



Università degli Studi di Bergamo



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA E SCIENZE APPLICATE

RETI INTERNET MULTIMEDIALI

Codifica delle Immagini: JPEG, TIFF, Facsimile

Il documento è adattato da materiale cortesemente messo a disposizione dal Prof. Stefano Paris e dal Prof. Vittorio Trecordi

JPEG

Joint Photographic Experts Group

Introduzione

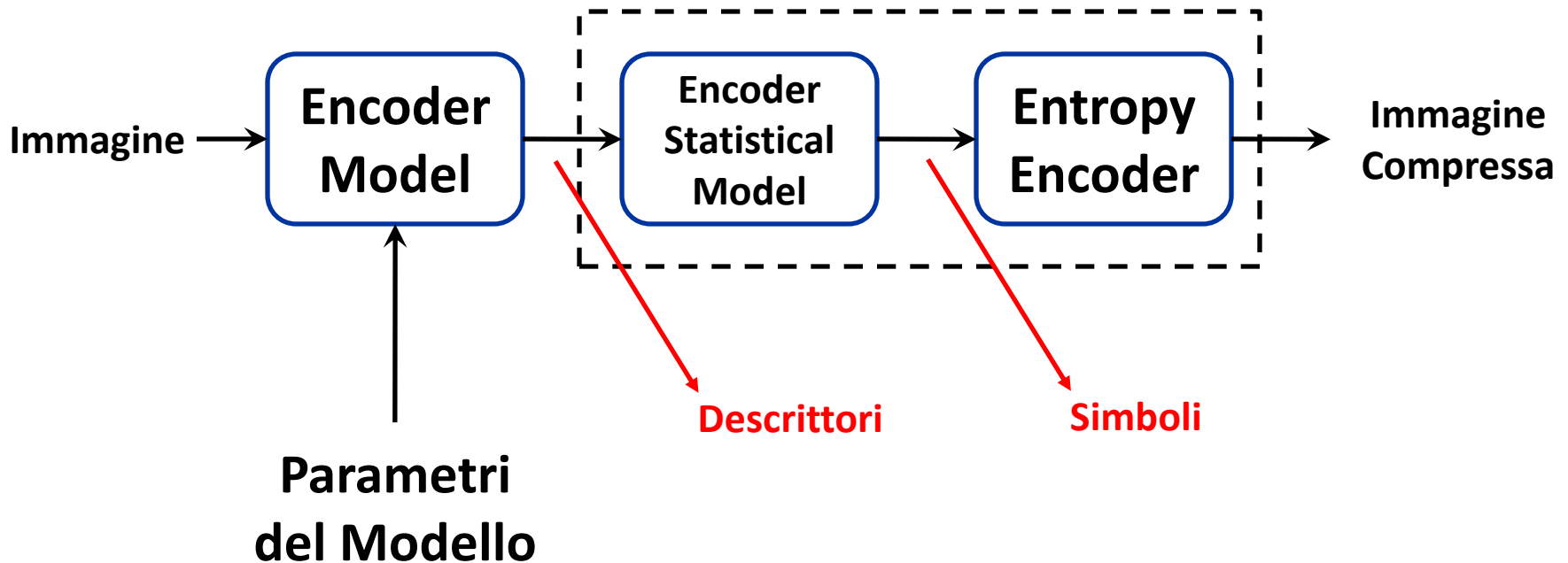
- JPEG: Joint Photographic Experts Group
 - Gruppo di lavoro congiunto tra ISO e ITU-T
 - Nato nel 1986
- Standard di compressione con perdita (compressione lossy) delle immagini
- La compressione e decompressione sono eseguite in modo efficiente e rapido
- Non definisce un unico formato per il file che contiene i dati che rappresentano l'immagine
 - Esistono diversi formati che supportano JPEG

Introduzione

- JPEG sfrutta le caratteristiche di percezione visiva dell'occhio umano
- Può raggiungere un rapporto di compressione elevato, oltre 20:1
- Garantisce un buona qualità dell'immagine anche ad alti rapporti di compressione
- La codifica JPEG è applicabile a qualsiasi immagine
 - Color e grayscale (variazione continua)
 - Composta da un massimo di 65535 linee e 65535 pixel per linea

Introduzione

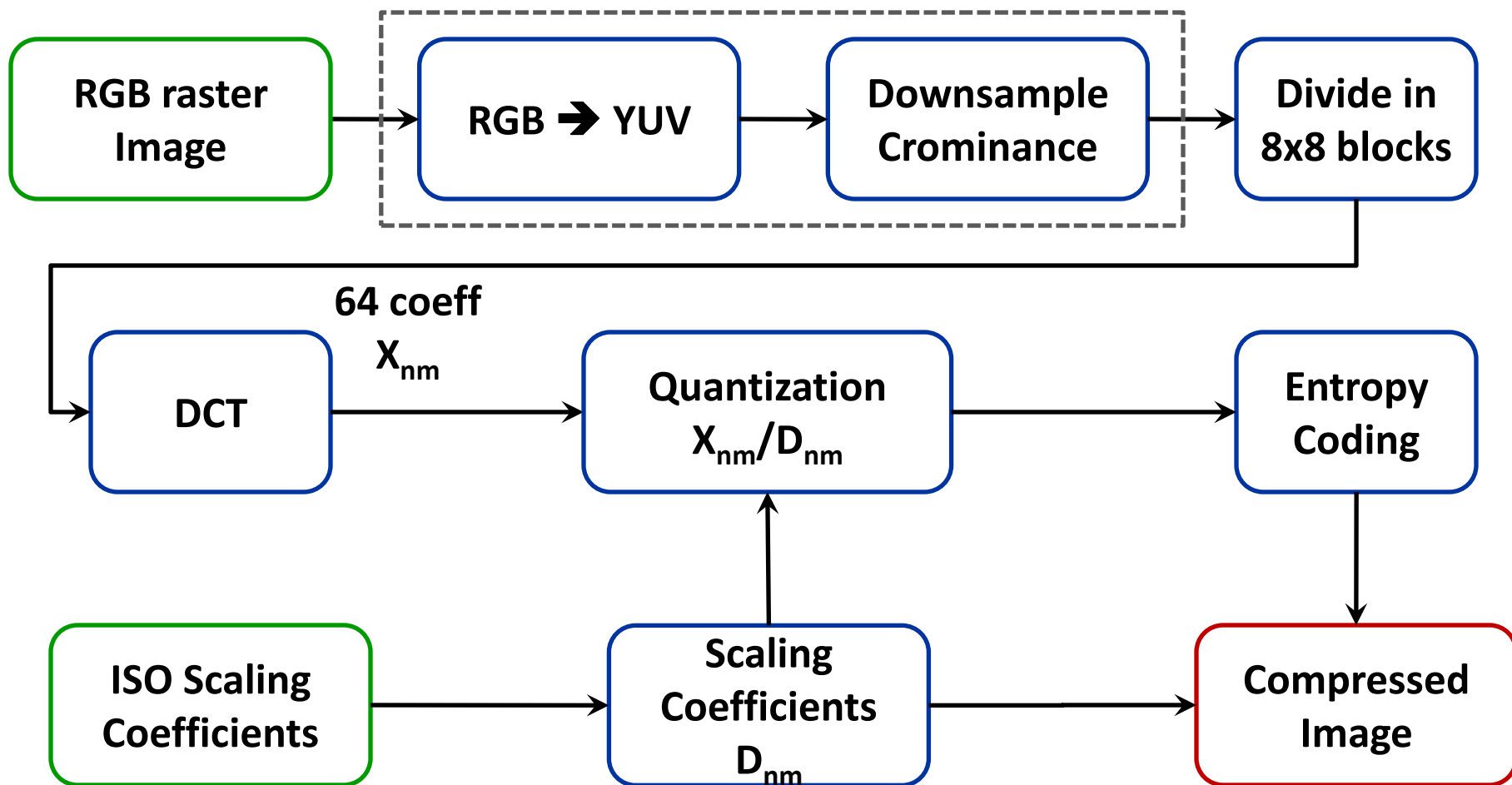
- La codifica JPEG è composta da 3 componenti principali



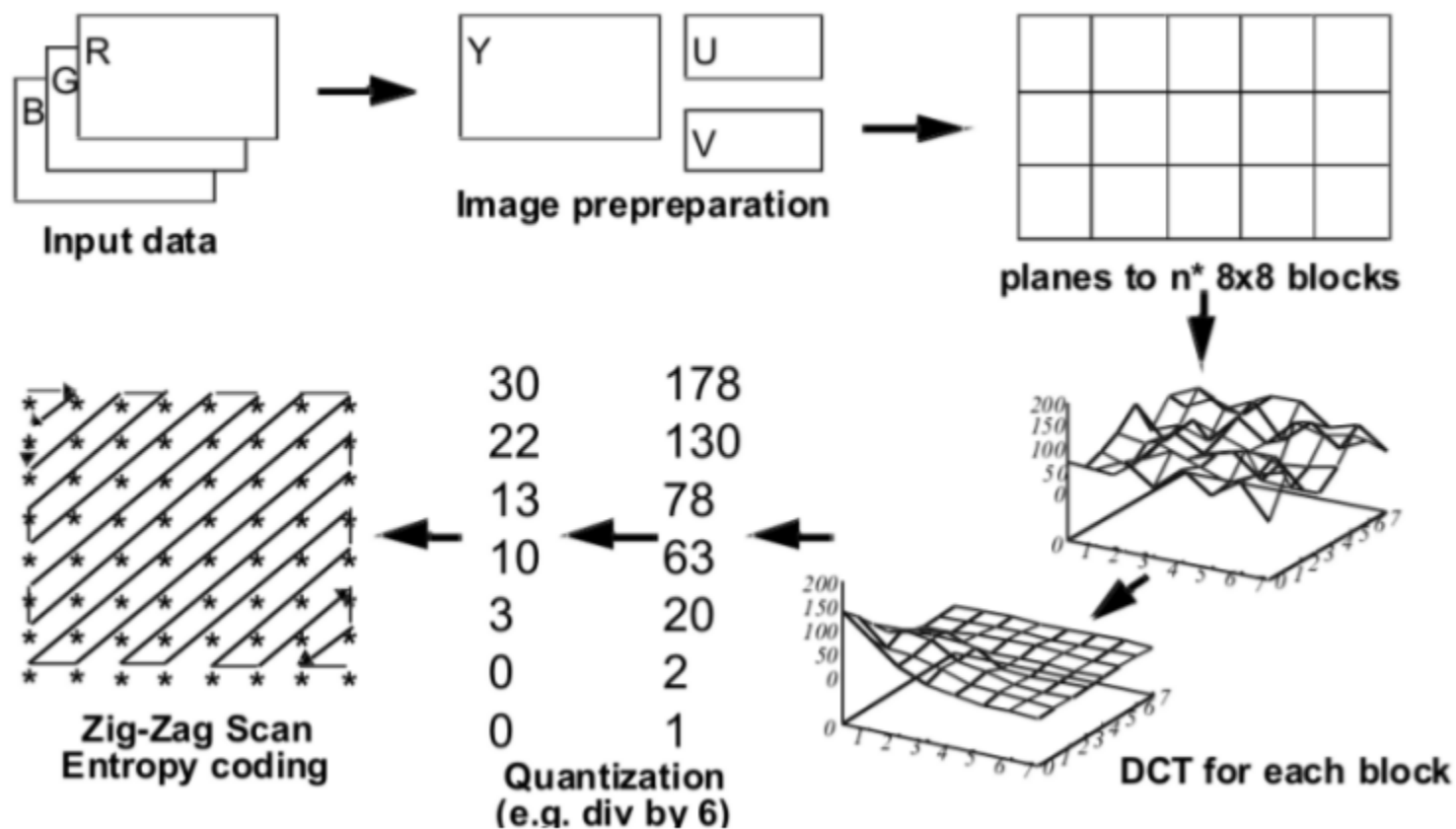
Introduzione

- Lo standard JPEG definisce 4 diversi tipi di modalità operative (tipi di codifica)
 - Sequential DCT-based (standard) encoding
 - Ogni componente dell'immagine è codificata in una sola scansione
 - Progressive DCT-based encoding
 - Sequential Lossless encoding
 - Hierarchical encoding
- Inoltre sono supportati 2 diversi tipi di codifica lossless (entropy coding)
 - Codifica di Huffman
 - Codifica Aritmetica

Compressione JPEG (sequenziale)



Compressione JPEG (sequenziale)



Compressione JPEG (sequenziale)

- Algoritmo di compressione composto da 5 fasi
 1. Trasformare l'immagine dalla rappresentazione RGB alla rappresentazione YUV e sotto-campionamento della crominanza [Opzionale]
 2. Dividere ogni componente (RGB o YUV) in blocchi di 8x8 elementi ed effettuare un'operazione di «shift to zero mean»
 3. Applicare la Discrete Cosine Transform (DCT) a ogni blocco 8x8 (spazio → frequenza)
 4. Quantizzare i coefficienti della DCT, dividendo ognuno di essi per un valore intero (dato come input) e approssimando all'intero più vicino
 5. Eseguire una Codifica di Huffman (o Codifica Aritmetica) dei coefficienti ottenuti al passo precedente seguendo una scansione a zig-zag

Fase 1a: Conversione RGB → YUV

- L'immagine sorgente è composta da una matrice raster RGB (Red, Green, Blue), che utilizza tre valori numerici (ognuno da 8 bit) per rappresentare ogni pixel dell'immagine
- La rappresentazione RGB viene trasformata in rappresentazione YUV, in cui il colore associato ad ogni pixel è rappresentato in termini di luminanza (luminosità) e cromaticanza (colore)
 - L'occhio umano è più sensibile a variazioni nella componente di luminosità Y rispetto a variazioni nelle componenti di cromaticanza U e V
- La trasformazione RGB → YUV non è parte integrante della compressione JPEG, ma permette di ottenere un migliore rapporto di compressione

Fase 1a: Conversione RGB → YUV

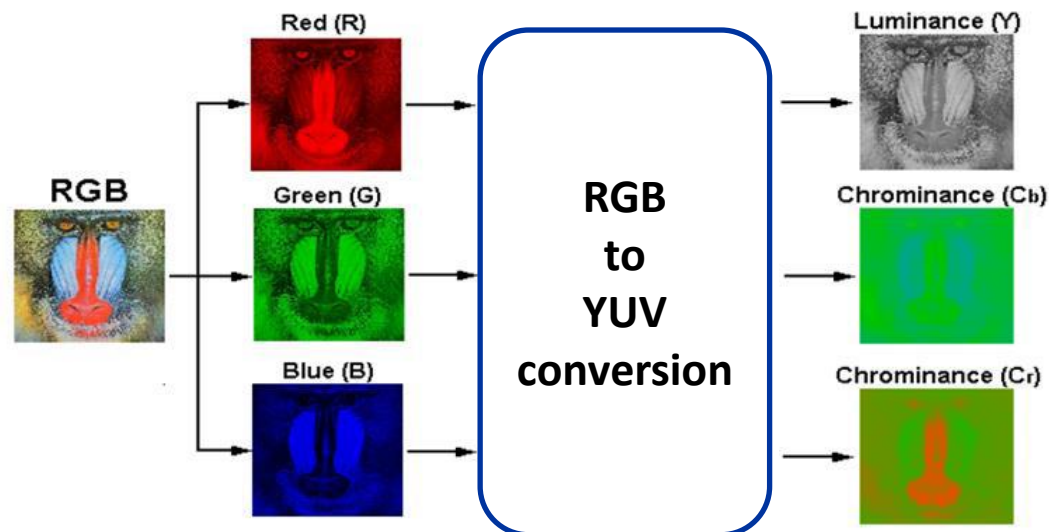
- La trasformazione è eseguita semplicemente attraverso un'operazione aritmetica (combinazione lineare)
 - La formula utilizzata specifica il contributo relativo di ognuno dei tre colori alle componenti di luminosità e cromaticità
- Esistono diverse versioni della formula di conversione, a seconda del dispositivo utilizzato per visualizzare l'immagine

$$\begin{cases} Y = 0.299 \cdot R + 0.586 \cdot G + 0.114 \cdot B \\ U = -0.169 \cdot R - 0.331 \cdot G + 0.5 \cdot B \\ V = 0.5 \cdot R - 0.419 \cdot G - 0.081 \cdot B \end{cases}$$

Fase 1a: Conversione RGB → YUV

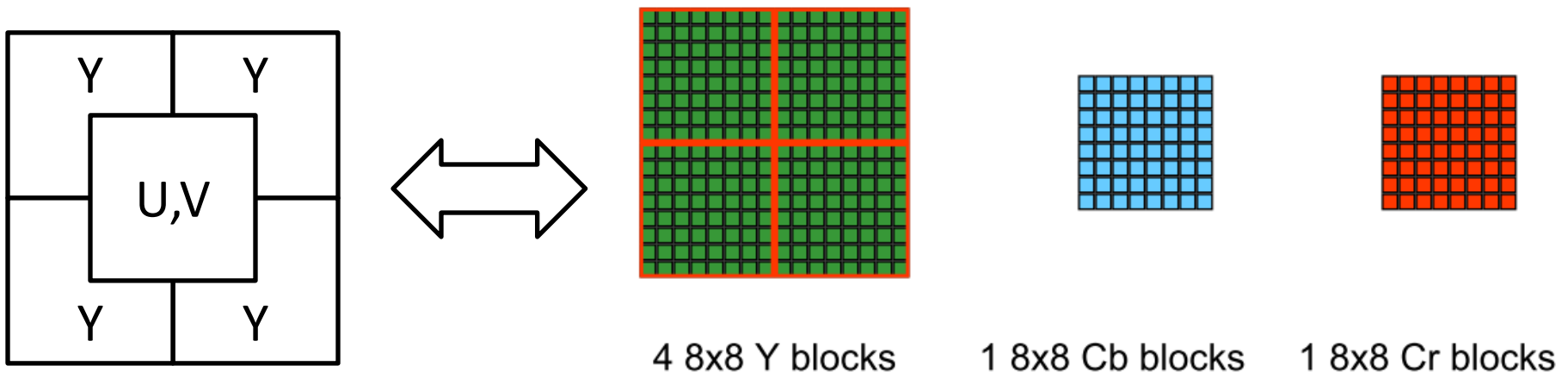
- La trasformazione da RGB a YUV (o YCrCb) viene effettuata per sfruttare la diversa sensibilità dell'occhio alla luminosità rispetto alla cromaticità

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_r \\ C_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.586 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



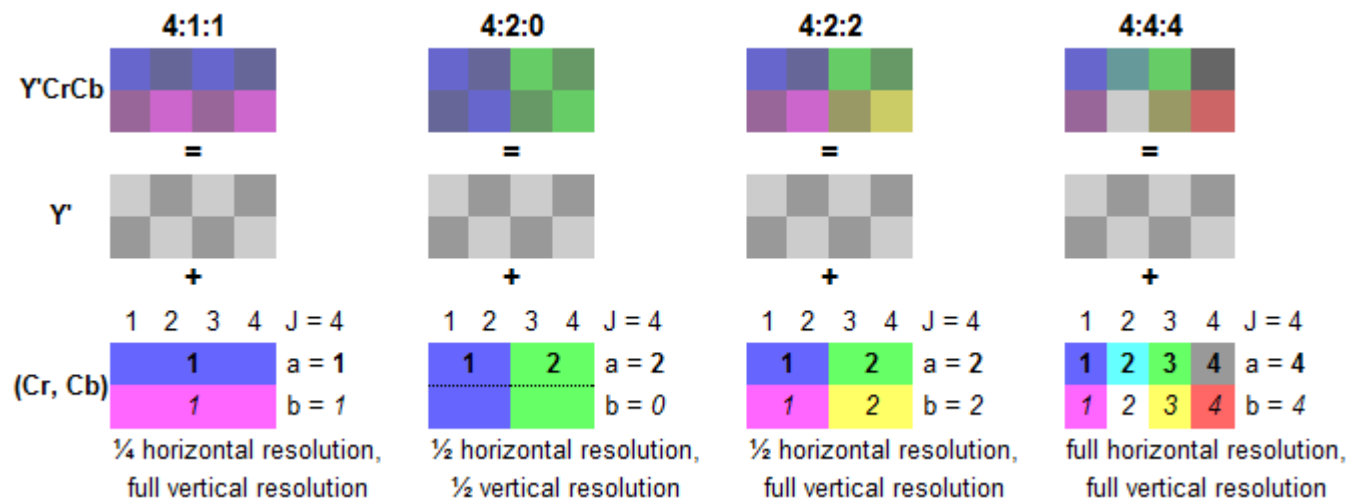
Fase 1b: Sotto-campionamento

- Poiché l'occhio umano è più sensibile alla luminosità, le componenti di cromaticità possono essere sotto-campionate
- Esistono diverse alternative di sotto-campionamento
- JPEG usa un sottocampionamento 4:2:0



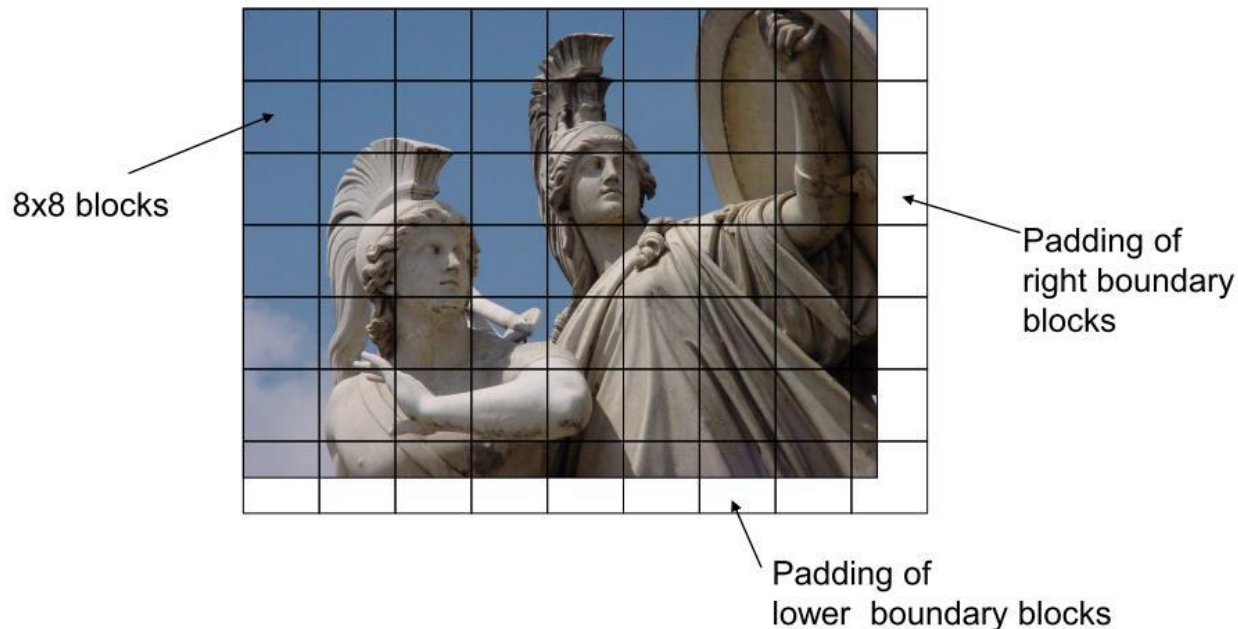
Fase 1b: Sotto-campionamento

- Il sotto-campionamento YUV viene rappresentato usando una notazione $J: a: b$
 - Ci si riferisce a un blocco di riferimento alto 2 e lungo J elementi (usualmente $J = 4$)
 - Il termine a indica il numero di elementi di crominanza nella prima riga del blocco di riferimento
 - Il termine b indica il numero di elementi di crominanza che cambia nella seconda riga del blocco di riferimento rispetto alla prima riga



Fase 2a: Divisione in blocchi 8x8

- L'immagine viene scomposta in blocchi di dimensione 8 pixel x 8 pixel
- Se l'immagine non può essere scomposta perfettamente in blocchi di dimensione 8x8, vengono aggiunti ulteriori pixel (padding)



Fase 2b: Shift to zero mean

- I valori associati ai pixel sono traslati in un range centrato intorno allo zero
- Ad esempio, per un'immagine con componenti RGB o YUV a 8 bit, si passa da valori interi positivi nell'intervallo $[0,255]$ a valori interi con segno nell'intervallo $[-128,127]$
- Questa operazione corrisponde a rinormalizzare il coefficiente DC della trasformata DCT (effettuata nel prossimo punto)
 - La dinamica del coefficiente DC è ridotta
 - I coefficienti DCT possono essere elaborati più facilmente

Fase 3: DCT

- La DCT trasforma i dati dell'immagine dal dominio dello spazio a quello delle frequenze
 - Il dominio dello spazio mostra la variazione di intensità del colore nello spazio
 - Il dominio delle frequenze mostra quanto rapidamente l'intensità del colore varia

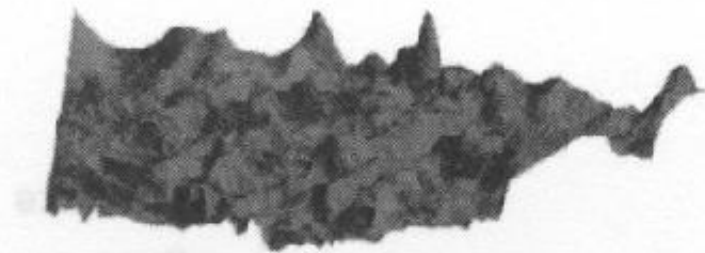


Figure 5.4

Figure 5.4: A grayscale image of a map of Italy, showing the geographical outline and internal details like roads and terrain.

Fase 3: DCT

- La rappresentazione nel dominio delle frequenze è più semplice da analizzare
 - Si distingue più facilmente l'informazione che è essenziale ai fini della percezione umana da quella che risulta invece superflua
- L'occhio umano non è molto sensibile a repentini cambiamenti del colore nelle immagini
 - Componenti in alta frequenza possono essere filtrate

Fase 3: DCT

- Input: blocco (matrice) composto da 8x8 elementi
($N = 8$)

$[p_{kh}]$ con $0 \leq k < 8, 0 \leq h < 8$

- Output: matrice composta dai coefficienti in frequenza della DCT

$[X_{nm}]$ $0 \leq n < 8, 0 \leq m < 8$

$$X_{nm} = \frac{1}{\sqrt{2N}} C_n C_m \sum_{k=0}^7 \sum_{h=0}^7 p_{kh} \cos\left[\frac{(2k+1)n\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2h+1)m\pi}{2N}\right]$$

$$C_n C_m = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & n, m = 0 \\ 1 & n, m \neq 0 \end{cases}$$

Fase 4: Quantizzazione

- La trasformata DCT non comprime il contenuto informativo, lo trasforma solamente (operazione reversibile)
- E' possibile ricostruire l'immagine originaria anti-trasformando se si hanno a disposizione tutti i coefficienti della trasformata
- I coefficienti della trasformata sono valori reali (floating-point)
 - E' necessario arrotondarli a valori interi, e questo introduce perdita di informazione
- Essi vengono inoltre scalati dividendoli per opportuni coefficienti D_{nm} (tabella ISO)

$$X_{nm} \rightarrow \frac{X_{nm}}{D_{nm}}$$

Fase 4: Quantizzazione

- La quantizzazione dei coefficienti viene eseguita in modo non uniforme
 - I coefficienti X_{nm} sono scalati per mezzo di coefficienti D_{nm} al variare di n e m
- I coefficienti D_{nm} utilizzati per scalare i coefficienti X_{nm} della DCT sono trasmessi insieme all'immagine compressa

$$F_{nm} = \text{round}\left(\frac{X_{nm}}{D_{nm}}\right)$$

Fase 4: Quantizzazione

- Lo scopo della quantizzazione è di ridurre il numero di bit necessari a rappresentare l'immagine compressa
- Alti valori dei coefficienti D_{nm} permettono di ridurre il contenuto informativo
 - Alti valori dei coefficienti D_{nm} vengono utilizzati per le alte frequenze
- Esistono tabelle standard dei coefficienti D_{nm}
 - Sono basate su studi di percezione visiva
 - Massimizzare il rapporto di compressione con una minima distorsione della percezione visiva

Fase 4: Quantizzazione

Table 9.1 The Luminance Quantization Table

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

Table 9.2 The Chrominance Quantization Table

17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

Fase 4: Quantizzazione

- Possono essere utilizzate diverse tabelle/matrici di quantizzazione (variando i valori di default)
 - Trade-off tra qualità e rapporto di compressione
 - Alti valori dei coefficienti D_{nm} implicano maggiore compressione e minore qualità
- I valori utilizzati dei coefficienti D_{nm} devono essere inviati al decodificatore

Blocchi Originali e Codificati DCT

■ Blocco altamente omogeneo

Luminanza (Y) del blocco 8x8



p_{kh}

200	202	189	188	189	175	175	175
200	203	198	188	189	182	178	175
203	200	200	195	200	187	185	175
200	200	200	200	197	187	187	187
200	205	200	200	195	188	187	175
200	200	200	200	200	190	187	175
205	200	199	200	191	187	187	175
210	200	200	200	188	185	187	186



$$X_{nm} = DCT(p_{kh} - 128)$$

515	65	-12	4	1	2	-8	5
-16	3	2	0	0	-11	-2	3
-12	6	11	-1	3	0	1	-2
-8	3	-4	2	-2	-3	-5	-2
0	-2	7	-5	4	0	-1	-4
0	-3	-1	0	4	1	-1	0
3	-2	-3	3	3	-1	-1	3
-2	5	-2	4	-2	2	-3	0

Shift to zero-mean



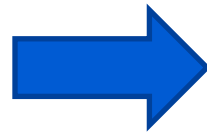
Blocchi Originali e Codificati DCT

■ Blocchi quantizzati e ricostruiti

$$F_{nm} = \text{round}\left(\frac{X_{nm}}{D_{nm}}\right)$$

$$\tilde{X}_{nm} = F_{nm} \cdot D_{nm}$$

32	6	-1	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	1	0	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
0	0	0	0	0	0	0	0



512	66	-10	0	0	0	0	0
-12	0	0	0	0	0	0	0
-14	0	16	0	0	0	0	0
-14	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

IDCT e Differenze dall'Originale

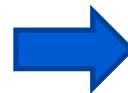
- Errore commesso a causa della quantizzazione nel processo di ricostruzione

Shift to original range

$$\tilde{p}_{kh} = IDCT(\tilde{X}_{nm}) + 128$$

$$\varepsilon_{kh} = p_{kh} - \tilde{p}_{kh}$$

199	196	191	186	182	178	177	176
201	199	196	192	188	183	180	178
203	203	202	200	195	189	183	180
202	203	204	203	198	191	183	179
200	201	202	201	196	189	182	177
200	200	199	197	192	186	181	177
204	202	199	195	190	186	183	181
207	204	200	194	190	187	185	184



1	6	-2	2	7	-3	-2	-1
-1	4	2	-4	1	-1	-2	-3
0	-3	-2	-5	5	-2	2	-5
-2	-3	-4	-3	-1	-4	4	8
0	4	-2	-1	-1	-1	5	-2
0	0	1	3	8	4	6	-2
1	-2	0	5	1	1	4	-6
3	-4	0	6	-2	-2	2	2

Blocchi Originali e Codificati DCT

■ Blocco poco omogeneo

Luminanza (Y) del blocco 8x8



p_{kh}

70	70	100	70	87	87	150	187
85	100	96	79	87	154	87	113
100	85	116	79	70	87	86	196
136	69	87	200	79	71	117	96
161	70	87	200	103	71	96	113
161	123	147	133	113	113	85	161
146	147	175	100	103	103	163	187
156	146	189	70	113	161	163	197

$$X_{nm} = DCT(p_{kh} - 128)$$



-80	-40	89	-73	44	32	53	-3
-135	-59	-26	6	14	-3	-13	-28
47	-76	66	-3	-108	-78	33	59
-2	10	-18	0	33	11	-21	1
-1	-9	-22	8	32	65	-36	-1
5	-20	28	-46	3	24	-30	24
6	-20	37	-28	12	-35	33	17
-5	-23	33	-30	17	-5	-4	20

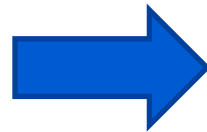
Blocchi Originali e Codificati DCT

■ Blocchi quantizzati e ricostruiti

$$F_{nm} = \text{round}\left(\frac{X_{nm}}{D_{nm}}\right)$$

$$\tilde{X}_{nm} = F_{nm} \cdot D_{nm}$$

-5	-4	9	-5	2	1	1	0
-11	-5	-2	0	1	0	0	-1
3	-6	4	0	-3	-1	0	1
0	1	-1	0	1	0	0	0
0	0	-1	0	0	1	0	0
0	-1	1	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0



-80	-44	90	-80	48	40	51	0
-132	-60	-28	0	26	0	0	-55
42	-78	64	0	-120	-57	0	56
0	17	-22	0	51	0	0	0
0	0	-37	0	0	109	0	0
0	-35	55	-64	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

IDCT e Differenze dall'Originale

- Errore commesso a causa della quantizzazione nel processo di ricostruzione

$$\tilde{p}_{kh} = IDCT(\tilde{X}_{nm}) + 128$$

$$\varepsilon_{kh} = p_{kh} - \tilde{p}_{kh}$$

70	60	106	94	62	103	146	176	0	10	-6	-24	25	-16	4	11
85	101	85	75	102	127	93	144	0	-1	11	4	-15	27	-6	-31
98	99	92	102	74	98	89	167	2	-14	24	-23	-4	-11	-3	29
132	53	111	180	55	70	106	145	4	16	-24	20	24	1	11	-49
173	57	114	207	111	89	84	90	-12	13	-27	-7	-8	-18	12	23
164	123	131	135	133	92	85	162	-3	0	16	-2	-20	21	0	-1
141	159	169	73	106	101	149	224	5	-12	6	27	-3	2	14	-37
150	141	195	79	107	147	210	153	6	5	-6	-9	6	14	-47	44

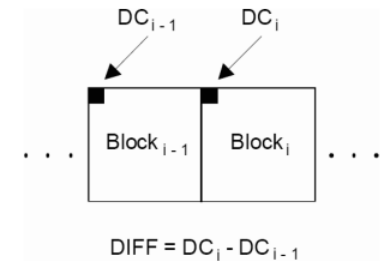
Fase 5: Entropy Coding

- I coefficienti quantizzati per ogni singolo blocco vengono compressi utilizzando una codifica lossless (Huffman o Aritmetica)
- I coefficienti DC vengono generalmente codificati separatamente dai rimanenti coefficienti AC
 - Blocchi adiacenti hanno valori medi simili (alta correlazione)
 - La codifica della differenza tra i coefficienti DC di blocchi adiacenti produce un maggior guadagno di compressione (codifica predittiva)
- I coefficienti AC vengono codificati secondo uno schema zig-zag
 - Migliora il rapporto di compressione

Fase 5: Entropy Coding

■ Codifica dei coefficienti DC

- Siano DC_i e DC_{i-1} i coefficienti DC dei blocchi i e $i - 1$
- Dopo le operazioni di zero-mean shift e di quantizzazione, $DC_i \in [-1024, 1023]$
 - Risulta quindi che $(DC_i - DC_{i-1}) \in [-2047, 2047]$
- Questo intervallo viene diviso in 12 categorie
- Ogni differenza dei valori dei coefficienti DC adiacenti viene espresso come *(size, amplitude)*
 - *Size* viene codificato con codifica di Huffman
 - *Amplitude* viene codificato con codifica binaria



Fase 5: Entropy Coding

■ Esempio di codifica dei coefficienti DC

- Tabella di codifica: 12 categorie con numero di appartenenti crescente
 - Differenza tra il codice DC attuale e il precedente
 - $2 - (-1) = 3$ nell'esempio
 - 3 è nella categoria «Size 2» (*code* = 011) in posizione 4 (*code* = 11)
 - La codifica risultante è 01111

	2	1	...
-1	3	-9	0
-7	0
...

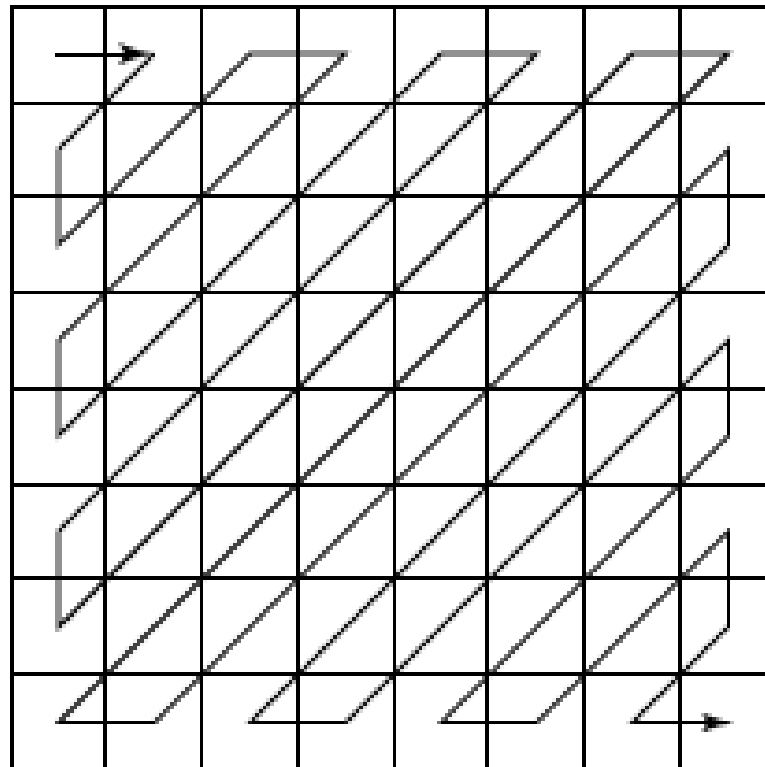
Size	Code	Value Range	Code
0	00	0	---
1	010	-1, 1	0,1
2	011	-3,-2, 2,3	00,01, 10,11
3	100	-7,-6,-5,-4, 4,5,6,7	000,...,011, 100,...,111
4	101	-15,-14,-13,...,-8, 8,...,13,14,15	0000,...,0111, 1000,...,1111
5	110	-31,...,-16, 16,...,31	00000,...,01111, 10000,...,11111
6	1110	-63,...,-32, 32,...,63	000000,...,011111, 100000,...,111111
7	11110	-127,...,-64, 64,...,127	0000000,...,1111111
8	111110	-255,...,-128, 128,...,255	00000000,...,11111111
9	1111110		
10	11111110		
11	111111110	-2047,...,-1024, 1024,...,2047	0000000000,...,1111111111

Size → (red arrow pointing to the first column)

Amplitude → (blue arrow pointing to the last column)

Fase 5: Entropy Coding

- Il codificatore segue un percorso zig-zag per i coefficienti AC



Fase 5: Entropy Coding

- Codifica dei coefficienti AC (linearizzati a zig-zag)
 - Dopo la quantizzazione la maggior parte dei coefficienti AC ha valore zero
 - I coefficienti diversi da zero hanno valori in $[-1024, 1023]$
 - Questo intervallo viene diviso in 10 categorie
 - Ogni coefficiente AC viene rappresentato secondo la notazione $((run/category), amplitude)$
 - $(Run/category)$ viene codificata con codifica di Huffman
 - $Amplitude$ viene codificato con codifica binaria

Fase 5: Entropy Coding

Run/category



Amplitude



Category	AC coefficient range
1	-1,1
2	-3,-2,2,3
3	-7,...,-4,4,...,7
4	-15,...,-8,8,...,15
5	-31,...,-16,16,...,31
6	-63,...,-32,32,...,63
7	-127,...,-64,64,...,127
8	-255,...,-128,128,...,255
9	-511,...,-256,256,...,511
10	-1023,...,-512,512,...,1023

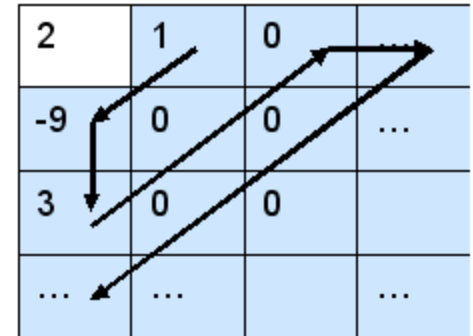
Run/Category	Base Code	Length	Run/Category	Base Code	Length
0/0	1010 (=EOB)	4			
0/1	00	3	8/1	11111010	9
0/2	01	4	8/2	11111111000000	17
0/3	100	6	8/3	111111110110111	19
0/4	1011	8	8/4	111111110111000	20
0/5	11010	10	8/5	111111110111001	21
0/6	111000	12	8/6	111111110111010	22
0/7	1111000	14	8/7	111111110111011	23
0/8	111110110	18	8/8	111111110111100	24
0/9	111111110000010	25	8/9	111111110111101	25
0/A	111111110000011	26	8/A	111111110111110	26
1/1	1100	5	9/1	111111000	10
1/2	111001	8	9/2	111111110111111	18
1/3	1111001	10	9/3	111111111000000	19
1/4	111110110	13	9/4	111111111000001	20
1/5	1111110110	16	9/5	111111111000010	21
1/6	111111110000100	22	9/6	111111111000011	22
1/7	111111110000101	23	9/7	111111111000100	23
1/8	111111110000110	24	9/8	111111111000101	24
1/9	111111110000111	25	9/9	111111111000110	25
1/A	1111111100001000	26	9/A	111111111000111	26
2/1	11011	6	A/1	111111001	10
2/2	11111000	10	A/2	111111111001000	18
2/3	1111110111	13	A/3	111111111001001	19
2/4	111111110001001	20	A/4	111111111001010	20
2/5	111111110001010	21	A/5	111111111001011	21
2/6	111111110001011	22	A/6	111111111001100	22
2/7	111111110001100	23	A/7	111111111001101	23

2/8	111111110001101	24	A/8	111111111001110	24
2/9	111111110001110	25	A/9	111111111001111	25
2/A	111111110001111	26	A/A	111111111010000	26
3/1	111010	7	B/1	111111010	10
3/2	111110111	11	B/2	111111111010001	18
3/3	11111110111	14	B/3	111111111010010	19
3/4	111111110010000	20	B/4	111111111010011	20
3/5	111111110010001	21	B/5	111111111010100	21
3/6	111111110010010	22	B/6	111111111010101	22
3/7	111111110010011	23	B/7	111111111010110	23
3/8	111111110010100	24	B/8	111111111010111	24
3/9	111111110010101	25	B/9	111111111011000	25
3/A	111111110010110	26	B/A	111111111011001	26
4/1	111011	7	C/1	111111010	11
4/2	111111000	12	C/2	111111111011010	18
4/3	111111110010111	19	C/3	111111111011011	19
4/4	111111110011000	20	C/4	111111111011100	20
4/5	111111110011001	21	C/5	111111111011101	21
4/6	111111110011010	22	C/6	111111111011110	22
4/7	111111110011011	23	C/7	111111111011111	23
4/8	111111110011100	24	C/8	111111111100000	24
4/9	111111110011101	25	C/9	111111111100001	25
4/A	111111110011110	26	C/A	111111111100010	26

Fase 5: Entropy Coding

■ Codifica dei coefficienti AC

- La tabella (Z,C) contiene i codici di Huffman per *run/category*
 - Z: numero di coefficienti AC di valore zero immediatamente precedenti
 - C: categoria del coefficiente AC



■ Esempio in figura

- 1 -> **(0,1)** -> **00 1** (0 coefficienti AC precedenti, prima categoria, seconda posizione)
- 9 -> **(0,4)** -> **1011 0111** (0 coefficienti AC precedenti, quarta categoria, settima posizione)
- 3 -> **(0,2)** -> **01 11** (0 coefficienti AC precedenti, seconda categoria, quarta posizione)
- 0...0 -> **(0,0)** -> **1010** (EOB)

Run/category

(Z,C)	Code	(Z,C)	Code
(0,0)EOB	1010	(1,1)	1100
(0,1)	00	(1,2)	11011
(0,2)	01
(0,3)	100	(16,0)ZRL	1111111001
...

Category	AC coefficient range
1	-1,1
2	-3,-2,2,3
3	-7,...,-4,4,...,7
4	-15,...,-8,8,...,15
5	-31,...,-16,16,...,31
6	-63,...,-32,32,...,63
7	-127,...,-64,64,...,127
8	-255,...,-128,128,...,255
9	-511,...,-256,256,...,511
10	-1023,...,-512,512,...,1023

Amplitude

Modalità JPEG

- Lo standard JPEG definisce 4 diversi tipi di modalità operative (tipi di codifica)
 - Sequential DCT-based coding(standard)
 - Illustrata nel dettaglio nelle slides precedenti
 - Progressive DCT-based coding
 - Sequential Lossless coding
 - Hierarchical coding

Modalità Progressiva

- Progressive mode genera e trasmette diverse versioni dell'immagine a qualità crescente
 - Viene inviata una prima versione a bassa qualità
 - I dettagli vengono aggiunti da scansioni successive
 - Ad esempio sono codificati e inviati i coefficienti DC e pochi AC per primi
 - Vengono quindi codificati e inviati in successione ulteriori coefficienti AC finché tutti i coefficienti sono stati inviati
- Molto utile per i siti web, in cui l'immagine da scaricare può richiedere molto tempo
 - Il browser può visualizzare la prima versione poco dettagliata e di seguito aggiungere dettagli

Sequenziale vs. Progressiva

- Visualizzazione di un'immagine JPEG in modalità sequenziale



- Visualizzazione di un'immagine JPEG in modalità progressiva



Modalità Gerarchica

- La modalità gerarchica codifica l'immagine a risoluzioni diverse
- Le diverse versioni dell'immagine possono essere codificate e trasmesse a risoluzione crescente
- Generalmente ad ogni scansione la risoluzione viene incrementata di un fattore 2
 - Base Layer: versione a più bassa risoluzione
 - Enhancement Layer: ottenuto dall'interpolazione tra i pixel del Base Layer e le differenze tra il frame attuale e tale versione predetta (codifica predittiva)

Modalità Gerarchica

Esempio: **Three-level Hierarchical Mode**

■ Algoritmo di compressione (3-level)

1. Riduzione della risoluzione dell'immagine ingresso
2. La risoluzione dell'immagine x viene ridotta progressivamente di un fattore 2

- $x (512 \times 512) \rightarrow x_2 (256 \times 256) \rightarrow x_4 (128 \times 128)$

2. Compressione dell'immagine x_4 (immagine a più bassa risoluzione) in modalità sequenziale

- Si ottiene $x_4 \rightarrow X_4$ (dove X_4 è l'immagine x_4 compressa)
- Questo è il *Base Layer*

Modalità Gerarchica

■ Algoritmo di compressione (continua)

3. Genera il primo Enhancement Layer

- Decodifica X_4 per ottenere $\underline{x}_4 \rightarrow \underline{x}_4 = \text{Dec}(X_4)$
- Interpola \underline{x}_4 per ottenere una versione dell'immagine con risoluzione uguale a quella di $x_2 \rightarrow I(\underline{x}_4)$
- Codifica l'immagine ottenuta dalle differenze di x_2 e $I(\underline{x}_4) \rightarrow D_2 = \text{Enc}(x_2 - I(\underline{x}_4))$

4. Genera il secondo Enhancement Layer

- Decodifica D_2 per ottenere $\underline{d}_2 \rightarrow \underline{d}_2 = \text{Dec}(D_2)$
- Aggiungi $I(\underline{x}_4)$ a \underline{d}_2 per ottenere una versione di $\underline{x}_2 \rightarrow \underline{x}_2 = \underline{d}_2 + I(\underline{x}_4)$
- Interpola \underline{x}_2 per ottenere una versione dell'immagine con risoluzione uguale a quella di $x \rightarrow I(\underline{x}_2)$
- Codifica l'immagine ottenuta dalle differenze di x e $I(\underline{x}_2) \rightarrow D_1 = \text{Enc}(x - I(\underline{x}_2))$

Modalità Gerarchica

■ Algoritmo di decompressione

1. Decodifica il Base Layer

- Decodifica X_4 utilizzando lo stesso meccanismo JPEG utilizzato per ottenere \underline{x}_4

2. Genera l'immagine a risoluzione intermedia \underline{x}_2 utilizzando il primo Enhancement Layer

- Utilizza $D_2 = \text{Enc}(x_2 - I(\underline{x}_4))$ e \underline{x}_4 per ottenere \underline{x}_2

3. Genera l'immagine originaria x utilizzando il secondo Enhancement Layer

- Utilizza $D_1 = \text{Enc}(x - I(\underline{x}_2))$ e \underline{x}_2 per ottenere \underline{x}

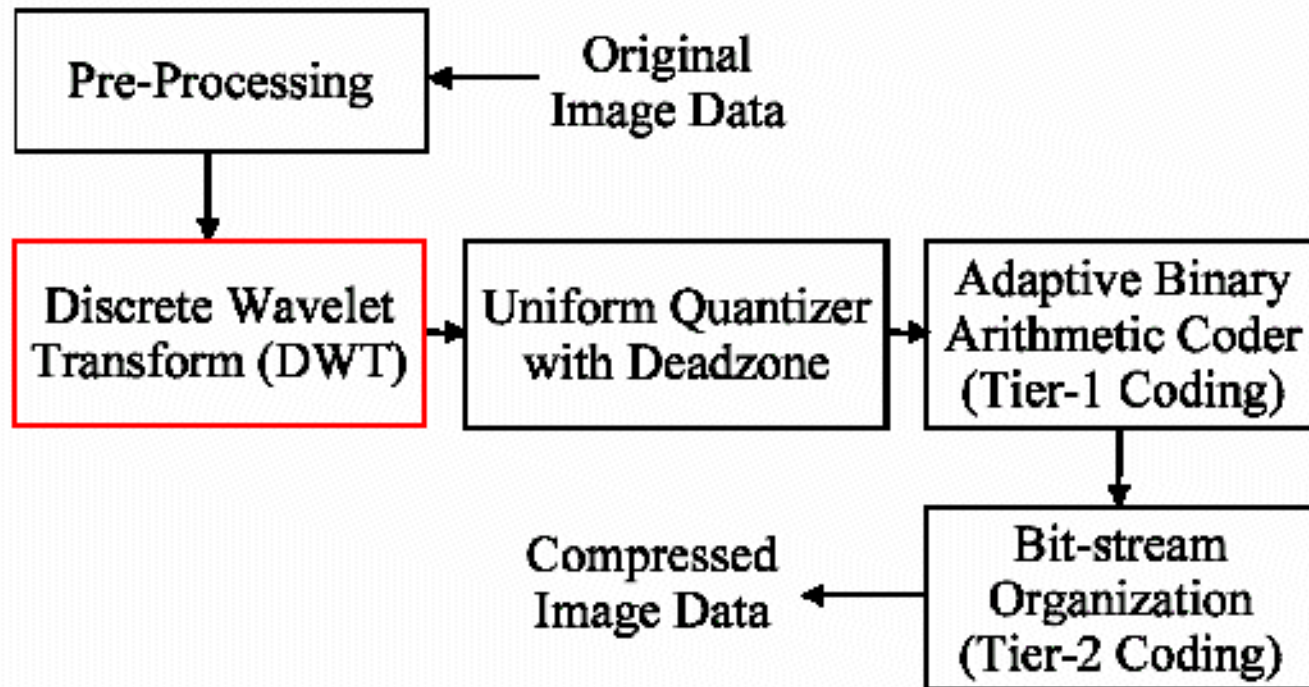
Prestazioni JPEG

Original size of color image (Kb)			313.076	
Original size of B/W image (Kb)			104.437	
Quality Factor	Color JPEG		B/W JPEG	
	File Size (Kb)	Comp. Ratio	File Size (Kb)	Comp. Ratio
75	23.039	13.59	21.02	4.97
20	8.457	37.02	7.599	13.74
5	4.009	78.09	3.257	32.07
3	3.268	95.80	2.522	41.41

JPEG2000

- JPEG2000 (jp2) è la versione più recente dei formati di compressione standardizzati dal gruppo JPEG
- Introduce numerosi miglioramenti rispetto a JPEG
 - Codifica Wavelet
 - Migliori rapporti di compressione
 - Maggiore compressione senza perdita (lossless)
 - Supporta immagini di maggiore dimensione

JPEG2000



JPEG vs. JPEG2000



original

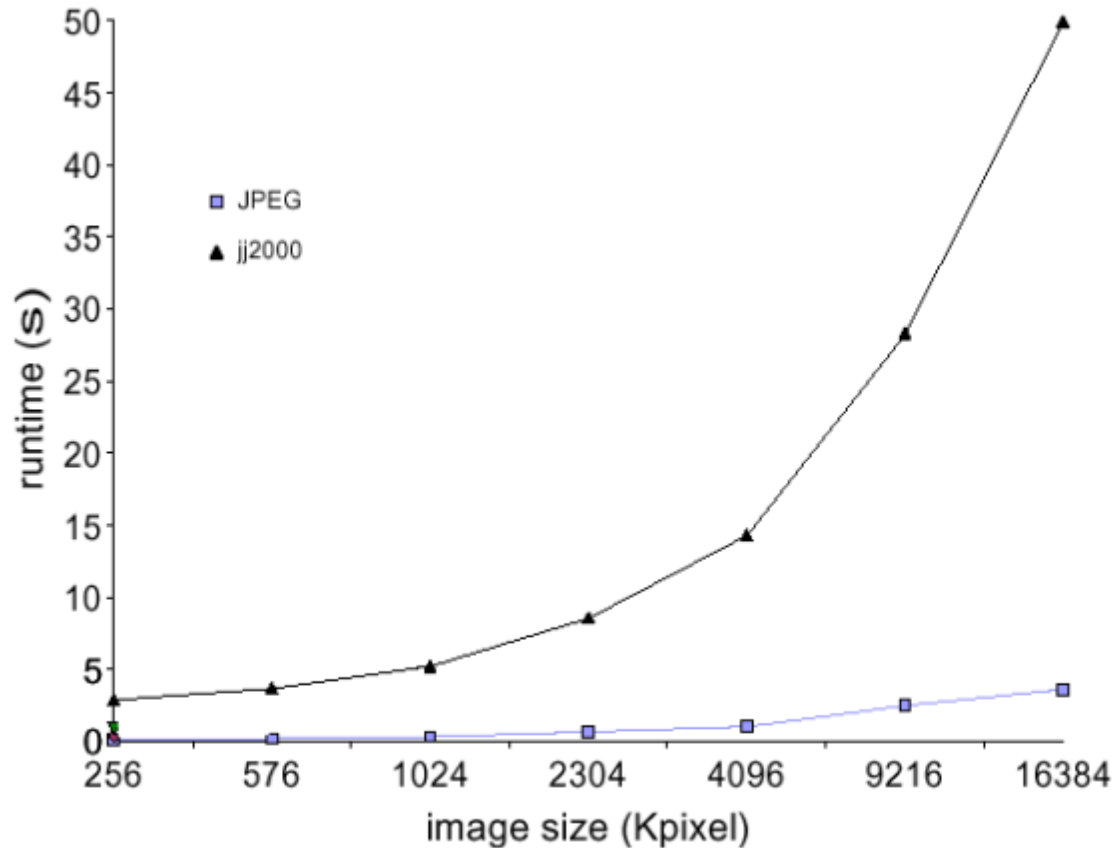
JPEG 2000 (43:1)



JPEG (43:1)



JPEG vs. JPEG2000



JPEG2000 è molto più complesso computazionalmente di JPEG, soprattutto per immagini di grandi dimensioni

ALTRI ALGORITMI DI COMPRESSIONE

JBIG, TIFF, FACSIMILE

JBIG

- JBIG (Joint Bi-Level Image Processing Group) è uno standard di compressione per le immagini binarie (immagini bianco/nero)
 - Fax, scansioni di documenti, etc.
 - Hanno caratteristiche diverse dalle immagini a colori o grayscale che richiedono diverse tipologie di codifica
- JBIG è una codifica di tipo senza perdita (lossless) di tipo aritmetico
- JBIG2 è una codifica di tipo con perdita (lossy)

Facsimile Compressive Coding

- Standard definito dall'ITU-T
- Lo standard utilizza parametri costanti per l'algoritmo di compressione
 - Nessun adattamento al messaggio codificato
 - Minore efficacia di codifica
- Si codifica un'immagine A4 (210 x 297 mm)
 - 1728 pixel per linea e 1145 linee per pagina A4
 - Se si utilizzasse 1 bit per ogni pixel si avrebbero circa 2 Mbit per pagina
- Una pagina contiene molti pixel consecutivi dello stesso colore
 - Applica Run Length Encoding (RLE)

TIFF

- TIFF (Tag Image File Format)
 - Insieme di formati di immagini grafiche
 - Supporta 6 tipi di *compressione lossless*
 - E' utilizzata principalmente per la fotografia digitale e altre applicazioni che richiedono un'immagine la cui qualità non ha subito degradazioni (es. editing)

TIFF - Tipi di Codifica

- Le tecniche di compressione definite dal formato utilizzano solo 6 tipi di codifica lossless
- Le 6 tecniche sono
 - Nessuna compressione
 - Huffman (CCITT Group 3)
 - Facsimile compatible (CCITT Group 3)
 - Facsimile compatible (CCITT Group 4)
 - Lempel-Ziv Welch (LZW)
 - PackBits (Macintosh)

Approfondimenti

■ Articoli:

- G. K. Wallace, “The JPEG still picture compression standard” IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 38, no. 1, pp. XVIII-XXXIV Feb. 1992

■ Links:

- ITU-T Recommendation T.81
<http://www.w3.org/Graphics/JPEG/itu-t81.pdf>