Compressione delle immagini (codifica JPEG)

ALBERTO BELUSSI

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

Motivazioni a favore della compressione

- Es. Si consideri di voler proiettare un'ora di un film mediante un dispositivo (CD-ROM, per esempio). Assumendo video frame con risoluzione di 620x560 pixel e 24 bpp, ogni frame richiederebbe circa 1 MB di memoria. Se il video animato necessita di 30 frame al secondo, occorrerà trasmettere 30MB/sec., o 108 GB in un'ora. Anche se fosse disponibile una quantità di memoria sufficiente, tale visione non sarebbe possibile in tempo reale a causa della bassa velocità di trasmissione che l'attuale tecnologia fornisce.
- Es. La larghezza di banda della rete di trasmissione classica (Ethernet, token ring) e' dell'ordine di **decine di Mb/sec, troppo** bassa anche per la trasmissione di un solo minuto video non compresso. L'ordine sale a **centinaia di Mb/sec** per reti ATM e FDDI, ma anche in questo caso solo poche sessioni multimediali simultanee sono possibili per trasmissioni di dati non compressi

Tipi di compressione

Senza perdita (*lossless*): *permette di ricostruire perfettamente la* rappresentazione dell'oggetto originale, conserva infatti tutti i bit di dati (es. codifica di *Huffman)*

Con perdita (*lossy*): *permette di ricostruire solo in parte la* rappresentazione dell'oggetto originale (alcuni bit di dati vengono scartati). Le tecniche "lossy" sono classificate in:

- Tecniche basate su **predizione**
- Tecniche orientate alla **frequenza (Discrete Cosine Transform - DCT)**
- Tecniche orientate all'**importanza**
- Tecniche di compressione **"ibride"** combinano alcuni approcci, come DCT e quantizzazione vettoriale

Rappresentazione delle immagini

- Dal punto di vista fisico un'immagine digitale è un **vettore 2-D** di elementi, detti **pixel**, in cui la prima coordinata rappresenta la larghezza dell'immagine mentre la seconda l'altezza. Un'immagine larga 500 e alta 300 (500x300) avrà dunque una dimensione totale di 150.000 pixel
- La **precisione** di un'immagine è espressa dal numero di bit usati per rappresentare ogni pixel (**bpp**) e determina il numero di colori che l'immagine stessa può contenere.

Rappresentazione delle immagini

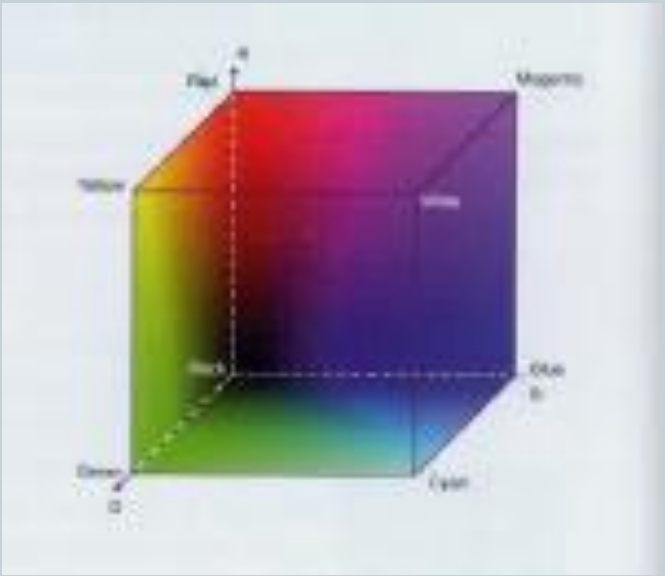
In base alla precisione le immagini si possono classificare in:

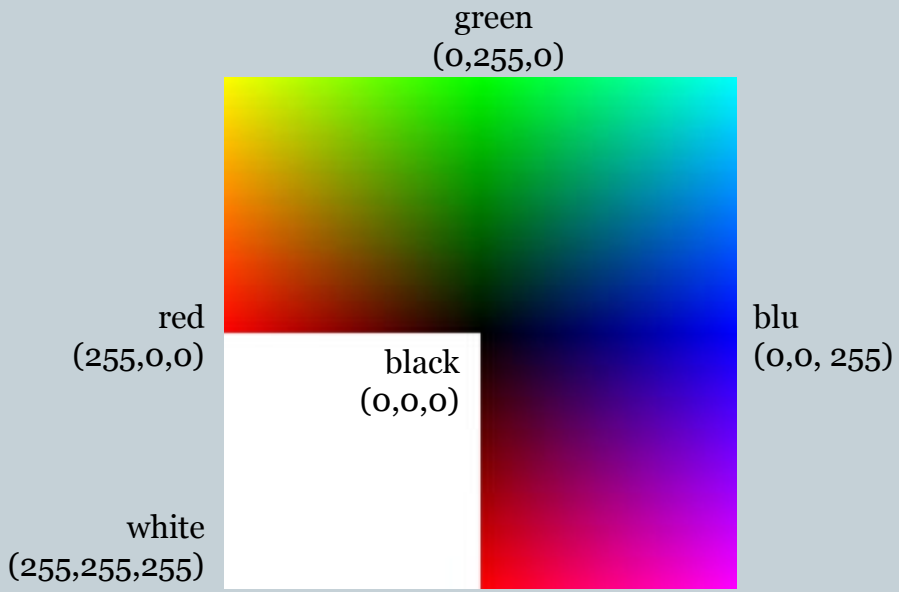
- Immagini **binarie**, rappresentate da 1 bpp (= 2 colori). Includono fotografie in bianco e nero
- Immagini **computerizzate**, rappresentate da 4 bpp (16 colori). Comprendono icone ma non immagini complesse
- Immagini **su scala di grigio**, rappresentate da 8 bpp (256 colori). Questa precisione non è ancora sufficiente per rappresentare fotografie o immagini scannerizzate
- Immagini **a colori**, rappresentate da 16, 24 o più bpp (da 32.768 a 16.777.216 colori). Includono fotografie e immagini scannerizzate.

Rappresentazione del colore

Sistemi di rappresentazione di colore (color space)

- **RGB:** Il colore si ottiene sommando tre colori primari: *red (R), green (G) e blue (B). La linea* del cubo in cui R=G=B specifica i valori di grigio compresi tra il nero e il bianco.

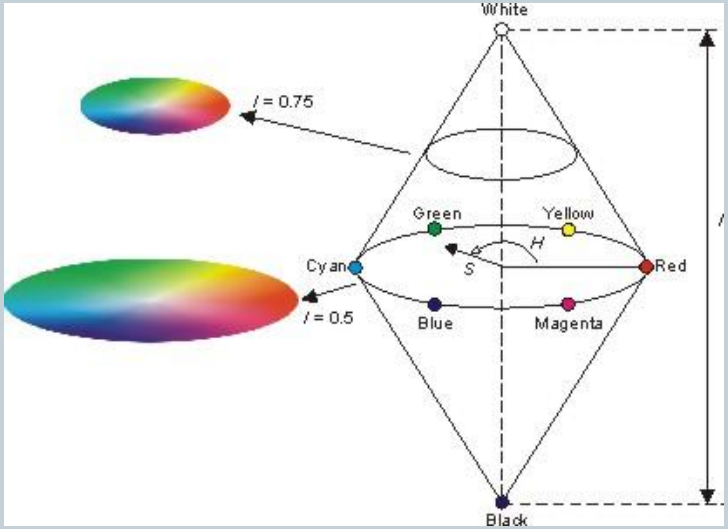




Rappresentazione del colore

Sistemi di rappresentazione di colore (color space)

- **HSI:** Il colore è scomposto in tre componenti: *hue (H),* rappresentante il colore, *saturation* (S), rappresentante la quantità di colore presente, e *intensity* (I), indicante la luminosità. Lo spazio in cui i tre valori sono resi graficamente è un **bi-cono in** cui l'asse centrale rappresenta i valori di grigio.



Esempio di rappresentazione dei colori (RBG, HSI, HSV, HSL)

Color	*R*	*G*	*B*	*H*	*V*	*L*	*I*	S_{HSV}	S_{HSL}	S_{HSI}
	1.000	1.000	1.000	n/a	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
	0.500	0.500	0.500	n/a	0.500	0.500	0.500	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	n/a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	1.000	0.000	0.000	0°	1.000	0.500	0.333	1.000	1.000	1.000
	0.750	0.750	0.000	60.0°	0.750	0.375	0.500	1.000	1.000	1.000
	0.000	0.500	0.000	120.0°	0.500	0.250	0.167	1.000	1.000	1.000
	0.500	1.000	1.000	80.0°	1.000	0.750	0.833	0.500	1.000	0.400
	0.500	0.500	1.000	240.0°	1.000	0.750	0.667	0.500	1.000	0.250
	0.750	0.250	0.750	300.0°	0.750	0.500	0.583	0.667	0.500	0.571
	0.628	0.643	0.142	61.8°	0.643	0.393	0.471	0.779	0.638	0.699
	0.255	0.104	0.918	251.1°	0.918	0.511	0.426	0.887	0.832	0.756
	0.116	0.675	0.255	134.9°	0.675	0.396	0.349	0.828	0.707	0.667
	0.941	0.785	0.053	49.5°	0.941	0.497	0.593	0.944	0.893	0.911
	0.704	0.187	0.897	283.7°	0.897	0.542	0.596	0.792	0.775	0.686
	0.931	0.463	0.316	14.3°	0.931	0.624	0.570	0.661	0.817	0.446
	0.998	0.974	0.532	56.9°	0.998	0.765	0.835	0.467	0.991	0.363
	0.099	0.795	0.591	162.4°	0.795	0.447	0.495	0.875	0.779	0.800
	0.211	0.149	0.597	248.3°	0.597	0.373	0.319	0.750	0.601	0.533
	0.495	0.493	0.721	240.5°	0.721	0.607	0.570	0.316	0.290	0.135

Rappresentazione del colore

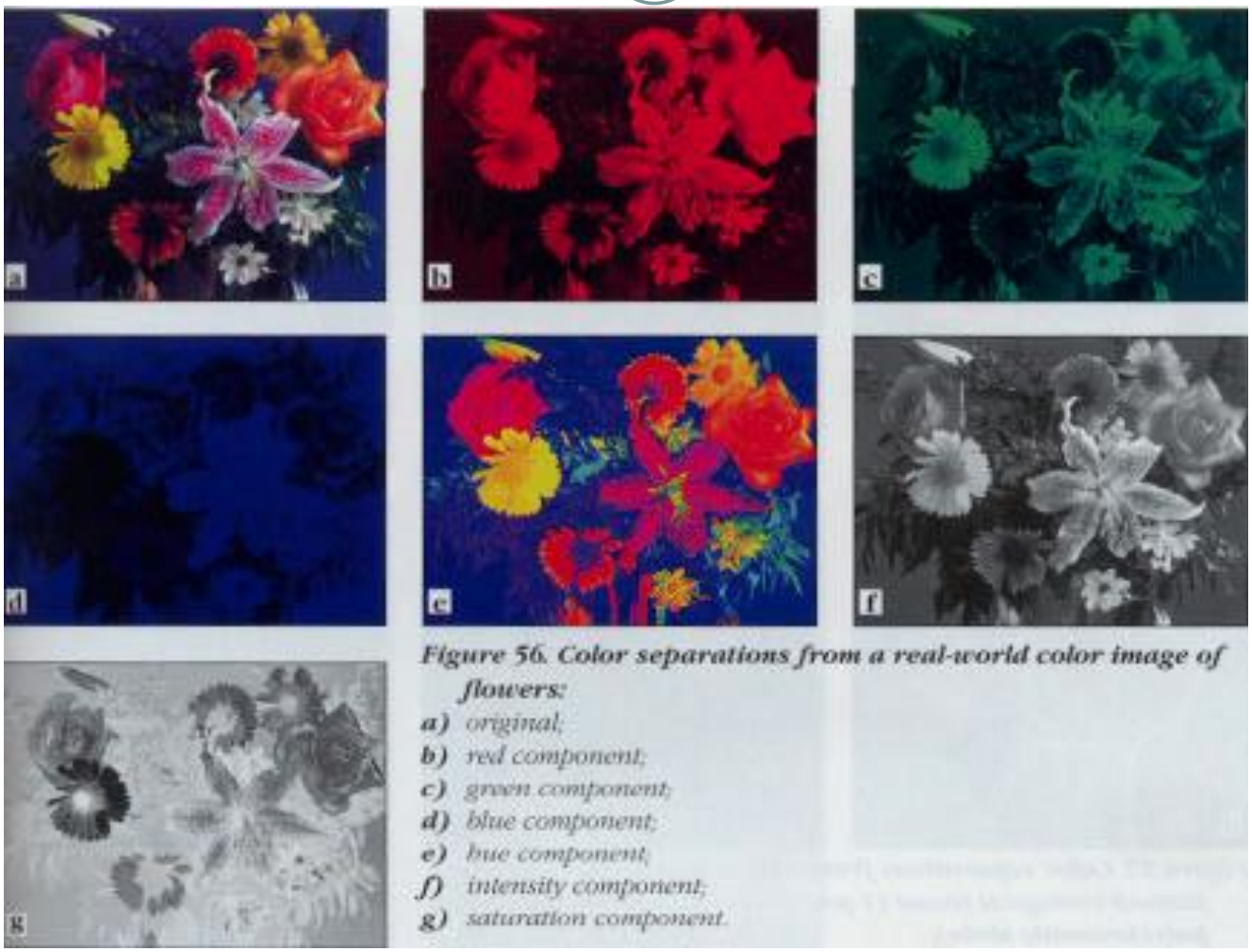


Figure 56. Color separations from a real-world color image of flowers:

a) *original;*
b) *red component;*
c) *green component;*
d) *blue component;*
e) *hue component;*
f) *intensity component;*
g) *saturation component.*

Formati di un'immagine

GIF (*Graphics Interchange Format)*

- Creato nel **1987, è uno dei formati standard più usati e** supportati. Ogni browser grafico può rappresentarlo.
- La compressione del formato GIF è di tipo *lossless (si basa su LZW)*. Supporta colori a **8 bit**: un'immagine GIF può avere **256** colori.
- Nel **1989 il formato viene aggiornato (GIF 89a) includendo tre** varianti:
  - GIF **normale**
  - GIF **trasparente**
  - GIF **animata**

Formati di un'immagine

JPEG (*Joint Photographic Experts Group)*

- Standard creato nel **1990 con l'intenzione di migliorare e** sostituire i formati di immagine già esistenti. Ogni browser grafico è in grado di rappresentarlo.
- La compressione JPEG è di tipo "ibrido", combina infatti DCT e quantizzazione
- Supporta colori a **8 e a 24 bit**: un'immagine JPEG può avere da 256 a oltre 16.7 milioni di colori.
- Un file JPEG occupa meno spazio di un file GIF della stessa immagine, JPEG usa infatti un rapporto di compressione più elevato. L'algoritmo di compressione JPEG e' più complesso rispetto a GIF e richiede un tempo di decompressione dell'immagine maggiore.

Codifica JPEG

JPEG standard fornisce quattro modi di operare:

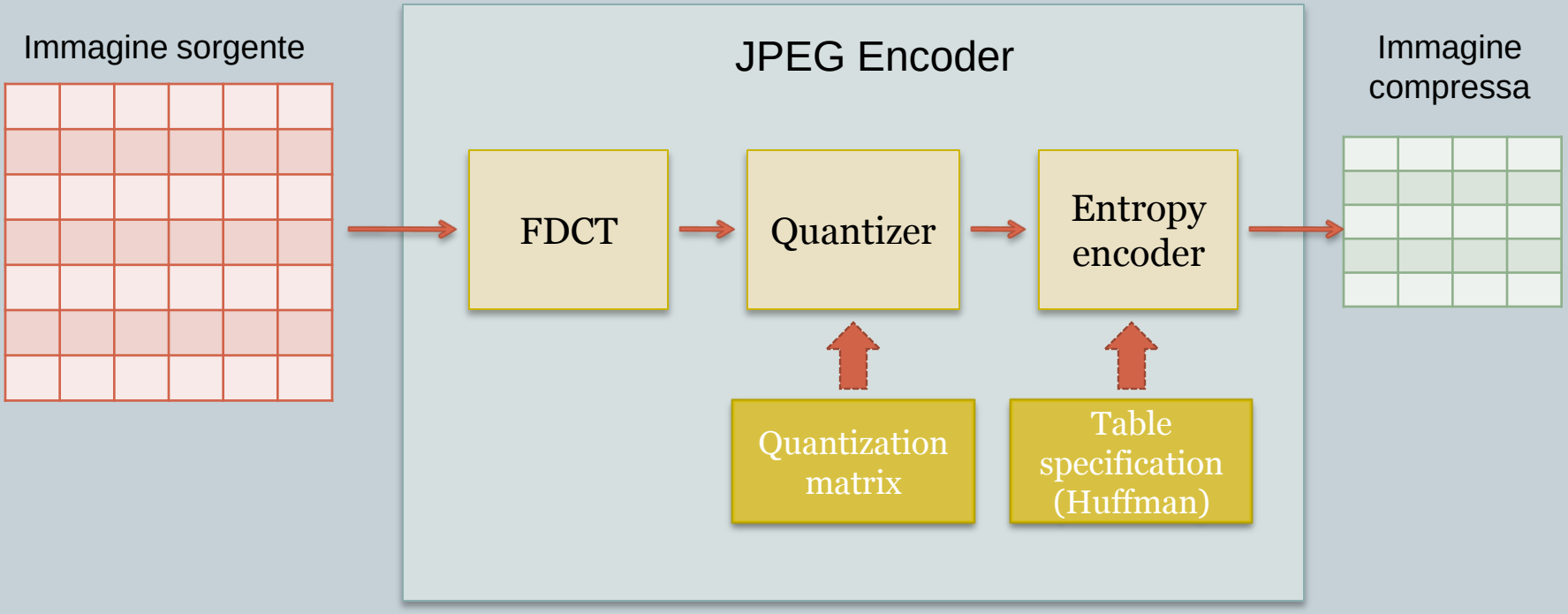
- Codifica **sequenziale** basata su DCT: ogni componente dell'immagine è codificata in un singolo scan (**left-to-right, top-to-bottom**)
- Codifica **progressiva** basata su DCT: l'immagine è codificata in scan successivi al fine di produrre una decodifica della stessa più veloce in caso di tempi di trasmissione elevati
- Codifica **lossless**: l'immagine è codificata in modo da garantirne un'esatta riproduzione
- Codifica **gerarchica**: l'immagine è codificata in multipla risoluzione

Codifica JPEG sequenziale

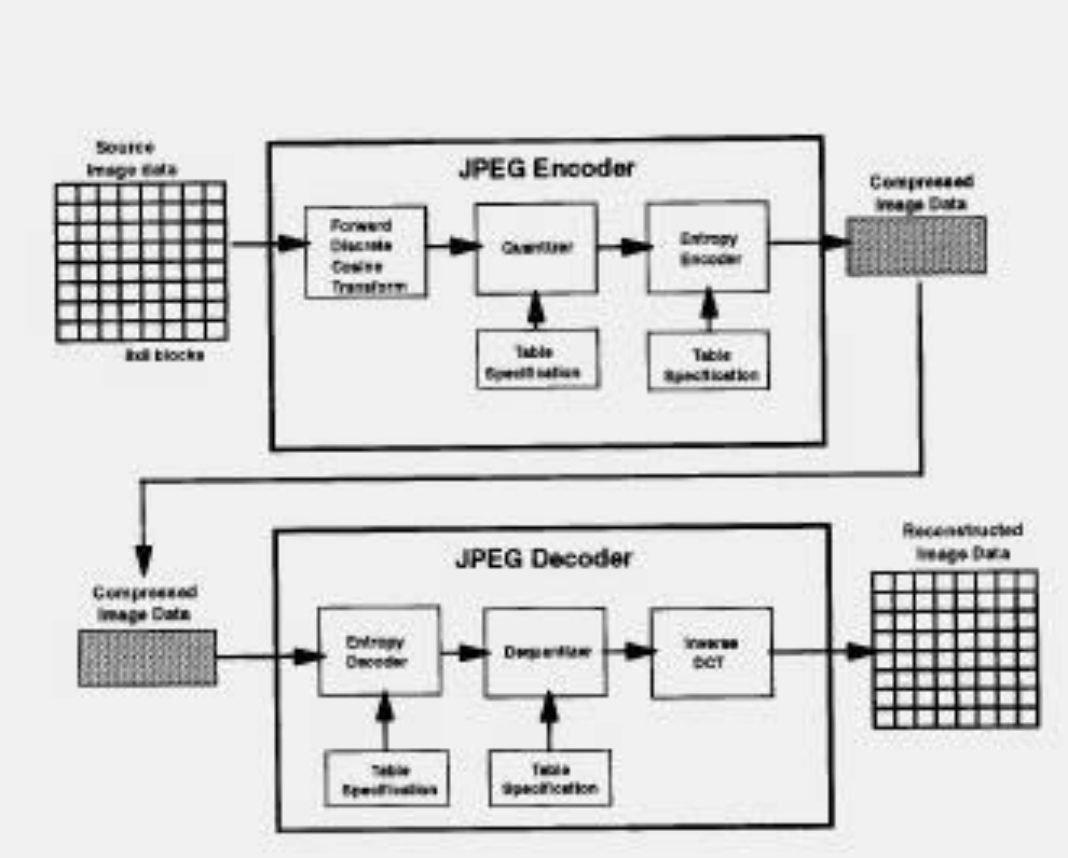
Codifica JPEG sequenziale su singola componente

- **JPEG encoder**
  - ***Forward* Descrete Cosine Transform (FDCT)**
  - *Quantizer*
  - *Entropy Encoder*
- **JPEG decoder**
  - *Entropy Decoder*
  - *Dequantizer*
  - ***Inverse* DCT (IDCT)**

Schema codifica JPEG



Schema completo



JPEG - Encoder

Passi principali

Fase 1 – Partizionamento dell'immagine

a. I pixel dell'immagine originale sono raggruppati in **blocchi di 8x8** elementi.
b. Gli elementi di ciascuno blocco sono **shiftati** da interi senza segno, nel range $[0, 2^p - 1]$, a interi con segno, nell'intervallo $[-2^{p-1}, 2^{p-1} - 1]$ (con p, precisione dell'immagine).

JPEG – Encoder (FDCT)

Fase 2 – Trasformazione FDCT

a. Ogni blocco 8x8 può essere visto come un segnale discreto a 64 punti. Tale segnale è dato in input alla trasformata FDCT, la cui definizione matematica è la seguente:

$$F(u,v) = \frac{1}{4} C(u) C(v) \sum_{x=0}^{7} \sum_{y=0}^{7} f(x,y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

dove C(u) e C(v) sono così definiti:

$$C(u), C(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & se \;\; u, v = 0 \\ 1 & altrimenti \end{cases}$$

JPEG Encoder (FDCT)

L'output della FDCT è un insieme di 64 coefficienti (*DCT coefficient*) che rappresentano le ampiezze dei segnali base in cui il segnale originale è stato scomposto.
Il coefficiente con valore di frequenza **nullo** in entrambe le dimensioni, *F(0, 0)*, è chiamato ***DC**-coefficient* (***D**irect*) e i restanti 63 ***AC**-coefficient* (***A**lternating*)

$$f(x,y) = \frac{1}{4}\sum_{u=0}^{7}\sum_{v=0}^{7} C(u)C(v)F(u,v)\cos\frac{(2x+1)u\pi}{16}\cos\frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

Esempio FDCT

$$\begin{bmatrix} 52 & 55 & 61 & 66 & 70 & 61 & 64 & 73 \\ 63 & 59 & 55 & 90 & 109 & 85 & 69 & 72 \\ 62 & 59 & 68 & 113 & 144 & 104 & 66 & 73 \\ 63 & 58 & 71 & 122 & 154 & 106 & 70 & 69 \\ 67 & 61 & 68 & 104 & 126 & 88 & 68 & 70 \\ 79 & 65 & 60 & 70 & 77 & 68 & 58 & 75 \\ 85 & 71 & 64 & 59 & 55 & 61 & 65 & 83 \\ 87 & 79 & 69 & 68 & 65 & 76 & 78 & 94 \end{bmatrix}$$

$x \longrightarrow$

$$\begin{bmatrix} -76 & -73 & -67 & -62 & -58 & -67 & -64 & -55 \\ -65 & -69 & -73 & -38 & -19 & -43 & -59 & -56 \\ -66 & -69 & -60 & -15 & 16 & -24 & -62 & -55 \\ -65 & -70 & -57 & -6 & 26 & -22 & -58 & -59 \\ -61 & -67 & -60 & -24 & -2 & -40 & -60 & -58 \\ -49 & -63 & -68 & -58 & -51 & -60 & -70 & -53 \\ -43 & -57 & -64 & -69 & -73 & -67 & -63 & -45 \\ -41 & -49 & -59 & -60 & -63 & -52 & -50 & -34 \end{bmatrix}$$

$y \downarrow$

$u \longrightarrow$

***DC**-coefficient*

***AC**-coefficient*

$$\begin{bmatrix} -415 & -30 & -61 & 27 & 56 & -20 & -2 & 0 \\ 4 & -22 & -61 & 10 & 13 & -7 & -9 & 5 \\ -47 & 7 & 77 & -25 & -29 & 10 & 5 & -6 \\ -49 & 12 & 34 & -15 & -10 & 6 & 2 & 2 \\ 12 & -7 & -13 & -4 & -2 & 2 & -3 & 3 \\ -8 & 3 & 2 & -6 & -2 & 1 & 4 & 2 \\ -1 & 0 & 0 & -2 & -1 & -3 & 4 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -4 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$v \downarrow$

JPEG Encoder (FDCT)

FDCT comprime l'immagine concentrando la maggior parte dell'energia contenuta nel segnale nelle componenti di bassa frequenza.

Si tratta di una compressione *lossless*.

E' da notare che, per un tipico blocco, buona parte delle frequenze spaziali o sono nulle o sono prossime allo zero e quindi è possibile una ulteriore compressione che si realizza nella fase successiva.

JPEG Encoder (Quantizzazione)

Fase 3 – Quantizzazione

- I 64 coefficienti DCT sono quantizzati uniformemente mediante una Tabella di Quantizzazione a 64 elementi rappresentati da interi nell'intervallo [1-255].
- La quantizzazione riduce l'ampiezza dei coefficienti DCT il cui contributo è nullo o comunque basso per la qualità dell'immagine. La quantizzazione scarta dunque informazione che non è rilevante al fine della visualizzazione. Si tratta di compressione *lossy*.

JPEG Encoder (Quantizzazione)

- La quantizzazione è un **mapping molti-a-uno** (*lossy*) e si calcola mediante l'equazione:

$$F_q(u,v) = Round\left(\frac{F(u,v)}{Q(u,v)}\right)$$

- dove Q(u,v) rappresenta il coefficiente di quantizzazione associato al coefficiente DCT.

JPEG Encoder (Quantizzazione)

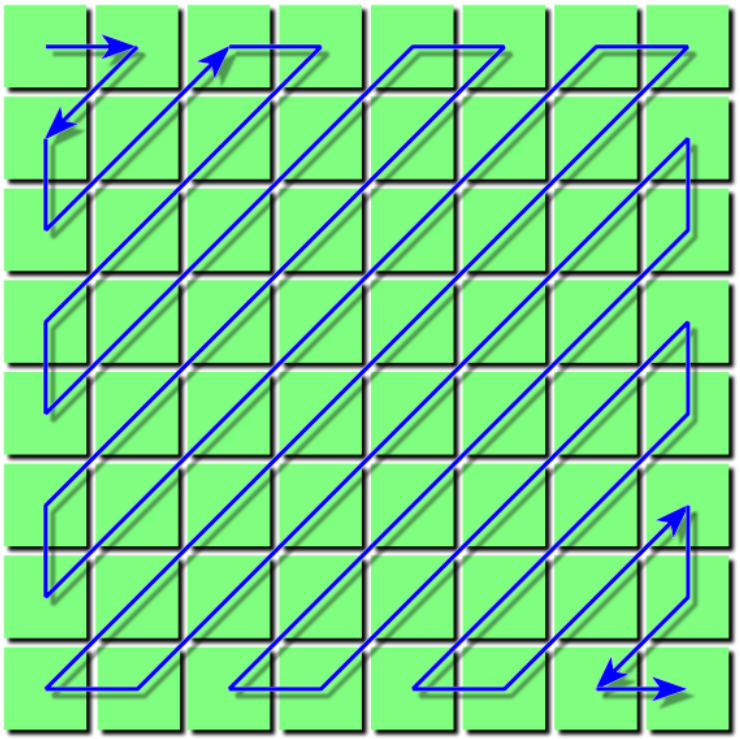
Tabelle di quantizzazione: esempio.

$$\begin{bmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{bmatrix}$$

JPEG Encoder (Quantizzazione)

- A questo punto il coefficiente DC viene trattato separatamente dai 63 coefficienti AC:
  - esiste infatti una forte correlazione tra i valori DC dei blocchi (8x8) adiacenti
  - il coefficiente quantizzato viene quindi codificato come differenza rispetto al valore DC del blocco adiacente
- Infine, tutti i coefficienti quantizzati (DC+AC) sono ordinati in una sequenza a **"zig-zag".** Questo ordine facilita la successiva fase di *Entropy Encoding* ponendo i coefficienti di bassa frequenza (più probabilmente non nulli) prima di quelli di alta frequenza.

JPEG Encoder (Quantizzazione)



JPEG Encoder (Quantizzazione)

$$\begin{bmatrix} -415 & -30 & -61 & 27 & 56 & -20 & -2 & 0 \\ 4 & -22 & -61 & 10 & 13 & -7 & -9 & 5 \\ -47 & 7 & 77 & -25 & -29 & 10 & 5 & -6 \\ -49 & 12 & 34 & -15 & -10 & 6 & 2 & 2 \\ 12 & -7 & -13 & -4 & -2 & 2 & -3 & 3 \\ -8 & 3 & 2 & -6 & -2 & 1 & 4 & 2 \\ -1 & 0 & 0 & -2 & -1 & -3 & 4 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -4 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$u \longrightarrow$

$v \downarrow$

$$\begin{bmatrix} -26 & -3 & -6 & 2 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 5 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

-26 -3 0 -3 -2 -6 2 -4 1 -4 1 1 5 1 2 -1 1 -1 2 0 0 0 0 0 -1 -1 0 0 ……

JPEG Encoder (Entropy Encoder)

Fase 3 – Entropy encoder

- *L'Entropy Encoder aggiunge ulteriore compressione (lossless) ai* coefficienti DCT quantizzati codificandoli in modo più compatto.
- Il processo si basa sulla **codifica di Huffman:**
  - La sequenza "zig-zag" di coefficienti DCT quantizzati è convertita in una **sequenza intermedia di simboli**
  - La sequenza intermedia è codificata in una **sequenza binaria** mediante l'uso di tabelle (**Tabelle di Huffman)**

JPEG Encoder (Entropy Encoder)

- Nella sequenza intermedia di simboli, ogni coefficiente AC è rappresentato da una coppia di simboli:
  - Simbolo-1 (**RUNLENGTH, SIZE) e**
  - Simbolo-2 (**AMPLITUDE)**
- RUNLENGTH rappresenta il numero di valori nulli che precedono un valore non nullo; SIZE indica il numero di bit necessari a codificare l'ampiezza (AMPLITUDE).

JPEG Encoder (Entropy Encoder)

- Esempio: Se la sequenza di coefficienti AC è:

  0, 0, 0, 0, 0, 0, 476

  allora il simbolo rappresentativo per il coefficiente AC 476 risulta essere (2^9=512):

  (6,9)(476)

JPEG Encoder (Entropy Encoder)

- Nella sequenza intermedia di simboli il coefficiente DC è rappresentato invece dalla coppia:
  - Simbolo-1 (**SIZE) e**
  - Simbolo-2 (**AMPLITUDE)**

JPEG Encoder (Entropy Encoder)

- La sequenza di simboli intermedia viene poi convertita in sequenza binaria:
  - Ogni Simbolo-1 (sia DC che AC) è codificato con un Variable-Length Code (VLC)
  - I Simboli-2 sono codificati usando un Variable-Length Integer (VLI)

JPEG Encoder (Quantizzazione)

-26 -3 0 -3 -2 -6 2 -4 1 -4 1 1 5 1 2 -1 1 -1 2 0 0 0 0 0 -1 -1 0 0 ……

Sequenza simboli intermedia

(5)(-26),(0,2)(-3),(1,2)(-3),(0,2)(-2),(0,3)(-6),(0,2)(2),(0,3)(-4),(0,1)(1),(0,3)(-4),(0,1)(1),(0,1)(1),(0,3)(5),(0,1)(1),(0,2)(2),(0,1)(-1),(0,1)(1)(0,1)(-1),(0,2)(2),(5,1)(-1),(0,1)(-1),(0,0)

Sequenza di bit (dipende dalle tabelle di Huffman)

(01)….

JPEG Decoder

Il *JPEG Decoder esegue i* ***processi inversi*** *rispetto quelli applicati nel JPEG Encoder* invertendone l'ordine:

- *Entropy Decoder:* prende la sequenza binaria e la trasforma, prima in sequenza intermedia di simboli, poi nella sequenza a "zig-zag" rappresentante i 64 coefficienti DCT quantizzati.
- *Dequantizer: prende i 64 coefficienti quantizzati DCT e li* trasforma in 64 coefficienti DCT semplici seguendo l'espressione:

$$F_q^{INV}(u,v) = F_q(u,v)Q(u,v)$$

JPEG Decoder

- *Inverse DCT (IDCT)*: prende in input i 64 coefficienti DCT e ricostruisce in output il segnale discreto di 64 punti rappresentante un blocco 8x8 dell'immagine originale.

$$f(x,y) = \frac{1}{4}\sum_{u=0}^{7}\sum_{v=0}^{7} C(u)C(v)F(u,v)\cos\frac{(2x+1)u\pi}{16}\cos\frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

$$C(u), C(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & se\ \ u,v = 0 \\ 1 & altrimenti \end{cases}$$

Esempi di compressione

2.6:1

15:1

23:1

46:1