

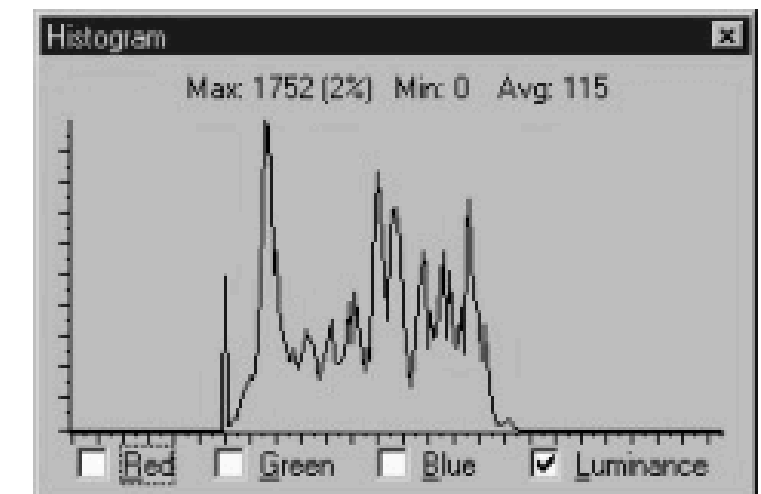
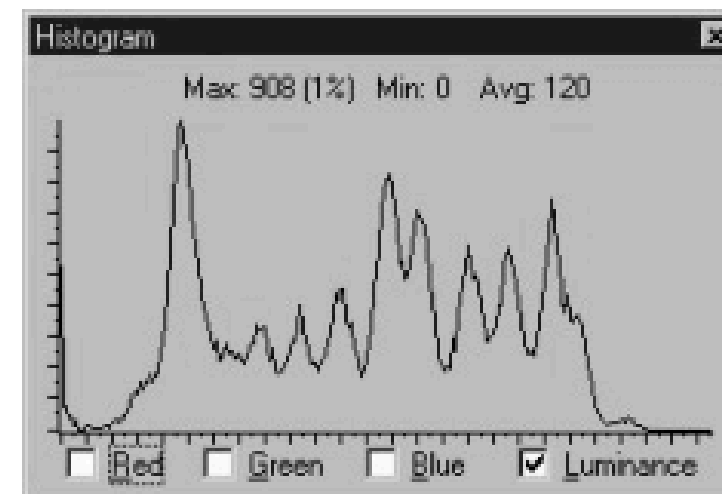
Image Coding

Pemrosesan Sinyal Multimedia

Muhammad Daffa Rizkyandri – 2206829194

Surya Dharmasaputra S. – 2206827825

Valentino Farish Adrian – 2206825896



Topics Covered

1 Theories for Image Compression

2 Entropy Coding

3 Lossy Image Compression

4 JPEG

5 JPEG2000

Image Coding

Definisi

Image Coding, merupakan proses untuk melakukan kompresi data yang dibutuhkan untuk merepresentasikan gambar digital, namun tetap mempertahankan visual integrity dari raw data. Proses ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan redundansi dan juga informasi yang tidak relevan di dalam raw data images tersebut.

Tujuan Image Coding/Compressing

- Mengurangi Storage Requirements
- Meningkatkan efisiensi dalam pengiriman Image data
- Mengoptimalkan representasi gambar sesuai dengan aplikasi spesifiknya

I. Theories for Image Compression

Information Theory

Teori Informasi dalam Image Compression, menjelaskan framework matematis yang ditujukan dalam melakukan encoding data secara efisien dengan mengukur jumlah informasi dalam data source dan meminimalkan redundansi yang ada. Dalam konteks Image Compression, teori-teori ini dapat membantu dalam menentukan seberapa banyak bagian dari gambar asli dapat dikompresi tanpa menghilangkan informasi esensial yang ada.

I. Theories for Image Compression

a. Teori Pengukuran Informasi

Misalkan kita memiliki sekumpulan simbol $A=\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ yang dihasilkan oleh suatu sumber, di mana setiap simbol a_n memiliki probabilitas kejadian p_n . Untuk menentukan **seberapa besar informasi yang diberikan oleh simbol tersebut**, digunakan rumus ukuran informasi (self-information) berikut:

$$I(a_n) = -\log_b(p_n) = \log_b \left(\frac{1}{p_n} \right)$$

Di mana b adalah basis logaritma yang menentukan satuan informasi:

- Logaritma basis 2 (\log_2) \rightarrow Bit (satuan biner).
- Logaritma basis 3 (\log_3) \rightarrow Trit (satuan trinary).
- Logaritma natural (\ln/\log_e) \rightarrow Nat (satuan berbasis e).
- Logaritma basis 10 (\log_{10}) \rightarrow Hartley (digunakan dalam teori informasi awal).

I. Theories for Image Compression

b. Teori Entropi: Mengukur Rata-Rata Informasi

Entropi $H(A)$ menggambarkan rata-rata jumlah informasi yang terdapat dalam suatu sumber data, dan menjadi indikator tingkat kompresibilitas citra. Rumus entropi untuk himpunan simbol A dengan probabilitas $P=\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ adalah:

$$H(A) = \sum_{n=1}^N p_n \log_b(p_n)$$

Dengan:

- p_n = probabilitas simbol a_n muncul dalam citra.
- $H(A)$ diukur dalam bit per simbol jika menggunakan basis log 2.

Interpretasi Entropi dalam Kompresi Citra

- Entropi tinggi \rightarrow Gambar memiliki banyak variasi warna/pola, sehingga lebih sulit dikompresi.
- Entropi rendah \rightarrow Gambar memiliki pola yang lebih seragam, sehingga lebih mudah dikompresi.

II. Entropy Coding

Entropy Coding, merupakan teknik coding yang menghubungkan panjang kode dengan probabilitas kemunculan simbol. Metode ini dirancang untuk mengurangi redundansi dalam data dengan mengganti simbol yang memiliki panjang kode tetap dengan kode variabel, di mana panjang setiap kode sebanding dengan logaritma negatif probabilitas simbol.

Dua teknik Entropy Coding yang paling umum adalah **Huffman Coding** dan **Arithmetic Coding**, dengan beberapa variasi seperti **CABAC (Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding)** dan **Run-Length Coding (RLC)**.

II. Entropy Coding

a. Huffman Coding

Huffman Coding merupakan teknik coding lossless, yang menggunakan **kode biner dengan panjang variabel**, dimana:

- Simbol yang lebih sering muncul mendapat kode lebih pendek.
- Simbol yang lebih jarang muncul mendapat kode lebih panjang.
- Kode yang dihasilkan adalah prefix-free (tidak ada kode yang menjadi awalan dari kode lainnya), memungkinkan dekode langsung tanpa ambigu.

Contoh Proses

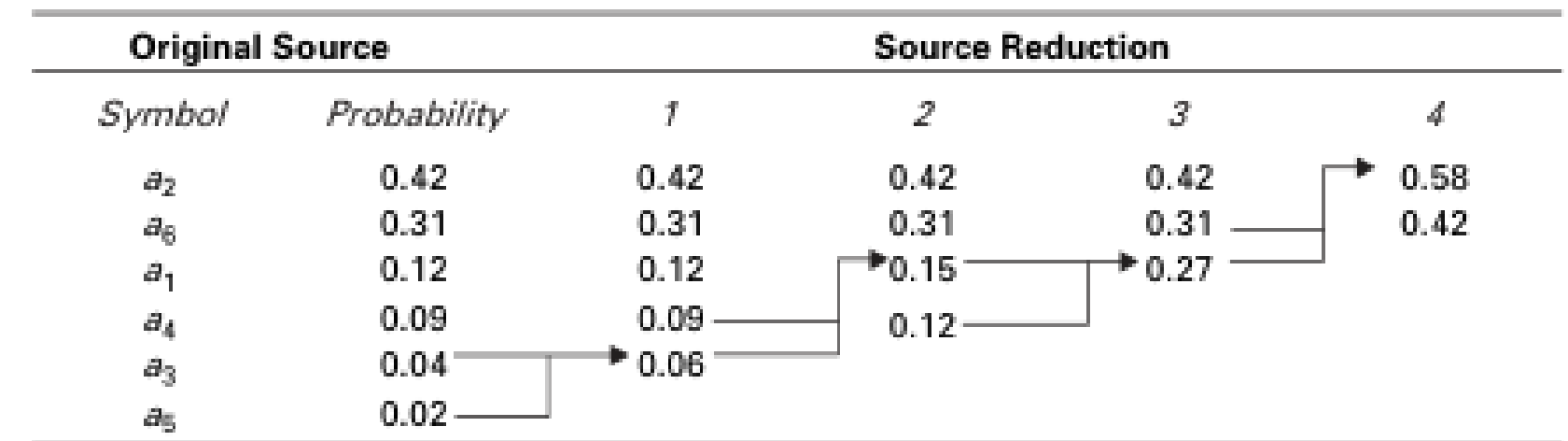


Figure 4.2 A typical Huffman entropy code generation process [6].

Dalam Gambar dijelaskan proses kode Huffman Entropy dengan:

- Simbol dan Probabilitas: Simbol (a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6) bersama dengan probabilitasnya.
- Tahapan Penggabungan: Pada setiap langkah, dua simbol dengan probabilitas terendah digabungkan hingga hanya tersisa satu simbol.

II. Entropy Coding

b. Arithmetic Coding

Berbeda dengan Huffman coding yang memberi kode unik untuk setiap simbol, Arithmetic coding mengkodekan seluruh urutan simbol sebagai satu nilai desimal dalam interval $[0,1]$.

- Interval awal adalah $[0,1]$.
- Setiap simbol yang dikodekan memperkecil interval, berdasarkan probabilitasnya.
- Semakin banyak simbol, semakin kecil intervalnya, menghasilkan kode yang lebih efisien.

Keunggulan

- Lebih fleksibel untuk distribusi probabilitas yang tidak tepat diketahui.
- Tidak membutuhkan panjang kode tetap per simbol, menghasilkan kompresi lebih optimal.

Contoh Proses

Misalkan terdapat tiga simbol:

- A (0.5), B (0.3), C (0.2)

Langkah-langkah:

- A \rightarrow Interval awal $[0,0.5]$
- B \rightarrow Dari $[0.5, 0.8]$
- C \rightarrow Dari $[0.8, 1.0]$

Setiap tambahan simbol memperkecil interval, menghasilkan representasi desimal yang lebih kompak.

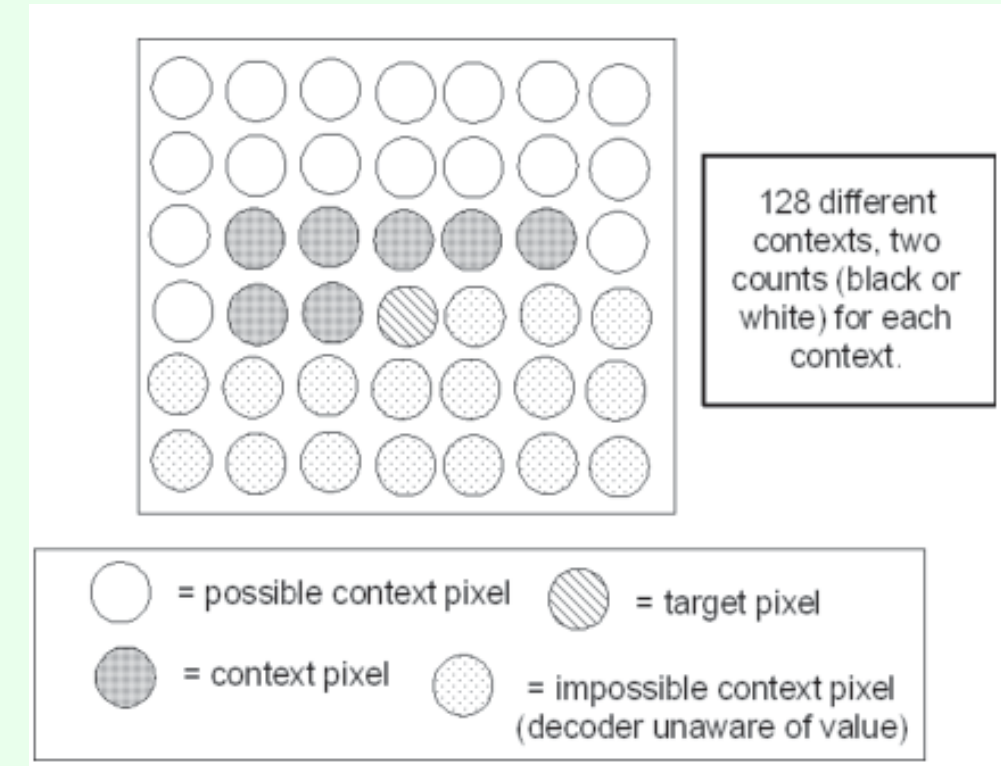
II. Entropy Coding

c. Context-adaptive Binary Coding (CABAC)

CABAC adalah teknik pengkodean aritmetika adaptif yang digunakan dalam H.264/AVC untuk kompresi video.

- Berbasis biner: Mengkodekan citra sebagai urutan bit 0 dan 1.
- Menggunakan model kontekstual: Probabilitas simbol diperbarui berdasarkan simbol sebelumnya.
- Menggunakan prediksi lokal: Bit dikelompokkan berdasarkan lingkungan sekitarnya untuk meningkatkan efisiensi.

Contoh Proses



Gambar ini menunjukkan contoh CABAC yang digunakan untuk mengkodekan piksel biner tertentu dalam gambar hitam putih.

- **Piksel Konteks:** Piksel target yang akan dikodekan dikelilingi oleh tujuh piksel konteks.
- **Probabilitas Adaptif:** Probabilitas piksel target dihitung secara adaptif berdasarkan nilai piksel konteks.
- **Pengkodean Aritmetika:** Setelah probabilitas ditentukan, pengkodean aritmetika digunakan untuk mengkodekan piksel target.

II. Entropy Coding

d. Run-length Coding (RLC)

RLC mengkodekan urutan panjang simbol berulang sebagai nilai tunggal dengan hitungan kemunculannya.

- Efektif untuk gambar dengan area luas berwarna seragam.
- Sering digunakan dalam kompresi dokumen (misalnya, TIFF, JBIG2).

Contoh Proses

Misalkan terdapat urutan piksel:

- 0000001110001111

RLC mengkodekannya sebagai:

- 6(0) 3(1) 3(0) 4(1)

Yang berarti: 6 nol, 3 satu, 3 nol, 4 satu.

III. Lossy Image Compression

Lossy, merupakan teknik *compression* yang menghilangkan beberapa data dari gambar sehingga tercapai kompresi dengan ukuran yang lebih kecil jika dibandingkan dengan teknik lossless. Teknik ini dipakai ketika gambar ingin diperkecil ukurannya semaksimal mungkin tanpa memperhatikan kualitas dari hasilnya.

Kompresi pada lossy menggunakan proses kuantisasi sinyal dalam menghilangkan data-data pada gambar. Kuantisasi sinyal ini dilakukan pada domain transformasi dan juga domain spasial dari gambar. Untuk melakukan kompresi dapat digunakan beberapa metode tertentu, yaitu **DCT (Discrete Cosine Transform)**, dan **Wavelet Transform**.

III. Lossy Image Compression

a. DCT (Discrete Fourier Transform)

DCT merupakan teknik image compression yang digunakan pada format file **JPEG**. DCT bekerja dengan **membagi gambar** menjadi beberapa bagian. Bagian-bagian tersebut akan dihitung dengan formula DCT sebagai berikut:

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

Dengan:

- **f(x,y)** → Intensitas piksel pada koordinat (x,y) di domain spasial.
- **F(u,v)** → Koefisien DCT pada koordinat (u,v) di domain frekuensi.
- **N** → Dimensi dari gambar yang ingin dikonversi (pada JPEG: 8x8).
- **C(u),C(v)** → Faktor normalisasi, dimana:
$$C(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{jika } u = 0 \\ 1, & \text{jika } u > 0 \end{cases}$$

Image Coding

Setelah dilakukannya perubahan dari intensitas pixel menjadi representasi frekuensi, akan dilakukannya kuantisasi matriks. **Kuantisasi matriks** ini bertujuan untuk menghilangkan detail-detail yang dirasa tidak penting. Kuantisasi dilakukan dengan rumus sebagai berikut:

$$F_Q(u, v) = \text{round} \left(\frac{F(u, v)}{Q(u, v)} \right)$$

Dengan:

- **F(u,v)** → koefisien DCT sebelum kuantisasi.
- **Q(u,v)** → adalah nilai dari matriks kuantisasi pada posisi yang sama.

Image Coding

Untuk mengurangi ukuran file lebih lanjut, dilakukan **entropy coding**. Proses ini menggunakan hasil perhitungan kuantisasi sebagai variabelnya.

Setelah *entropy coding*, dilanjutkan ke tahap terakhir yaitu dekompresi. **Dekompresi** merupakan proses rekonstruksi gambar dari data kompresi. Dekompresi dilakukan dengan formula **Inverse DCT** sebagai berikut:

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

Dengan:

- **f(x,y)** → Intensitas piksel pada koordinat (x,y) di domain spasial.
- **F(u,v)** → Koefisien DCT pada koordinat (u,v) di domain frekuensi.
- **N** → Dimensi dari gambar yang ingin dikonversi (pada JPEG: 8x8).
- **C(u),C(v)** → Faktor normalisasi, dimana:
$$C(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{jika } u = 0 \\ 1, & \text{jika } u > 0 \end{cases}$$

III. Lossy Image Compression

b. DWT (Discrete Wavelet Transform)

DWT merupakan teknik image compression yang digunakan pada format file **JPEG2000**. DWT bekerja dengan **mengelompokkan ke dalam sub-band frekuensi** yang berbeda-beda. Pengelompokan ini dilakukan dengan menerapkan ***filtering*** dan ***downsampling*** pada gambar. Berikut ini merupakan langkah-langkah yang dilakukan ketika menerapkan teknik DWT:

1. Melakukan ***filtering*** pada gambar
2. Mengolah hasil pengelompokan dengan **formula DWT**
3. Melakukan **kuantisasi** koefisien wavelet
4. Melakukan ***entropy coding***

Filtering dilakukan dengan menerapkan Low-Pass dan juga High-Pass filter. **Low-pass filter** dilakukan dengan menjumlahkan keseluruhan data secara berpasangan yang lalu dirata-ratakan tiap pasangannya. Sementara **High-pass filter** dilakukan dengan mengurangi data secara berpasangan yang lalu dirata-ratakan tiap pasangannya. Dalam image compressing, filtering akan dilakukan secara **horizontal** terlebih dahulu barulah secara **vertikal**

Hasil filtering ini membagi gambar ke dalam empat sub-band wavelet:

- **LL (Low-Low)** → Informasi frekuensi rendah (bagian utama gambar).
- **LH (Low-High)** → Detail horizontal.
- **HL (High-Low)** → Detail vertikal.
- **HH (High-High)** → Detail diagonal.

Image Coding

DWT memiliki formula sebagai berikut dalam mengubah suatu gambar:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt$$

Dengan:

- **$W(a,b)$** → koefisien wavelet.
- **$f(t)$** → fungsi sinyal (gambar).
- **$\psi_{a,b}(t)$** → fungsi wavelet dasar yang diskalakan dan digeser.

Image Coding

Berikut ini merupakan formula perhitungan DWT pada **gambar 2D** untuk memperjelas rumus utamanya:

$$W(x, y) = \sum_i \sum_j f(i, j) \cdot \psi_{x,y}(i, j)$$

Dengan:

- **$W(x,y)$** → koefisien wavelet 2D.
- **$f(i,j)$** → nilai pixel pada posisi (i,j).
- **$\psi_{x,y}(i,j)$** → fungsi wavelet 2D yang diskalakan dan digeser.

Image Coding

Setelah dilakukannya konversi, maka akan dilakukannya **kuantisasi** dengan rumus sebagai berikut:

$$Q(u, v) = \text{round} \left(\frac{W(u, v)}{n} \right)$$

Dengan:

- $Q(u, v)$ → koefisien wavelet yang telah dikuantisasi.
- $W(u, v)$ → koefisien wavelet sebelum kuantisasi.
- n → langkah kuantisasi (quantization step).

Setelah melakukan kuantisasi, akan dilakukan kompresi lebih lanjut dengan **entropy coding**. Dalam penerapannya, DWT menggunakan **arithmetic coding** dan **context-adaptive Binary Coding**.

IV. JPEG Format

JPEG (Joint Photographic Experts Group) adalah standar kompresi citra lossy yang paling populer dan banyak digunakan di seluruh dunia. Format ini ditetapkan dalam standar ISO/IEC 10918-1/2/3 pada tahun 1994 dan digunakan secara luas untuk penyimpanan dan transmisi gambar digital, terutama dalam fotografi digital dan web.

Jenis Mode Pengkodean JPEG

1. **Baseline JPEG (Sequential Mode):** Mode paling umum, menggunakan DCT (Discrete Cosine Transform) untuk kompresi.
2. **Progressive JPEG:** Gambar dikodekan dalam beberapa tahap untuk pratinjau cepat sebelum data lengkap diterima.
3. **Hierarchical JPEG:** Mengkodekan gambar dalam berbagai resolusi untuk aplikasi tampilan multi-skala.
4. **Lossless JPEG:** Tidak menggunakan DCT, tetapi menggunakan prediksi dan pengkodean entropi untuk hasil tanpa kehilangan kualitas.

IV. JPEG Format

a. Chroma Subsampling (Konversi RGB ke YCbCr dan Reduksi Resolusi Warna)

JPEG menggunakan transformasi RGB ke YCbCr sebelum kompresi. Hal ini dilakukan karena mata manusia lebih sensitif terhadap detail kecerahan (luminance Y) dibandingkan warna (chrominance CbCr).

Jenis Chroma Subsampling yang Digunakan dalam JPEG

1. **4:4:4** → Tidak ada subsampling, kualitas tertinggi.
2. **4:2:2** → Reduksi horizontal 2:1 (resolusi warna setengah dari luminance).
3. **4:1:1** → Reduksi horizontal 4:1 (resolusi warna seperempat dari luminance).

Subsampling ini membantu mengurangi ukuran file tanpa banyak mengurangi kualitas visual karena mata manusia tidak peka terhadap detail warna dibandingkan detail terang-gelap.

IV. JPEG Format

b. Block-based Discrete Cosine Transform

DCT digunakan untuk mengubah blok citra 8×8 piksel dari domain spasial ke domain frekuensi.

Rumus DCT 2D untuk 8x8:

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

- $f(x,y)$ → Nilai intensitas piksel pada posisi (x,y).
- $F(u,v)$ → Koefisien DCT yang merepresentasikan citra dalam domain frekuensi.
- $C(w) = 1/\sqrt{2}$ jika $w=0$, dan 1 jika $w \neq 0$.

Hasil dari DCT

- **DC Coefficient (koefisien $F(0,0)$):** Representasi rata-rata kecerahan blok.
- **AC Coefficients:** Representasi detail tekstur dan pola dalam frekuensi yang lebih tinggi.

IV. JPEG Format

c. Quantization of DCT Coefficients

Setelah DCT, semua 64 koefisien dalam setiap blok dikompresi menggunakan kuantisasi.

Proses Kuantisasi

$$F_Q(u, v) = \text{IntegerRound} \left(\frac{F(u, v)}{Q(u, v)} \right)$$

- **Q(u,v)** adalah **tabel kuantisasi** (terpisah untuk luminance dan chrominance).
- Koefisien **frekuensi tinggi** diberi **step size** lebih besar untuk mengurangi pengaruhnya.
- **Luminance** dikompresi lebih sedikit dibandingkan chrominance untuk mempertahankan detail visual.

Dampak Kuantisasi

- Membuang informasi yang tidak terlihat oleh mata manusia.
- Menghasilkan artefak blok (blockiness) jika kompresi terlalu agresif.

IV. JPEG Format

d. DCT Coding and Zigzag Sequence

Setelah kuantisasi, koefisien DCT disusun dalam urutan zigzag.

Tujuan Zigzag Scanning

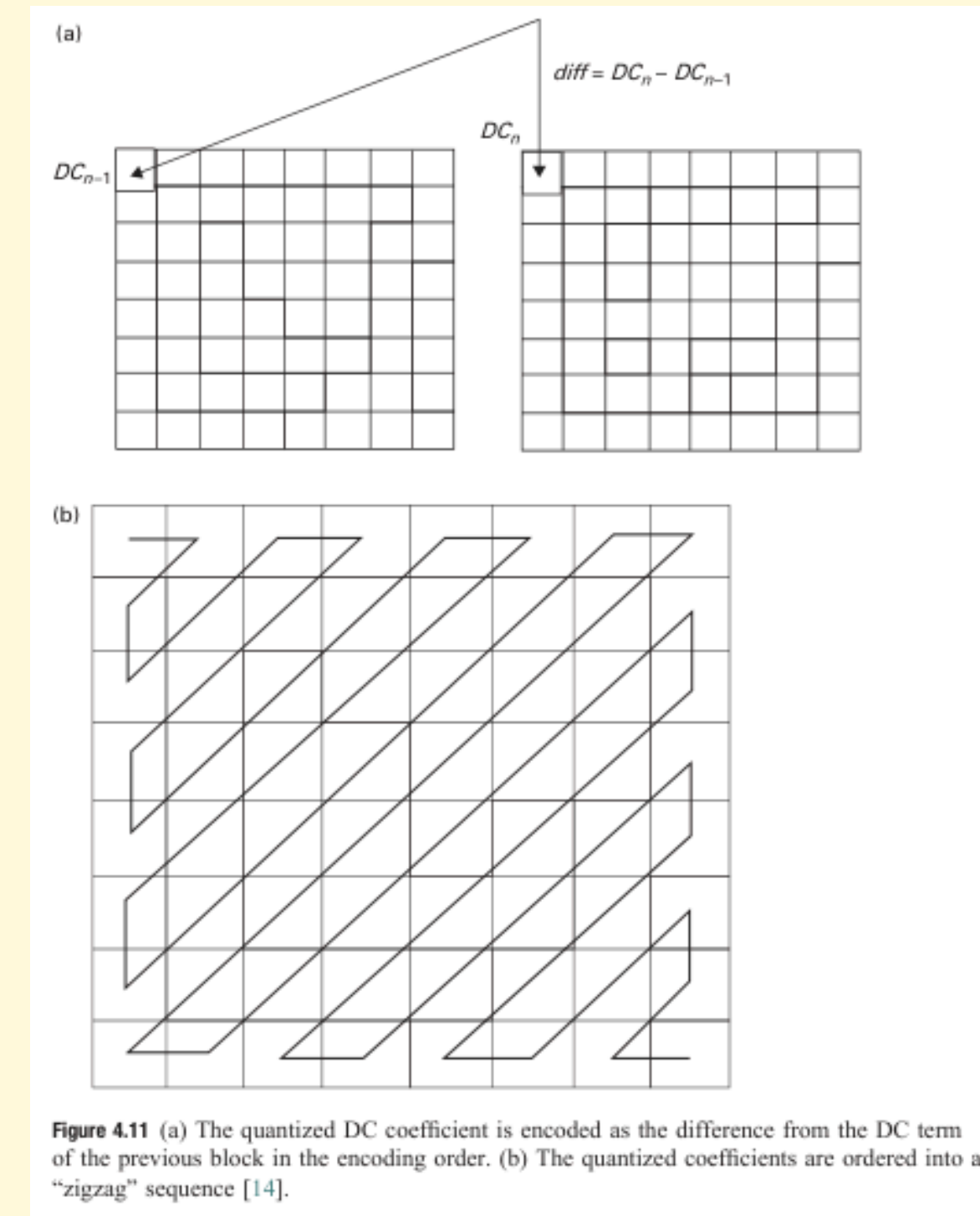
- Koefisien dengan nilai lebih besar muncul lebih awal.
- Koefisien kecil (sering nol) berada di akhir untuk mempermudah Run-Length Coding (RLC).

Penjelasan Gambar

(a) Pengkodean DC Terkuantisasi: Koefisien DC yang terkuantisasi dikodekan sebagai selisih dari koefisien DC blok sebelumnya.

(b) Urutan Zigzag: Koefisien terkuantisasi diurutkan dalam pola "zigzag".

Contoh Zigzag Sequence



IV. JPEG Format

e. Entropy Coding in JPEG

Setelah zigzag scanning, data dikodekan menggunakan pengkodean entropi: RLC untuk AC Coefficients, Differential Coding untuk DC Coefficients, dan Huffman atau Arithmetic Coding untuk kompresi terakhir

Huffman Coding (Baseline)

- Huffman coding digunakan untuk baseline JPEG.
- Menggunakan dua tabel: satu untuk DC coefficients, satu untuk AC coefficients.

Arithmetic Coding (Optional)

- Digunakan dalam mode non-baseline.
- Memberikan kompresi 10% lebih baik dibandingkan Huffman coding.

V. JPEG2000 Format

JPEG2000 merupakan perkembangan yang dibuat oleh Joint Photographic Experts Group (JPEG) sebagai penerus dari format JPEG tradisional.

Keunggulan JPEG2000 dibanding JPEG

1. **Kompresi lebih efisien:** Menggunakan DWT dibandingkan dengan DCT sehingga lebih efisien.
2. **Dapat dikompresi secara lossless maupun lossy**
3. **Mendukung *progressive decoding*:** Gambar dapat ditampilkan dengan resolusi atau kualitas yang berbeda-beda dengan bertahap
4. **Dukungan untuk gambar dengan kedalaman bit yang tinggi:** Mendukung gambar hingga 16 bit per *channel* RGB.
5. **Dukungan untuk Region of Interest (ROI):** Dapat meng-*compress* bagian tertentu dari gambar

V. JPEG2000 Format

a. Lossless Coding

Dalam penerapannya, JPEG2000 dapat melakukan *lossless coding* dengan menggunakan **DWT**. Hal ini dapat dilakukan dengan parameter filter yang dipakai dalam formula menggunakan **Le Gall 5/3**, Lossless coding diterapkan dalam pencitraan medis dan juga penyimpanan arsip.

Le Gall 5/3

- Le Gall 5/3 adalah filter DWT yang diciptakan oleh Didier Le Gall pada 1989. Jumlah koefisien yang digunakan dalam perhitungan Le Gall 5/3 menggunakan filter **low-pass** (5 koefisien) dan **high-pass** (3 koefisien).
- Filter ini digunakan untuk kompresi lossless pada JPEG2000 secara khusus.

V. JPEG2000 Format

b. Lossy Coding

Dalam penerapannya, JPEG2000 dapat melakukan *lossy coding* dengan menggunakan **DWT**. Hal ini dapat dilakukan dengan parameter filter yang dipakai dalam formula menggunakan **Daubechies 9/7**. Digunakan dalam streaming dan juga fotografi.

Daubechies 9/7

- Daubechies 9/7 adalah filter DWT yang diciptakan oleh Ingrid Daubechies Jumlah koefisien yang digunakan dalam perhitungan Le Gall 5/3 menggunakan filter low-pass (**9 koefisien**) dan high-pass (**7 koefisien**).
- Filter ini digunakan secara khusus dalam lossy coding pada JPEG2000

V. JPEG2000 Format

c. Progressive Mode

Mode yang digunakan untuk menampilkan gambar secara bertahap resolusinya. Hal ini dapat diperoleh dengan mengatur bitstream dari gambar. Berikut ini merupakan formula dari Progressive Mode:

$$I(x, y) = \sum_i \sum_j W(x, y) \cdot \psi_{i,j}(x, y)$$

Dengan:

- $I(x,y)$ → Gambar yang telah direkonstruksi ulang dengan menggunakan DWT
- $W(x,y)$ → Koefisien Wavelet.
- $\psi_{x,y}(i,j)$ → fungsi wavelet yang diskalakan dan digeser.

V. JPEG2000 Format

d. Progressive Mode

Proses yang diterapkan apabila ingin memfokuskan kompresi pada **area tertentu** gambar. Berikut ini formulanya:

$$W_{ROI}(u, v) = W(u, v) \cdot s$$

Dengan:

- **$W_{ROI}(u, v)$** → Koefisien wavelet yang telah diskalakan
- **$W(u, v)$** → Koefisien Wavelet.
- **s** → Skala yang diinginkan.

V. JPEG2000 Format

e. Single-Tile dan Multi-Tile

Merupakan proses untuk menentukan apakah gambar dikompresi secara satu kesatuan atau dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lalu dikompresikan secara independen.

$$T(x, y) = I(x \bmod w, y \bmod h)$$

Dengan:

- $T(x, y) \rightarrow$ Tile/bagian pada (x, y) .
- $I(x, y) \rightarrow$ Input gambar asli.
- $w \rightarrow$ Lebar tile.
- $h \rightarrow$ Tinggi tile.

V. JPEG2000 Format

f. Multi Component

JPEG2000 mendukung beberapa warna sekaligus (RGB, CYMK). Dimana tiap komponen warna dapat dikompresi secara individu maupun bersamaan.

$$W_c(u, v) = \sum_i \sum_j I_c(i, j) \cdot \psi_{u,v}(i, j)$$

Dengan:

- **$W_c(u,v)$** → Koefisien wavelet untuk bagian dengan warna c
- **$I_c(i,j)$** → Nilai piksel pada (i,j) dalam warna c.
- **$\psi_{u,v}(i,j)$** → Fungsi wavelet

VI. Hasil Run Program

Berikut ini adalah output dari program yang telah dibuat

