

Alcuni semplici concetti matematici possono aiutare nella scelta dei parametri della digitalizzazione

Autori:

ing. Carlo Jacob (<mailto:jacob@posta.cilea.it>), esperto di elaborazione di immagini digitali e databases, docente nel corso CILEA "Progettare il digitale in biblioteca"

Abstract (Italiano):

La digitalizzazione di un'immagine comporta innanzi tutto la scelta della sua risoluzione spaziale. In dipendenza dal tipo di immagine e dal suo supporto, tale scelta non è sempre facile. Alcune semplici considerazioni matematiche consentono di operare scelte ragionevoli anche in casi particolarmente critici, come nel caso della digitalizzazione tramite una fotocamera digitale o di quella di un'immagine a stampa tipografica.

Abstract(English):

Digitization of an image means mainly selecting a proper value for the spatial resolution. Depending on the image type and its medium, this choice is not always so easy. Some mathematical considerations can help in most critical cases, such as when using a digital camera or when scanning a printed image.

Keywords:

C.Jacob,CILEA,Biblioteca Digitale,Progettare il digitale in biblioteca, Digitalizzazione,Risoluzione,Campionamento,Minimo dettaglio,Fotocamera digitale,Moiré,Dimensioning a Digital Libray,Digitization, Resoution,Sanpling,Minimum Detail,Digital Camera



[Licenza](#)

1. Misure delle immagini digitali: la risoluzione

Il termine "risoluzione" è quello che incontra più frequentemente chi si interessa di immagini digitali. Con "risoluzione", in generale, si intende non solo la densità di informazioni con cui deve essere digitalizzata un'immagine da un qualunque *scanner* o deve essere visualizzata un'immagine digitale su un *medium* qualunque (risoluzione spaziale), ma anche la precisione con cui vengono rappresentati i colori da uno scanner o da una stampante o da uno schermo (risoluzione cromatica o radiometrica). La risoluzione spaziale, soprattutto dal punto di vista percettivo, è di gran lunga la più critica.

Un qualunque dispositivo di digitalizzazione suddivide idealmente la scena da digitalizzare in un certo numero di areole elementari (Figura 1.1), disposte in una griglia (o tabella o matrice) secondo righe (orizzontali) e colonne (verticali).

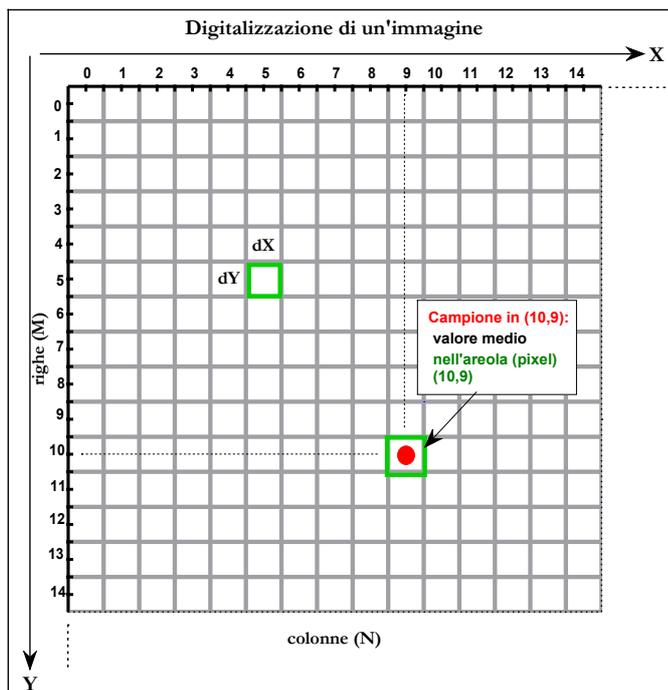


Figura 1.1.
L'immagine da digitalizzare viene suddivisa in areole elementari, generalmente quadrate dette pixel. Per ciascuna areola viene misurata la media delle luminanze dei punti interni. Tale media costituisce il campione di luminanza in quel pixel.

Per ciascuna areola, di dimensioni $dX \times dY$ (di solito $dX=dY$, detti passi di campionamento), il dispositivo determina la media delle luminanze dei punti interni (Figura 1.2), trasformando questo valore in una scala a numeri interi, di solito da 0 a 255 (Figura 1.3). Il risultato è il “campione” di luminanza relativo all’areola. Il termine *pixel* (da *picture element*) viene usato come sinonimo di areola. Il campione, quindi, è il “valore” di un pixel. Nella digitalizzazione delle immagini a colori, in realtà, ogni pixel è dotato di tre campioni, il primo relativo alla componente rossa (R), il secondo a quella verde (G) e il terzo alla blu (B).

In questo caso, quello che è importante per una soddisfacente ricostruzione digitale della scena originaria è la densità dei campioni, ovvero il numero di campioni per unità di lunghezza (pollici, centimetri etc.), da cui dipende il numero totale di campioni con cui sarà descritta l’intera scena di origine. Questa densità viene detta risoluzione (spaziale) della digitalizzazione. Si vede facilmente che la risoluzione di digitalizzazione risulta pari al reciproco $1/dX$ del passo di campionamento dX ¹.

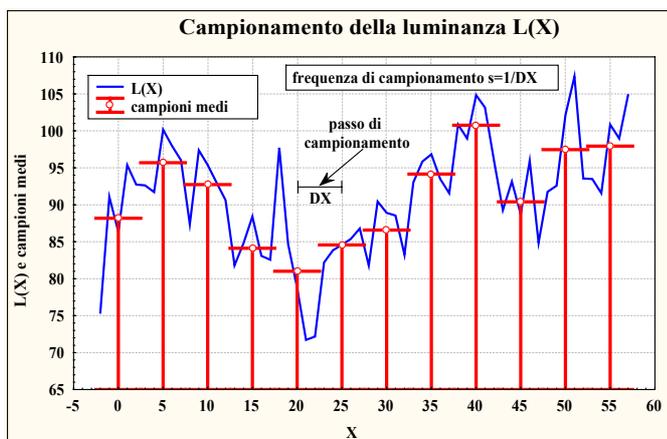


Figura 1.2.
Campioni di luminanza lungo una riga o colonna. Il complesso dei campioni è solo un'approssimazione della curva.

¹ Qui si suppone $dX=dY$.

Per esempio, per una risoluzione pari a 150 campioni per pollice, il passo di campionamento, e quindi il lato dell'areola, risulta pari a circa 1,7 decimi di millimetro, da cui risultano circa 6 campioni per millimetro. Si vedrà in seguito se questa risoluzione è sufficiente per la leggibilità di un testo digitalizzato (vedi 2 Determinazione della risoluzione di digitalizzazione).

Nel caso della visualizzazione di un'immagine digitale su un medium qualunque, come, per esempio, nella stampa, le cose funzionano come nel caso precedente. Mentre prima della digitalizzazione bisognava fissare la risoluzione dei campioni da raccogliere (input), ora bisogna fissare innanzi tutto la risoluzione in stampa, ovvero con quale densità bisogna rappresentare i pixel in stampa (output).

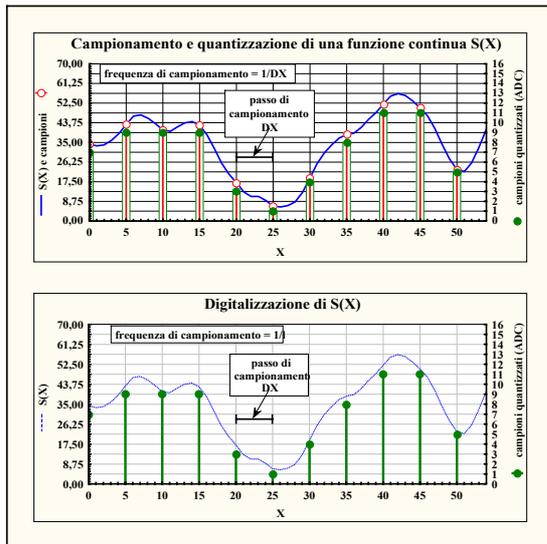


Figura 1.3. Il complesso dei campioni è ulteriormente approssimato dalla quantizzazione, cioè dalla riduzione del loro valore di luminanza media a numero intero (p.es. da 0 a 255, 256 livelli).

La risoluzione di stampa non deve essere necessariamente quella di digitalizzazione. Infatti, per la stampante si definisce un altro tipo di risoluzione, quella "fisica" del processo di stampa, che forma l'immagine sul foglio inchiostrando successivamente i punti, detti dot, con cui ricopre idealmente e in modo regolare il foglio stesso (vedi i piccoli cerchi in Figura 1.4).

Ovviamente, ma entro certi limiti e relativamente alla tecnica usata, quanto più i dot sono densi tanto più la stampa è precisa. In tutti i processi di stampa, ogni pixel dell'immagine da stampare occupa un certo numero di dot, dal momento che, di solito, la densità dei dot è superiore a quella dei pixel (vedi quadrato rosso in Figura 1.4).

I driver di stampa lasciano libera scelta di fissare la grandezza del quadrato dei dot che corrisponde a un pixel, ma al variare di questa grandezza i pixel rappresentati saranno più o meno "densi" sul foglio e, di conseguenza, l'estensione della visualizzazione subirà variazioni anche rilevanti (vedi quadrati verdi in Figura 1.4).

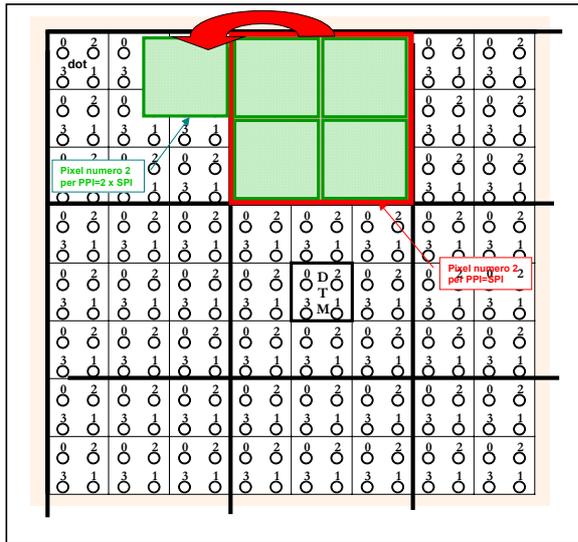


Figura 1.4. In rosso: dot interessati da un pixel nella stampa a PPI=SPI. In verde: dot interessati da un pixel nella stampa a PPI=2 x SPI.

Inoltre, fissato il numero di dot per pixel, i pixel stessi saranno più o meno densi in stampa anche in relazione alla densità dei dot. Insomma le tre risoluzioni viste sono indipendenti l'una dall'altra: la scelta della risoluzione di digitalizzazione sarà fatta in relazione alla qualità dell'immagine digitale che si ottiene, quelle della risoluzione in stampa e della risoluzione in dot della stampante in relazione alla qualità della visualizzazione dell'immagine digitale.

A questo punto, per semplificare e chiarire le cose, bisogna introdurre tre termini differenti per le tre risoluzioni: **spi** (*samples/inch*, campioni per pollice) per la digitalizzazione, **ppi** (*pixels/inch*, pixel per pollice) per la visualizzazione e **dpi** (*dots/inch*, punti per pollice) per la stampante².

Posto, quindi, che le risoluzioni **spi**, **ppi** e **dpi** sono indipendenti l'una dall'altra, è bene tenere presenti le seguenti relazioni:

- $ssize = \frac{N}{spi}$: dimensioni lineari in pollici; N è il numero di pixel
- $psize = \frac{N}{ppi}$: dimensioni lineari in pollici della stampa
- $dpp = \frac{dpi}{ppi}$: dimensioni lineari in dot di stampa di un pixel
- $m = \frac{psize}{ssize} = \frac{spi}{ppi}$: ingrandimento lineare dell'immagine in stampa

Esempio:

- dati: **dpi**=600; N=1000; **spi**=150; **ppi**=100;
- calcolati: ssize=6,67; psize=10; dpp=6; m=1.5

Le relazioni viste, servono anche a capire che cosa succede se si richiede ad un applicativo di eseguire un *rescaling* di un'immagine digitale con $N=N1$ da una risoluzione pari a **spi1** ad una risoluzione pari a **spi2**, a parità di dimensioni in stampa. Si vede subito che:

$$N2 = \frac{spi2}{spi1} \times N1 \text{ (poiché } ssize1=ssize2)$$

dove $N2$ è il nuovo numero di pixel lineari. Se, per esempio, **spi2** è un sottomultiplo esatto **m** di **spi1**, si ha:

² Per brevità, è assunto il pollice (inch) come unità di lunghezza standard. Si ricorda che un pollice equivale a circa 2.54 cm.

$$N2 = \frac{N1}{m}$$

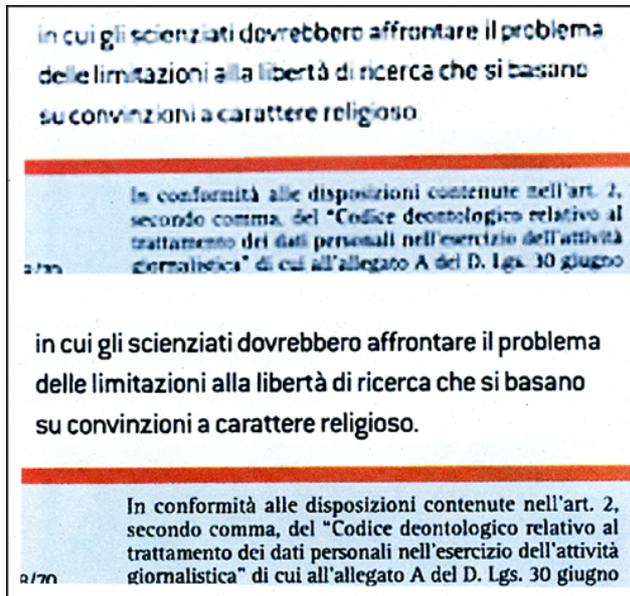


Figura 1.5. In alto: un testo con spi=72 stampato a ppi=36. In basso: lo stesso testo con spi=144 e ppi=72. In base alle relazioni viste le dimensioni in stampa sono identiche nei due casi.

Per riassumere:

- la scelta di **spi** deve essere dettata unicamente dalle esigenze di qualità dell'immagine digitale (leggibilità, esigenze di analisi etc.)
- la scelta di **ppi** riguarda unicamente la qualità della stampa e il suo ingrandimento rispetto alle dimensioni originarie
- anche la scelta di una stampante con una risoluzione **dpi** adeguata riguarda la qualità della stampa (granularità della stampa)
- a parità di **ppi**, la qualità della stampa è tanto maggiore quanto maggiore è la risoluzione **spi** originaria (Figura 1.5)

2. Determinazione della risoluzione di digitalizzazione

All'inizio di una campagna di digitalizzazione la domanda principale che ci si pone è: a che risoluzione (**spi**) debbo digitalizzare il mio materiale? La risposta a questa domanda non è facile, ma soprattutto non è unica. Come detto, fissare **spi** significa fissare la quantità di informazioni digitali da prelevare da un'immagine "analogica" che rappresenta una certa scena, sia essa una pagina di un testo, una foto, una pellicola negativa e/o positiva, un documento qualunque, o da prelevare direttamente da una scena nel senso più generale del termine, come nel caso dell'impiego di una fotocamera digitale (vedi 3 Digitalizzazione tramite fotocamere digitali).

E' evidente che **spi** non può non dipendere da:

- la complessità della scena e il suo tipo, se testo moderno o antico, scena di paesaggio, rappresentazione di opera d'arte etc.
- il minimo dettaglio di scena che è necessario riprodurre in termini visibilmente comprensibili sull'immagine digitale

Ma queste considerazioni sono puramente qualitative e non sono sufficienti per fissare un valore per **spi**, per esempio 72, 85, 133, 175, 150, 300 o 600. Bisogna ricorrere a concetti matematici che si avvalgano di procedure numeriche relative alla teoria dell'informazione, il cui obiettivo è quello di studiare in maniera quantitativa il contenuto informativo di un qualunque segnale.

Una celebre legge matematica viene in soccorso di chi deve decidere: la "legge (o teorema) del campionamento", detta di Shannon-Nyquist [4] [5].

Naturalmente non è questo il luogo per illustrare nei dettagli la legge del campionamento. Val solo

la pena di osservare che l'obiettivo che la legge si propone è il seguente: a che risoluzione si deve digitalizzare un qualunque segnale continuo³ in maniera tale da poterlo ricostruire esattamente servendosi solo dei campioni ottenuti?

La legge parte dal presupposto che un qualunque segnale (mono o bidimensionale) è la somma di un numero elevatissimo di "armoniche", cioè di oscillazioni o onde che si compongono opportunamente a formarlo. Nel caso di un'immagine (Figura 2.1) un'armonica componente è un'onda di luminosità bidimensionale che percorre tutto il piano dell'immagine stessa.

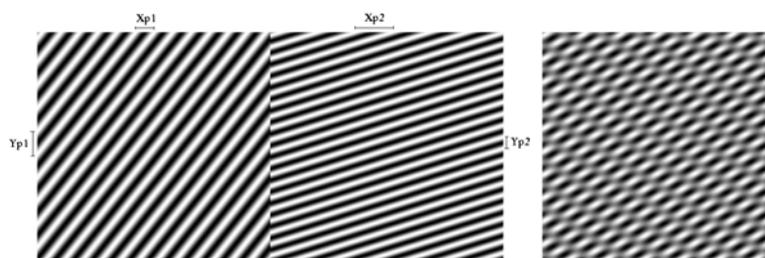


Figura 2.1. Due armoniche bidimensionali e la loro composizione (a ds.)

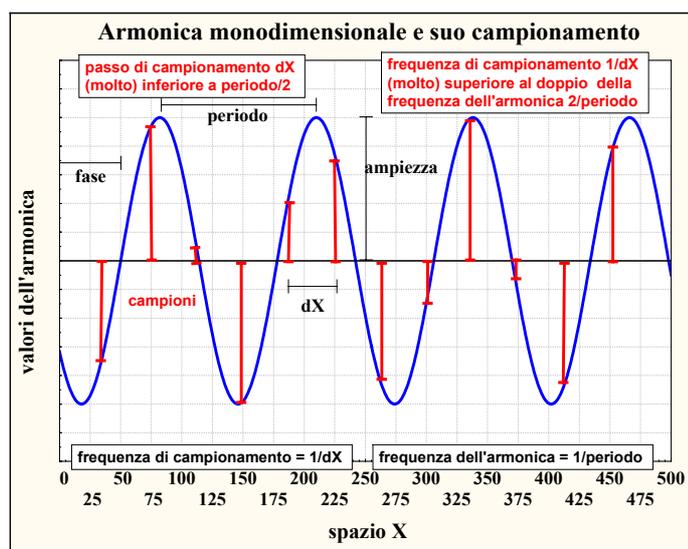


Figura 2.2. Per una corretta ricostruzione approssimata dell'armonica originale, il campionamento deve avere una frequenza molto superiore al doppio della frequenza dell'armonica.

Le caratteristiche principali di un'armonica sono ampiezza, origine o fase e frequenza (Figura 2.2). La legge del campionamento lega la massima frequenza di armonica in un segnale alla risoluzione necessaria alla sua esatta ricostruzione.

La legge stabilisce che la risoluzione **spi** deve essere (molto) superiore al doppio della frequenza massima contenuta nel segnale, ovvero che il passo di campionamento deve essere (molto) inferiore alla metà del suo periodo⁴. Se queste condizioni non sono rispettate, il risultato della digitalizzazione è affetto dal cosiddetto *aliasing*, che, nel caso di un'immagine, genera scalettature,

³ Qui il "segnale" potrebbe essere di qualunque natura: un brano musicale (monodimensionale), una foto o un testo (bidimensionali) etc. In tutti i casi si assumerà come "continuo", anche se una foto può provenire da un negativo a grana grossa o un'immagine su un documento è stata stampata con retino discreto (vedi 4 Digitalizzazione di stampe tipografiche: il problema del moiré)

⁴ Nel caso di un'armonica di immagine (Figura 2.1), i periodi sono due, uno orizzontale e uno verticale.

invece che sfumature, puntature e *moiré* (vedi 4 Digitalizzazione di stampe tipografiche: il problema del moiré)



Figura 2.3. Il programma Campionamento del corso “Progettare il digitale in biblioteca”.

Come conseguenza approssimata, utile nella pratica, si assume che il passo di campionamento dX debba essere (molto) inferiore alla metà del dettaglio minimo sull'immagine che è necessario rilevare tramite la digitalizzazione.

Nel corso CILEA “Progettare il digitale in biblioteca”, a titolo di esercitazione viene usato il programma **Campionamento** (Figura 2.3), che è in grado di calcolare la risoluzione necessaria fissando la misura del dettaglio minimo e di valutare la dimensione in *bytes* dell'immagine digitalizzata fornendo le dimensioni di scena, provvedendo a fare tutte le conversioni del caso fra unità di misura (pollici, centimetri, millimetri). Per chiarire la differenza fra **spi** e **ppi**, il programma consente di fare anche alcune ipotesi di stampa a parità di **spi** al variare di **ppi**, servendosi delle relazioni viste in 1 Misure delle immagini digitali.

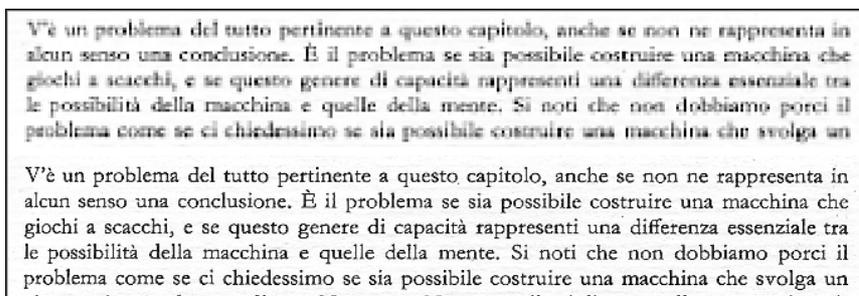


Figura 2.4. Un testo con caratteri di circa 1 mm campionato a 153 spi (sotto) e lo stesso testo a 72 spi e riportato alle stesse dimensioni di quello a 153 spi per ragioni di confronto (sopra).

Per rimanere nel campo della biblioteca digitale, facciamo un esempio di digitalizzazione di un testo: supponendo che il testo abbia formato **A4** (larghezza **21 cm**, altezza **29,7 cm**), e contenga caratteri di dimensioni diverse, se il più piccolo *font* presente consiste in caratteri di 1 millimetro, per il minimo dettaglio di **1 mm** e 6 campioni per pollice (il passo di campionamento è un terzo della metà **0.5 mm** del minimo dettaglio) il programma *Campionamento* fornisce **153** come **spi** consigliata e un'immagine finale di **1265** colonne (X) e **1789** righe (Y), per un totale di circa **2.16** Mega⁵ pixel, pari a **2.16** MegaBytes (MB) se la digitalizzazione è a 256 livelli per ogni campione e a livelli di grigio, altrimenti, se a colori, **2.16x3=6.48** MB. Se si impone un **ppi** di **72**, *Campionamento* calcola in **44.6 cm** la larghezza in stampa e **63.1 cm** l'altezza, con un ingrandimento rispetto all'originale pari a **2.125**.

In Figura 2.4 si può fare un confronto fra un testo da **1 mm** a **72 spi** e lo stesso a **153 spi**.

Concludendo, vale la pena di spendere due parole su un problema che spesso è sottovalutato. I suggerimenti della legge del campionamento non debbono trarre in inganno sul tipo di scanner da usare (vedi, 3 Digitalizzazione tramite fotocamere digitali). Se, per esempio, il calcolo suggerisce una risoluzione **spi** di 300 per un certo tipo di scena (testo e/o immagine), non per questo può essere sufficiente usare un sistema digitalizzatore a 300 campioni per pollice come risoluzione ottica. Infatti, spesso le interfacce dei driver consentono di apportare correzioni varie di luminosità, contrasto e toni cromatici per rendere più leggibile un'immagine digitale. Queste elaborazioni, però, a volte introducono dei salti bruschi nella distribuzione dei valori dei pixel o redistribuzioni imprevedibili dei valori (Figura 2.5) che, pur non compromettendo la comprensibilità della scena, ne compromettono alcune analisi di alto livello, come l'estrazione e lo studio della struttura degli oggetti di scena, caratteri tipografici o, nel caso di manoscritti, elementi grafologici⁶. Queste regolazioni vengono eseguite dalle interfacce a risoluzione ottica. Si può vedere facilmente che l'effetto distortore delle regolazioni è tanto minore quanto più la risoluzione ottica è grande rispetto a quella richiesta. Di conseguenza, in relazione alla tipologia della scena (testo e altro) e alla destinazione d'uso dell'immagine digitalizzata (se per semplice fruizione visiva e per analisi), la risoluzione consigliata dalla legge del campionamento suggerisce implicitamente anche una scelta ragionevole delle caratteristiche del digitalizzatore.

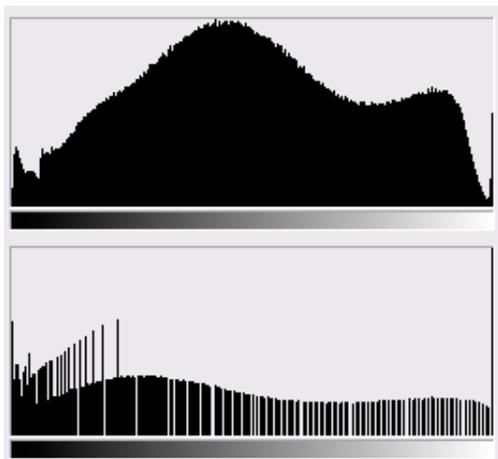


Figura 2.5. Distribuzione (istogramma) delle luminosità dei pixel di un'immagine dal nero al bianco prima della correzione di contrasto (sopra), e dopo la correzione (in basso).

3. Digitalizzazione tramite fotocamere digitali

Soprattutto per la digitalizzazione dei testi, è frequente l'impiego delle fotocamere digitali montate su stativi al di sopra del piano di ripresa (Figura 3.1). Un impianto di questo genere viene detto scanner planetario.

⁵ Kilo (1024), Mega (1024x1024=1024 Kilo),Giga(1024x1024x1024=1024 Mega) etc.

⁶ Questo tipo di analisi va sotto il nome di *Pattern Recognition*

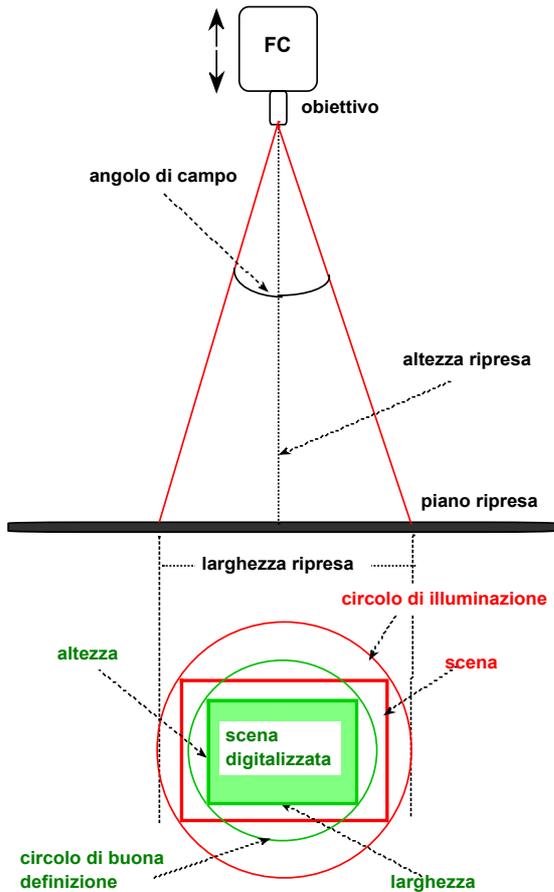


Figura 3.1. Rapporti fra sensore, posizione della fotocamera e scena da digitalizzare.

La qualità delle immagini digitalizzate da uno scanner planetario dipende da più fattori, di cui i principali sono:

- risoluzione della fotocamera
- perfetto allineamento perpendicolare al piano di ripresa
- tecnologia della fotocamera, cioè se raccoglie le tre componenti R, G e B separatamente o tramite un unico sensore da cui sono estratte tramite interpolazioni matematiche⁷
- corretta illuminazione della scena ripresa

Al di là degli ultimi tre fattori, facilmente comprensibili, è necessario chiarire la questione della risoluzione della digitalizzazione.

Il cuore di una fotocamera digitale è il sensore (Figura 3.2), esattamente come in una fotocamera classica l'elemento fondamentale è la pellicola.

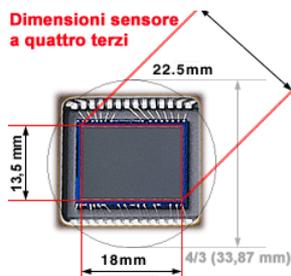


Figura 3.2. Il sensore di una fotocamera digitale: una matrice di CCD/pixel

⁷ CFr. nota 8 e nota 12

Il sensore, in realtà, è una matrice di sensori elementari, di solito CCD (*Coupled Charged Device*), ciascuno relativo ad un campione (pixel) dell'immagine digitale ottenuta⁸. La matrice è composta da un certo numero di righe e di colonne ed ha una certa dimensione lineare (di solito in pollici). Il numero totale di sensori elementari (di campioni, di pixel) è pari a $NS = \text{righe} \times \text{colonne}$. Invece che caratterizzare un sensore tramite numero di righe e colonne e tramite le loro dimensioni lineari, in commercio si preferisce caratterizzarlo fornendo NS , dimensioni della diagonale e *aspect ratio*, cioè il rapporto fra colonne e righe (comuni aspect ratio sono 4/3 o 3/2).

E' comune definire come "risoluzione" della fotocamera il rapporto fra numero di colonne e dimensione lineare della riga o, più frequentemente, direttamente NS , misurato in MegaPixel (1 MegaPixel=1024 x 1024 pixel). Questa definizione di risoluzione, però non risponde alla domanda: qual'è la risoluzione dell'immagine digitale ottenuta? In altri termini, con che risoluzione è rappresentata la scena ripresa?

Dalla Figura 3.1 risulta evidente che se l'altezza di ripresa aumenta (diminuisce), la scena ripresa dall'angolo di campo, cioè dall'apertura del cono di luce che colpisce l'obiettivo (e quindi il sensore), aumenta (diminuisce) di dimensione. Ma, con la manovra di messa a fuoco sul piano di ripresa, comunque l'obiettivo indirizza la luce di scena su tutto il sensore, variando l'angolo di campo. Ne consegue che lo stesso numero di pixel del sensore è interessato da scene che in realtà diventano sempre più ampie (ridotte). In questo modo ogni pixel è relativo ad areole della scena di dimensioni via via crescenti (ridotte) della scena stessa. Questo non significa altro che la risoluzione effettiva dell'immagine digitalizzata diminuisce (cresce) (vedi 1 Misure delle immagini digitali).

A parità del numero di pixel del sensore, allora, la risoluzione di campionamento dipende fortemente da:

- altezza di ripresa e conseguente messa a fuoco sul piano di ripresa
- distanza focale, che condiziona l'angolo di campo
- numero dei pixel del sensore (NS): il formato dell'immagine ottenuta dipenderà dall'aspect ratio del sensore

Figura 3.3. Il programma Fotocamera del corso "Progettare il digitale in biblioteca".

⁸ Nella tecnologia detta a "3 CCD" i sensori R,G e B sono separati e colpiti rispettivamente dalla componente rossa, verde e blu della luce proveniente dalla scena, filtrata e deviata su tre sensori tramite specchi interni. In quella a "1 CCD", i sensori elementari R,G e B sono contenuti in un unico sensore secondo una disposizione alternata, il che rende necessario l'intervento di software speciale per "interpolare" il valore del rosso sui sensori verdi e blu, del verde su quelli rossi e blu, e del blu sui rossi e verdi.

La relazione fra queste grandezze è molto complessa [10]. La situazione è complicata dal fatto che, per ragioni di nitidezza di riproduzione, non tutti i pixel del sensore vengono usati effettivamente, ma solo quelli centrali, lontani dai bordi del cono di campo (circolo di illuminazione), inscritti nel circolo di buona definizione. Alle grandezze viste, quindi, va aggiunto anche l'ammontare dei pixel effettivamente usati (l'aspect ratio è lo stesso del sensore). Tutte le grandezze necessarie al calcolo della risoluzione di scena debbono essere fornite dal costruttore della fotocamera.

Per superare la complessità dei calcoli, nel corso CILEA "Progettare il digitale in biblioteca", a titolo di esercitazione viene usato il programma *Fotocamera* (Figura 3.3).

Il programma risolve varie combinazioni alternative di dati e di risultati:

1. dati obbligatori:
 - focale
 - numero totale dei pixel del sensore
 - numero di righe e colonne dei pixel effettivi di buona definizione
2. dati alternativi strutturali:
 - diagonale e aspect ratio del sensore
 - larghezza e altezza metriche del sensore
3. dati alternativi per il calcolo:
 - data l'altezza di ripresa: viene calcolata la risoluzione di scena e le dimensioni dell'immagine digitale ottenuta
 - data la risoluzione di scena: viene calcolata l'altezza di ripresa e le dimensioni dell'immagine digitale ottenuta
 - date le dimensioni dell'immagine digitalizzata: viene calcolata sia la risoluzione che l'altezza di ripresa

Esempi:

Per una fotocamera con le seguenti caratteristiche:

- sensore da **10.2** milioni di pixel
- focale di **35 mm**
- dimensioni metriche del sensore pari a **23.6 mm** (larghezza) x **15.8 mm** (altezza) (diagonale circa **28.4 mm** e aspect ratio **3/2**)
- **3872** (colonne) x **2592** (righe) \cong **10.04** milioni di pixel effettivi

il programma fornisce:

1. da altezza di ripresa pari a 50 cm: risoluzione **spi** di **317** pixel/pollice, larghezza della scena ripresa circa **31.1 cm**, altezza circa **20.8 cm**
2. da risoluzione spi pari a 300: altezza di ripresa circa **52.5 cm**, larghezza della scena ripresa circa **32.8 cm**, altezza circa **21.9 cm**
3. da larghezza della scena 29.7 cm, altezza 21 cm (formato A4 orizzontale): risoluzione **spi** di **332**, altezza di ripresa circa **47.9 cm**

Notare che per una risoluzione di **600** pixel/pollice, come nel caso di digitalizzazioni di particolare qualità, *Fotocamera* calcola un'altezza di ripresa pari a soli **28.0 cm** e una scena di appena **16.4 cm** per **11.0 cm**.

4. Digitalizzazione di stampe tipografiche: il problema del moiré

Digitalizzare immagini da documenti a stampa pone dei problemi non facilmente risolvibili. Il primo e più grave è il problema del **moiré**.

Per capire come il campionamento di simili immagini generi immagini digitali a volte incomprensibili per la presenza di artifatti, occorre fare alcune considerazioni sui metodi di stampa, anche se qui non è il caso di scendere in particolari.



Figura 4.1. Stampa digitale con metodo FM.

In linea di massima sono due i metodi principali di stampa, uno moderno, digitale, e uno classico, eminentemente tipografico. Nel primo metodo (detto **FM**, *Frequency Modulated screening*) [8] il *driver* della stampante, una volta calcolata la posizione dell'immagine da stampare sul foglio, decide dot per dot se inchiostrare o meno, facendo ricorso anche a metodi statistici e correggendo opportunamente la distribuzione dei dot inchiostriati.

Ne risultano stampe compatte e facilmente decodificabili dal nostro sistema percettivo (Figura 4.1). Questo tipo di stampe, proprio per l'intervento di processi statistici, non pone particolari problemi di campionamento, che avviene su una griglia regolare.



Figura 4.2. Stampa con metodo AM.

Il secondo metodo (detto **AM**, *Amplitude Moderated screening*) [8] pone dei seri problemi di digitalizzazione. Qui il processo di stampa, che classicamente si serve di metodi fotografici, suddivide l'area di stampa in celle regolari, il complesso delle quali è chiamato **retino**⁹, di cui modula l'inchiostatura generando macchie di inchiostro più o meno estese all'interno di ciascuna cella o piastrella (Figura 4.2) [6].

Questa modulazione, integrata dal nostro sistema percettivo, produrrà la sensazione dei livelli continui di grigio. Ovviamente, i driver di stampa digitale simulano matematicamente questi processi¹⁰.

I problemi sorgono dal fatto che tale piastrellatura è regolare esattamente come regolare è il complesso delle areole di campionamento. In più, le celle vengono disposte per **linee** variamente inclinate a seconda dei colori di base della quadricromia, **C** (ciano), **M** (magenta), **Y** (giallo) e **K** (nero)¹¹ (Figura 4.3) [3].

Le due piastrellature si influenzano a vicenda senza avere la possibilità di compensarsi per minimizzare gli artefatti indesiderati, come avviene nel metodo FM. Se la frequenza di campionamento **spi** è inferiore ad un certo limite che dipende dalla densità delle linee di stampa, si produce aliasing e si dice che la griglia delle areole di campionamento “**entra in risonanza**” con il

⁹ I processi percettivi della retinatura sono gli eredi diretti dell'antica **mezzatinta** (*halftone*).

¹⁰ Non tutte le stampanti usano FM o AM. In generale ormai le *inkjet*, dato l'elevato valore **dpi**, usano quasi sempre FM, mentre i risultati delle *laser printer* ancora dipendono fortemente alle tecniche di retinatura.

¹¹ La necessità di inclinazioni diverse per i colori della quadricromia deriva dal fatto che il nostro sistema percettivo è diversamente sensibile ad allineamenti regolari di macchie C, M, Y o K.

retino di stampa. Gli artifatti che ne derivano sono chiamati *moiré* (vedere la parte sinistra di Figura 4.6) [7] [9], conseguenza dell'aliasing delle armoniche (vedi 2 Determinazione della risoluzione di digitalizzazione) generate dalle linee di stampa stesse.

Essendo un'aliasing, il moiré può essere minimizzato se si conosce esattamente la densità delle linee, ovvero la risoluzione di stampa **lpi** (*lines/inch*, linee per pollice), da non confondersi con la risoluzione della stampante **dpi**. Infatti, dalla legge del campionamento (vedi 2 Determinazione della risoluzione di digitalizzazione) deriva che il moiré è minimo, o addirittura inesistente, se la risoluzione di campionamento **spi** è maggiore o superiore a **2 x lpi**. Per valori maggiori il retino è sempre più correttamente rappresentato, il che potrebbe essere un risultato della digitalizzazione, basti pensare agli studi sui metodi di stampa come "firme" di un testo.

Il vantaggio di assumere **spi** come un multiplo esatto di **lpi**, al minimo due volte **lpi**, deriva dalla circostanza che, in realtà, le linee non provocano solo un'armonica di frequenza **lpi**, ma una serie di armoniche di frequenze multipli di **lpi**, il cui aliasing potrebbe provocare moiré anche per **spi** pari o superiori a **2 x lpi** (aliasing residuo). Inoltre, un multiplo esatto, facilita l'eventuale rescaling dell'immagine digitale ottenuta, a parità di dimensioni di stampa, a risoluzioni sottomultipli esatti di **spi**. Per tali rescaling da una certa risoluzione a un'altra, infatti, in generale qualunque applicativo usa formule matematiche molto semplici, le quali richiedono un minimo di trattamento numerico, evitando così che trattamenti sofisticati finiscano per far riapparire il moiré residuo. Dalle relazioni viste in 1 Misure delle immagini digitali, si vede facilmente che, se, per esempio, il rescaling è da **spi** ottica **2400** a **spi** richiesta **600** ($2400/600=4$), per ottenere i valori dei nuovi pixel sarà sufficiente eseguire la media aritmetica di $4 \times 4 = 16$ pixel "ottici" adiacenti per ogni pixel a **600**, e da **600** a **300** basterà eseguire la media aritmetica di $2 \times 2 = 4$ pixel adiacenti a **600** per ogni pixel a **300**¹².

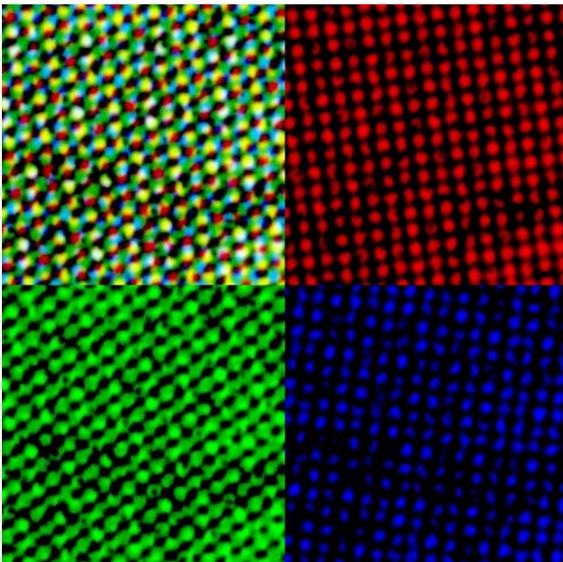


Figura 4.3. Componenti RGB di un frammento di retinatura (a sn. in alto) di un'immagine a stampa digitalizzata ad altissima risoluzione. Sono visibili gli allineamenti prodotti dalla retinatura per linee (metodo AM).

Posto come standard di **spi** il valore **2 x lpi**, al diminuire di **spi** aumenta la percezione del moiré ma aumenta anche l'aliasing, fino a che il risultato è talmente "disturbato" da essere incomprensibile, sebbene l'aumento delle dimensioni delle areole di campionamento (vedi 1 Misure delle immagini digitali), su cui il digitalizzatore esegue le medie, "smussi" (sfocati) sempre più l'aliasing, con conseguente riduzione degli artifatti. All'aumentare di **spi**, invece, diminuisce la percezione del moiré e migliora la riproduzione del retino.

¹² Si tratta della cosiddetta "media mobile", caso particolare delle più generiche "interpolazioni" fra valori di campioni per ottenere, sia pur approssimativamente, nuovi campioni intermedi.

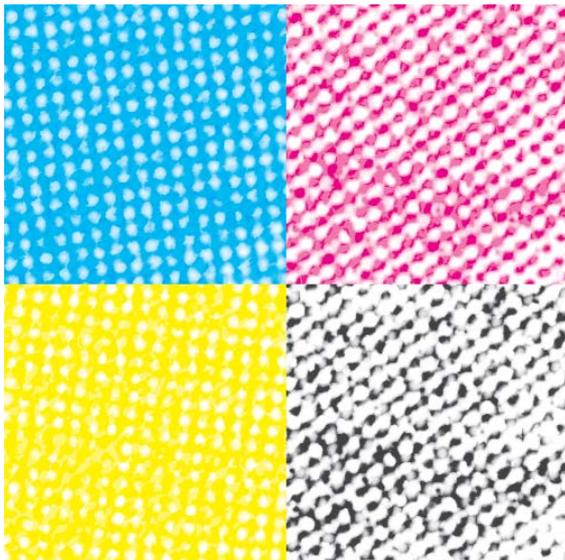


Figura 4.4. Componenti CMYK secondo un modello di colore arbitrario del frammento di retinatura di Figura 4.3).

Il problema è che, anche conoscendo il valore di **lpi** originario, è impossibile ricavare le quattro componenti della quadricromia CMK da una digitalizzazione RGB in maniera tale da determinare un valore corretto di **spi**. E questo perché, nella grande maggioranza delle stampe a colori, non si dispone delle firme cromatiche degli inchiostri usati, ovvero il loro modello di colore (Figura 4.4) [1] [2] [3]. Inoltre, anche per le stampe in bianco e nero, le eventuali deformazioni del supporto possono rendere inutile la conoscenza del valore originario di **lpi**.

Il programma *Retinex* (Figura 4.5), usato nel corso CILEA “Progettare il digitale in biblioteca”, stima non tanto il valore esatto di **lpi** di una stampa, quanto le regolarità che la retinatura induce nella digitalizzazione, le quali sono le maggiori responsabili del moiré.

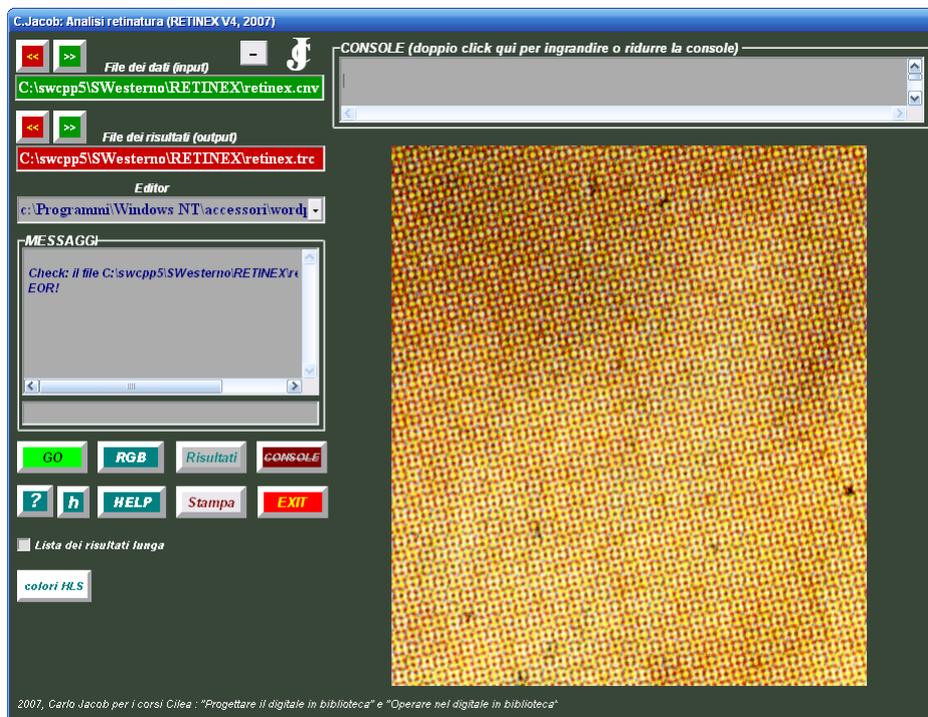


Figura 4.5. Il programma Retinex del corso “Progettare il digitale in biblioteca”.

Per stimare **lpi**, Retinex analizza la digitalizzazione ad altissima risoluzione¹³ di un frammento di stampa (in alto a sin. in Figura 4.3), che può essere considerato come un vero e proprio DNA del retino. Il risultato non è un solo e definitivo valore di **lpi**, ma una serie di stime statistiche basate sullo studio delle armoniche contenute nelle parti R, G e B del frammento, o, a scelta, in quelle C, M, Y e K calcolate secondo un metodo arbitrario da R, G e B. Queste stime vengono inoltre confrontate con la risoluzione ottica dello scanner¹⁴, dal momento che campionando a **spi** inferiori alla ottica (massima) il driver è costretto a usare interpolazioni¹⁵ che introducono a loro volta del moiré, sia pur minimo. Oltre ai valori medi di **spi**=2 x **lpi**, Retinex fornisce anche il valore consigliato di **spi** che interferisce di meno con la ottica e tende a riprodurre il retino. Il programma stima anche se le **lpi** calcolate possano essere identificate con alcuni standard, come le classiche 85 (per stampe di quotidiani), 133 (per riviste) o 175 (per stampe di particolare pregio).



Figura 4.6. Per l'immagine di cui alle figure precedenti, Retinex suggerisce un lpi medio di 152. A sinistra un frammento della digitalizzazione a 280 spi (non multiplo di 152), dove il moiré è evidente. A destra un frammento della digitalizzazione a 304 spi (multiplo di 152), dove il moiré è ragionevolmente ridotto e si comincia a intravedere la trama del retino .

Poiché le stime sono approssimative, per quanto detto sopra, la percezione del moiré residuo (o della retinatura, se quest'ultima non interessa) può essere diminuita con processi di sfocatura, più o meno accentuata, seguiti dalla riduzione delle dimensioni della digitalizzata

In Figura 4.6 è riportato il caso della digitalizzazione di un'immagine stampata per la quale **Retinex** aveva stimato un **lpi** di **152**. E' evidente il moiré campionando a **280** (che non è multiplo di 152 e inoltre è inferiore a $2 \times 152 = 304$), mentre campionando a **304** il moiré, pur non essendo completamente scomparso, è ragionevolmente ridotto.

Tenere presente che analisi di questo tipo sono soprattutto efficaci per stampe a retino di tecnologia classica. Si stanno sempre più diffondendo, però, stampe sempre a retino ma di tipo digitale, in cui il retino stesso ha una struttura complessa in cui le linee di stampa sono difficilmente identificabili (Figura 4.7) [6].

¹³ A risoluzione **ottica** dello scanner, che è la massima risoluzione possibile senza intervento di calcoli da parte del driver.

¹⁴ Cfr. nota 13

¹⁵ Cfr. nota 12



Figura 4.7. Stampa digitale con retino di Bayer [6].

Bibliografia e Riferimenti

- [1] Commission Internationale de l'Eclairage, International Commission on Illumination, URL: <http://www.cie.co.at/>
- [2] International Color Consortium, URL: <http://www.color.org/>
- [3] C.Oleari (a cura di), *Misurare il colore*, Hoepli, Milano, 1998, ISBN 88-203-2516-0
- [4] V.Cappellini, *Elaborazione numerica delle immagini*, Boringhieri, Torino, 1985, ISBN 88-339-5006-9
- [5] V.Cappellini, *Digital Filters and Their Applications*, Academic Press, 1978, ISBN 0-12-159250-2
- [6] J.D.Foley, A. van Dam, S.K.Feiner, J.F.hughes;
Computer Graphics: principles and practice,
Addison-Wesley, II edizione, 1990, ISBN 0-201-12110-7
- [7] M.J.Sullivan, *Make Your Scanner a Great Design & Production Tool*, North Light Books, Cincinnati, 1995, ISBN 0-89134-617-1
- [8] S.IRHIG, E.IRHIG; *Immagini digitali: trattamento e stampa*, McGraw-Hill Libri Italia, 2002, III Ed., ISBN 88-386-4249-4
- [9] S.IRHIG, E.IRHIG; *Scanner e acquisizione delle immagini*, McGraw-Hill Libri Italia, 1999, ISBN 88-386-4058-0
- [10] M.Micci, *Elementi di fotografia*, Cesco Ciapanna Editore, Roma, 1999, ISBN 88-87068-10-0