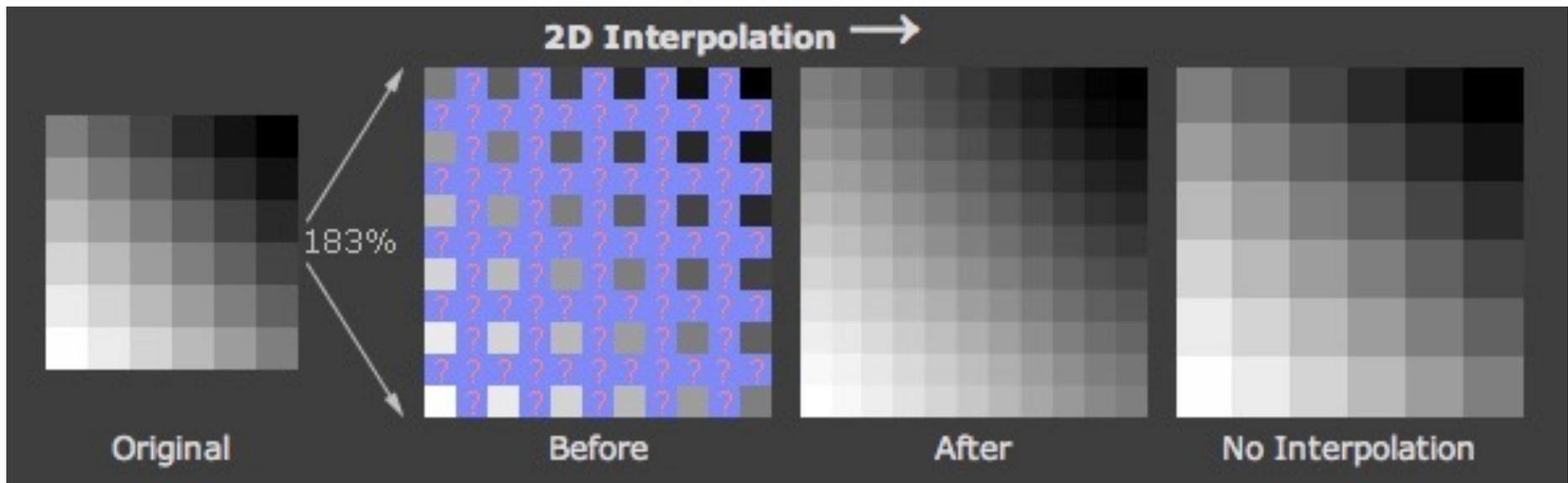
# Tipologie di istogrammi



Cambio dimensioni

# Interpolazione

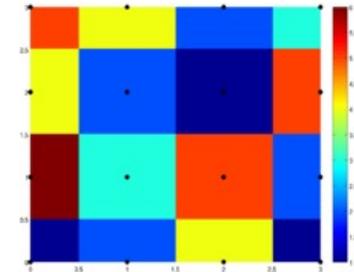
Dati noti per stimare apparentemente i valori in “locazioni” sconosciute



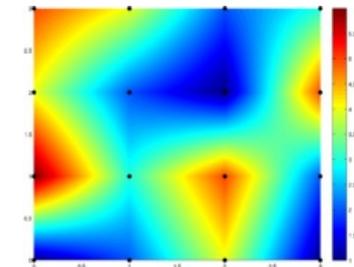
<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/image-interpolation.htm>

# Algoritmi di interpolazione

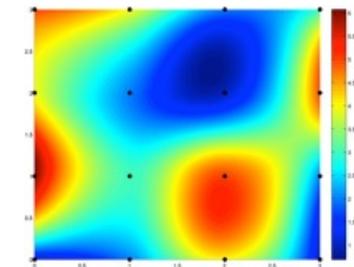
Nearest neighbor: si replica il valore di un pixel



Bi-lineare:  $v(x,y) = ax + by + cxy + d$



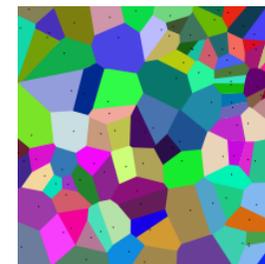
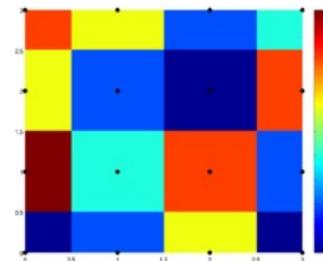
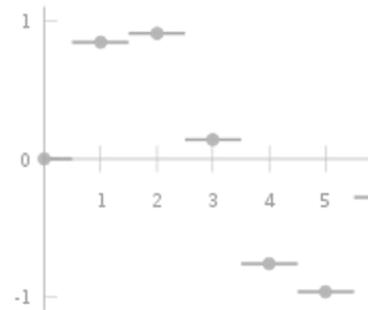
Bi-cubica  $v(x,y) = \sum_{i,j=0}^3 a_{ij} x^i y^j$



# Raddoppio di dimensione: Nearest neighbor

Wiki Dimensione originale

Wiki

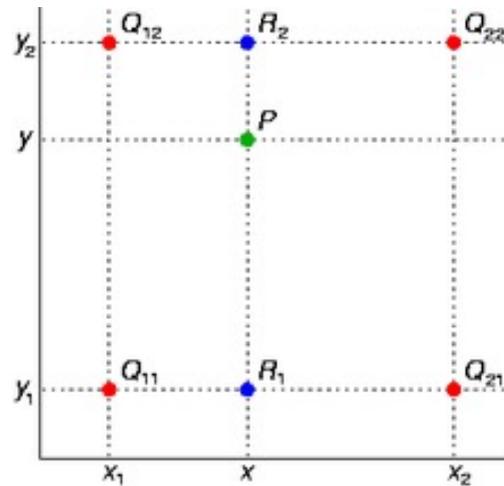


Raddoppio di dimensione:

Bi-lineare:  $v(x,y) = ax + by + cxy + d$

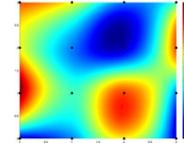
Wiki Dimensione originale

Wiki



# Raddoppio di dimensione: Bi-cubica

$$v(x, y) = \sum_{i,j=0}^3 a_{ij} x^i y^j$$



**Wiki**

Dimensione originale

**Wiki**

Confronto

Wiki

Wiki

Wiki

Wiki

Wiki

# Esempio di interpolazione

3692 x 2812

→ 72 dpi →



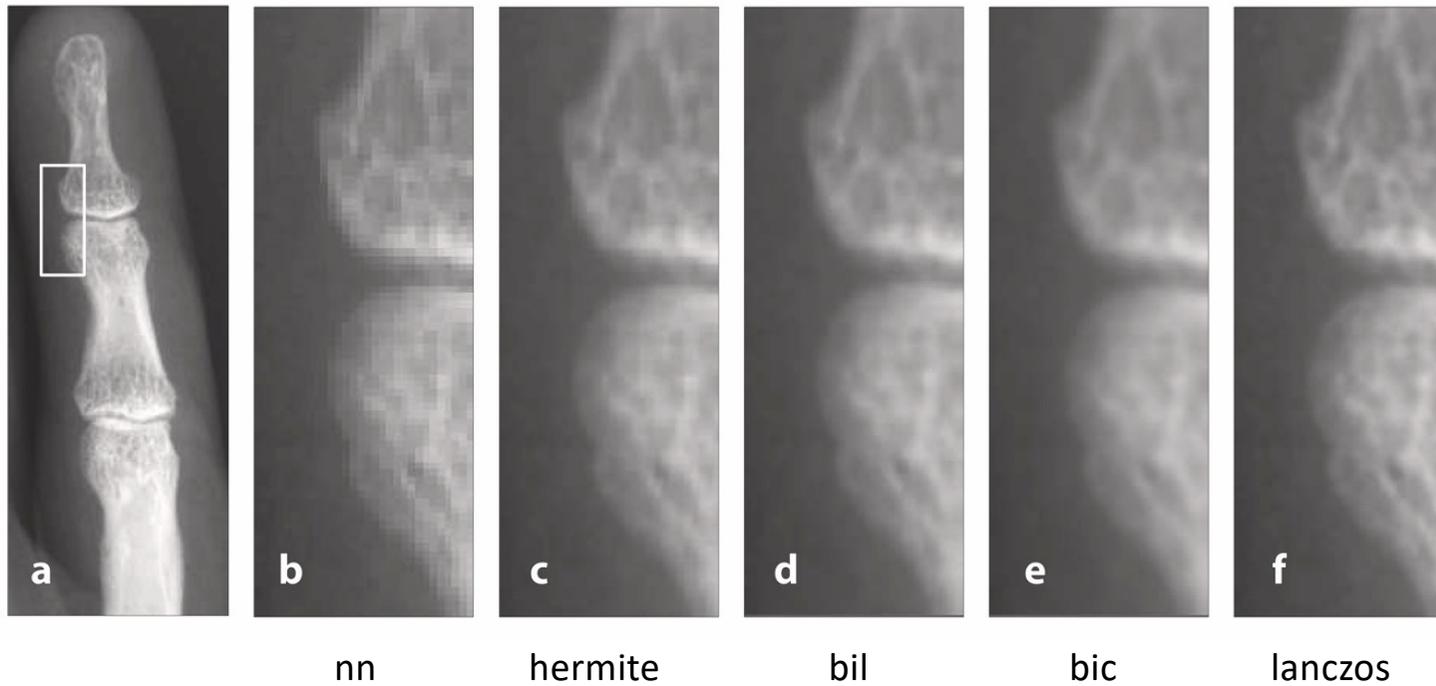
→ 150 dpi →



a b c  
d e f

**FIGURE 2.24** (a) Image reduced to 72 dpi and zoomed back to its original size (3692 × 2812 pixels) using nearest neighbor interpolation. This figure is the same as Fig. 2.20(d). (b) Image shrunk and zoomed using bilinear interpolation. (c) Same as (b) but using bicubic interpolation. (d)–(f) Same sequence, but shrinking down to 150 dpi instead of 72 dpi [Fig. 2.24(d) is the same as Fig. 2.20(c)]. Compare Figs. 2.24(e) and (f), especially the latter, with the original image in Fig. 2.20(a).

# Esempi di interpolazione

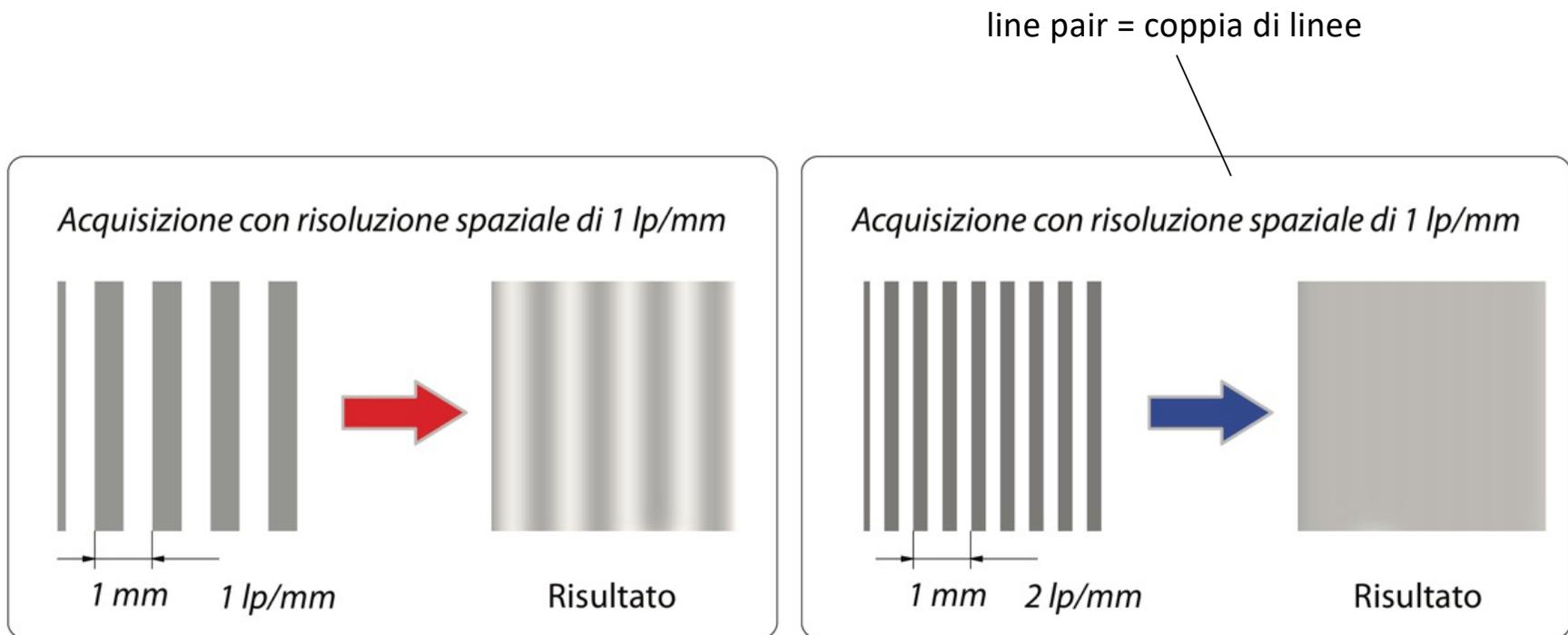


# Qualità delle immagini digitali

# La frequenza (o risoluzione) spaziale

- Ripetizioni dei valori dei pixel nello spazio
- Unità di misura: cicli per metro
- Rileva contrasti/transizioni di luminosità
- # transizioni di luminosità in spazio unitario

# Risoluzione spaziale

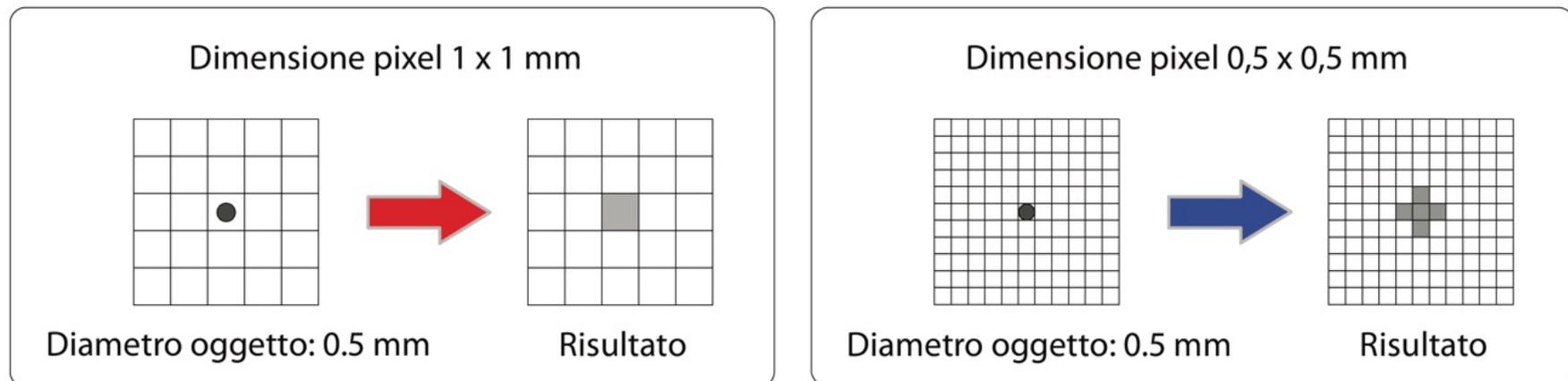


# Teorema di Nyquist/Shannon

pixel di  $px$  mm  $\rightarrow$  rappresentazione corretta fino a  $(1/2) \times (1/px)$

Esempio

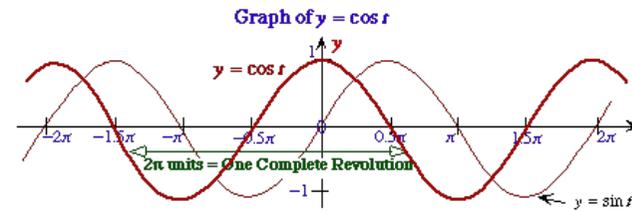
pixel di 0,25 mm  $\rightarrow$  rappresentazione corretta fino a  
 $(1/2) \times (1/0,25) = 2$  lp/mm



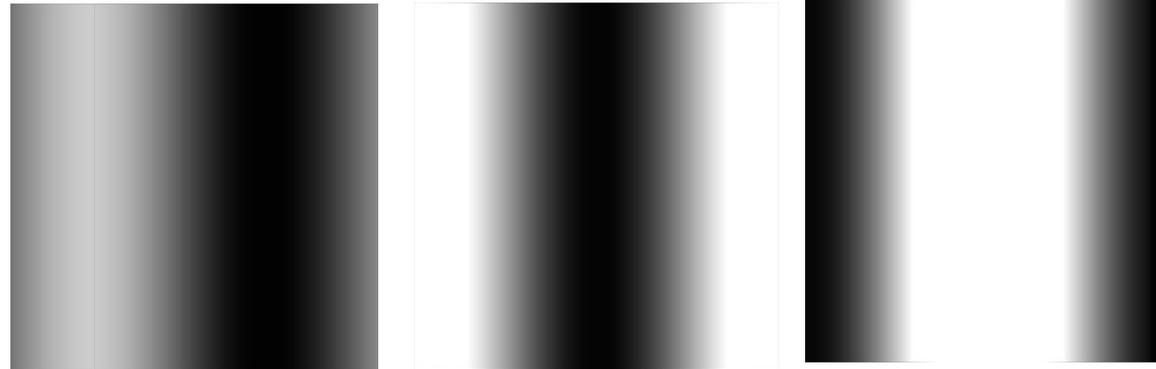
# Diverso contenuto di frequenze spaziali



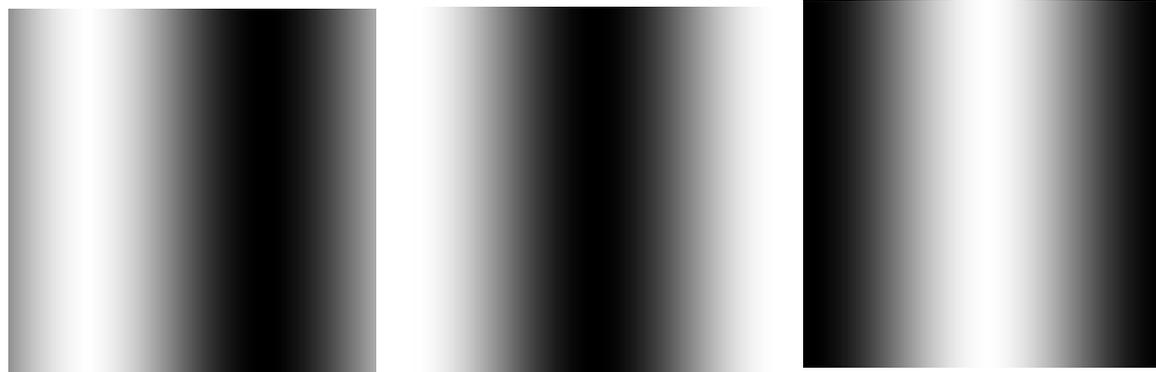
# Reticoli (Fourier)



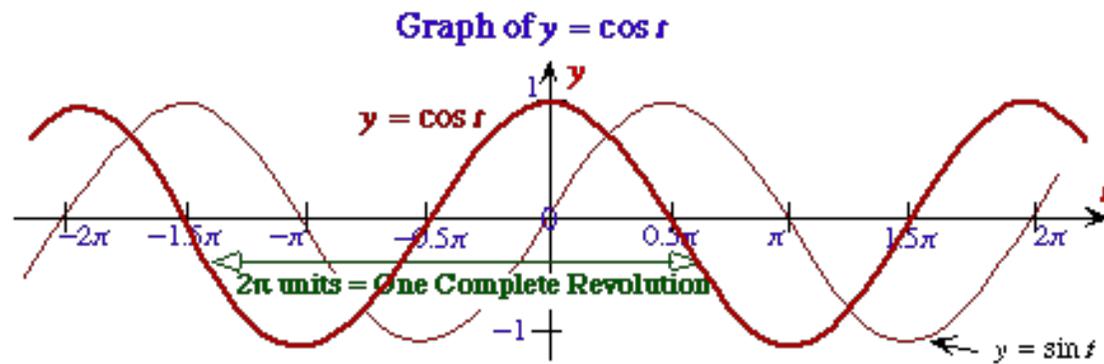
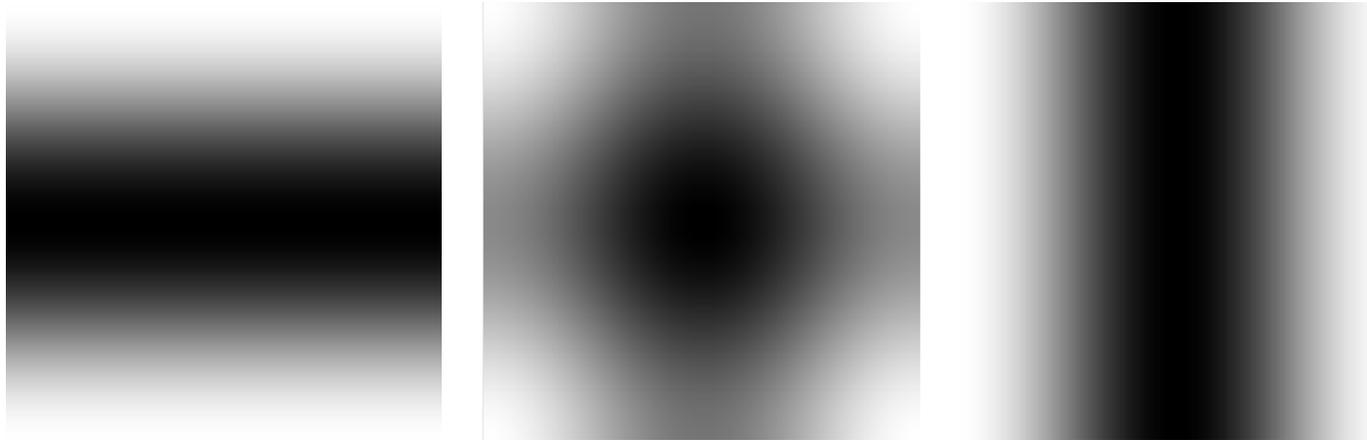
Ampiezza



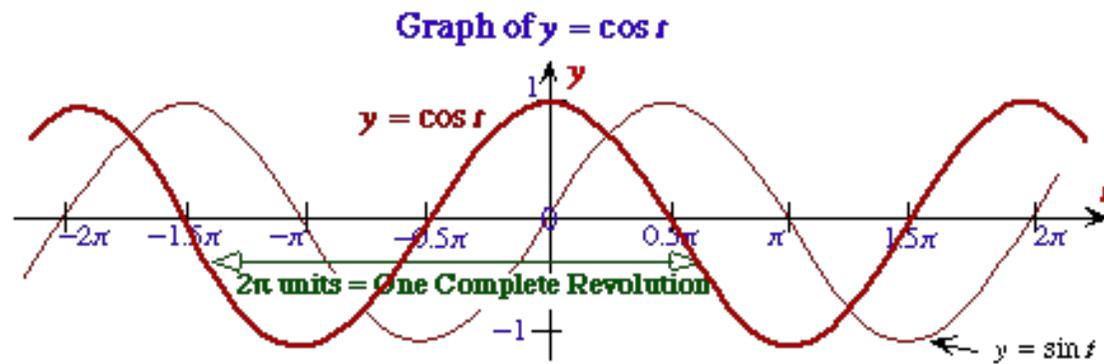
Fase



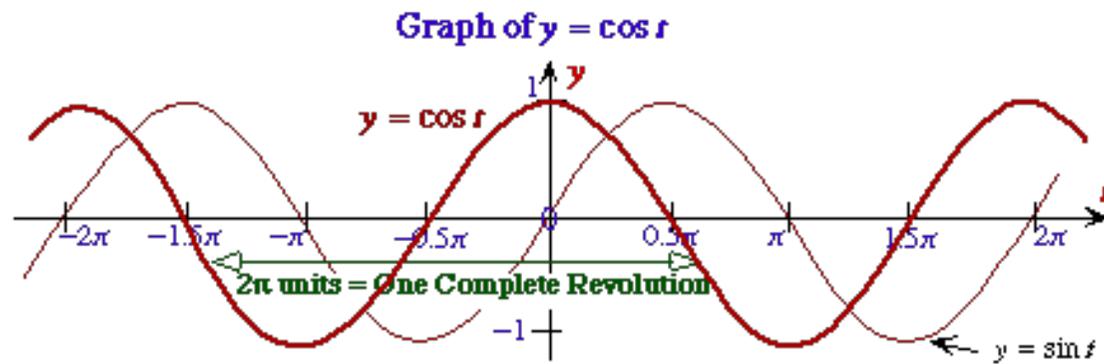
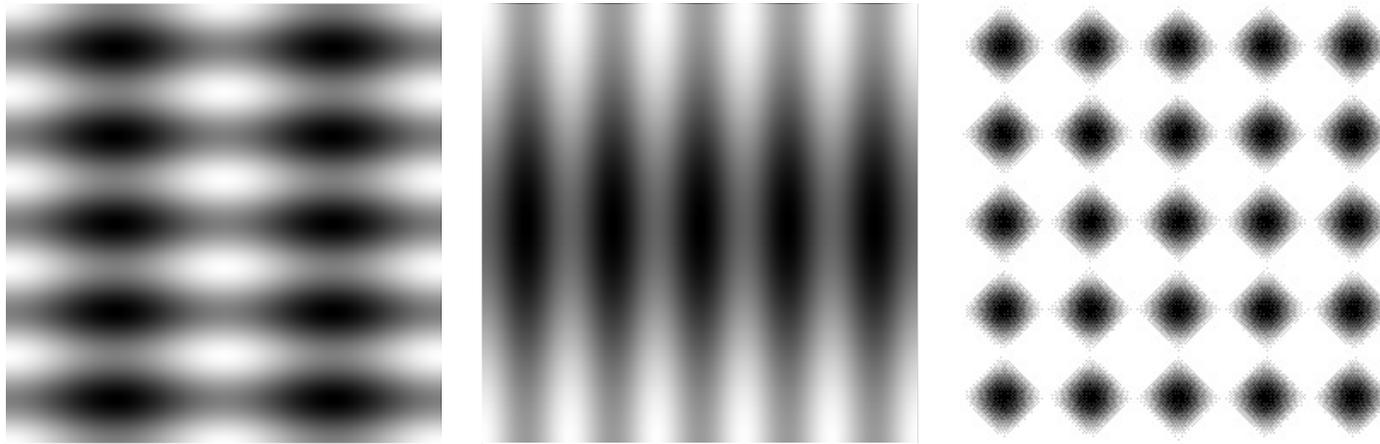
# Reticolo (frequenza 1)



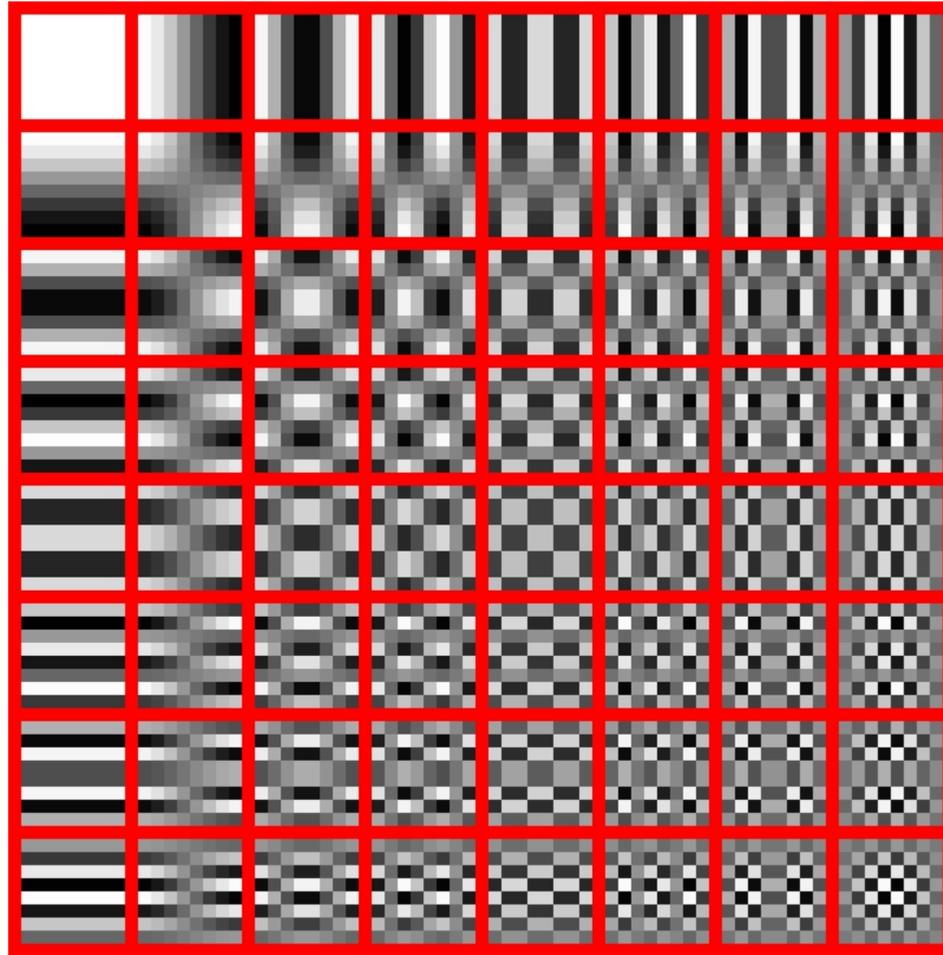
# Reticolo (frequenza 2)



# Reticolo (frequenza 5)



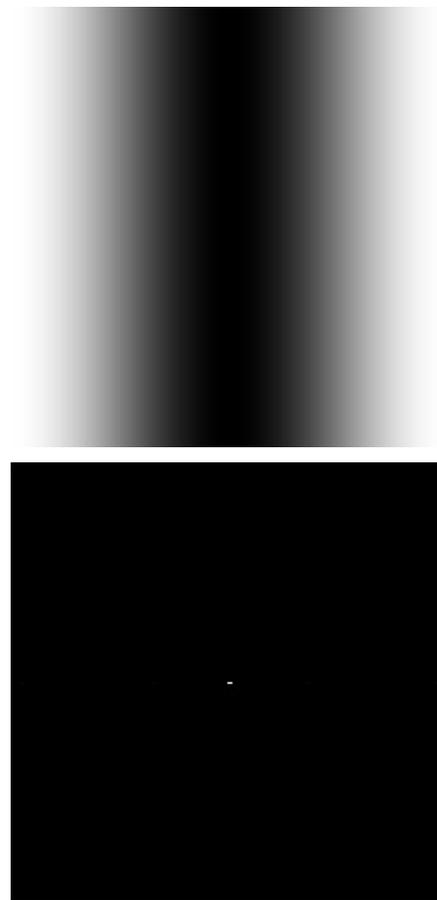
JPEG 8x8



# Teorema di Fourier

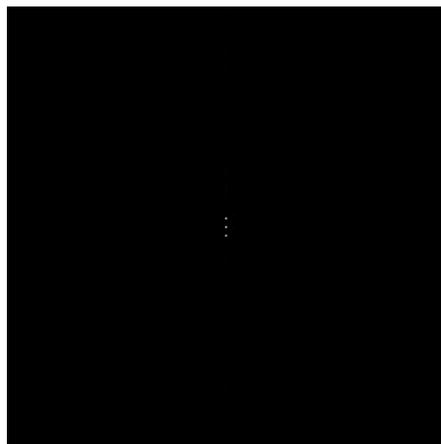
Un segnale qualsiasi si può ottenere dalla somma di più segnali semplici (eventualmente in numero infinito)

# Reticolo (1) trasformato

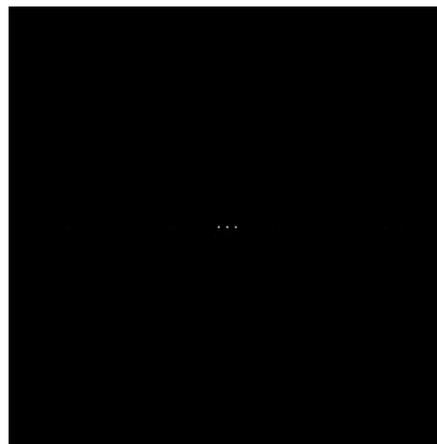


# Reticolo (5) trasformato

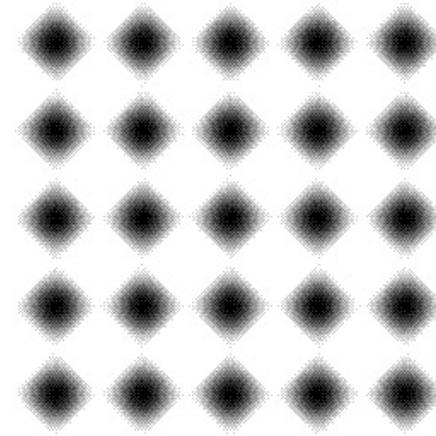
(0,5)



(5,0)



(0,5) + (5,0)



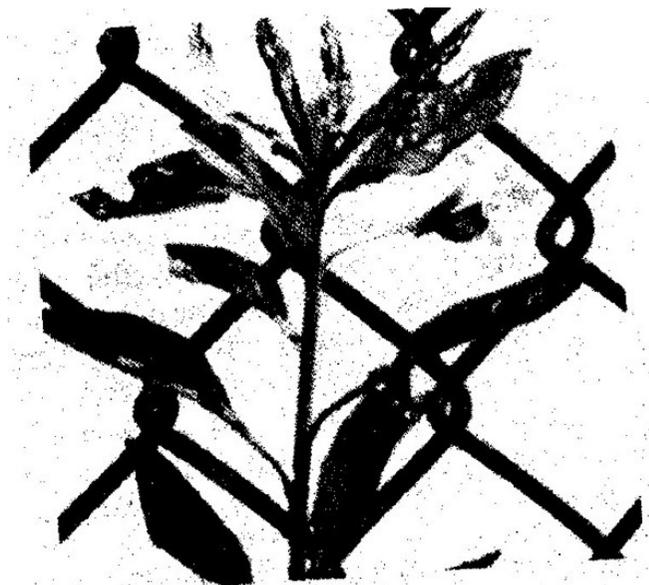
# Intuitivamente

- Segmenti più larghi, basse frequenze
- Segmenti più stretti, alte frequenze
- In corrispondenza delle alte frequenze vi sono i particolari fini delle immagini

# Immagini qualsiasi e istogramma

- Uniformità dell'immagine connessa alle basse frequenze
- Le alte frequenze contribuiscono ai contorni (variazioni repentine di intensità)

# Filtraggio di alte frequenze

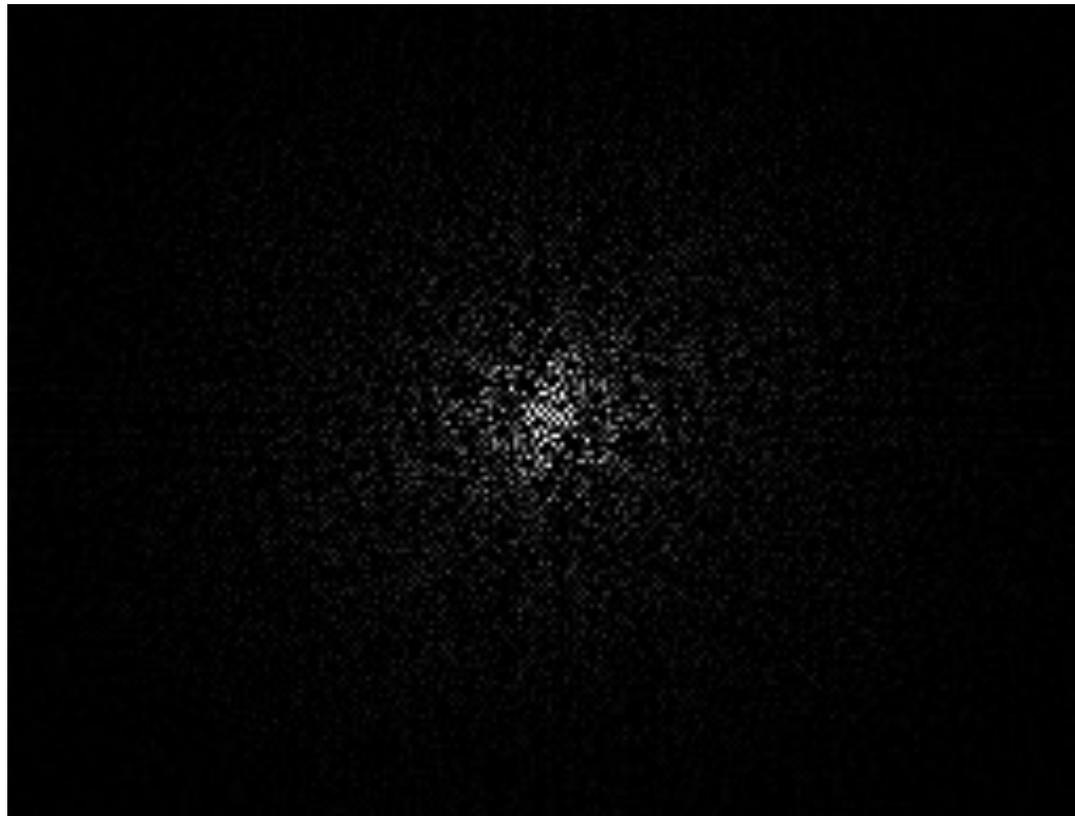
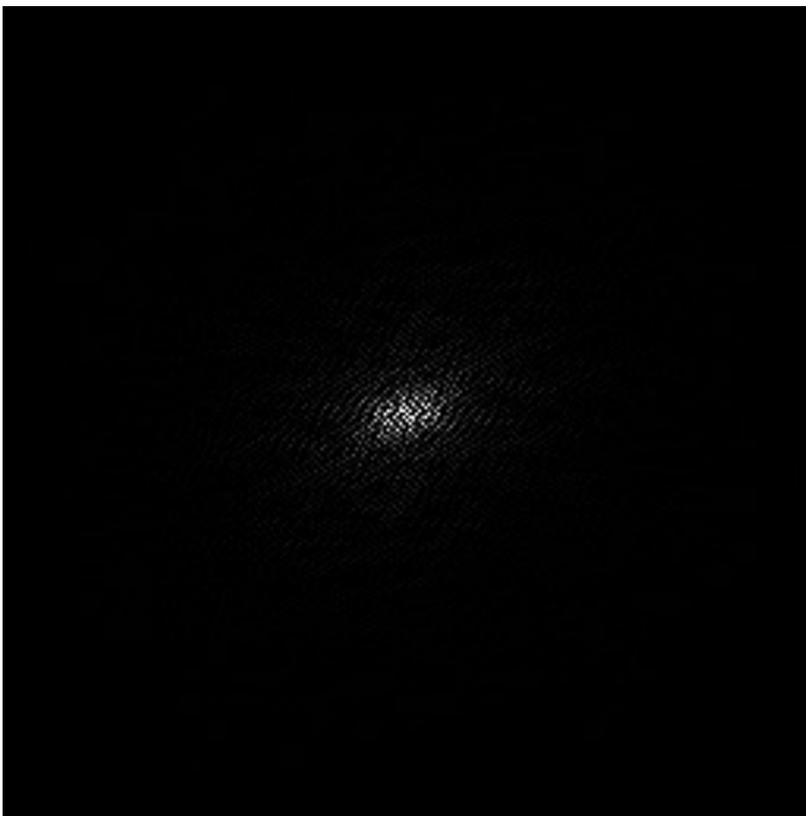


Aliasing:  
campionamento e alte frequenze





Più o meno rumore



# Sovracampionamento e sottocampionamento



# Palette, Tavolozza, Look-Up-Table

0	$R_0$	$G_0$	$B_0$
1	$R_1$	$G_1$	$B_1$
2	$R_2$	$G_2$	$B_2$
...	...	...	...
...	...	...	...
255	$R_{255}$	$G_{255}$	$B_{255}$

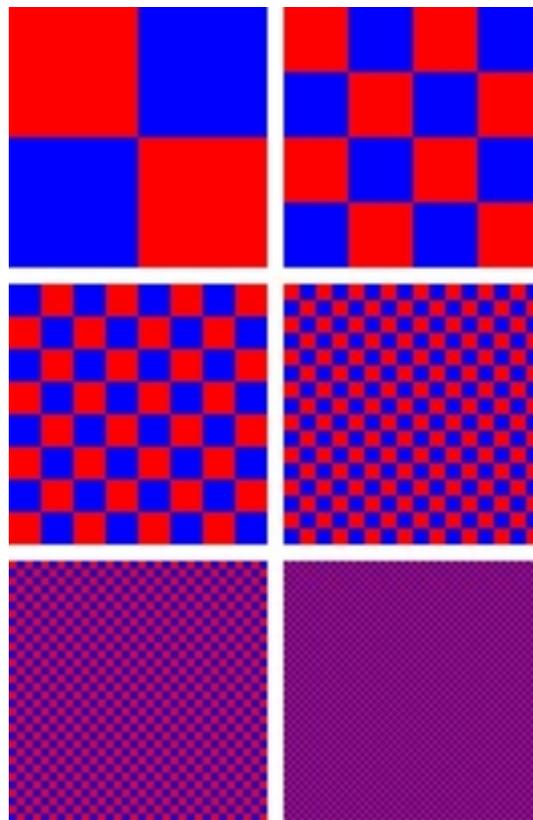
# Dithering



# Dithering di Floyd-Steinberg (1975)

	P	7/16
3/16	5/16	1/16

# Dithering in rosso e blu



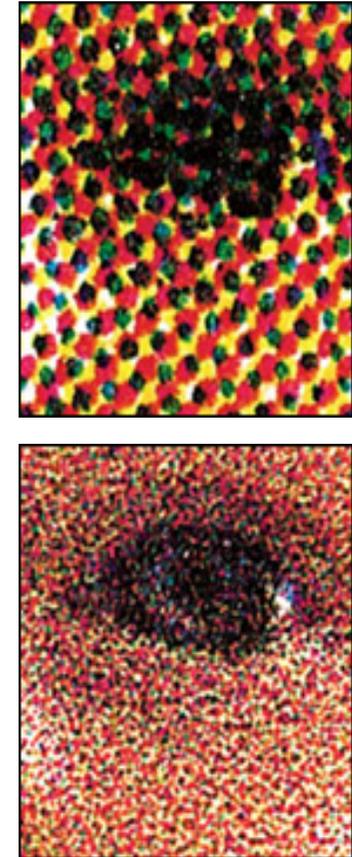
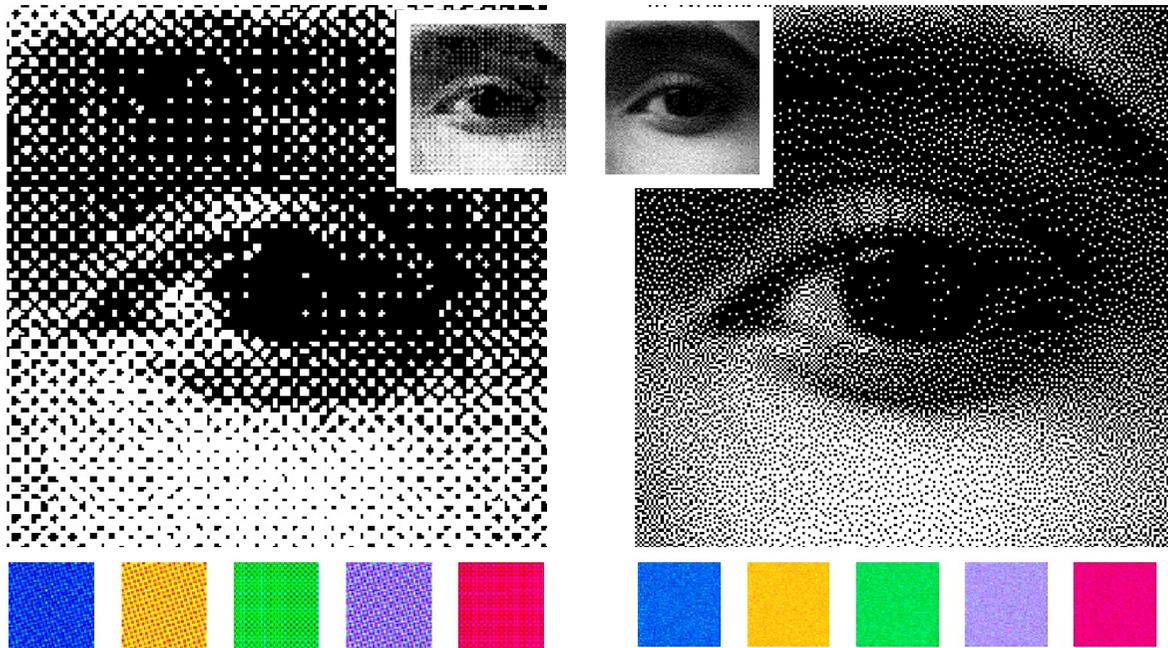
# Convoluzione

- $u=-1 \ v=-1 \ \dots \ w_{i-1,j-1} \ P_{i-1,j-1}$
- $u=-1 \ v=0 \ \dots \ w_{i-1,j} \ P_{i-1,j}$
- $u=-1 \ v=+1 \ \dots \ w_{i-1,j+1} \ P_{i-1,j+1}$
- $u=0 \ v=-1 \ \dots \ w_{i,j-1} \ P_{i,j-1}$
- $u=0 \ v=0 \ \dots \ w_{i,j} \ P_{i,j}$
- $u=0 \ v=+1 \ \dots \ w_{i,j+1} \ P_{i,j+1}$
- $u=+1 \ v=-1 \ \dots \ w_{i+1,j-1} \ P_{i+1,j-1}$
- $u=+1 \ v=0 \ \dots \ w_{i+1,j} \ P_{i+1,j}$
- $u=+1 \ v=+1 \ \dots \ w_{i+1,j+1} \ P_{i+1,j+1}$

$$P_{ij} = \sum_{u,v=-1}^{+1} w_{i+u,j+v} P_{i+u,j+v}$$

# Retinatura (Fox Talbot 1852)

- Pixel in celle
- Differenti pattern di punti neri



Grazie dell'attenzione