

Beeldkwaliteit van bronkodering voor digitale video-recording

Citation for published version (APA):

Westerink, J. H. D. M. (1986). *Beeldkwaliteit van bronkodering voor digitale video-recording*. (IPO rapport; Vol. 559). Instituut voor Perceptie Onderzoek (IPO).

Document status and date:

Gepubliceerd: 31/10/1986

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Rapport no. 559

Beeldkwaliteit van bronkodering
voor digitale video-recording

J.H.D.M. Westerink

Samenvatting

Voor een computerprogramma voor image compression op DCT-basis zijn, aan de hand van stilstaande zwart-wit beelden, een aantal verschillende quantizers en andere inputparameters onderzocht. Daaruit bleek, dat niet de kwantisatie, doch de selectie van de DCT-coëfficiënten bepalend is voor de beeldkwaliteit. Een suggestie voor het verbeteren van het programma is dan ook het invoeren van een spatiale weging van de DCT-coëfficiënten. Verder is een optimalisatie van alle belangrijke parameters van het bestaande programma uitgevoerd.

Met beelden, gekodeerd bij een optimale parameterinstelling, is een klein proefpersonenexperiment uitgevoerd. Resultaten geven onder meer verschillen tussen experts met en zonder voorkennis te zien, en tussen de verschillende testscenes. Gemiddeld over alle proefpersonen en scenes ligt de drempel voor de zichtbaarheid van een kwaliteitsverslechtering als gevolg van codering bij een bit rate van ongeveer 13.5 Mbit/s.

Ook bleek het mogelijk de kwaliteitsverslechtering ten gevolge van het gebruiken van een simpelere set van quantizers te karakteriseren als gelijkwaardig aan een kwaliteitsverslechtering ten gevolge van het verlagen van de bit rate met 0.6 Mbit/s. Deze verslechtering ligt overigens onder drempelnivo.

Voorwoord

Dit verslag is een weergave van onderzoek, uitgevoerd in het kader van de Van Houten-stage voor nieuwe Nat.Lab.-medewerkers. De stage is uitgevoerd op het basis-ontwikkelingslaboratorium van de product divisie Consumer Electronics, onder begeleiding van de heren Van Heuven, Borgers en De With, in de maanden juli tot en met oktober 1986. Onderwerp van de stage is de beeldkwaliteit van een toekomstige digitale videorecorder zoals deze aan de hand van computer-simulaties naar voren komt (DVS-project).

Van harte wil ik mijn begeleiders en ook de overige leden van de groep bedanken voor de prettige werksfeer, waarin zij mij opgenomen hebben. Het heeft er onder andere toe geleid, dat ik mij blijkens mijn kijkerstest-resultaten nu ook een 'experienced viewer' kan noemen.

Inhoud

| | pagina |
|--|--------|
| 1. Het kodeerprogramma | 4 |
| 1.1 Doel en randvoorwaarden | 4 |
| 1.2 Programma-opbouw | 4 |
| 2. Onderzoek: optimalisatie | 7 |
| 2.1 Inleiding | 7 |
| 2.2 Materiaal | 7 |
| 2.3 Resultaten | 8 |
| 2.3.1 Selectie: Nieuwe inputparameters | 8 |
| 2.3.2 Geoptimaliseerde inputparameters | 10 |
| 3. Experiment met proefpersonen | 11 |
| 3.1 Doelstelling | 11 |
| 3.2 Proefopzet | 11 |
| 3.3 Resultaten | 12 |
| 3.3.1 Drempelmetingen | 12 |
| 3.3.2 Simpele en complexe quantizers | 14 |
| Referenties | 15 |
| Bijlage | 16 |

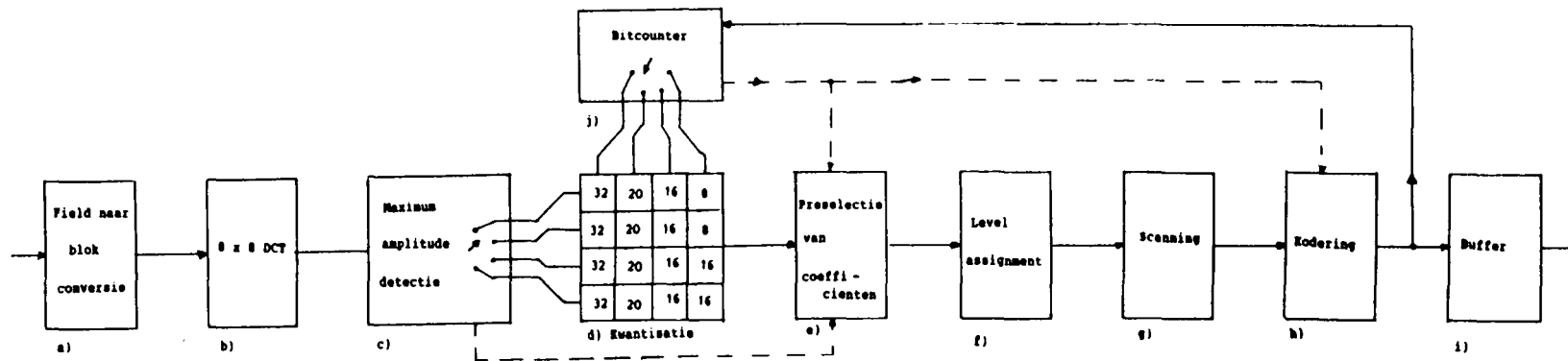


Fig. 1. Schema koderingsprogramma

Het programma bestaat uit de modules a t/m j, die in de tekst nader verklaard worden.

De getallen in de kwantisatiemodule d geven het aantal outputlevels van de betreffende quantizer aan.

1. Het kodeerprogramma

1.1 Doel en randvoorwaarden

Aan het bouwen van een systeem voor digitale videorecording zitten verschillende aspecten, die in het DVS-project geïntegreerd in beschouwing worden genomen. Binnen het basis-ontwikkelingslaboratorium van CE concentreert men zich voor namelijk op het signaal-processingsaspect. Randvoorwaarden worden onder andere gesteld door de consument, die bijvoorbeeld een quick search mode op zijn recorder zal verwachten. Ook de technologie op het gebied van magnetische recording stelt zijn eisen, bijvoorbeeld dat de informatiestroom onder een waarde van zo'n 20 Mbit/s blijft.

Om dit laatste te bereiken moet een aanzienlijke reductie in informatie-dichtheid worden gerealiseerd. Voor het volledig verzenden van het helderheidssignaal van een sequence van gedigitaliseerde beelden, is een bit rate van zo'n 160 Mbit/s nodig. Men tracht deze kompressie te bereiken door het verwaarlozen van de in ieder beeld aanwezige (visueel) redundante informatie, hetgeen zijn beslag krijgt in het grover kwantiseren van de beeldinformatie en in het selectief verzenden ervan. De hiervoor toegepaste methode werkt op grond van discrete cosinus transformaties (DCT). In de vakliteratuur worden DCT-methodes sinds de jaren zeventig uitvoerig beschreven (ref. 1-3). Ook is onderzoek gedaan naar DCT-methodes in connectie met modellen van het visuele systeem van de mens (o.a. Nill, ref. 4). Soortgelijke onderzoeken binnen het DVS-project worden voorsnog gedaan aan de hand van computersimulaties. Deze onderzoeken worden uitgevoerd met behulp van een VTE-videosimulator met twee beeldgeheugens en aan de hand van een DCT-koderingsprogramma (VAX-Fortran, auteur Peter de With), dat op originele videobeelden DCT-kodering toepast.

1.2 Programma-opbouw

In figuur 1 is een schema gegeven van de opbouw van het koderingsprogramma. De functie en werking ervan worden hieronder per module beschreven.

- a) Twee fields uit een beeldsequence worden tot een frame gemaakt, dat lijn voor lijn wordt ingelezen. Daarna worden de beelden opgedeeld in blokken van 8 x 8 pixels. Samplefrequentie van de beelden is 13.5 MHz (volgens de normen van CCIR-Rec. 601, ref. 5), hetgeen neerkomt op 720 pixels per lijn en 576 lijnen per beeld.
- b) Op de grijswaarden $f(j,k)$ van een blokje van 8 x 8 pixels ($N=8$) wordt een discrete cosinus transformatie uitgevoerd:

$$DCT(u,v) = 4C(u)C(v)/N^2 * \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} f(j,k) * \cos((2j+1)u * \pi / 2N) * \cos((2k+1)v * \pi / 2N)$$

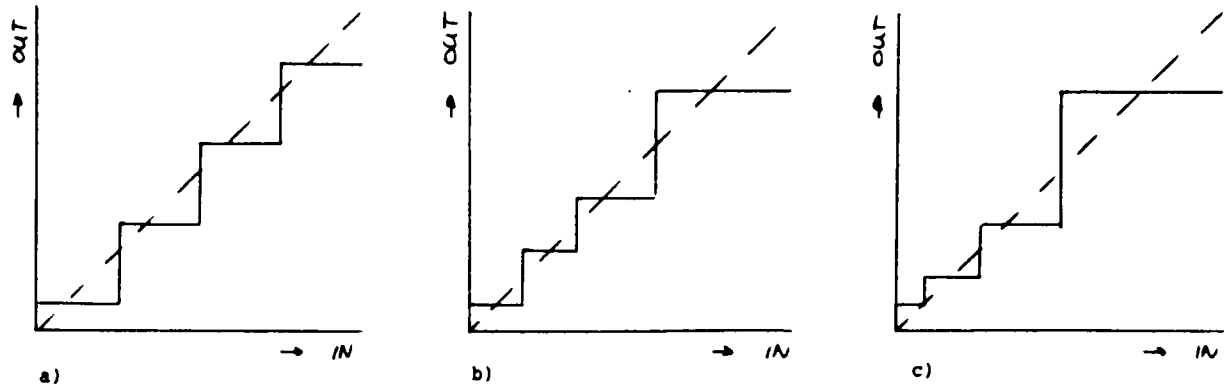


Fig. 2. Verschillende kwantisatiekurven
 Horizontaal: inputlevel
 Vertikaal : outputlevel
 a) uniforme kwantisatiekurve
 b) licht niet-uniforme kwantisatiekurve
 c) sterk niet-uniforme kwantisatiekurve.

met $C(x)=1/2$ als $x=0$, en anders $C(x)=1$.

Voor een blokje levert dit 64 DCT-coëfficiënten op. Deze kunnen eventueel weergegeven worden in een matrix, waarbij de DC-DCT-coëfficiënt linksboven staat (conventie).

- c) De grootste AC-DCT-coëfficiënt van het blokje wordt opgezocht. Afhankelijk van zijn waarde (W) wordt aan het blokje een amplitude range (A) toegekend:
- | | | |
|-----|-----|----------------|
| A=1 | als | $0 < W < 33$ |
| A=2 | als | $32 < W < 65$ |
| A=3 | als | $64 < W < 97$ |
| A=4 | als | $96 < W < 192$ |
- d) De 63 AC-DCT-coëfficiënten worden nu gekwantiseerd in een kwantisatiecurve (quantizer, zie bijvoorbeeld fig. 2, waarin een aantal verschillende typen quantizers). Welke van de 16 mogelijke quantizers gebruikt wordt, is afhankelijk van de waarde van de amplitude range A (zie c)), en van de waarde van de bufferstatus S (zie j)). Naarmate A toeneemt bevat de quantizer meer inputlevels, en naarmate S toeneemt wordt het aantal outputlevels beperkt. De waarde van de DC-DCT-coëfficiënt blijft ongekwantiseerd (9 bits).
- e) Een selectie van de coëfficiënten vindt plaats door een aantal ervan op de waarde nul te brengen. Het betreft AC-DCT-coëfficiënten die kleiner zijn dan een drempelwaarde $T(A,S)$, en die bovendien in de matrix voor minder dan 50% omringd zijn door coëfficiënten waarvoor dat ook geldt. De waarde van de drempel T wordt bepaald uit een gewogen som van A en S.
- f) Voor de overgebleven coëfficiënten wordt de gekwantiseerde waarde van het outputlevel van de quantizer omgezet naar het volgnummer van dat level.
- g) De twee-dimensionale matrix van DCT-coëfficiënten wordt omgezet in een een-dimensionale reeks. Dit gebeurt in de volgorde van een diagonale zig-zaggende scan, die linksboven (bij de DC-DCT-coëfficiënt) begint, en geleidelijk aan naar de AC-DCT-coëfficiënten met de hogere frequenties toewerkt.
- h) Allereerst wordt de DC-DCT-coëfficiënt in volle resolutie (9 bits) gekodeerd. De AC-DCT-coëfficiënten, beschreven door hun levelnummers, worden nu in volgorde van afnemend levelnummer gekodeerd. Dit gebeurt bovendien per levelnummer in de volgorde van de een-dimensionale reeks van g). Voor levelnummers kleiner dan een bepaalde drempel U wordt geen onderscheid in levelnummer meer gemaakt: zij worden tegelijk gekodeerd, wederom in de volgorde van de een-dimensionale reeks. De waarde van U is gesteld op 5, en de coëfficiënten met lagere levelnummers worden de 'staart' van de data genoemd.
- De codering van de levelnummers en de plaatsen (adressen) van de DC-DCT-coëfficiënten gebeurt op basis van de verschillen in waarde (DPCM-codering).
- De codering wordt gemonitord door de bufferstatus S (zie j)): bij lage S worden alle coëfficiënten overgezonden; bij hogere waarden van S maximaal 17 stuks. Bovendien wordt voortdurend gecontroleerd of er nog voldoende plaats is in de buffer (zie i)). Als dit niet het geval is, wordt de codering onmiddellijk gestaakt.

- i) De gegenereerde kodes worden in een buffer opgevangen. De lengte L van deze buffer bedraagt 4 kbit. De buffer zorgt ervoor dat de outputstroom van het programma niet in dichtheid varieert, maar een konstante bit rate heeft. Deze bit rate wordt meestal ingesteld op een waarde tussen de 10 en 20 Mbit/s.
- j) De bitcounter telt hoe vol de buffer is (percentage $P(m,t)$, afhankelijk van bloknummer m , van de tijd t , en natuurlijk van het aantal inmiddels gekodeerde bits $B(m,t)$):

$$P(m,t) = P(m-1) + (B(m,t)-R)/L.$$

Na de codering van het blok m wordt het eindpercentage $P(m)$ van dat blok bepaald, en deze informatie wordt omgezet in een bufferstatus S , die de waardes 1 tot en met 4 kan hebben.

Het bovenbeschreven schema is te karakteriseren als een adaptieve encoder. Daar waar de bufferstatus S invloed heeft, wordt de datastroom gekontroleerd. Een hoge status beperkt in het algemeen het aantal outputlevels van de quantizer (zie d)), verlaagt het aantal geselecteerde DCT-coëfficiënten (zie e)), en vermindert het aantal over te zenden kodes (zie h)). Deze stages zijn bewust ingebouwd om bij gebrek aan bufferruimte een zinnige selectie te maken uit de coëfficiënten, en dit zo weinig mogelijk aan het toeval over te laten.

De amplitude range A beschrijft de structuur van de input. Naarmate de amplitude range kleiner wordt, laat het verminderde aantal inputlevels een fijnere verdeling van de outputlevels toe. Dit is ook noodzakelijk, aangezien in een beeldgedeelte met weinig detail of structuur (kleine A) kwantisatiefouten snel opvallen. Anderzijds is het oog in een sterk gedetailleerd beeldgedeelte (grote A) juist verminderd gevoelig voor kwantisatiefouten, en is derhalve een grovere kwantisatie toegestaan. Verder is ook de selectie van de coëfficiënten afhankelijk gemaakt van de amplitude range A (zie e)).

Statistische analyses tonen aan, dat van een beeld het grootste aantal blokken doorgaans in amplitude range $A=1$ wordt gekodeerd, en dat dit aantal afneemt voor grotere waarden van A . Dit is uiteraard afhankelijk van de sceneinhoud van het beeld. Wat de bufferstatus betreft, blijken de meeste blokken in status $S=4$ gekodeerd te worden, en hun aantal neemt langzaam af voor kleinere waarden van S . Bij erg lage bitrates echter, of bij erg detailarme beelden, wordt het grootste aantal blokken gekodeerd bij status $S=3$ of nog lager.

Bij dit encodingsschema hoort uiteraard ook een decoder, die uit de buffer-output via een invers proces het beeld rekonstrueert. De zaak is om de beeldkwaliteit van dit gerekonstrueerde beeld, gegeven een zeker bit rate R (en dus een kompressiefactor), zo hoog mogelijk te maken.

2. Onderzoek: Optimalisatie

2.1 Inleiding

De versie van het koderingsprogramma zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, was nog niet volkomen geoptimaliseerd wat betreft de afregeling van de parameters. Met name verwachtte men nog winst te kunnen maken door de juiste keuze van de vorm van de kwantisatiekurven, en hierin werd het doel van het stage-onderzoek gelegd. Er werd besloten in grote stappen de mogelijkheden na te gaan, die liggen in het gebied tussen een uniforme quantizer en een sterk niet-uniforme (zie fig. 2).

Een aantal beperkingen kenmerken het onderzoek.

Allereerst geeft de videosimulator niet de mogelijkheid om een sequence van beelden te bekijken. Een aantal effecten in het temporele domein kan daardoor aan de aandacht ontsnappen. Dit is zeer betreurenswaardig, temeer daar het bekend is dat het visuele systeem juist in hoge mate gevoelig is voor deze temporele effecten.

Een tweede nadeel is, dat dit optimaliseren in handen is gelegd van een enkele kijker. Deze kan 'beroepsafwijkingen' hebben, of anderszins wat betreft zijn oordeel een slechte vertegenwoordiger van de gemiddelde videokijker zijn.

2.2 Materiaal

De gekodeerde beelden werden bekeken op een Barco CVTM/3 monitor, met een beeldhoogte van 28.5 cm. Uit overwegingen van tijdwinst is gewerkt met zwart-witbeelden. Van deze beperking worden echter geen nadelige effecten verwacht, daar de spatiale resolutie van het visuele systeem in het helderheidskanaal veel groter is dan in de kleurkanalen.

Een aantal veranderingen zijn aangebracht in de output van het DCT-koderingsprogramma, die de bestudering van de effecten van een bepaalde parameterverandering vergemakkelijken.

Zo het mogelijk statistische informatie op te vragen over het aantal blokken dat door een willekeurige quantizer is gekwantiseerd, en over de verdeling van het gebruik van de verschillende outputlevels van de quantizer.

Ook is het mogelijk in het outputbeeld al die pixels weer door hun originele waarden te vervangen, als zij niet gekwantiseerd zijn door een bepaalde, willekeurig te kiezen, quantizer (of set van quantizers), waardoor de effecten per quantizer bestudeerd kunnen worden. Daarbij kan als output een complete gedetailleerde beschrijving worden gegenereerd van alle betrokken DCT-coëfficiënten, hoe zij gekwantiseerd zijn, en of zij uiteindelijk al of niet gekodeerd zijn.

2.3 Resultaten

2.3.1 Selectie: Nieuwe inputparameters

Voor enige scenes zijn een aantal beelden gekodeerd, en wel met behulp van verschillende kwantisatiekurven, en bij verschillende bit rates. Deze beelden zijn in kwaliteit met elkaar vergeleken. Ook de gedetailleerde informatie, die aangeeft of een bepaalde coefficient uiteindelijk nu wel of niet werd gekodeerd, is uitvoerig bestudeerd. Daarbij bleek, dat in nagenoeg alle gevallen een verschil in beeldkwaliteit was terug te voeren op een of meer significante coefficienten, die wel, respectievelijk niet, werden gekodeerd. Met andere woorden:

Niet de kwantisatie van de coefficienten is belangrijk, maar de selectie ervan.

Deze bevinding lijkt in tegenspraak, met name in de hogere amplitude ranges, met de tot nu toe opgedane ervaringen met het kodeerschema. In speciaal aangemaakte sequences van gekodeerde beelden, blijkt namelijk dat het optreden van ruis afhankelijk is van de vorm van de kwantisatiecurve. Het oog is echter veel gevoeliger voor het veranderen van de kwantisatiefout (temporeel effect in bewegende beelden) dan voor de kwantisatiefout zelf (in stilstaande beelden). Hieruit moet dan ook de vermeende discrepantie verklaard worden.

Uitgaande van het feit, dat de selectie van de coefficienten bepalend is voor de beeldkwaliteit, moeten die plaatsen geïdentificeerd worden, waar selectie van coefficienten plaatsvindt. Dit blijkt te zijn op een drietal plaatsen:

- 1) De module 'preselectie van coefficienten' (fase e, zie paragraaf 1.2) selecteert coefficienten op grond van hun waarde ten opzichte van coefficienten van ongeveer dezelfde frequentie. De drempelwaarde $T(A,S)$ geldt hierbij als criterium. Wil men de selectie kunnen beïnvloeden, dan moet men de waarde van T expliciet als een parameter kunnen besturen. Het computerprogramma is zodanig veranderd, dat dit voortaan tot de mogelijkheden behoort: alle 16 waarden voor T moeten apart gespecificeerd worden.
Beter was het geweest als deze preselectie van coefficienten zou plaatsvinden voordat de DCT-coefficienten gekwantiseerd worden. Er is op dat moment nog meer informatie omtrent de (relatieve) waarden van de DCT-coefficienten aanwezig. Deze verandering is echter niet aangebracht in het programma, en wordt slechts als suggestie voor een verbetering vermeld.
- 2) De volgorde van codering in de coderingsmodule (fase h) houdt in feite ook een vorm van selectie in, met name als er slechts een beperkt aantal coefficienten gekodeerd mogen worden. Van de coefficienten, die in de staart van de data vallen, worden namelijk die met de lagere frequenties eerder gekodeerd dan die met de hogere frequenties. Door middel van de drempelwaarde $U(A)$ wordt in feite een afweging gemaakt tussen

significante hoogfrequente coëfficiënten en minder significante laagfrequente coëfficiënten.

Ook deze afweging kan slechts beïnvloed worden als de waarde $U(A)$ als parameter bestuurbaar is. Het kodeerprogramma is zodanig veranderd, dat dit mogelijk is geworden. Hiertoe wordt geïntroduceerd het zogenaamde niet-staart-level ($NSL(A)$): dit is de waarde van het laagste inputlevel dat absoluut niet tot de staart van de data mag gaan behoren. Uit de waarde van $NSL(A)$ en de vorm van de quantizer leidt het programma dan automatisch de waarde van $U(A)$ af. Een voordeel van het specificeren van $NSL(A)$ boven $U(A)$ is, dat $NSL(A)$ direct betrekking heeft op de data: als de vorm van de quantizer verandert, en daarmee de ligging van de outputlevels, worden toch steeds (ongeveer) dezelfde coëfficiënten geselecteerd, zolang $NSL(A)$ hetzelfde blijft. Dit is niet het geval als $U(A)$ konstant wordt gehouden, hetgeen een eerlijke vergelijking van verschillende kwantisatiekurven onmogelijk maakt.

De afweging tussen hoog- en laagfrequente DCT-coëfficiënten, die in deze module gemaakt wordt, zou ook in een aparte module geïmplementeerd kunnen worden, en wel aan de hand van expliciete wegingsfactoren. Een geschikt moment daarvoor in de bewerking is bijvoorbeeld vlak voor of tijdens de kwantisatie. Een dergelijke weging vindt zijn basis in het visuele systeem van de mens, dat verminderd gevoelig is voor hogere spatiale frequenties. Uit vergelijkingen van verschillende gekodeerde beelden is hiervoor de volgende grove vuistregel gevonden: Een hoogfrequente DCT-coëfficiënt draagt in het algemeen meer aan de beeldkwaliteit bij dan een laagfrequente DCT-coëfficiënt, als de eerste ongeveer een factor 1,5 groter is dan de tweede. Echter ook deze expliciete weging is niet in het programma opgenomen, en wordt wederom slechts vermeld als een suggestie voor een verbetering.

- 3) In dezelfde coderingsmodule (h) bevindt zich ook een tweede plaats waar selectie gepleegd wordt, namelijk wanneer de stroom van coderingsdata wordt afgebroken als de buffer vol is. Het toeslaan van dit mes is echter volkomen afhankelijk van het te coderen videobeeld, en moet gezien worden als een ingreep in noodgevallen. Hier is dan ook geen mogelijkheid een regelbare parameter te destilleren.

De nieuwe parameters $T(A,S)$ en $NSL(A)$ zijn vervolgens aan een nadere beschouwing onderworpen. Wanneer men in gedachten T van een waarde van nul af langzaam laat toenemen, verwacht men dat in eerste instantie de beeldkwaliteit ook toeneemt. Naarmate T toeneemt worden namelijk meer visueel onbelangrijke coëfficiënten weggegooid, waardoor bufferruimte kan worden gespaard, die daarvoor in de plaats gebruikt kan worden om de wel belangrijke coëfficiënten uit andere blokken juist te coderen. Wanneer T echter erg groot wordt, zullen echter een aantal zeer belangrijke coëfficiënten niet door de selectie komen, waardoor de beeldkwaliteit weer verslechtert. Op grond hiervan verwachten we, dat er een optimale waarde van $T(A,S)$ moet bestaan.

Een soortgelijk betoog is van toepassing op de parameter $NSL(A)$. Deze zal bij een lage waarde te veel onbelangrijke hoogfrequente coëfficiënten

selecteren, waardoor een slecht gebruik van de beschikbare bufferruimte wordt gemaakt. Bij een hoge waarde van NSL komen dezelfde hoogfrequente coëfficiënten echter niet aan bod, hetgeen resulteren zal in een verslechtering van de beeldkwaliteit. Ook voor NSL(A) verwachten we dus een optimum te vinden.

2.3.2 Geoptimaliseerde inputparameters

Voor ieder van de 16 quantizers zijn nu de parameters T(A,S) en NSL(A) geoptimaliseerd. Daarna werd de vorm van de quantizer onder de loep genomen. Dit gebeurde steeds bij een aantal bit rates tussen de 10 en 15 Mbit/s. Alle quantizers zijn een voor een in behandeling genomen, beginnend met de quantizer waarin de meeste data gekwantiseerd worden: Q(A=1,S=4), en eindigend bij de minst gebruikte quantizer: Q(A=4,S=1). Tijdens het optimaliseren van T en NSL is gebruik gemaakt van een licht niet-uniforme quantizer, zodat T en NSL in zo klein mogelijke stappen gevarieerd konden worden. Verder is gebruik gemaakt van de mogelijkheid om slechts de resultaten van bepaalde quantizers in het gekodeerde beeld te veranderen. Wanneer bijvoorbeeld een parameter of kwantisatiecurve behorend bij status S en amplitude range A gevarieerd wordt, kan men de grootste effecten verwachten in blokken gekwantiseerd bij deze waarden, maar ook in blokken met dezelfde waarde voor A en een hogere waarde voor S. Het is van nut gebleken wanneer men deze effecten geïsoleerd kan bestuderen. Het bleek, dat als functie van T(A,S) en NSL(A) in de meeste gevallen inderdaad optima gevonden werden. Deze waren niet voor alle bit rates en testbeelden dezelfde, doch de variaties waren niet erg groot, en de gemiddelde waarde voldeed vaak prima in alle gevallen. Anderzijds kwam het ook voor, met name bij de variatie van kwantisatiecurven, dat geen eensluidend oordeel te destilleren was voor alle testbeelden en bit rates, en ook geen trend in het oordeel was te ontdekken. In deze gevallen is gekozen voor die parameterinstelling, die bij de verschillende scènes en bit rates de meeste voorkeurstemmen kreeg. De optimale parameters en kwantisatiecurven, die op deze manier gevonden zijn, zijn als bijlage opgenomen in dit verslag. Zowel de waarden van T(A,S) als die van NSL(A) kennen een minimum bij A=2. Dit is enigszins onverwacht, maar bleek bij een extra controle (nu met alle verdere parameters en kwantisatiecurven geoptimaliseerd!) inderdaad de juiste keuze te zijn. Enige verklaring hiervoor kan misschien gezocht worden in het feit dat in de quantizer Q(A=1,S=4) de meeste blokken gekodeerd worden. Daardoor is wat in Q(1,4) gekodeerd wordt, bepalend voor de status waarin de rest van het beeld gekodeerd wordt, en dit kan een verhoging van de efficiency noodzakelijk maken (hogere waarden van T en NSL).

3. Experiment met proefpersonen

3.1 Doelstelling

De doelstelling van dit experiment is tweeledig. Het eerste doel was die bit rate te bepalen, waarbij de gemiddelde kijker geen kwaliteitsverschil meer ziet tussen een gekodeerd beeld en het originele beeld. Voor de quantizers en andere parameters werden de eindresultaten van het optimalisatieproces genomen (zie hoofdstuk 2). Aan dit geheel van waarden wordt de naam 'komplexe set van quantizers' gegeven. Het tweede doel van het experiment betreft een 'simpele set van quantizers', (deze wordt uit de complexe set afgeleid door de kwantisatiekurve en parameters van status=1 te vervangen door die van status=2, en die van status=4 door die van status=3). Van de simpele set van quantizers wordt als voordeel verwacht, dat hij gemakkelijker en efficiënter in hardware realiseerbaar zal zijn. De vraag is echter of hierdoor een verlaging van de beeldkwaliteit optreedt, en zo ja, of daarvoor een maat te geven is. Dit is onderzocht bij een bit rate van 12 Mbit/s.

3.2 Proefopzet

De in dit experiment gebruikte methode is die van de Two Alternative Forced Choice (voor een beschrijving zie bijvoorbeeld Laming, ref. 6). De proefpersoon krijgt daarbij steeds een tweetal beelden (alternatieven) aangeboden, en moet een van beide aanwijzen als die met de beste kwaliteit. Wanneer het verschil tussen beide beelden in de ogen van de proefpersoon duidelijk is, zal hij in 100% van de aanbiedingen voor hetzelfde beeld kiezen. Wanneer hij geen verschil ziet, of geen duidelijke voorkeur heeft, hangen zijn keuzes van het toeval af, hetgeen neerkomt op een voorkeurspercentage van 50%.

In dit experiment is de bit rate van het gekodeerde beeld, en daarmee de kwaliteit, over een brede range gevarieerd. Dit gekodeerde beeld wordt door de proefpersoon in kwaliteit vergeleken met het origineel. De drempel D voor de zichtbaarheid van een kwaliteitsverslechtering ten gevolge van codering wordt nu gelegd bij een voorkeurspercentage van 75% voor het origineel. Ook zijn vergelijkingen gemaakt tussen twee, bij een bit rate van 12 Mbit/s gekodeerde beelden: het ene met behulp van de simpele set van quantizers, het andere met behulp van de complexe. Om na te gaan waaraan een eventueel kwaliteitsverschil te wijten is, zijn beelden aangemaakt, uitgaande van dezelfde condities, echter nu met alleen die pixels veranderd, die gekwantiseerd zijn in amplitude range=1 (zie hoofdstuk 2, materiaal). En ook daarmee is een kwaliteitsvergelijking tussen de simpele en de complexe set van quantizers gemaakt. Hetzelfde is gedaan voor beelden met pixels, gekwantiseerd in amplitude range>1. Bovendien zijn er vergelijkingen gemaakt tussen beelden, gekodeerd met de simpele set van quantizers bij een

a)

b)

Fig. 3. Gebruikte testscenes
De linker beeldhelft is
gekodeerd bij een bit rate van
7 Mbit/s,
de rechter beeldhelft is het
origineel.
De drie scenes worden genoemd
a) BALTIMORE
b) CAR13
c) TEENY.

bit rate van 12 Mbit/s, en beelden, gekodeerd met de complexe set bij bit rates van 14.5, 12 en 9.5 Mbit/s. Hiermee is onderzocht of het effect van de simpele quantizerset zich laat vertalen in een verschil in bit rate. Ter controle van een eventuele voorkeur ten gevolge van andere dan de bedoelde factoren moest de proefpersoon ook enkele keren een keuze maken tussen twee identieke (al dan niet gekodeerde) beelden.

De beelden werden getoond op een Barco CVTM/3 monitor, met een beeldhoogte (H) van 28,5 cm. De convergentie van deze monitor was vlak voor de experimenten geoptimaliseerd, doch de purity liet met name in de linker onderhoek te wensen over (rood-zweem), en ook had de rechter beeldhelft een enigszins hogere luminantie dan de linker. De gamma van het display systeem (van videogeheugen tot luminantie op het beeldscherm) had een waarde van 2.0.

Gemiddeld bedroeg de luminantie van het beeldscherm 40 cd/m². Achter de monitor bevond zich een egaal witte wand, die indirect verlicht werd tot een illuminantie van zo'n 15 cd/m². In de rest van de kamer bedroeg de illuminantie gemiddeld ongeveer 5 cd/m². Het midden van het beeldscherm was op ooghoogte van de proefpersoon gebracht. De kijkafstand (V) bedroeg 1.7 m ($V = 6 \cdot H$).

De twee te vergelijken beelden vulden ieder de helft van het scherm, en werden tegelijkertijd getoond (zie fig. 3). De proefpersoon had onbeperkt de tijd om een keuze tussen links of rechts te maken. De beeldparen werden in een random volgorde gepresenteerd, en wel zodanig dat ieder beeldpaar even vaak in de eerste helft van de sessie als in de tweede helft voorkwam. Bovendien werd ieder beeldpaar in beide onderlinge posities gepresenteerd (A links en B rechts, of omgekeerd), waardoor de effecten van de monitor-asymmetrie in eerste orde onderdrukt worden. De beeldparen werden zonder tussenliggend adaptatieveld direct na elkaar gepresenteerd (een beperking, die opgelegd werd door de videosimulator).

Er is gebruik gemaakt van een drietal scenes: TEENY (zie fig. 3), en gedeelten van de bekende BALTIMORE- en CAR AND GATE-scenes. De gemiddelde luminanties ervan lagen bij de 40 cd/m², lokale minima bedroegen ongeveer 15 cd/m², lokale maxima bereikten 60 cd/m².

Aan het experiment hebben 12 proefpersonen deelgenomen, sommigen met uitgebreide kijkervaring, anderen zonder kijkervaring.

3.3 Resultaten

3.3.1 Drempelmetingen

Per proefpersoon en per scene zijn acht aanbiedingen van hetzelfde beeldpaar gedaan. Er bleek, waarschijnlijk door invloed van interfererende processen, te weinig statistiek aanwezig in de data voor een beschrijving per proefpersoon en per scene. Dit was wel het geval voor bijvoorbeeld het gemiddelde over de proefpersonen of over een subgroep daarvan.

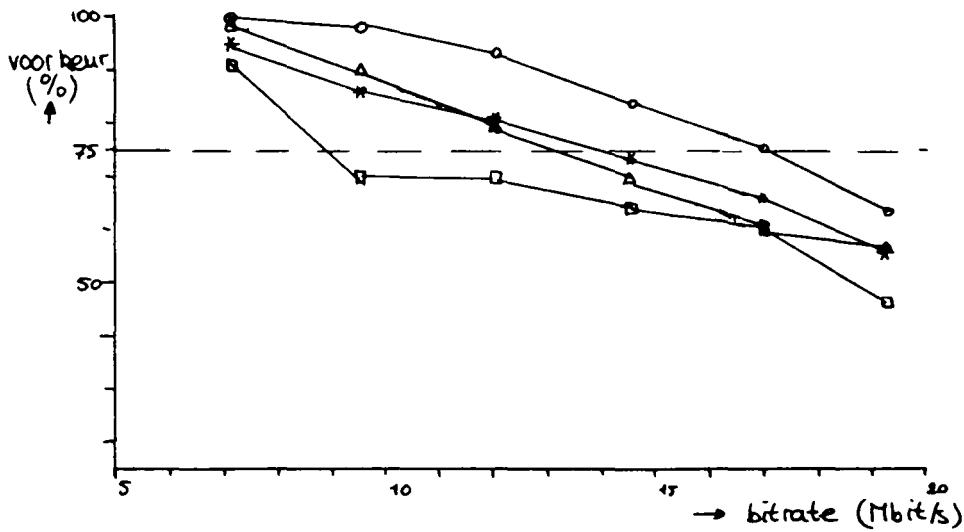


Fig. 4. Drempelkurven voor de verschillende scenes
 De data zijn gemiddeld over alle proefpersonen.
 ○) scene BALTIMORE
 Δ) scene CAR13
 □) scene TEENY
 *) de drie scenes gemiddeld.

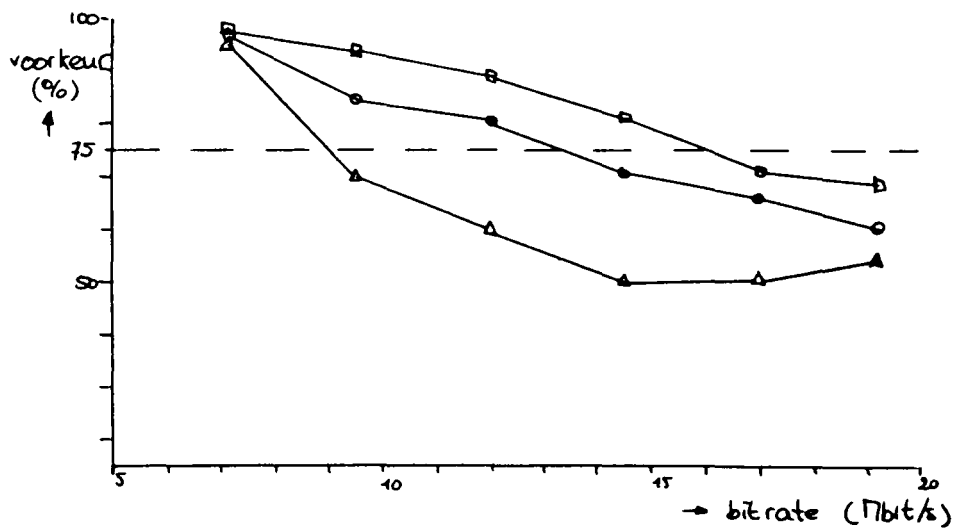


Fig. 5. Drempelkurven voor verschillende groepen proefpersonen
 De data zijn gemiddeld over alle scenes.
 □) experts met voorkennis (5 personen)
 ○) experts zonder voorkennis (5 personen)
 Δ) non experts (2 personen)
 Een verklaring van deze termen wordt in de tekst gegeven.

Uit de keuzes tussen twee identieke beelden bleek, gemiddeld over alle proefpersonen en scenes, geen enkele voorkeur voor links (52%) of rechts. Hieruit valt te konkluderen, dat de afwijkingen van de monitor slechts in geringe mate een rol hebben gespeeld.

Er blijkt, zoals verwacht, een verschil te zijn in de gevonden drempels voor de verschillende scenes (data gemiddeld over alle proefpersonen, zie fig. 4). De gevonden drempels zijn:

BALTIMORE: D = 17 Mbit/s
 CAR13 : D = 13.5 Mbit/s
 TEENY : D = 9 Mbit/s

De scenes BALTIMORE en CAR13 blijken kritischer te zijn dan de scene TEENY, hetgeen overeenkomt met de opmerkingen van de verschillende proefpersonen: Vooral de teksten 'baltimore' en het nummerbord lijken hiervoor verantwoordelijk. Verder is de scene BALTIMORE iets detailrijker dan CAR13, waardoor misschien ook de ietwat hogere drempel te verklaren is.

Ook de proefpersonen tonen onderlinge verschillen. Zij blijken opsplitsbaar te zijn in drie groepen (data gemiddeld over alle scenes, zie fig. 5). Deze groepen en hun drempels zijn:

EXPERTS MET VOORKENNIS : D = 16 Mbit/s
 EXPERTS ZONDER VOORKENNIS: D = 13.5 Mbit/s
 NON EXPERTS : D = 9 Mbit/s

Non-experts zijn mensen, die in hun dagelijkse werkzaamheden niet te maken hebben met monitoren. Zij zijn niet bekend met effecten van display-techniek in de ruimste zin van het woord. Experts zijn dat wel: zij beschikken over de kennis om artefacten grofweg te categoriseren (bijvoorbeeld als bron- of als display-probleem). Bovendien weten zij in welke gedeelten van het beeld men effecten van bronkodering kan verwachten. Voorkennis tenslotte heeft betrekking op dit specifieke koderingsprogramma. Degenen die beelden hiervan al enige malen kritisch bekeken hebben, behoren tot deze groep. Zij weten niet alleen in welke delen van het beeld de afwijkingen zullen gaan optreden, maar hebben ook een aardig idee omtrent de aard van de afwijking. Voorkennis kan zelfs specifiek voor een aantal bepaalde scenes gelden. Dit blijkt uit een vergelijking van de resultaten van twee proefpersonen ('experts met voorkennis'). Proefpersoon JW heeft de test in elkaar gezet, en uit dien hoofde tevoren zeer kritisch naar alle scenes gekeken. Drempels voor de scenes BALTIMORE, CAR en TEENY waren respectievelijk 16, 17 en 14 Mbit/s, hetgeen, gezien de statistiek, redelijk konstant genoemd mag worden. Proefpersoon PW heeft uitgebreide ervaring met het evalueren van het koderingsprogramma, vooral met de scenes BALTIMORE en CAR. De drempels voor deze laatste scenes zijn dan ook hoog: respectievelijk 17 en 20 Mbit/s. De drempel voor de scene TEENY moet echter gezocht worden bij 9 Mbit/s, hetgeen ook ongeveer de drempel voor deze scene voor de categorie 'experts zonder voorkennis' is.

Voor toekomstige testen lijken experts zonder voorkennis de ideale groep proefpersonen.

3.3.2 Simpele en complexe quantizers

Voor alle groepen proefpersonen geldt in de vergelijking tussen de simpele en de complexe set van quantizers zo'n beetje hetzelfde beeld: Er is een lichte voorkeur voor de complexe set. Deze voorkeur (59%) is statistisch wel significant, maar blijft echter onder drempelnivo. Op grond van deze test kan dus besloten worden tot het simplificeren van de set van quantizers. Met nadruk wordt hierbij echter in herinnering gebracht, dat deze test alleen betrekking heeft op stilstaande beelden.

Wat betreft de beeldparen, waarin slechts die pixels veranderd waren, die gekwantiseerd waren in amplitude range $A=1$ (of juist bij $A>1$), is ook geen sprake van een duidelijke voorkeur (54%, respectievelijk 52%). Hieruit mag opgemaakt worden, dat de lichte voorkeur voor de complexere set gedragen wordt door afwijkingen in alle amplitude ranges, en niet in een bepaalde amplitude range.

Het blijkt in dit geval mogelijk te zijn om de voorkeur voor de complexe quantizer uit te drukken in een verschil in bit rates. Dit gebeurt met behulp van een extra meetresultaat, namelijk dat een beeld, gekodeerd bij een bit rate van 12 Mbit/s met de simpele quantizerset, nog altijd een gemiddeld voorkeurspercentage van 20% heeft ten opzichte van een beeld, gekodeerd bij 9.5 Mbit/s met de complexe set van quantizers. Door middel van lineaire interpolatie kan men vaststellen, dat de combinatie 'komplexe set, bit rate 11.4 Mbit/s', een voorkeurspercentage van 50% zal hebben, wanneer ze vergeleken wordt met de combinatie 'simpele set, bit rate 12 Mbit/s'. Met andere woorden:

Bij een bit rate van 12 Mbit/s geeft het versimpelen van de quantizer een zelfde kwaliteitsverslechtering als het verlagen van de bit rate met 0.6 Mbit/s.

Deze waarden bleken voor de verschillende proefpersonengroepen van non experts, en experts zonder en met voorkennis, respectievelijk te zijn: 0.4, 0.5 en 0.7 Mbit/s. Ook hieruit kan men weer zien, dat experts met voorkennis kritischer zijn dan de andere groepen proefpersonen.

Referenties

1. W.H. Chen & C.H. Smith, Adaptive coding of monochrome and color images,
IEEE Trans. Com, COM-25 (1977) 1285-1292.
2. W.H. Chen & W.K. Pratt, Scene adaptive coder,
IEEE Trans. Com, COM-32 (1984) 225-232.
3. J.W. Modestino e.a., Performance of block cosine image coding with
adaptive quantization,
IEEE Trans. Com., COM-33 (1985) 210-217.
4. N.B. Nill, A visual model weighted cosine transform for image compression
and quality assessment,
IEEE Trans. Com., COM-33 (1985) 551-557.
5. CCIR- Rec. 601.
6. D. Laming, Mathematical Psychology,
Academic Press, London, 1973.

Bijlage

Geoptimaliseerde parameters en kwantisatiekurven

NSL(A): NSL(1)= 3
 NSL(2)= 1
 NSL(3)= 24
 NSL(4)= 24

T(A,S): T(1,1)= 1, T(1,2)= 1, T(1,3)= 2, T(1,4)= 2
 T(2,1)= 0, T(2,2)= 1, T(2,3)= 1, T(2,4)= 2
 T(3,1)= 4, T(3,2)= 4, T(3,3)= 7, T(3,4)= 7
 T(4,1)= 4, T(4,2)= 4, T(4,3)= 8, T(4,4)= 8

Quantizers Q(A,S):

inputlevel Q(1,1) Q(1,2) Q(1,3) Q(1,4)

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 7 | 7 | 7 | 6 | 6 |
| 8 | 8 | 8 | 8 | 18 |
| 9 | 9 | 9 | 8 | 18 |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 18 |
| 11 | 11 | 11 | 10 | 18 |
| 12 | 12 | 11 | 12 | 18 |
| 13 | 13 | 13 | 12 | 15 |
| 14 | 14 | 13 | 14 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 14 | 15 |
| 16 | 16 | 15 | 16 | 15 |
| 17 | 17 | 17 | 16 | 15 |
| 18 | 18 | 17 | 18 | 15 |
| 19 | 19 | 19 | 18 | 22 |
| 20 | 20 | 19 | 21 | 22 |
| 21 | 21 | 21 | 21 | 22 |
| 22 | 22 | 21 | 21 | 22 |
| 23 | 23 | 23 | 24 | 22 |
| 24 | 24 | 23 | 24 | 22 |
| 25 | 25 | 25 | 24 | 22 |
| 26 | 26 | 25 | 27 | 29 |
| 27 | 27 | 28 | 27 | 29 |
| 28 | 28 | 28 | 27 | 29 |
| 29 | 29 | 28 | 30 | 29 |
| 30 | 30 | 31 | 30 | 29 |
| 31 | 31 | 31 | 30 | 29 |
| 32 | 32 | 31 | 30 | 29 |

inputlevel Q(2,1) Q(2,2) Q(2,3) Q(2,4)

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|----|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 4 | 3 | 3 | 3 | 6 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| 6 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| 7 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| 8 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| 9 | 9 | 10 | 10 | 11 |
| 10 | 9 | 10 | 10 | 11 |
| 11 | 11 | 10 | 10 | 11 |
| 12 | 11 | 13 | 13 | 11 |
| 13 | 13 | 13 | 13 | 11 |
| 14 | 13 | 13 | 13 | 17 |
| 15 | 15 | 16 | 16 | 17 |
| 16 | 15 | 16 | 16 | 17 |
| 17 | 17 | 16 | 16 | 17 |
| 18 | 17 | 19 | 19 | 17 |
| 19 | 19 | 19 | 19 | 17 |
| 20 | 19 | 19 | 19 | 17 |
| 21 | 21 | 22 | 19 | 26 |
| 22 | 21 | 22 | 23 | 26 |
| 23 | 23 | 22 | 23 | 26 |
| 24 | 23 | 25 | 23 | 26 |
| 25 | 25 | 25 | 23 | 26 |
| 26 | 25 | 25 | 27 | 26 |
| 27 | 27 | 28 | 27 | 26 |
| 28 | 27 | 28 | 27 | 26 |
| 29 | 29 | 28 | 27 | 26 |
| 30 | 29 | 31 | 32 | 26 |
| 31 | 31 | 31 | 32 | 26 |
| 32 | 31 | 31 | 32 | 37 |
| 33 | 33 | 34 | 32 | 37 |
| 34 | 33 | 34 | 32 | 37 |
| 35 | 35 | 34 | 37 | 37 |
| 36 | 35 | 34 | 37 | 37 |
| 37 | 37 | 38 | 37 | 37 |
| 38 | 37 | 38 | 37 | 37 |
| 39 | 39 | 38 | 37 | 37 |
| 40 | 39 | 38 | 37 | 37 |
| 41 | 41 | 42 | 44 | 37 |
| 42 | 41 | 42 | 44 | 37 |
| 43 | 43 | 42 | 44 | 48 |
| 44 | 43 | 42 | 44 | 48 |
| 45 | 45 | 46 | 44 | 48 |
| 46 | 45 | 46 | 44 | 48 |
| 47 | 47 | 46 | 44 | 48 |
| 48 | 47 | 46 | 51 | 48 |
| 49 | 49 | 51 | 51 | 48 |
| 50 | 49 | 51 | 51 | 48 |
| 51 | 51 | 51 | 51 | 48 |
| 52 | 51 | 51 | 51 | 48 |
| 53 | 53 | 51 | 51 | 48 |
| 54 | 53 | 56 | 51 | 59 |
| 55 | 55 | 56 | 51 | 59 |
| 56 | 55 | 56 | 60 | 59 |
| 57 | 57 | 56 | 60 | 59 |
| 58 | 57 | 56 | 60 | 59 |
| 59 | 60 | 61 | 60 | 59 |
| 60 | 60 | 61 | 60 | 59 |
| 61 | 60 | 61 | 60 | 59 |
| 62 | 63 | 61 | 60 | 59 |
| 63 | 63 | 61 | 60 | 59 |
| 64 | 63 | 61 | 60 | 59 |

inputlevel Q(3,1) Q(3,2) Q(3,3) Q(3,4)

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| 8 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| 9 | 9 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 9 | 10 | 10 | 10 |
| 11 | 12 | 10 | 10 | 10 |
| 12 | 12 | 13 | 13 | 13 |
| 13 | 12 | 13 | 13 | 13 |
| 14 | 15 | 13 | 13 | 13 |
| 15 | 15 | 13 | 13 | 13 |
| 16 | 15 | 18 | 18 | 18 |
| 17 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 19 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 20 | 21 | 22 | 18 | 18 |
| 21 | 21 | 22 | 23 | 23 |
| 22 | 21 | 22 | 23 | 23 |
| 23 | 24 | 22 | 23 | 23 |
| 24 | 24 | 22 | 23 | 23 |
| 25 | 24 | 27 | 23 | 23 |
| 26 | 27 | 27 | 23 | 23 |
| 27 | 27 | 27 | 30 | 30 |
| 28 | 27 | 27 | 30 | 30 |
| 29 | 30 | 27 | 30 | 30 |
| 30 | 30 | 27 | 30 | 30 |
| 31 | 30 | 33 | 30 | 30 |
| 32 | 33 | 33 | 30 | 30 |
| 33 | 33 | 33 | 30 | 30 |
| 34 | 33 | 33 | 37 | 37 |
| 35 | 36 | 33 | 37 | 37 |
| 36 | 36 | 33 | 37 | 37 |
| 37 | 36 | 39 | 37 | 37 |
| 38 | 39 | 39 | 37 | 37 |
| 39 | 39 | 39 | 37 | 37 |
| 40 | 39 | 39 | 37 | 37 |
| 41 | 42 | 39 | 37 | 37 |
| 42 | 42 | 39 | 46 | 46 |
| 43 | 42 | 45 | 46 | 46 |
| 44 | 45 | 45 | 46 | 46 |
| 45 | 45 | 45 | 46 | 46 |
| 46 | 45 | 45 | 46 | 46 |
| 47 | 48 | 45 | 46 | 46 |
| 48 | 48 | 45 | 46 | 46 |

inputlevel Q(3,1) Q(3,2) Q(3,3) Q(3,4)

| | | | | |
|---------------|---------------|----|---------------|---------------|
| 49 | 48 | 51 | 46 | 46 |
| 50 | 51 | 51 | 46 | 46 |
| 51 | 51 | 51 | 55 | 55 |
| 52 | 51 | 51 | 55 | 55 |
| 53 | 54 | 51 | 55 | 55 |
| 54 | 54 | 51 | 55 | 55 |
| 55 | 54 | 58 | 55 | 55 |
| 56 | 57 | 58 | 55 | 55 |
| 57 | 57 | 58 | 55 | 55 |
| 58 | 57 | 58 | 55 | 55 |
| 59 | 60 | 58 | 55 | 55 |
| 60 | 60 | 58 | 55 | 55 |
| 61 | 60 | 58 | 66 | 66 |
| 62 | 63 | 65 | 66 | 66 |
| 63 | 63 | 65 | 66 | 66 |
| 64 | 63 | 65 | 66 | 66 |
| 65 | 66 | 65 | 66 | 66 |
| 66 | 66 | 65 | 66 | 66 |
| 67 | 66 | 65 | 66 | 66 |
| 68 | 66 | 65 | 66 | 66 |
| 69 | 70 | 72 | 66 | 66 |
| 70 | 70 | 72 | 66 | 66 |
| 71 | 70 | 72 | 66 | 66 |
| 72 | 70 | 72 | 77 | 77 |
| 73 | 74 | 72 | 77 | 77 |
| 74 | 74 | 72 | 77 | 77 |
| 75 | 74 | 72 | 77 | 77 |
| 76 | 74 | 79 | 77 | 77 |
| 77 | 78 | 79 | 77 | 77 |
| 78 | 78 | 79 | 77 | 77 |
| 79 | 78 | 79 | 77 | 77 |
| 80 | 82 | 79 | 77 | 77 |
| 81 | 82 | 79 | 77 | 77 |
| 82 | 82 | 79 | 77 | 77 |
| 83 | 82 | 86 | 77 | 77 |
| 84 | 82 | 86 | 90 | 90 |
| 85 | 86 | 86 | 90 | 90 |
| 86 | 86 | 86 | 90 | 90 |
| 87 | 86 | 86 | 90 | 90 |
| 88 | 86 | 86 | 90 | 90 |
| 89 | 90 | 86 | 90 | 90 |
| 90 | 90 | 93 | 90 | 90 |
| 91 | 90 | 93 | 90 | 90 |
| 92 | 90 | 93 | 90 | 90 |
| 93 | 94 | 93 | 90 | 90 |
| 94 | 94 | 93 | 90 | 90 |
| 95 | 94 | 93 | 90 | 90 |
| 96 | 94 | 93 | 90 | 90 |

| inputlevel | Q(4,1) | Q(4,2) | Q(4,3) | Q(4,4) |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| 4 | 4 | 6 | 2 | 2 |
| 5 | 4 | 6 | 8 | 8 |
| 6 | 4 | 6 | 8 | 8 |
| 7 | 9 | 6 | 8 | 8 |
| 8 | 9 | 6 | 8 | 8 |
| 9 | 9 | 11 | 8 | 8 |
| 10 | 9 | 11 | 8 | 8 |
| 11 | 9 | 11 | 8 | 8 |
| 12 | 9 | 11 | 8 | 8 |
| 13 | 15 | 11 | 18 | 18 |
| 14 | 15 | 11 | 18 | 18 |
| 15 | 15 | 17 | 18 | 18 |
| 16 | 15 | 17 | 18 | 18 |
| 17 | 15 | 17 | 18 | 18 |
| 18 | 15 | 17 | 18 | 18 |
| 19 | 21 | 17 | 18 | 18 |
| 20 | 21 | 17 | 18 | 18 |
| 21 | 21 | 23 | 18 | 18 |
| 22 | 21 | 23 | 18 | 18 |
| 23 | 21 | 23 | 18 | 18 |
| 24 | 21 | 23 | 18 | 18 |
| 25 | 27 | 23 | 30 | 30 |
| 26 | 27 | 23 | 30 | 30 |
| 27 | 27 | 30 | 30 | 30 |
| 28 | 27 | 30 | 30 | 30 |
| 29 | 27 | 30 | 30 | 30 |
| 30 | 27 | 30 | 30 | 30 |
| 31 | 33 | 30 | 30 | 30 |
| 32 | 33 | 30 | 30 | 30 |
| 33 | 33 | 30 | 30 | 30 |
| 34 | 33 | 37 | 30 | 30 |
| 35 | 33 | 37 | 30 | 30 |
| 36 | 33 | 37 | 30 | 30 |
| 37 | 39 | 37 | 43 | 43 |
| 38 | 39 | 37 | 43 | 43 |
| 39 | 39 | 37 | 43 | 43 |
| 40 | 39 | 37 | 43 | 43 |
| 41 | 39 | 44 | 43 | 43 |
| 42 | 39 | 44 | 43 | 43 |
| 43 | 45 | 44 | 43 | 43 |
| 44 | 45 | 44 | 43 | 43 |
| 45 | 45 | 44 | 43 | 43 |
| 46 | 45 | 44 | 43 | 43 |
| 47 | 45 | 44 | 43 | 43 |
| 48 | 45 | 51 | 43 | 43 |
| 49 | 51 | 51 | 43 | 43 |
| 50 | 51 | 51 | 56 | 56 |
| 51 | 51 | 51 | 56 | 56 |
| 52 | 51 | 51 | 56 | 56 |
| 53 | 51 | 51 | 56 | 56 |
| 54 | 51 | 51 | 56 | 56 |
| 55 | 57 | 51 | 56 | 56 |
| 56 | 57 | 60 | 56 | 56 |
| 57 | 57 | 60 | 56 | 56 |
| 58 | 57 | 60 | 56 | 56 |
| 59 | 57 | 60 | 56 | 56 |
| 60 | 57 | 60 | 56 | 56 |
| 61 | 63 | 60 | 56 | 56 |
| 62 | 63 | 60 | 56 | 56 |
| 63 | 63 | 60 | 69 | 69 |
| 64 | 63 | 60 | 69 | 69 |
| 65 | 63 | 70 | 69 | 69 |
| 66 | 63 | 70 | 69 | 69 |
| 67 | 69 | 70 | 69 | 69 |
| 68 | 69 | 70 | 69 | 69 |
| 69 | 69 | 70 | 69 | 69 |
| 70 | 69 | 70 | 69 | 69 |
| 71 | 69 | 70 | 69 | 69 |
| 72 | 69 | 70 | 69 | 69 |
| 73 | 75 | 70 | 69 | 69 |
| 74 | 75 | 70 | 69 | 69 |
| 75 | 75 | 70 | 69 | 69 |
| 76 | 75 | 82 | 82 | 82 |
| 77 | 75 | 82 | 82 | 82 |
| 78 | 75 | 82 | 82 | 82 |
| 79 | 81 | 82 | 82 | 82 |
| 80 | 81 | 82 | 82 | 82 |
| 81 | 81 | 82 | 82 | 82 |
| 82 | 81 | 82 | 82 | 82 |
| 83 | 81 | 82 | 82 | 82 |
| 84 | 81 | 82 | 82 | 82 |
| 85 | 87 | 82 | 82 | 82 |
| 86 | 87 | 82 | 82 | 82 |
| 87 | 87 | 82 | 82 | 82 |
| 88 | 87 | 82 | 82 | 82 |
| 89 | 87 | 95 | 95 | 95 |
| 90 | 87 | 95 | 95 | 95 |
| 91 | 93 | 95 | 95 | 95 |
| 92 | 93 | 95 | 95 | 95 |
| 93 | 93 | 95 | 95 | 95 |
| 94 | 93 | 95 | 95 | 95 |
| 95 | 93 | 95 | 95 | 95 |
| 96 | 93 | 95 | 95 | 95 |

| inputlevel | Q(4,1) | Q(4,2) | Q(4,3) | Q(4,4) |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| 97 | 99 | 95 | 95 | 95 |
| 98 | 99 | 95 | 95 | 95 |
| 99 | 99 | 95 | 95 | 95 |
| 100 | 99 | 95 | 95 | 95 |
| 101 | 99 | 95 | 95 | 95 |
| 102 | 99 | 100 | 100 | 100 |
| 103 | 105 | 100 | 100 | 100 |
| 104 | 105 | 100 | 100 | 100 |
| 105 | 105 | 100 | 100 | 100 |
| 106 | 105 | 100 | 100 | 100 |
| 107 | 105 | 100 | 100 | 100 |
| 108 | 105 | 100 | 100 | 100 |
| 109 | 111 | 100 | 100 | 100 |
| 110 | 111 | 100 | 100 | 100 |
| 111 | 111 | 100 | 100 | 100 |
| 112 | 111 | 100 | 100 | 100 |
| 113 | 111 | 100 | 100 | 100 |
| 114 | 111 | 100 | 100 | 100 |
| 115 | 117 | 121 | 121 | 121 |
| 116 | 117 | 121 | 121 | 121 |
| 117 | 117 | 121 | 121 | 121 |
| 118 | 117 | 121 | 121 | 121 |
| 119 | 117 | 121 | 121 | 121 |
| 120 | 117 | 121 | 121 | 121 |
| 121 | 123 | 121 | 121 | 121 |
| 122 | 123 | 121 | 121 | 121 |
| 123 | 123 | 121 | 121 | 121 |
| 124 | 123 | 121 | 121 | 121 |
| 125 | 123 | 121 | 121 | 121 |
| 126 | 123 | 121 | 121 | 121 |
| 127 | 129 | 121 | 121 | 121 |
| 128 | 129 | 134 | 134 | 134 |
| 129 | 129 | 134 | 134 | 134 |
| 130 | 129 | 134 | 134 | 134 |
| 131 | 129 | 134 | 134 | 134 |
| 132 | 129 | 134 | 134 | 134 |
| 133 | 135 | 134 | 134 | 134 |
| 134 | 135 | 134 | 134 | 134 |
| 135 | 135 | 134 | 134 | 134 |
| 136 | 135 | 134 | 134 | 134 |
| 137 | 135 | 134 | 134 | 134 |
| 138 | 135 | 134 | 134 | 134 |
| 139 | 141 | 134 | 134 | 134 |
| 140 | 141 | 134 | 134 | 134 |
| 141 | 141 | 147 | 147 | 147 |
| 142 | 141 | 147 | 147 | 147 |
| 143 | 141 | 147 | 147 | 147 |
| 144 | 141 | 147 | 147 | 147 |
| 145 | 147 | 147 | 147 | 147 |
| 146 | 147 | 147 | 147 | 147 |
| 147 | 147 | 147 | 147 | 147 |
| 148 | 147 | 147 | 147 | 147 |
| 149 | 147 | 147 | 147 | 147 |
| 150 | 147 | 147 | 147 | 147 |
| 151 | 154 | 147 | 147 | 147 |
| 152 | 154 | 147 | 147 | 147 |
| 153 | 154 | 147 | 147 | 147 |
| 154 | 154 | 160 | 160 | 160 |
| 155 | 154 | 160 | 160 | 160 |
| 156 | 154 | 160 | 160 | 160 |
| 157 | 154 | 160 | 160 | 160 |
| 158 | 161 | 160 | 160 | 160 |
| 159 | 161 | 160 | 160 | 160 |
| 160 | 161 | 160 | 160 | 160 |
| 161 | 161 | 160 | 160 | 160 |
| 162 | 161 | 160 | 160 | 160 |
| 163 | 161 | 160 | 160 | 160 |
| 164 | 161 | 160 | 160 | 160 |
| 165 | 168 | 160 | 160 | 160 |
| 166 | 168 | 160 | 160 | 160 |
| 167 | 168 | 173 | 173 | 173 |
| 168 | 168 | 173 | 173 | 173 |
| 169 | 168 | 173 | 173 | 173 |
| 170 | 168 | 173 | 173 | 173 |
| 171 | 168 | 173 | 173 | 173 |
| 172 | 175 | 173 | 173 | 173 |
| 173 | 175 | 173 | 173 | 173 |
| 174 | 175 | 173 | 173 | 173 |
| 175 | 175 | 173 | 173 | 173 |
| 176 | 175 | 173 | 173 | 173 |
| 177 | 175 | 173 | 173 | 173 |
| 178 | 175 | 173 | 173 | 173 |
| 179 | 182 | 173 | 173 | 173 |
| 180 | 182 | 186 | 186 | 186 |
| 181 | 182 | 186 | 186 | 186 |
| 182 | 182 | 186 | 186 | 186 |
| 183 | 182 | 186 | 186 | 186 |
| 184 | 182 | 186 | 186 | 186 |
| 185 | 182 | 186 | 186 | 186 |
| 186 | 189 | 186 | 186 | 186 |
| 187 | 189 | 186 | 186 | 186 |
| 188 | 189 | 186 | 186 | 186 |
| 189 | 189 | 186 | 186 | 186 |
| 190 | 189 | 186 | 186 | 186 |
| 191 | 189 | 186 | 186 | 186 |
| 192 | 189 | 186 | 186 | 186 |