IN2070 – Digital bildebehandling

FORELESNING 12

KOMPRESJON OG KODING – II

Andreas Kleppe

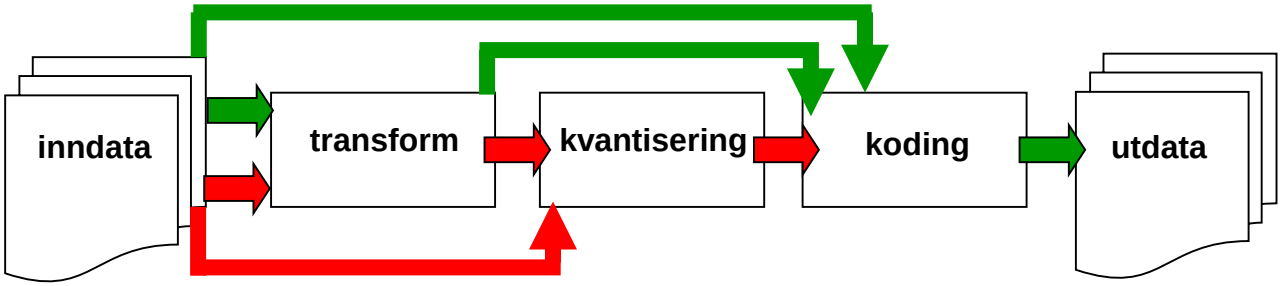
Differansetransform
Løpelengdetransform
LZW-transform
JPEG-kompresjon
Tapsfri prediktiv koding

Modifisering av forelesningsnotater laget av Fritz Albregtsen

Kompendium: 18.4, 18.7.3 og 18.8-18.8.1

Repetisjon: Kompresjon

- Kompresjon kan deles inn i tre steg:
  - **Transform** - representér bildet mer kompakt.
  - **Kvantisering** - avrund representasjonen.
  - **Koding** - produsér og bruk en kodebok.

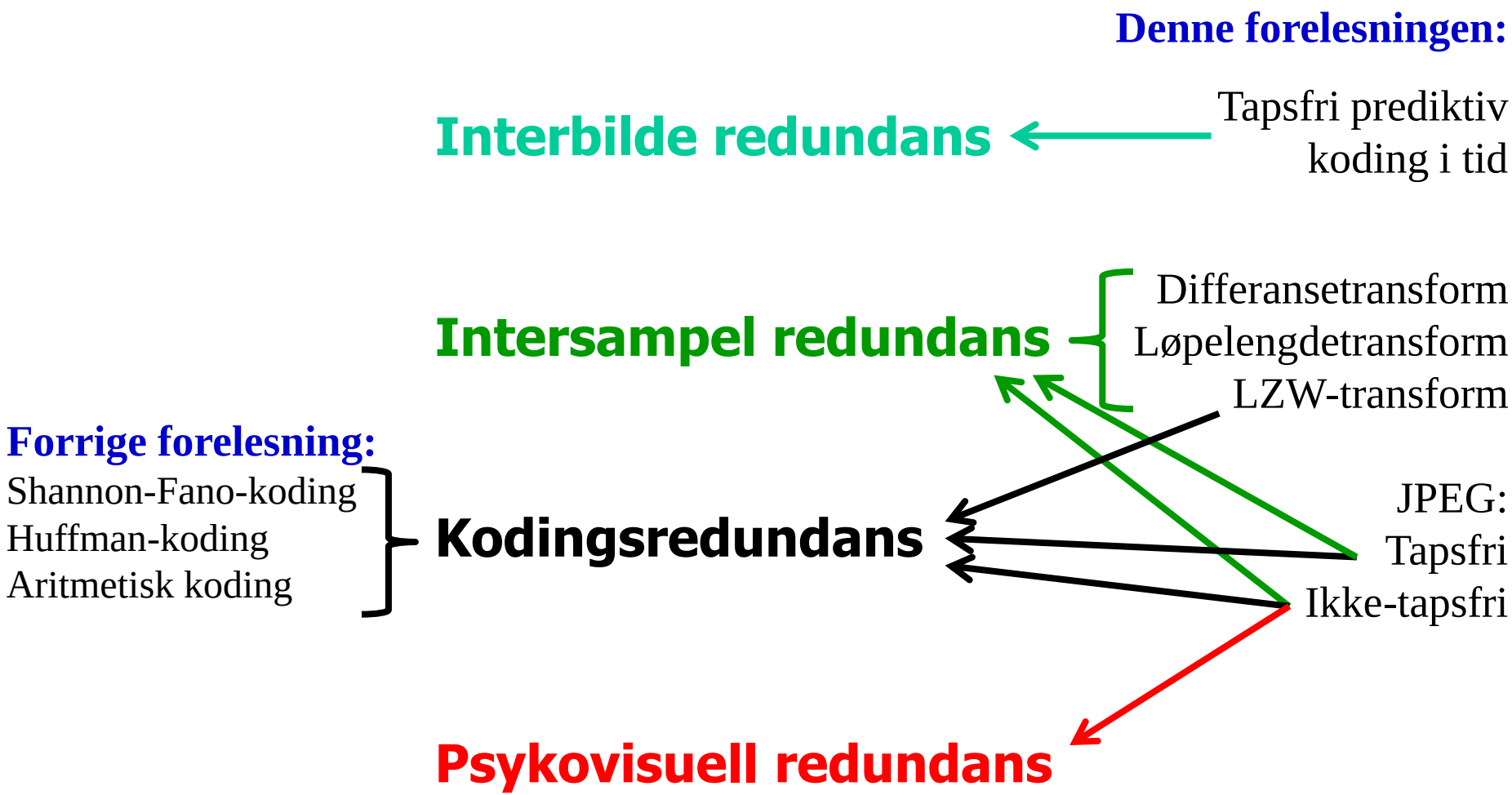


- Kompresjon kan gjøres:
  - **Eksakt / tapsfri** (eng.: *lossless*) – følg de grønne pilene.
    - Kan da eksakt rekonstruere det originale bildet.
  - **Ikke-tapsfri** (eng.: *lossy*) – følg de røde pilene.
    - Kan da (generelt) ikke eksakt rekonstruere bildet.
    - Resultatet kan likevel være «godt nok».
  - Det finnes en mengde ulike metoder innenfor begge kategorier.

Repetisjon: Fire typer redundans

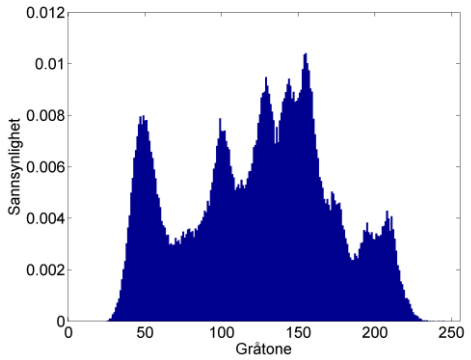
- Psykovisuell redundans. → Mer generelt: **Irrelevant informasjon**: Unødvendig informasjon for anvendelsen, f.eks. for visuell betraktning av hele bildet.
  - Det finnes informasjon vi ikke kan se.
    - Eksempler på enkle muligheter for å redusere redundansen: Subsample eller redusere antall biter per piksel.
- Interbilde-redundans.
  - Likhet mellom nabobilder i en tidssekvens.
    - Kan reduseres ved å lagre noen bilder i tidssekvensen og ellers differanser.
- Intersampel-redundans.
  - Likhet mellom nabopiksler.
    - Kan reduseres ved å løpelengde-transformere hver linje i bildet.
- Kodings-redundans.
  - Enkeltsymboler (enkeltpiksler) blir ikke lagret optimalt.
  - Gitt som gjennomsnittlig kodelengde minus et teoretisk minimum.
    - Velg en metode som er «grei» å bruke og som gir liten kodingsredundans.

Kompresjonsmetoder og redundans

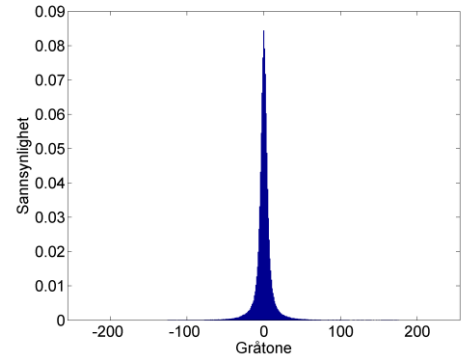


Differansetransform

- Utnytter at horisontale nabopiksler ofte har ganske lik gråtone.
- Gitt en rad i bildet med gråtoner:
  $f_1, \ldots, f_N$ der $0 \le f_i \le 2^b-1$
- Transformer (reversibelt) til
  $g_1 = f_1,\ g_2 = f_2-f_1,\ \ldots,\ g_N = f_N-f_{N-1}$
- Merk at: $-(2^b-1) \le g_i \le 2^b-1$
  - Må bruke b+1 biter per g_i hvis vi skal tilordne like lange kodeord til alle mulig verdier.
- De fleste differansene er nær 0.
  - Naturlig binærkoding av differansene er **ikke** optimalt.
- Bildet f gjenskapes ved transformen:
  $f_1 = g_1,\ f_2 = g_2+f_1,\ \ldots,\ f_N = g_N+f_{N-1}$



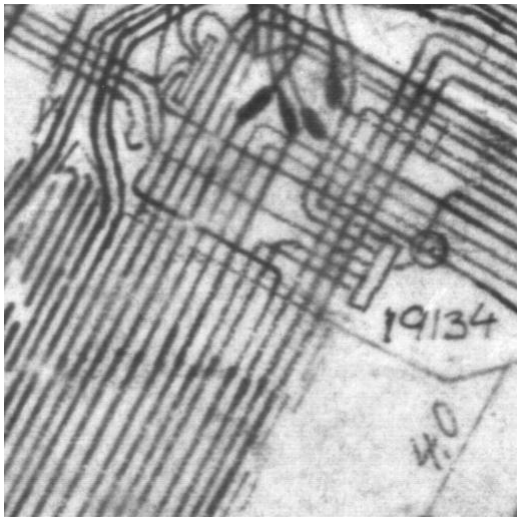
Entropi ≈ 7,45 => CR = b/c ≈ 1,07



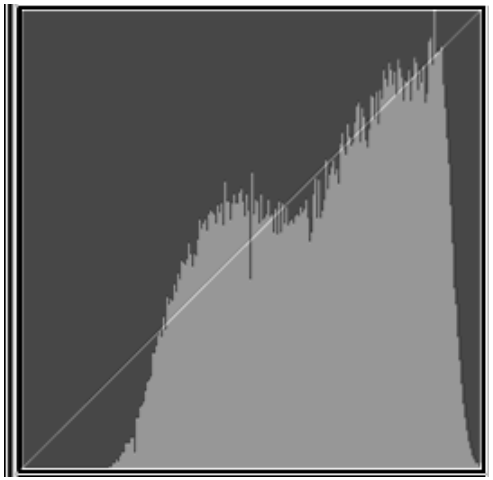
Entropi ≈ 5,07 => CR = b/c ≈ 1,58

Differansebilder og histogram

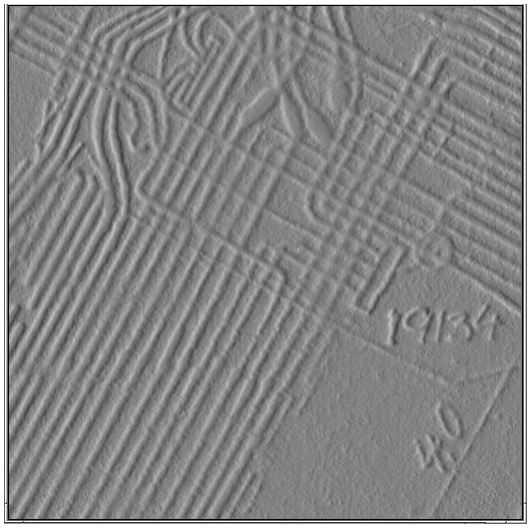
Original:



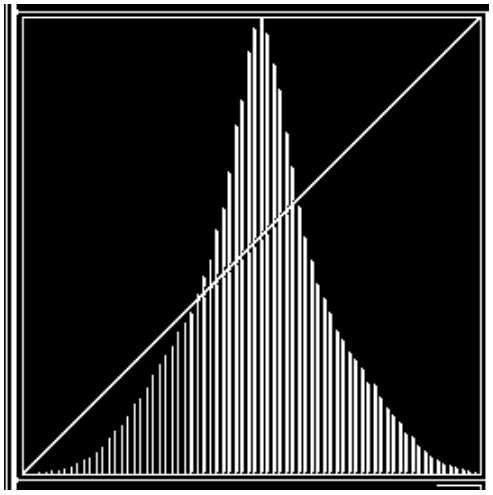
Originalt histogram:



Differansebilde:



Histogram til differansebildet:



Løpelengde-transform

- Ofte inneholder bildet objekter med lignende gråtoner, f.eks. svarte bokstaver på hvit bakgrunn.
- Løpelengde-transformen (eng.: *run-length transform*) **utnytter at horisontale nabopiksler har samme gråtone**.
  - Merk: Krever ekte likhet, ikke bare «omtrent like».
  - Løpelengde-transformen komprimerer bedre ettersom kompleksiteten i bildet blir mindre.
- Løpelengde-transformen er reversibel.
- Hvis pikselverdiene til en rad er:

  333333555555555544777777 (24 tall)
- Så starter løpelengde-transformen fra venstre og finner tallet 3 gjentatt 6 ganger etter hverandre, og returnerer derfor tallparet (3,6). **Formatet er: (tall, løpelengde)**
- For hele sekvensen vil løpelengdetransformen gi de 4 tallparene:

  (3,6), (5,10), (4,2), (7,6) (merk at dette bare er 8 tall)
- Kodingen avgjør hvor mange biter vi bruker for å lagre tallene.

Bare løpelengder, ikke tall

- I **binære bilder** trenger vi bare å angi løpelengden for hvert «run».
  - Må også angi om raden starter med hvitt eller svart «run», alternativt forhåndsdefinere dette og tillate en «run length» på 0.
- Histogrammet av løpelengdene er ofte ikke flatt (korte «runs» er ofte vanligere enn lengre «runs»).
  - Bør derfor benytte koding som gir korte kodeord til de hyppigste løpelengdene.
- I ITU-T (tidligere CCITT) standarden for dokument-overføring per fax så Huffman-kodes løpelengdene.
  - Forhåndsdefinerte Huffman-kodebøker, én for svarte og én for hvite ”runs”.
- (Tall-spesifiseringen i løpelengde-transformen av et gråtonebilde kan med fordel fjernes dersom ett tall forekommer *svært* hyppig.)

Repetisjon: Naturlig binærkoding

- Alle kodeord er like lange.
- Symbolets kode er binærrepresentasjonen til symbolets (null-indekserte) indeks.
  - Man legger til 0-ere foran slik at koden får den ønskelige lengden.
- Eks: En 3-biters naturlig binærkode har 8 mulige verdier:

Symbolindeks	0	1	2	3	4	5	6	7
Symbol	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7
Kode c_i	000	001	010	011	100	101	110	111

"Gray code"

- La oss se på et b-biters gråtonebilde som b bitplan lagt oppå hverandre.
- Naturlig binærkoding gir ofte høy bitplan-kompleksitet.
  - Selv om nabopiksler ofte har omtrent lik gråtoneverdi så kan mange biter endres i den konvensjonelle binærrepresentasjonen.
  - Eks.: 127 = 01111111 og 128 = 10000000
- Anta vi ønsker minst mulig kompleksitet i hvert bitplan.
  - F.eks. for vi ønsker å løpelengde-transformere hvert bitplan, og vi vil da få bedre komprimering desto lavere kompleksitet i hvert bitplan.
- Da bør vi bruke en alternativ binærrepresentasjonen som er slik at bitene avviker minst mulig for nære gråtoneverdier.
- I «Gray code» **skifter** alltid bare **én bit** når gråtonen endres med 1.
- Overgangen fra naturlig binærkode til «Gray code» er en transform, men både naturlig binærkode og «Gray code» er koder.
  - Både i naturlig binærkode og i «Gray code» er alle kodeord like lange. **Så forskjellen er bare hvilke kodeord som tilordnes hvilke gråtoner.**

"Gray code"-transformasjoner

- Transformasjon fra naturlig binærkode (BC) til Gray-kode (GC):

«MSB» står for «most significant bit»

1. Start med MSB i BC og behold alle 0 inntil du treffer 1.
2. 1 beholdes, men alle følgende bits komplementeres inntil du treffer 0.
3. 0 komplementeres, men alle følgende bit beholdes inntil du treffer 1.
4. Gå til 2.

Huskeregel: **Marker forskjellene** fra forrige bit. Bruk at før første bit er 0.

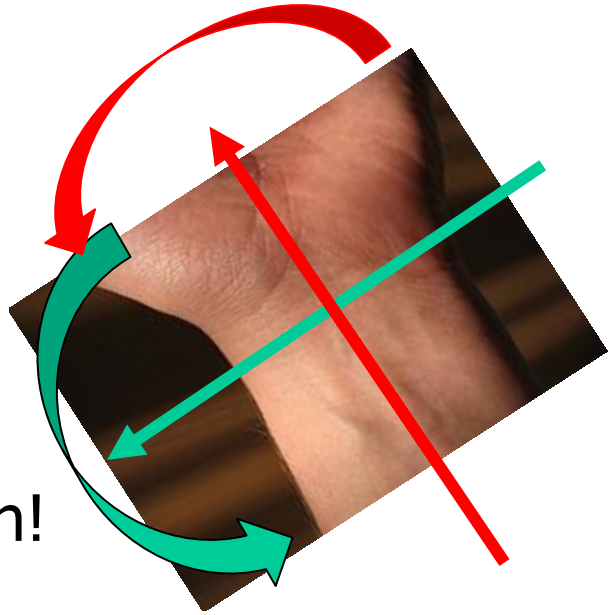
- Fra Gray-kode til naturlig binærkode:

1. Start med MSB i GC og behold alle 0 inntil du treffer 1.
2. 1 beholdes, men alle følgende bits komplementeres inntil du treffer 1.
3. 1 komplementeres, men alle følgende bits beholdes inntil du treffer 1.
4. Gå til 2.

Huskeregel: **Fyll inn mellom par av 1-ere** og fjern den siste 1-eren i hvert par. Hvis antall 1-ere er odde; fyll inn fra siste 1-er.

«Gray Code» & «Shaft Encoders»

- Anta at du skal bygge en robot-hånd.
- Du skal kunne rotere håndleddet om (minst) to akser.
- Du trenger «feedback».
- Det kan være støy i «feedback».
- Du trenger en representasjon som minimerer konsekvensen av støyen!

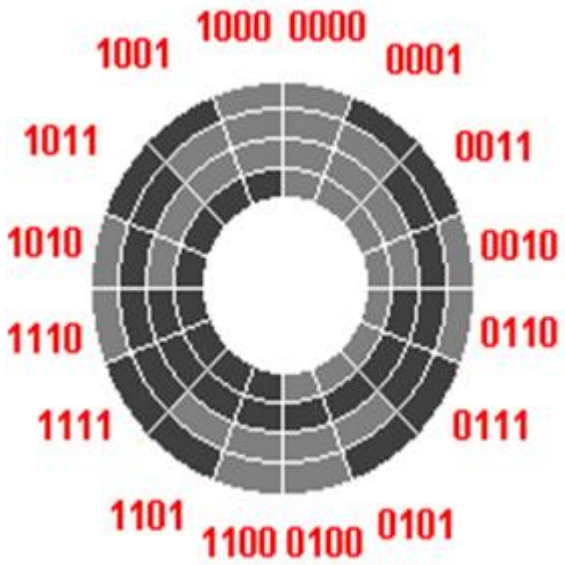


- Mer om Gray Code på https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder

Eksempel: Gray-koding

4-biters Gray- og naturlig binærkode:

Gray-kode	Naturlig binærk.	Desimalt tall
0000_g	0000_b	0_d
0001	0001	1
0011	0010	2
0010	0011	3
0110	0100	4
0111	0101	5
0101	0110	6
0100	0111	7
1100	1000	8
1101	1001	9
1111	1010	10
1110	1011	11
1010	1100	12
1011	1101	13
1001	1110	14
1000	1111	15

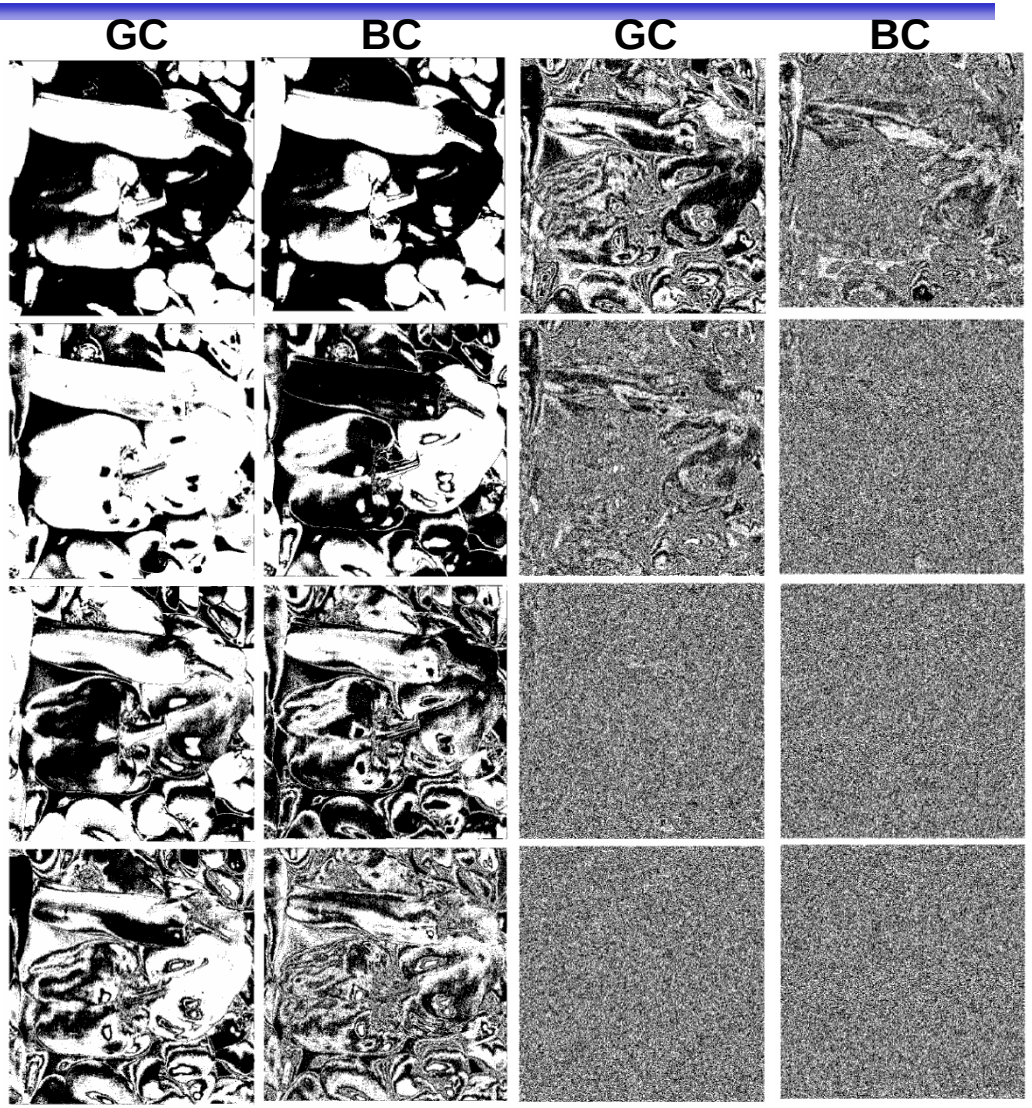


«Gray code shaft encoder»
Brukes for sikker avlesing av vinkel, f.eks. i styring av robot-armer.

Brukt i Frank Gray's patent fra 1953, men ble brukt i Émile Baudot's telegrafkode fra 1870.

Gray-kode i gråtonebilder

- MSB er alltid lik i de to representa-sjonene.
- Større homogene områder i hvert bitplan i Gray-kode enn i naturlig binærkode.
- Flere bitplan med «støy» i naturlig binærkode.
- => Løpelengdetransform av hvert bitplan gir bedre kompresjon vba. Gray-kode enn vba. naturlig binærkode.



Lempel-Ziv-Welch-transform

- Utnytter **mønstre** i meldingen.
  - Ser på samforekomster av symboler.
  - Reduserer derfor først og fremst intersample-redundans.

- Lar en **symbolsekvens (streng) få én kode**.

- **Bygger opp en liste** av symbolsekvenser/strenger.
  - … både under kompresjon og dekompresjon.
  - Listen skal verken lagres eller sendes.
    - Senderen bygger opp listen fra meldingen som kodes.
    - Mottakeren bygger opp listen fra meldingen som mottas.

- Det **eneste man trenger er et standard start-alfabet**.
  - F.eks. ASCII eller heltallene f.o.m. 0 t.o.m. 255.

Eksempel: LZW-transform

- Alfabetet: a, b og c med koder 0, 1 og 2, henholdsvis.
- Meldingen: ababcbababaaaaabab (18 symboler)
- LZW-sender: ny streng = sendt streng pluss neste usendte symbol
- LZW-mottaker: ny streng = nest siste streng pluss første symbol i sist tilsendte streng

Ser	Sender	Senders liste	Mottar	Tolker	Mottakers liste
		a=0, b=1, c=2			a=0, b=1, c=2
a	0	ab=3	0	a	
b	1	ba=4	1	b	ab=3
ab	3	abc=5	3	ab	ba=4
c	2	cb=6	2	c	abc=5
ba	4	bab=7	4	ba	cb=6
bab	7	baba=8	7		

» Vi mottar kode 7, men denne koden finnes ikke i listen!
» Fra ny-streng-oppskriften vet vi at kode 7 ble laget ved: ba + ?
» Siden kode 7 nå sendes, må: ? = b => 7 = ba + b = bab

Eksempel: LZW-transform

Melding:
ababcbabab
aaaaabab

Ser	Sender	Senders liste	Mottar	Tolker	Mottakers liste
		a=0, b=1, c=2			*a=0, b=1, c=2*
a	*0*	*ab=3*	*0*	*a*	
b	*1*	*ba=4*	*1*	*b*	*ab=3*
ab	*3*	*abc=5*	*3*	*ab*	*ba=4*
c	*2*	*cb=6*	*2*	*c*	*abc=5*
ba	*4*	*bab=7*	*4*	*ba*	*cb=6*
bab	*7*	*baba=8*	**7**	**bab**	**bab=7**
a	0	aa=9	0	a	baba=8
aa	9	aaa=10	**9**	**aa**	**aa=9**
aa	9	aab=11	9	aa	aaa=10
bab	7		7	bab	aab=11

- » Senderen må ha laget kode 9 da 0 = a ble sendt.
- » Siden kode 9 nå sendes, må siste symbol i kode 9 være a.
- » Derfor er må: 9 = a+a = aa

- Istedenfor **18 symboler er det sendt 10 koder**.
- 5 av 9 koder som ble laget (5 av totalt 12 koder) ble ikke brukt.

G&W-eksempel: LZW-transform

- Alfabet: 0, 1, …, 255 med koder 0, 1, …, 255, henholdsvis.
- Melding: aabbaabbaabbaabb (16 piksler med gråtoner a=39 og b=126)
- LZW-sender: ny streng = sendt streng pluss neste usendte symbol
- LZW-mottaker: ny streng = nest siste streng pluss første symbol i sist tilsendte streng

Ser	Sender	Senders liste	Mottar	Tolker	Mottakers liste
a	39	aa=256	39	a	
a	39	ab=257	39	a	256=aa
b	126	bb=258	126	b	257=ab
b	126	ba=259	126	b	258=bb
aa	256	aab=260	256	aa	259=ba
bb	258	bba=261	258	bb	260=aab
aab	260	aabb=262	260	aab	261=bba
ba	259	baa=263	259	ba	262=aabb
ab	257	abb=264	257	ab	263=baa
b	126		126	b	264=abb

- Bruker 9 biter for hver kode; opprinnelig bruktes 8 biter (ved naturlig b.k.).
- Kompresjonsrate CR = b/c = 8/((10x9)/16) = (16x8)/(10x9) = 1,4222…

Lempel-Ziv-Welch-transform

- LZW-kodene blir normalt naturlig binærkodet.
- Komprimerer typiske tekstfiler med en faktor på ≈2.
- **LZW-transform er mye brukt!**
  - Finnes i Unix' *compress* -kommando fra 1984.
  - Finnes i GIF-formatet fra 1987.
  - Er en opsjon i TIFF-formatet og i PDF-formatet.
- Men fått mye negativ oppmerksomhet pga. (nå utgått) patent.

- LZW-kodene kan **kodes videre** (f.eks. Huffman-kodes)!
- For å redusere antall mulige koder kan **listen begrenses**.
  - Vi kan sette en maksgrense, f.eks. 2^{b+1}, og så ikke lage flere koder.
  - Vi kan ha faste prosedyrer for sletting av lite brukte / gamle koder.
    - Ofte får vi ikke bruk for alle kodene, men vi må ha **faste** prosedyrer for sletting slik at mottaker sletter likt som sender.

Ikke-tapsfri kompresjon

- For å få høye kompresjonsrater, er det ofte nødvendig med ikke-tapsfri kompresjon.
- Husk: Man kan da **ikke rekonstruere** det originale bildet, fordi et **informasjonstap** har skjedd.
- Noen enkle metoder for ikke-tapsfri kompresjon:
  - Rekvantisering til færre antall gråtoner.
  - Resampling til dårligere romlig oppløsning.
  - Filtreringsbaserte metoder, f.eks.
    erstatt hvert ikke-overlappende 3×3-område
    med én piksel som har verdi lik f.eks.
    middelverdien eller medianverdien av de 9 pikselverdiene.

Hvor god er bildekvaliteten?

- For **ikke-tapsfri kompresjon** er det svært nyttig å kunne måle om kvaliteten på ut-bildet er «**god nok**».
- La oss forsøke å gjøre dette ved å definere feilen forårsaket av komprimeringen som:

  e(x,y) = g(x,y) – f(x,y)

  Feil-bildet = Ut-bildet etter kompresjon og så dekompresjon – Inn-bildet

- RMS-avviket (kvadratfeilen) mellom bildene er:

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} e^2(x,y)}$$

(bildet har størrelse M×N)

- Vi kan betrakte feilen som **støy** og se på midlet kvadratisk signal-støy-forhold (SNR_{ms}):

$$SNR_{MS} = \frac{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} g^2(x,y)}{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} e^2(x,y)}$$

Hvor god er bildekvaliteten?

- RMS-verdien av SNR er da:

$$SNR_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} g^2(x,y)}{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} e^2(x,y)}}$$

- Bildekvalitetsmålene ovenfor slår sammen alle feil over hele bildet.
  - Vårt synssystem er ikke slik!
    - F.eks. vil mange små avvik kunne føre til en større SNR_{RMS} enn enkelte manglende eller falske objekter i forgrunnen, men vi vil oppfatte at sistnevnte er av dårligst kvalitet.

- Ofte ønsker vi at bildekvalitetsmålet skal gjenspeile **vår oppfatning av bildets kvalitet**.
  - F.eks. hvis formålet med bildet er visuell betraktning.
  - Husk: Vår oppfatning er subjektiv!

Hvor god er bildekvaliteten?

- Et bildekvalitetsmål som godt gjenspeiler vår oppfatning vil typisk basere seg på flere parametere.
  - Hver parameter prøver å indikere hvor ille vi oppfatter en side ved kompresjonsfeilen.
  - Bildekvalitetsmålet er én verdi som baserer seg på alle parameterne.

- Feil rundt kanter oppfattes som ille.
- Feil i forgrunnen oppfattes som verre enn feil i bakgrunnen.
- Manglende eller falske strukturer oppfattes som ille.

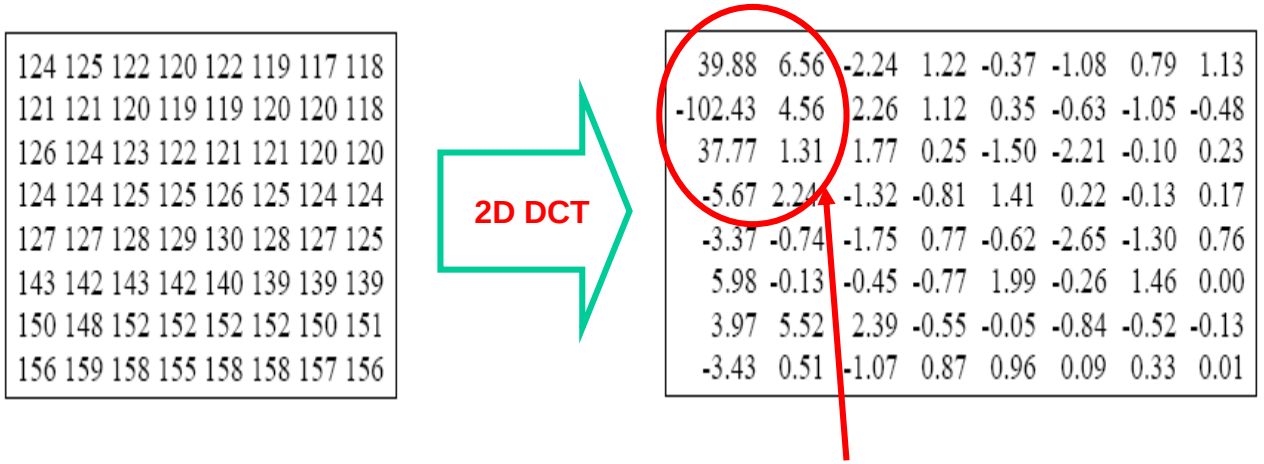
- **Kompresjonsgraden** bør trolig **variere rundt i bildet**:
  - Komprimér nesten-homogene områder kraftig.
    - Har lite informasjon og få koeffisienter i 2D DFT-en har høy absoluttverdi.
  - Komprimér kanter og linjer mindre.
    - Har mer informasjon og flere koeffisienter i 2D DFT-en har høy absoluttverdi.

JPEG-standarden

- JPEG (Joint Photographic Expert Group)
  er en av de vanligste bildekompresjonmetodene.
- JPEG-standarden (opprinnelig fra 1992) har varianter både for tapsfri og ikke-tapsfri kompresjon.
  - Den tapsfrie varianten er ikke JPEG-LS (som kom i 1998).
- I begge tilfeller brukes
  enten Huffman-koding eller aritmetisk koding.
- I den tapsfrie varianten benyttes **prediktiv koding**.
- I den ikke-tapsfrie varianten benyttes en
  2D diskret cosinus-transform (2D DCT).

Ikke-tapsfri JPEG-kompresjon

1. Hver bildekanal deles opp i blokker på 8x8 piksler, og hver blokk i hver kanal kodes separat.
2. Dersom intensitetene er gitt uten fortegn; trekk fra 2^{b-1} der 2^b er antall intensitetsverdier.
   - Gjør at forventet gjennomsnittlig pikselverdi er omtrent 0.
   - Eks.: Intensitetsintervallet [0, 255]; 128 trekkes fra alle pikselverdiene.
3. Hver blokk transformeres med 2D DCT (diskret cosinus-transform).



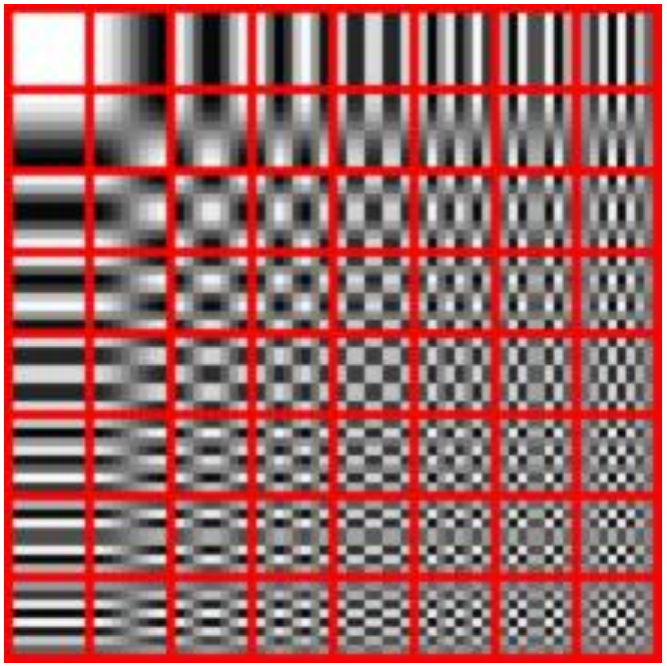
   - Mye av informasjonen i de 64 pikslene samles i en liten del av de 64 2D DCT-koeffisientene; nemlig de i øverste, venstre hjørne.

2D diskret cosinus-transform

- Grunnpilaren i ikke-tapsfri JPEG-kompresjon er 2D DCT:

$$F(u,v) = \frac{2}{\sqrt{MN}} c(u)c(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \cos\left[\frac{\pi u}{M}\left(x+\frac{1}{2}\right)\right] \cos\left[\frac{\pi v}{N}\left(y+\frac{1}{2}\right)\right], \qquad c(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{hvis } \xi = 0 \\ 1 & \text{ellers} \end{cases}$$

- Sterkt relatert til 2D DFT.
- I JPEG transformerer vi 8x8-blokker så vi bruker bare de 64 «8x8-cosinus-bildene»:
  - For hvert bilde vi går til høyre eller ned så økes den tilhørende frekvenskomponenten med 0,5.
  - Husk: I 2D DFT økte frekvenskomp. med 1, som lagde par med like cosinus-bilder.
  - Husk: I 2D DFT hadde vi også noen sinus-bilder.
  - 2D DCT-koeffisientene beregnes analogt med det vi gjorde for 2D DFT; summere punktproduktet mellom 8x8-blokken og hvert «cosinus-bilde».
  - 2D DCT beregnes hurtig ved å forhåndsberegnes de 64 «8x8-cosinus-bildene».

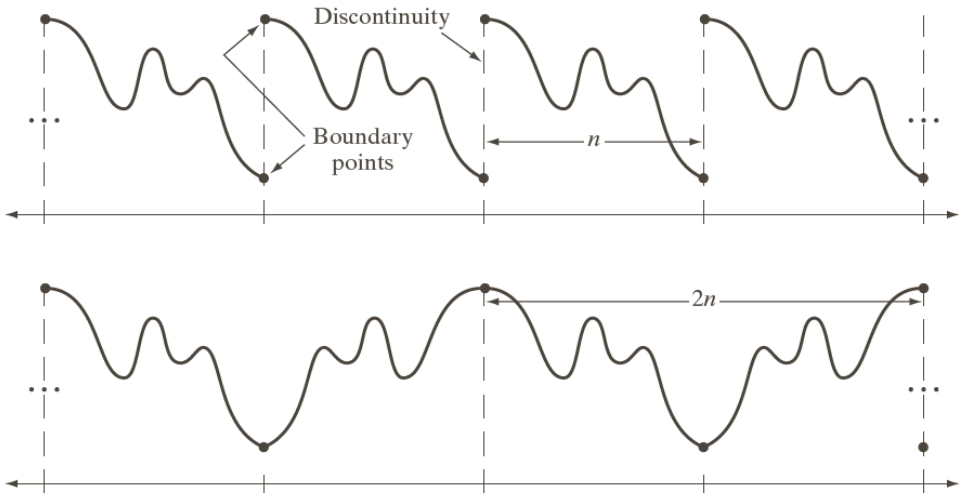


Hvorfor DCT og ikke DFT?

- Den implisitt antatte N-punkts periodisiteten i DFT-en vil introdusere høye frekvenser pga. randdiskontinuitet.
  - Fjerner vi disse frekvensene får vi kraftige blokk-artefakter.
  - Beholder vi dem reduseres kompresjonsraten ift. DCT der vi ofte slipper å beholde de fleste høye frekvenser.

N er lengden av 1D-bildet.

I JPEG-sammenheng er «randen» blokkranden.



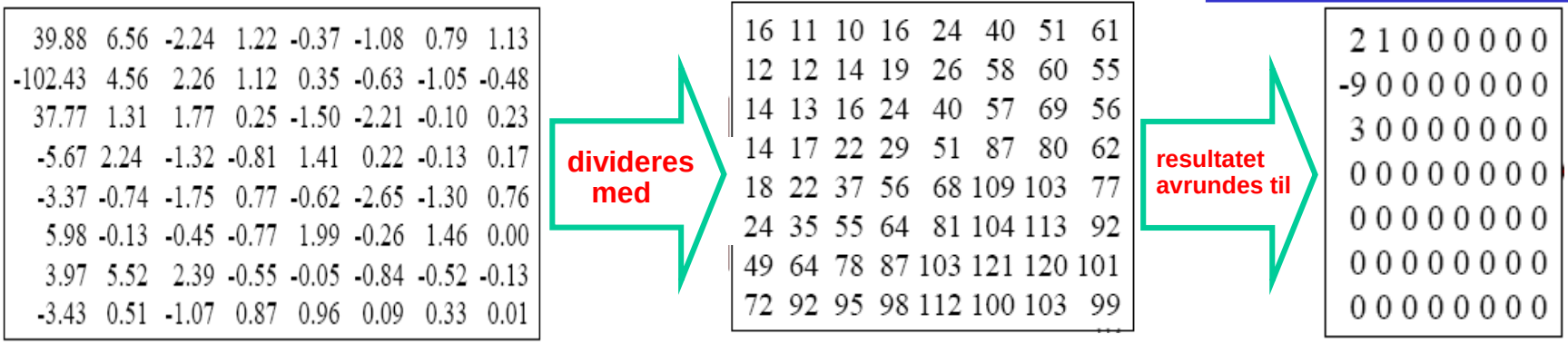
- DCT er implisitt 2N-punkts periodisk og symmetrisk om N, derfor **introduseres ikke disse høye frekvensene**.

Ikke-tapsfri JPEG-kompresjon

JPEG-kompresjonsalgoritmen fortsetter med at:

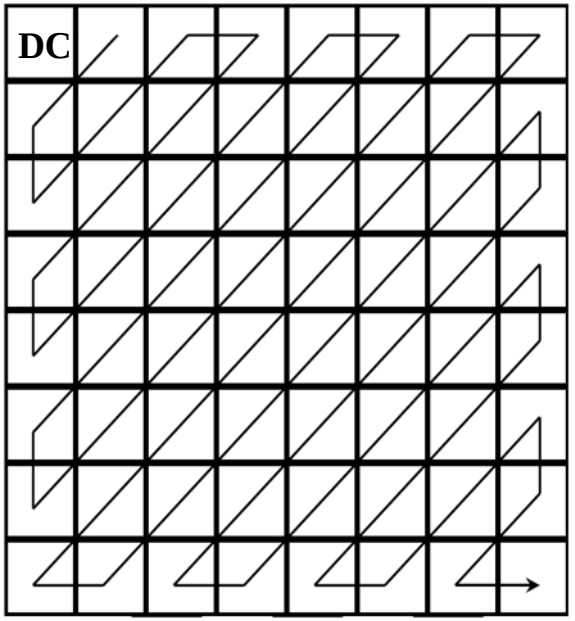
4. 2D DCT-koeffisientene
   a) punktdivideres med en vektmatrise og deretter
   b) avrundes til nærmeste heltall.

Før avrunding er verdiene ca. 2,49, 0,60, -0,22, osv.



Ikke-tapsfri JPEG-kompresjon (sekvensiell modus)

DC- og AC-elementene behandles nå separat.



AC-elementene:

1. Sikk-sakk-skannes:
   - Ordner elementene i en 1D-tallfølge.
   - Absoluttverdien av elementene vil stort sett avta utover i tallfølgen.
   - Mange koeffisienter er null, spesielt litt uti tallfølgen.
2. 0-basert løpelengdetransform av 1D-tallfølgen.
3. «Løpelengdeparene» Huffman- eller aritmetisk kodes.
   - Et «løpelengdepar» er her (antall 0-ere, antall biter i «ikke-0»).
   - Aritmetisk koding gir ofte 5-10 % bedre kompresjon (ifølge JPEG-medlemmers tester)

Ikke-tapsfri JPEG-kompresjon

DC- og AC-elementene
behandles nå separat.

DC-elementene:

1. For hver kanal samles DC-elementene fra alle blokkene.

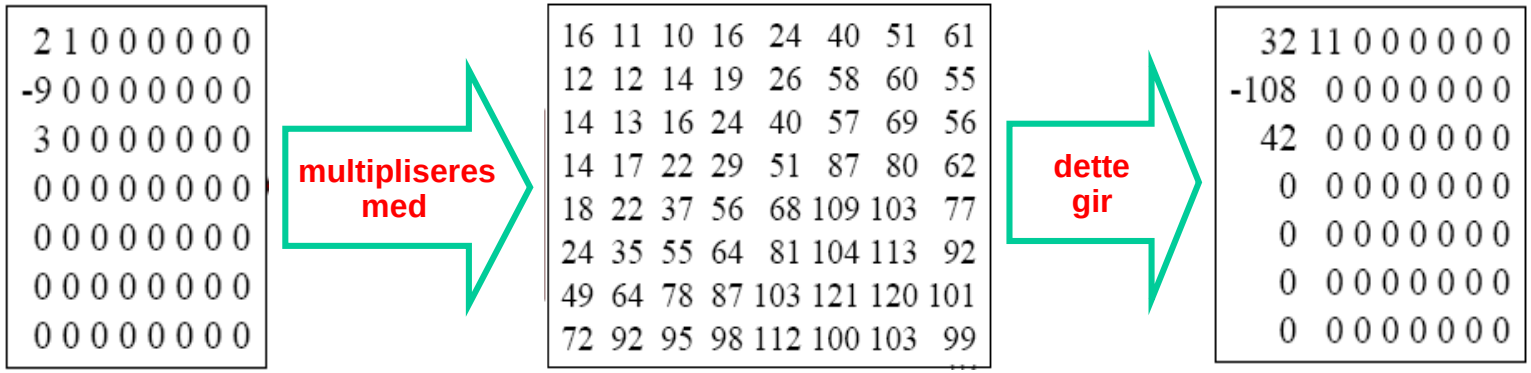
2. Disse er korrelerte og blir derfor differansetransformert.

3. Differansene Huffman-kodes eller aritmetisk kodes.
   - Mer presist: Antall biter i hver differanse entropikodes.

Ikke-tapsfri JPEG-dekompresjon

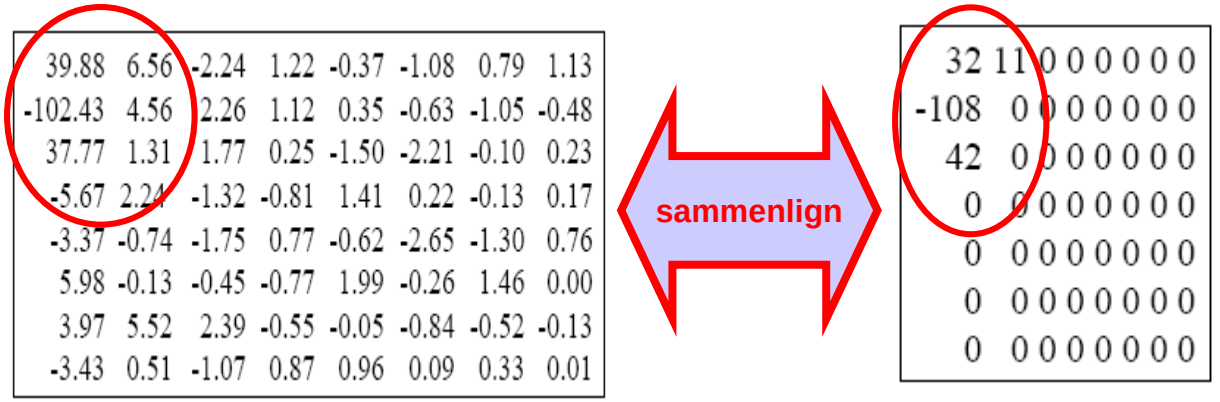
- Huffman-kodingen og den aritmetiske kodingen er reversibel, og gir AC-«løpelengdeparene» og DC-differansene.
- «Løpelengdetransformen» og differansetransformen er reversibel, og gir de skalerte og kvantifiserte 2D DCT-koeffisientene.
- Sikk-sakk-transformen er reversibel, og gir en heltallsmatrise.

- Denne matrisen punktmultipliseres med vektmatrisen.



Ikke-tapsfri JPEG-dekompresjon

- Produktet er **IKKE** helt likt 2D DCT-koeffisientene.



- Men **de store trekkene er bevart**.
  - Her (og oftest): De store tallene i øvre venstre hjørne.
  - I enkelte blokker (og i svært detaljrike bilder med gjennomgående høy kvalitet): Noen andre tall også.
- De fleste tallene i matrisen er lik 0,
  men disse var også opprinnelig nær 0.

Ikke-tapsfri JPEG-dekompresjon

- Så gjør vi en invers 2D DCT, og avrunder de resulterende verdiene til nærmeste heltall.

- Vi har da fått rekonstruert en 8×8 piksels bildeblokk.

32	11	0	0	0	0	0	0
-108	0	0	0	0	0	0	0
42	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

123	122	122	121	120	120	119	119
121	121	121	120	119	118	118	118
121	121	120	119	119	118	117	117
124	124	123	122	122	121	120	120
130	130	129	129	128	128	128	127
141	141	140	140	139	139	138	137
152	152	151	151	150	149	149	148
159	159	158	157	157	156	155	155

Ikke-tapsfri JPEG-dekompresjon

- Differansene fra den originale blokken er **små**!

124	125	122	120	122	119	117	118
121	121	120	119	119	120	120	118
126	124	123	122	121	121	120	120
124	124	125	125	126	125	124	124
127	127	128	129	130	128	127	125
143	142	143	142	140	139	139	139
150	148	152	152	152	152	150	151
156	159	158	155	158	158	157	156

-

123	122	122	121	120	120	119	119
121	121	121	120	119	118	118	118
121	121	120	119	119	118	117	117
124	124	123	122	122	121	120	120
130	130	129	129	128	128	128	127
141	141	140	140	139	139	138	137
152	152	151	151	150	149	149	148
159	159	158	157	157	156	155	155

=

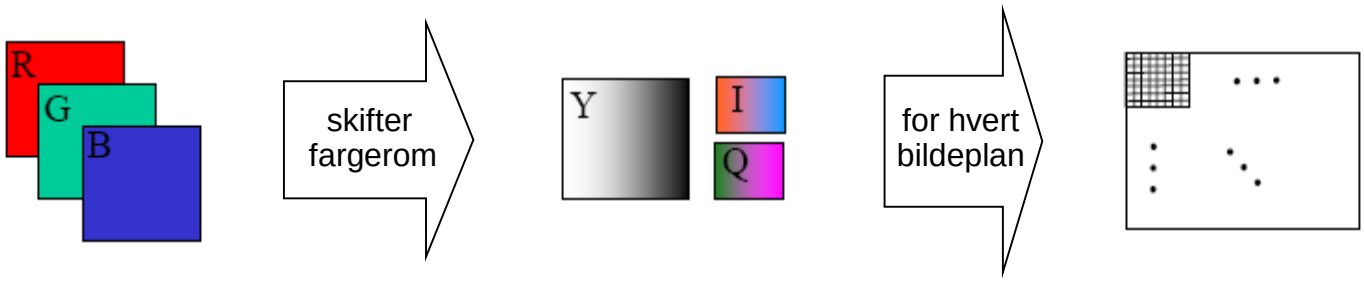
1	3	0	-1	-2	-1	-2	-1
0	0	-1	-1	0	2	2	0
5	3	3	3	3	3	3	3
0	0	2	3	4	4	4	4
-3	-3	-1	0	2	0	-1	-2
2	1	3	2	1	0	1	2
2	-4	1	1	2	3	1	3
-3	0	0	-2	-1	2	2	1

- De er **likevel ikke 0**.
- Det kan bli gjort forskjellig feil på nabopiksler, spesielt dersom de tilhører forskjellige blokker.
  - Kompresjon / dekompresjon kan derfor gi **blokk-artefakter**; rekonstruksjonsfeil som gjør at vi ser at bildet er blokk-inndelt.

Ikke-tapsfri JPEG-kompresjon av fargebilde

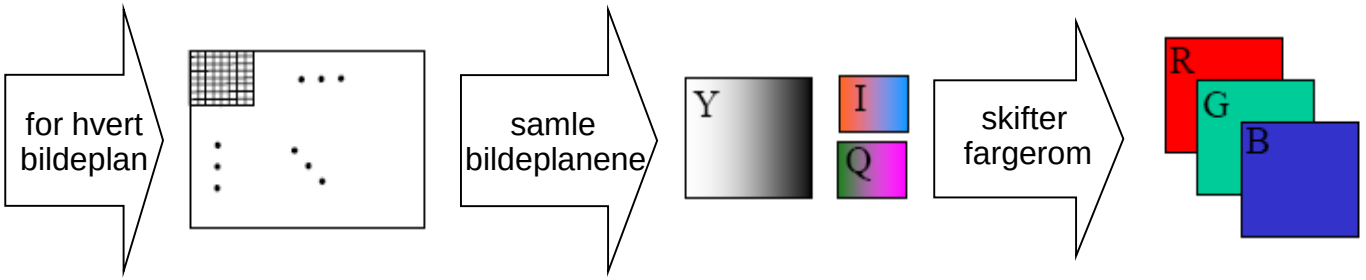
- Skifter fargerom for å separere lysintensitet fra kromasi.
  - Stemmer bedre med hvordan vi oppfatter et fargebilde.
    - Lysintensiteten er viktigere enn kromasi for oss.
  - Kan også gi lavere kompleksitet i hver kanal.
- Nedsampler (normalt) kromasitet-kanalene.
  - Typisk med en faktor 2 i begge retninger.
- Hver bildekanal deles opp i blokker på 8x8 piksler, og hver blokk kodes separat som før.
  - Kan bruke forskjellige vektmatriser for intensitet- og kromasitet-kanalene.

Intet fargerom er spesifisert i del 1 (1992) av JPEG-standarden. En senere del, del 5 (2009), spesifiserer filformatet JFIF (JPEG File Interchange Format). Her brukes fargemodellen $Y'C_BC_R$



Ikke-tapsfri JPEG-dekompresjon av fargebilde

- Alle dekomprimerte 8x8-blokker i hver bildekanal samles til en matrise for den bildekanalen.
- Bildekanalene samles til et fargebilde.
- Vi skifter fargerom fra den brukte fargemodellen til:
  - til RGB for fremvisning, eller
  - til CMYK for utskrift.



- Selv om kromasitet-kanalene har redusert oppløsning, har vi full oppløsning i RGB-fargerommet.
  - Kan få 8×8-blokkartefakter i intensitet.
  - Ved en faktor 2 nedsampling i hver retning av kromasitet-kanalene kan vi få 16×16 piksels blokkartefakter i kromasi («fargene»).

Rekonstruksjonsfeil i gråtonebilder

- JPEG-kompresjon kan gi **8×8-piksels blokk-artefakter**, **glatting** og **ringinger**.
- Avhengig av vektmatrisen
  - som bestemmer hvor mange koeffisienter som lagres, og hvor presist disse lagres.

Blokk-artefakter

- Blokk-artefaktene øker med kompresjonsraten.

- Øverst: kompresjonsrate = 25
- Nederst: kompresjonsrate = 52

Eksperiment: Skalering av vektmatrisen

- Ikke-tapsfri JPEG-komprimering og -dekomprimering ved bruk av vektmatrisen:

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

skalert med hhv.:

1, 2, 4

8, 16, 32

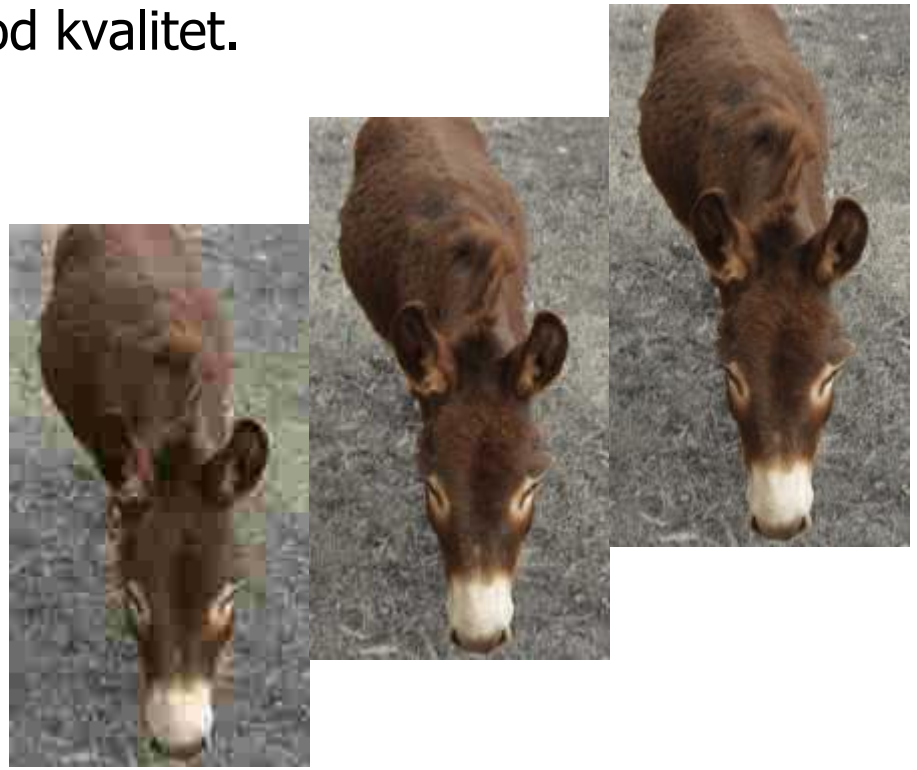
- Får da kompresjons-rater på hhv.:

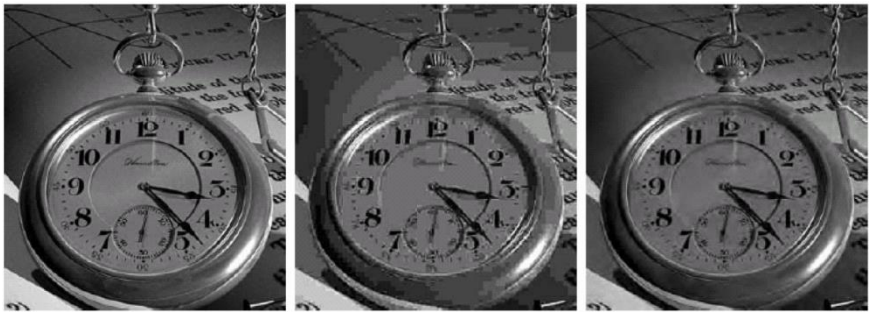
12, 19, 30

49, 85, 182

Rekonstruksjonsfeil i fargebilder

- 24-biters RGB-bilde komprimert til 1,5-2 biter per piksel (bpp).
- 0,5 - 0,75 bpp gir god/meget god kvalitet.
- 0,25 - 0,5 bpp gir noen feil.
  - 8x8-blokkeffekt i intensitet.
  - Kromasifeil («fargefeil») i muligens større blokker.
- JPEG 2000 bruker ikke blokker.
  - Gir høyere kompresjon.
  - Og/eller mye bedre kvalitet:

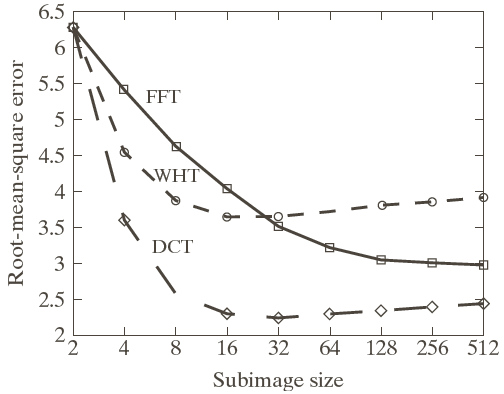




Original JPEG JPEG 2000

Blokkstørrelse

- Kompresjonsraten og eksekveringstiden øker med blokkstørrelsen, men rekonstruksjonsfeilen avtar opp til et punkt:
- Eksperiment: For forskjellige n;
  1. Del opp bildet i nxn piksels blokker.
  2. 2D DCT, behold 25% av koeffisientene.
  3. Invers 2D DCT og beregn kvadratfeilen.
- **Blokk-artefakter avtar** med blokkstørrelse:



Original 2x2-blokker 4x4-blokker 8x8-blokker

- Men **ringing-problemet øker** med blokkstørrelsen!

Tapsfri JPEG-kompresjon

- I den tapsfrie varianten av JPEG benyttes **prediktiv koding**.
- Generelt for prediktiv koding så kodes:
  e(x,y) = f(x,y) - g(x,y)
  der g(x,y) er **predikert fra m naboer** rundt (x,y).
- 1D lineær prediktor av orden m: $g(x,y) = round\left[\sum_{i=1}^{m} \alpha_i \; f(x, y-i)\right]$
- Førsteordens lineær prediktor: $g(x,y) = round\left[\alpha \; f(x,y-1)\right]$
  - **Hvilken transform er dette hvis α=1?**
- Med lik-lengde koding trenger vi et ekstra bit per piksel e(x,y).
  - Eller enda flere biter dersom summen av prediksjonskoeffisientene, α_i, er mer enn 1.
  - Løsning: **Entropikoding**.

Tapsfri JPEG-kompresjon

- I tapsfri JPEG-kompresjon predikeres f(x,y) ved bruk av opptil 3 elementer:
  - X er pikselen vi ønsker å predikere.
  - Benytter 1-3 av elementene A, B og C.

C	B	
A	X	

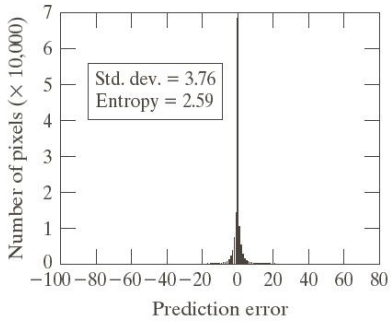
- Prediksjonsfeilene entropikodes.
  - Huffman-koding eller aritmetisk koding.

- Kompresjonsraten er avhengig av:
  - Biter per piksel i originalbildet.
  - Entropien til prediksjonsfeilene.
- For vanlige fargebilder blir kompresjonsraten ≈2.

- Brukes for det meste kun i medisinske anvendelser der det ikke er akseptabelt å introdusere kompresjonsfeil.

Tapsfri koding av bildesekvenser

- Prediksjon også mulig i tidssekvenser: $g(x,y,t) = round\left[\sum_{i=1}^{m} \alpha_i \; f(x,y,t-i)\right]$
- Enkleste mulighet: Førsteordens lineær: $g(x,y,t) = round\left[\alpha \; f(x,y,t-1)\right]$
- Eksempel:
  - Differanse-entropien er lav: H=2,59
  - Gir en optimal kompresjonsrate (ved koding av enkeltdifferanser):
    CR ≈ 8/2,59 ≈ 3
- Bevegelse-deteksjon og bevegelse-kompensasjon innenfor blokker er nødvendig for å øke kompresjonsraten.
  - Blokkene kalles ofte **makroblokker** og kan f.eks. være 16x16 piksler.



Digital video

- Kompresjon av digitale bildesekvenser/video er vanligvis basert på **prediktiv koding med bevegelse-kompensasjon og 2D DCT**.
- I nyere standarder er prediksjonen basert på **både tidligere og fremtidige bilder**.
  - Typisk: Noen bilder er upredikerte, noen flere bruker kun tidligere bilder, mens de fleste bruker både tidligere og fremtidige.
- Med 50-60 bilder i sekundet er det mye å spare på prediksjon!
- Det finnes mange standarder for videokompresjon.
  - ISO/IEC gjennom sin Motion Picture Expert Group (MPEG): MPEG-1 (1992), MPEG-2 (1994), MPEG-4 (1998), MPEG-H (2013) og MPEG-I (2020).
  - ITU-T gjennom sin Visual Coding Experts Group (VCEG): H.120 (1984) og H.26x
  - H.264 (2003) = MPEG-4 Part 10 er mest vanlig.
  - H.265 (2013) = MPEG-H Part 2 skal gi 25-50 % lavere bitforbruk.
  - H.266 (2020) = MPEG-I Part 3 skal gi ytterligere 30-50 % lavere bitforbruk.
  - AOMedia Video 1 (AV1) (2018) er et åpent og godt alternativ.

Oppsummering: Kompresjon

- Hensikt: Kompakt data-representasjon, «samme» informasjon.
  - Fjerner eller reduserer redundanser.
- Kompresjon er basert på informasjonsteori.
- Antall biter per symbol/piksel er sentralt, og varierer med kompresjonsmetodene og meldingene.
- Sentrale algoritmer:
  - Transformer (brukes før koding): Løpelengdetransform, LZW-transform, 2D DCT, og prediktiv koding; differansetransform, differanse i tid m.m.
  - Koding (husk kodingsredundans og entropi!)
    - Huffman-koding: Til å lage en forhåndsdefinert kodebok, eller bruk symbolhistogrammet til meldingen og send kodeboken.
    - Aritmetisk koding: Representerer meldingen som et intervall og så koder intervallet som det binært sett korteste tallet i intervallet. Send eller ha forhåndsdefinert modellen.