

MULTIMEDIÁLNÍ A HYPERMEDIÁLNÍ SYSTÉMY

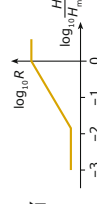
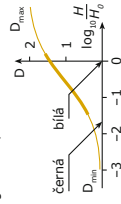
8)
Bitmapový obraz 2

Petr Lobaz, 21.4.2015

KVANTIZACE JASU

VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY

- elementární detektor světla (pixel snímače) reaguje na přijatou energii – závisí na osvětlení H (\Rightarrow jas) L , clonovém číslu C , času závěrky t) a citlivosti
- film: senzimetrická charakteristika (H-D křivka, viz přednáška 6)
- typický elektronický snímač
 - $H < H_{\min} \Rightarrow$ reakce R nerozlišitelná od tepelného šumu
 - $H > H_{\max} \Rightarrow R$ jako pro H_{\max} („přepal“, ztráta textury v jasných oblastech snímku)
 - $H_{\min} < H < H_{\max} \Rightarrow R$ přibližně lineární
 - hodnoty H_{\min} , H_{\max} závisí na snímači a nastavení citlivosti



KVANTIZACE JASU

- závislost reakce R snímače na vstupním jasu L_{IN} (resp. osvětlu H): *OETF* (opto-electronic transfer function) (alternativně *OECF*, opto-electronic conversion function)
- na displeji je třeba na základě R zvolit jas pixelu L_{OUT} *EOTF* (electro-optical transfer function, alternativně *EOCF*)
- ideální kvantizace R :
sousední hodnoty R_1, R_2 vedou na stěží rozeznatelné jasy $L_{OUT,1}, L_{OUT,2}$
- kvantizace R hrubší: jasy $L_{OUT,1}, L_{OUT,2}$ zřetelně rozpoznatelné
⇒ na displeji místo hladkého přechodu jasů oddělené pruhy (*posterizace*)
- kvantizace R jemnější: pro zakódování je třeba víc bitů, než je zapotřebí
 - má smysl, bude-li se s obrazem jasově manipulovat

KVANTIZACE JASU

- experimentální zjištění rozlišitelnosti jasů
 - (velká) plocha s jasem L_1 určuje jasovou adaptaci oka
 - zjišťujeme, zda se (malá) ploška s jasem L_2 jeví odlišná
- jasy L_1, L_2 ($L_1 < L_2$) rozpoznatelné
jasy L_1', L_2' ($L_1 < L_2'$) nerozpoznatelné
⇒ stěží rozpoznatelná změna $\Delta L_1 = L_2 - L_1$
(JND = just noticeable difference)
- pro jasy používané v multimédiích platí Weberův zákon:
$$\frac{\Delta L}{L} = konst.$$
- v multimédiích se obvykle uvažuje $L_2 = 1,01 L_1$
(tj. jasy L_1, L_2 rozpoznáme, liší-li se alespoň o 1 %)
 - viz též contrast sensitivity function, přednáška 7

KVANTIZACE JASU

ROZLIŠUJEME

- kvantizace hodnot R vstupujících do displeje
 - musí postihnout kontrast displeje $L_{D,max} / L_{D,min}$
 - jas pro sousední kvantizované hodnoty $R_1 < R_2$ odpovídá JND (tj. $L(R_2) < 1,01 L(R_1)$)
 - kvantizace hodnot R ze snímače
 - musí dostatečně jemně postihnout předpokládaný kontrast scény $L_{S,max} / L_{S,min}$
 - jemnost kvantizace musí vycházet z předpokládané manipulace s obrazem a předpokládaných podmínek zobrazení
- ⇒ budeme se především zabývat kvantizací s ohledem na displej

KVANTIZACE JASU

TERMINOLOGIE

- místo jasu L budeme pracovat z *relativním jasem* Y
 $Y = 100 L / L_{-bílá}$
 - $Y = 0$ absolutní tma, technicky nedosažitelné
 - $Y = 100$ relativní jas bílé plochy; záleží na definici bílé (např. matná plocha s odrazivostí 100 %)
 - $Y > 100$ relativní jas lesklých odlesků
 - (relativní) jas není perceptuálně rovnoměrný
 - vizuální rozdíl relativních jasů 1 a 2 podstatně větší než relativních jasů 99 a 100
- ⇒ zavedeme perceptuálně rovnoměrnou *měrnou světlost* L^*
- pro $Y = 0$ je $L^* = 0$, pro $Y = 100$ je $L^* = 100$
 - chování pro jiné relativní jasy definujeme později

KVANTIZACE JASU

TYPICKÉ PODMÍNKY REPRODUKCE OBRAZU

zobrazení	okolí	max. jas L_{\max} [cd m ⁻²]	kontrast L_{\max} / L_{\min}	minimální L^*
filmové plátno	tma	48	100 : 1	9,0
televizor	šero	200	400 : 1	2,3
počítačový displej	světlo	320	50 : 1	15,5
tištěná stránka	světlo	50	25 : 1	23,7

- kontrast (a tedy L_{\min}^*) je nejvíce ovlivněn světlem odrážejícím se od plochy displeje (flare)
- při dalších úvahách budeme uvažovat požadovaný kontrast 100 : 1

KVANTIZACE JASU

UNIFORMNÍ KVANTIZACE REL. JASU

- výstup ideálního snímače: $R(Y_{\text{in}}) = Y_{\text{in}}$ $Y_{\text{in}} \in [1; 100]$
- uniformní kvantizace: $R_Q(Y_{\text{in}}) = \text{round}(kR(Y_{\text{in}}))$
 - konstanta $k = ?$
- dekvantizace a rekonstrukce jasu: $Y_{\text{out}}(R_Q) = R_Q / k$
- nejtavnější rozlišitelné relativní jasy: $Y_{\text{in}1} = 1, Y_{\text{in}2} = 1,01$ musí vést k různým $R_{Q,1}, R_{Q,2}$
 - ⇒ volíme $k = 100$ (nebo vyšší)
- pro $k = 100$ je $R_Q(100) = 10000$
 - pro zakódování celočíselného rozsahu 100 až 10000 potřebujeme 14 bitů
- poměr $Y_{\text{out}}(10000) / Y_{\text{out}}(9999) = 1,0001$
 - ⇒ pro světlé části obrazu je kvantizace zbytečně jemná

KVANTIZACE JASU

- výstup reálného snímače: $R(Y_{IN}) = rY_{IN} + R_{DARK}$
 $\Rightarrow R'(Y_{IN,1}) / R'(Y_{IN,2}) \neq Y_{IN,1} / Y_{IN,2}$
 - linearita výstupu poškozena tepelným šumem R_{DARK} (nenulový výstup pro „tmu“: $R(0) = R_{DARK}$)
- před dalším zpracováním je třeba odečíst průměrnou hodnotu R_{DARK}
 - typický postup: část snímače permanentně zakryta \Rightarrow výstup zakryté části odpovídá R_{DARK}
- velmi malé jasy ($Y_{IN} \approx R_{DARK}$) silně poškozeny šumem
 - šum ale maskuje případnou posterizaci
 - např. pro rozsah 12 EV (kontrast 4096 : 1) bychom teoreticky potřebovali reprezentovat kvantizované hodnoty 100 až 100×2^{12} (tj. pomocí 19 bitů), v praxi ale stačí méně, např. 14 bitů

KVANTIZACE JASU

NEUNIFORMNÍ KVANTIZACE REL. JASU

- k dosažení rovnoměrné efektivity kvantizace je vhodnější relativní jas (tj. výstup ideálního snímače) převést na měrnou světlost L^* (aproximaci L^* budeme značit V):
 $R_Q(Y_{IN}) = \text{round}(k L^*(Y_{IN}))$
 $Y_{IN} \in [1; 100]$
- dekvantizace: $Y_{OUT} = L^{* INVERSE}(R_Q / k)$
- jednoduchá úvaha: „měrná světlost odpovídá počtu JND“
 - „největší měrná světlost“ 100
 - „druhá největší měrná světlost“ $100 / 1,01 = 99,01$
 - „třetí největší měrná světlost“ $100 / 1,01^2 = 98,03$
 - „nejmenší měrná světlost“ $100 / 1,01^{463} = 0,998$
- $R_Q(Y_{IN}) = \text{round}(\log Y_{IN} / \log 1,01)$
 $R_Q(1) = 0$ $R_Q(100) = 463$
 - pro zakódování rozsahu 0 až 463 potřebujeme 9 bitů

KVANTIZACE JASU

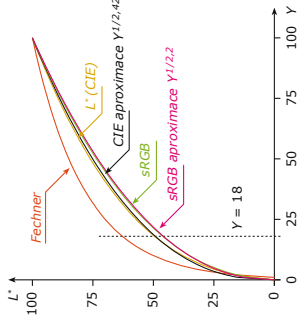
- rozšíření předchozí úvahy: měrná světlost má logaritmičtý průběh (Fechnerův zákon): $V_{\text{Fechner}} = 100 \log(Y_{\text{in}}) / \log(100)$
 - pro $Y_{\text{in}} < 1$ poskytuje záporné hodnoty
 - z definice JND neplatí nic o vjemu rozdílů vyšších než 1 JND \Rightarrow pro korektní definici L^* je třeba jiná úvaha / měření
- Stevensův zákon – obecně platný vztah mezi energetickou veličinou ψ a perceptuální veličinou ψ^*
$$\psi^*_{\text{Stevens}} = k(\psi - \psi_0)^n$$
 - pro měrnou světlost $n = 0.33$
- Weberův zákon neplatí pro malé jasy!

KVANTIZACE JASU

- měrná světlost podle MKO (Mezinárodní komise pro osvětlení = CIE = Commission Internationale de l'Éclairage)
$$L^*(Y) = \begin{cases} 116 (Y / Y_{\text{max}})^{1/3} - 16 & \text{pro } Y / Y_{\text{max}} > 0,008856 \\ 903,3 (Y / Y_{\text{max}}) & \text{pro } Y / Y_{\text{max}} \leq 0,008856 \end{cases}$$
 - pro naši definici relativního jasu je $Y_{\text{max}} = 100$
 - lineární segment zprěšňuje L^* pro tmavé jasy
 - pro potřeby multimédií se dá obvykle aproximovat
$$V_{\text{CIE}} = 100 (Y / Y_{\text{max}})^{1/2,4,2}$$
- konkrétní pozorovací podmínky mohou vztah pozměnit
 - např. pro definici sRGB (kancelářské displeje)
$$V_{\text{sRGB}}(Y) = \begin{cases} 105,5 (Y / Y_{\text{max}})^{1/2,4} - 5,5 & \text{pro } Y / Y_{\text{max}} > 0,0031308 \\ 1292 (Y / Y_{\text{max}}) & \text{pro } Y / Y_{\text{max}} \leq 0,0031308 \end{cases}$$

KVANTIZACE JASU

- neuniformní kvantizaci s mocninou funkcí (a případným lineárním segmentem) říkáme **gamma kódování**
- je-li funkce vyjádřena čistě mocninou funkcí, říkáme převrácené hodnotě exponentu γ (**gamma**)
 - v grafu jsou křivky pro $\gamma = 2,2$ a $\gamma = 2,42$
- víme, že průměrná odrazivost okolí je 18 %
 - $\Rightarrow L^*(18) \approx 50$
 - \Rightarrow 18% šedé říkáme „střední šedá“



MHS – Bitmapový obraz 2

13 / 59

KVANTIZACE JASU

- pro úvahy o bitové hloubce kvantizace nicméně Fechnerův zákon stačí
- JND 1 % odpovídá $\Delta EV \approx 0,0144$ ($1 / \Delta EV \approx 70$)
 - např. pro rozsah jasů 12 EV (kontrast 4096 : 1) potřebujeme reprezentovat kvantizované hodnoty od 0 do přibližně $12 \times 70 = 840 \Rightarrow$ 10 bitů na vzorek
- pro rozsah jasů 7 EV (kontrast 128 : 1) potřebujeme maximální kód přibližně $7 \times 70 = 490 \Rightarrow$ 9 bitů na vzorek
 - v praxi se ukazuje, že pro zašuměný obraz je 8 bitů na vzorek dostačující

MHS – Bitmapový obraz 2

14 / 59

KVANTIZACE JASU

STANDARDNÍ KVANTIZACE

- 8 bitů, gama kódování: běžná počítačová grafika, distribuční formát videa (ale viz studio-swing – kódování typu R'G'B'₂₁₉)
- 16 bitů, uniformní kvantizace: typický výstup digitálního snímače, v praxi využito méně než 16 bitů (např. 14)
- 16 bitů, gama kódování: interní kvantizace při high-end zpracování obrazu – uplatní se zejména při práci s obrazy bez šumu a s jemnými přechody
- 10 bitů, neuniformní kvantizace (gama nebo logaritmičká): studiový standard pro film / video
- 1 bit (tzv. „pérovka“): speciálně pro tisk, 1 bit určuje tisknout barvu/netisknout barvu

KVANTIZACE JASU

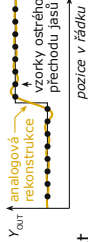
MÉNĚ BĚŽNÉ KVANTIZACE

- 4 bity, gama kódování: pro nenáročné displeje (např. levné mobilní)
- pro kódování složek RGB se jednotlivé složky mohou kvantizovat na 5–6–5 nebo 5–5–5 bitů (hi-color)
 - např. pro redukci datového toku při rychlém náhledu obrazu
- pro kódování velkého rozsahu jasů (HDR – high density range) se jasy přímo ukládají jako 16bitové nebo 32bitové číslo s plovoucí desetinnou čárkou
 - zejména pro modelování osvětlení, speciální fotografické techniky
 - neřeší, jak se má zobrazit na běžném displeji

KVANTIZACE JASU

KÓDOVÁNÍ S OMEZENÝM ROZSAHEM

- ideální snímač následovaný neuniformním kvantizérem mapuje Y na kód 0
 - tepelný šum kód zvyšuje \Rightarrow průměr nejtmavšího jasu $\neq 0$
 - displej musí digitální signál (vzorky) převést na spojité
 - rekonstruovaný signál může přesáhnout minimum/maximum digitálních vzorků
- \Rightarrow při kódování je výhodné nechat část rozsahu volnou
- hojně využíváno pro distribuční formát a zpracování videa (studio-swing)
 - plný rozsah (full-swing) se používá zejména v počítačové grafice



KVANTIZACE JASU

PŘÍKLAD

- vstup relativní jas Y z rozsahu 1–100 (resp. 0–100)
- výpočet „měrné světlosti“ V (libovolný vztah), rozsah 0–100
- pro studiový 8bitový rozsah:
 - $R_Q = \text{round}(219 \times V / 100) + 16$
 - $\Rightarrow R_Q(Y_{\min}) = 16$ $R_Q(Y_{\max}) = 235$
- pro studiový 10bitový rozsah
 - $R_Q = \text{round}(4 \times 2,19 \times V) + 4 \times 16 = \text{round}(8,76 \times V) + 64$
 - $\Rightarrow R_Q(Y_{\min}) = 64$ $R_Q(Y_{\max}) = 940$
- zobrazení: $R_Q(Y_{\min})$ se zobrazí jako černá, $R_Q(Y_{\max})$ jako bílá
- nějakým způsobem zakódované „měrné světlosti“ říkáme **luma**, značení Y' (bližší viz definice barevnosti)

ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

- doposud jsme se de facto zabývali pouze OETF
- naivní EOTF: inverzní postup k OETF
- příklad:
 - vstup: relativní jas Y z rozsahu 0–100
 - výpočet OETF: $Y' = \text{round}(219 \times (Y / 100)^{1/2.42} + 16)$
 - přenos Y'
 - realizace EOTF: oříznutí Y' na rozsah 16–235
- $L = ((Y' - 16) / 219)^{2.42} \times L_{\text{max}}$
(výstupem displeje je jas L , jas bílé má být L_{max})
- problémy:
 - jas bílé ve scéně typicky neodpovídá L_{max} na displeji
 - podání černé na displeji ovlivněno odraženým světlem (flare; poměrně důležité u projekčních displejů)

ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

- obvykle se EOTF definuje jako $\text{EOTF}(Y') = (Y' / Y'_{\text{max}} + \text{black})^{\text{gamma}} \times L_{\text{max}}$
- jas displeje pak dán jako $L_{\text{displej}} = \text{EOTF}(Y') + L_{\text{flare}}$
- termíny:
 - Y'_{max} : maximální hodnota luma, např. 255
 - *black*: na displejích často značeno jako brightness v uvedeném vztahu typicky $\pm 0,05$
 - L_{max} : na displejích často značeno jako contrast v uvedeném vztahu typicky 100 cd m^{-2}
 - L_{flare} : neovlivnitelný jas odražený displejem, např. 1 cd m^{-2}
- *black* a L_{max} obvykle nastavujeme tak, aby byl mezi Y' a měrou světlosti displeje lineární vztah
- 1. nastavení *black*, aby byly černé odstíny rozlišitelné
- 2. nastavení L_{max} , aby nedocházelo k přebuzení v bílých

ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

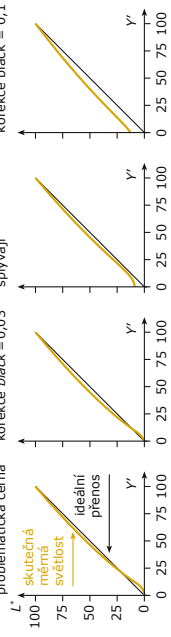
- příklad:

- snímání pomocí OETF Rec. 709 (typická kamera):

$$V_{709}(Y) = \begin{cases} 109,9 (Y / Y_{\max})^{0,45} - 9,9 & \text{pro } Y / Y_{\max} > 0,018 \\ 450 (Y / Y_{\max}) & \text{pro } Y / Y_{\max} \leq 0,018 \end{cases}$$

- $Y' \in [0, 100]$, zobrazení pomocí EOTF s $\gamma = 2,2$

flare = 0
v okolí $Y' = 0$
problématická černá
korekce black = 0,03



MHS – Bitmapový obraz 2

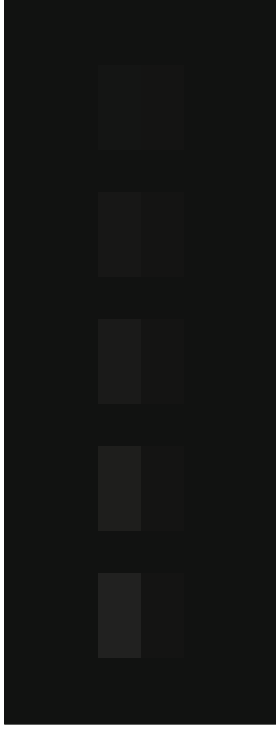
21 / 59

ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

- doposud jsme neuvažovali obvyklou situaci, kdy je jas ve scéně mnohem vyšší než jas displeje
- při „ideálním“ zobrazovacím řetězci $L_{\text{displej}} = konst. \times L_{\text{scéna}}$ se bude obraz jevit přesvětlený, nekонтрастní
 - surrounď effect
 - ve světlém prostředí se „černá“ jeví černější, bílá „bělejší“
 - možné vysvětlení: díky velkému jasu jsou tmavé jasy více ovlivněny okolním světlem (flare), oko se snaží kompenzovat „ztmavením“
- ⇒ důsledek: původně nerozlišitelné černé detaily se po prostém přeškálování jasu stanou zřetelnými
- podobný je Huntuňv efekt: ve světlém prostředí se barvy jeví sytější

MHS – Bitmapový obraz 2

22 / 59



ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

- náprava: při velkém rozdílu jasů scény a displeje tmavá místa obrazu ztmavovat

TEORETICKÁ REALIZACE

- vstup: luma Y
- dekodování normalizované hodnoty $Y'_{\text{norm}} \in [0, 1]$ (např. 8bitový studio-swing $Y'_{\text{norm}} = (Y' - 16) / 219$)
- úprava $Y'_{\text{norm korekce}} = (Y'_{\text{norm}})^{\text{systemová_gamma}}$
- hodnota **systemová_gamma** typicky mezi 1,0 a 1,5
- výstup: nová hodnota luma Y'_{korekce} (např. 8bitový studio-swing $Y'_{\text{korekce}} = 219 \cdot Y'_{\text{norm korekce}} + 16$)
- pokračování standardním postupem (EOTF)
- některé displeje umožňují hodnotu systémové gama nastavit, není to ale obvyklé

ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

PRAKTICKÁ REALIZACE

- uvažujeme jednoduché OETF, EOTF bez mezikroku s kódováním lumina:

$$\text{OETF: } V = (L_{\text{scéna}} / L_{\text{scéna max}})^{1/\text{gammaOETF}}$$

$$\text{EOTF: } L_{\text{ displej}} = V^{\text{gammaOETF}} \times L_{\text{max}}$$

- složením vztahů dostaneme

$$L_{\text{ displej}} = (L_{\text{scéna}} / L_{\text{scéna max}})^{\text{gammaOETF} / \text{gammaEOTF}} \times L_{\text{max}}$$

- hodnota $(\text{gammaEOTF} / \text{gammaOETF})$ odpovídá hodnotě systémové gama

⇒ pro obvyklé scény a obvyklé pozorovací podmínky je vhodné nastavit gammaEOTF a gammaOETF tak, aby systémová gama vyšla požadovaným způsobem (1,5 pro kino; 1,1 pro kancelářské displeje)

ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

PŘÍKLAD

- kamerová OETF podle Rec. 709

$$V_{709}(Y) = \begin{cases} 109,9 (Y / Y_{\text{max}})^{0,45} - 9,9 & \text{pro } Y / Y_{\text{max}} > 0,018 \\ 450 (Y / Y_{\text{max}}) & \text{pro } Y / Y_{\text{max}} \leq 0,018 \end{cases}$$

dá se aproximovat funkcí s exponentem 0,51 = 1 / 1,96

$$(\text{gammaOETF} = 1,96)$$

- EOTF typického kancelářského displeje se dá aproximovat funkcí s exponentem $\text{gammaEOTF} = 2,2$
 - nastavení *black* může chování podstatně změnit!
- systémová gama = 2,2 / 1,96 = 1,12

ZOBRAZOVACÍ ŘETĚZEC

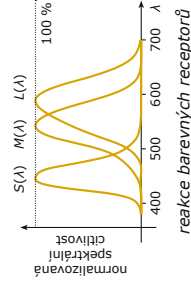
HISTORICKÁ ZAJÍMAVOST

- v původních CRT televizních obrazovkách dopadal proud elektronů na luminofor \Rightarrow emise světla
 - emitovaný jas L závislý na vstupním napětí U přibližně $L_{\text{displej}} \approx U^{2,5}$
 - EOTF původní CRT obrazovky rovnou odpovídalo požadovanému
 - jelikož napětí U mělo reprezentovat jas L_{displej} , bylo třeba napětí U generované kamerou „korigovat“:
 $U = (L_{\text{scéna}})^{1/2,5}$
(exponent mohl být jiný – viz systémová gama)
- \Rightarrow z historických důvodů se gama kódování někdy říká **gama korekce**

VZORKOVÁNÍ BARVY

VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY

- světlo = elektromagnetické záření cca 400 – 700 nm
- vjem barvy určen: spektrem záření, reakcí oka, psychologickými procesy
- za barevné vidění zodpovědné tři druhy světločivých buněk v oku (čípky) – L, M, S (long, medium, short)
 - \Rightarrow zdá se, že tři vzorky spektra by měly stačit \Rightarrow zdá se, že k reprodukci stačí barvy R, G, B
- otázka: jaké mají být spektrální citlivosti snímačů?



VZORKOVÁNÍ BARVY

- reakce čípků na světlo se spektrem $\Phi(\lambda)$:

$$L = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) L(\lambda) d\lambda$$

$$M = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) M(\lambda) d\lambda$$

$$S = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

- L, M, S jsou velikosti reakce čípků, $L(\lambda), M(\lambda), S(\lambda)$ jejich spektrální citlivosti (L tentokrát není jas!)
- elektronický snímač s elementy R, G, B reaguje podle stejného principu, spektrální citlivosti budou $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$

VZORKOVÁNÍ BARVY

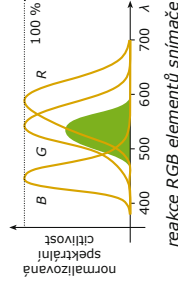
PRVNÍ ŠPATNÁ ODPOVĚĎ

- Citlivosti RGB elementů snímáče jako citlivosti L, M, S .
- experiment:
 - na displeji rozsvítíme jen zelenou barvu (G), pokusíme se zaznamenat snímáčem a výsledek opět zobrazit na displeji

⇒ díky spektrální podobě

zelené barvy displeje
reagují všechny elementy
 R, G, B

⇒ při reprodukce se rozsvítí
všechny barvy (R), (G), (B)

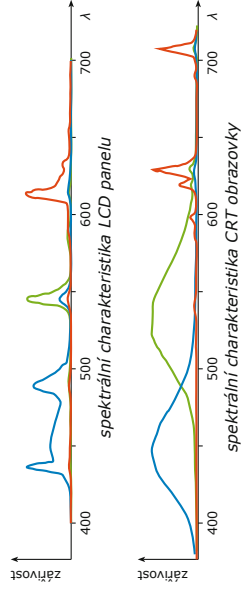


reakce RGB elementů snímáče

VZORKOVÁNÍ BARVY

DRUHÁ ŠPATNÁ ODPOVĚĎ

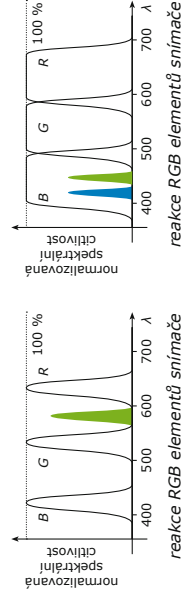
- Citlivosti R, G, B elementů by měly být stejné jako spektrální charakteristiky RGB elementů displeje.
- např. „LCD elementy“ by nereagovaly na $\lambda = 525 \text{ nm}$



VZORKOVÁNÍ BARVY

DALŠÍ ŠPATNÉ ODPOVĚDI

- elementy téměř monochromatické
⇒ nedetekují světlo kolem $\lambda = 575 \text{ nm}$
- elementy širokopásmové, pokrývají všechny vlnové délky
⇒ reagují stejně na světla $\lambda_1 = 425 \text{ nm}$ a $\lambda_2 = 450 \text{ nm}$



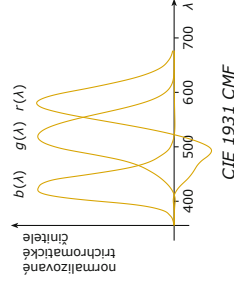
VZORKOVÁNÍ BARVY

SPRÁVNÁ ODPOVĚĎ

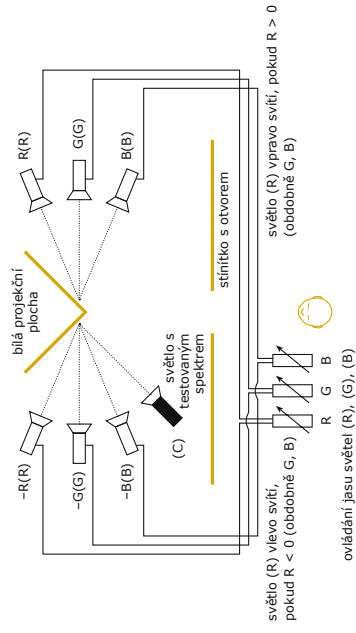
- správně formulovaná otázka:
Jakou směs (R), (G), (B) světél (např. na displeji) potřebujeme pro napodobení světla se spektrem $\varphi(\lambda)$?
- každé světlo je směsí monochromatických světél
- Grassmanův zákon:
Pokud světlo se spektrem $A(\lambda)$ vypadá stejně jako $A'(\lambda)$, světlo se spektrem $B(\lambda)$ vypadá stejně jako $B'(\lambda)$, potom světla se spektry $[A(\lambda) + A'(\lambda)]$ a $[B(\lambda) + B'(\lambda)]$ vypadají také stejně.

VZORKOVÁNÍ BARVY

- Zjednodušená otázka:
Jakou směs (R), (G), (B) světél (např. na displeji) potřebujeme pro napodobení monochromatického světla?
⇒ colour matching functions
- optimální citlivost snímače
odpovídá CMF



VZORKOVÁNÍ BARVY



MHS – Bitmapový obraz 2

35 / 59

VZORKOVÁNÍ BARVY

MĚŘENÍ CMF

- pozorovatel vidí v zorném poli vlevo vzorek barvy (C)
 - řízením směsí světel (R), (G), (B) vpravo se snaží dosáhnout barevné shody obou ploch
 - $1,0 (C) = R(R) + G(G) + B(B)$
 - pro velmi syté barvy to nelze udělat výhradně se světly vpravo, resp. musely by umět svítit „záporným jasem“
 - $1,0 (C) = -R(R) + G(G) + B(B)$
 - měření „záporného jasu“ -R: rozsvícení světla (R) vlevo s jasem +R:
 $1,0 (C) + R(R) = G(G) + B(B)$
- ⇒ pro libovolný stimul (C) určíme zjistit kladné i záporné koeficienty R, G, B

MHS – Bitmapový obraz 2

36 / 59

VZORKOVÁNÍ BARVY

PRAKTICKÉ DŮSLEDKY PRO DISPLEJ

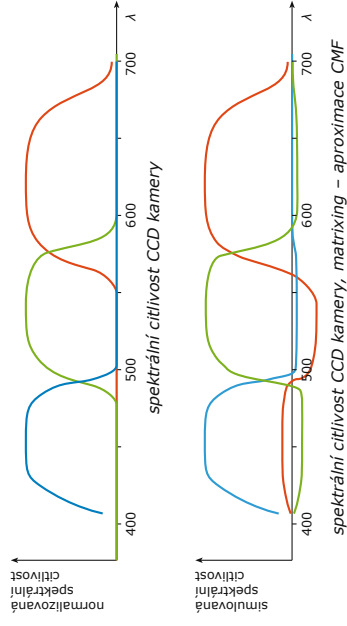
- pokud se pro světla (R), (G), (B) použijí monochromatická světla (např. $\lambda_r = 700 \text{ nm}$, $\lambda_g = 546,1 \text{ nm}$, $\lambda_b = 435,8 \text{ nm}$), mají funkce $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ „málo“ záporných částí při použití jiných (i polychromatických) světel je „záporných částí“ více
 - ⇒ málo syté základní barvy displeje omezují množství reprodukovatelných barev
 - na druhou stranu: velmi syté základní barvy (až monochromatické) jsou energeticky náročnější
 - ⇒ při stejném příkonu je displej mnohem tmavší
- ⇒ volba základních barev displeje kompromisem mezi jasem a barevným rozsahem

VZORKOVÁNÍ BARVY

PRAKTICKÉ DŮSLEDKY PRO SNÍMAČ

- záporné části CMF (záporná reakce na dopadající světlo) jde vyrobit obtížně
1. řešení – R, G, B elementy citlivost jako kladné části CMF
 - ⇒ velká chyba reprodukce některých barev
 2. řešení – R, G, B elementy citlivost jako kladné části CMF, výstupem jejich lineární kombinace (matrixing) – napodobení CMF
 - ⇒ malá chyba reprodukce u většiny barev
 3. řešení – doplnění dalších elementů (E – emerald), matrixing
 - ⇒ vylepšení barevného podání (doplnění se použít i pro displeje, např. žlutá!)

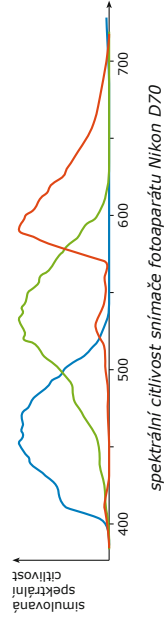
VZORKOVÁNÍ BARVY



VZORKOVÁNÍ BARVY

FINÁLNÍ SPRÁVNÁ ODPOVĚĎ

- Spektrální charakteristika barevných snímačů může být libovolná, ale musí umožňovat aproximaci CMF (colour matching functions).



DEFINICE BAREVNOSTI

REPREZENTACE BARVY PIXELU

- přímá
 - „truecolor“ – 8/16 bitů na kanál, RGB i jiné modely
 - „hi-color“ – RGB, 5-5-5 nebo 5-6-5 bitů na kanál, v distribuci multimédií se prakticky nepoužívá
 - podvzorkování barev (chroma subsampling)
- gradační křivka (duplex)
 - obrázek 1 kanál 8/16 bitů
 - převod do několika barev – přenosová křivka
- paleta
 - pevně daná paleta, typicky max. 256 barev, RGB
 - v pixelu odkaz do palety

DEFINICE BAREVNOSTI

BAREVNÉ MODEL Y

- nezávislé na zařízení
 - pro světlo se spektrem $\Phi(\lambda)$ existuje jednoznačná sada koeficientů (např. RGB), které jej popisují
 - vyžaduje přesnou specifikaci základních světél (např. $\lambda_r = 700 \text{ nm}$, $\lambda_g = 546,1 \text{ nm}$, $\lambda_b = 435,8 \text{ nm}$ s relativními základními výkony 73 : 1,4 : 1)
 - závislé na zařízení
 - „barva“ popsaná koeficienty RGB se zobrazí různě na různých typech zařízení
 - snaha vytvořit převodní vztahy do barevného modelu nezávislého na zařízení
- ⇒ pro distribuci nezávislý model, pak převod na model displeje

DEFINICE BAREVNOSTI

ADITIVNÍ MODELY

- založené na míšení základních světel
 - součet dvou světel je světlejší než každá ze složek
- koeficienty (např. RGB) se kvantizují stejně jako jas
- notace: gama-kódované koeficienty označujeme např. $R'G'B'$
 - naprotá většina barevných modelů používaných v multimédiích
 - příklad: $R'G'B'_{2,09}$: gama korigované koeficienty R, G, B; kvantizace 8 bitů, studio-swing (rozsah hodnot 16–235)

DEFINICE BAREVNOSTI

- speciální model: CIEXYZ
 - koeficienty X, Y, Z jsou kladné pro libovolnou barvu
 - primární světla (X), (Y), (Z) fyzikálně nerealizovatelná
 - místo trichromatických číteleů $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ se pro odvození koeficientů použijí $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$
 - koeficient Y odpovídá (relativnímu) jasu
 - standardní barevný model nezávislý na zařízení
 - příklad: RGB_{709} s primárními barvami podle Rec. 709
- $$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,412453 & 0,357580 & 0,180423 \\ 0,212671 & 0,715160 & 0,072169 \\ 0,019334 & 0,119193 & 0,950227 \end{bmatrix} \begin{matrix} R_{709} \\ G_{709} \\ B_{709} \end{matrix} \times$$
- speciální model X'Y'Z' – distribuční formát pro digitální kino

DEFINICE BAREVNOSTI

SUBTRAKTIVNÍ SYSTÉMY

- založené na míšení tiskových pigmentů
 - složením dvou pigmentů vznikne barva tmavší než každá ze složek
- základní barevný model pro tisk
- základní pigmenty:
 - C (azurová, cyan) – odráží vše kromě červeného světla
 - M (purpurová, magenta) – ... kromě zeleného světla
 - Y (žlutá, yellow) – ... kromě modrého světla
- obvykle se přidává K (černá, key/black)
 - bez ní by se pro tvorbu tmavých barev muselo použít hodně pestrých (dražších) pigmentů
- podle stejné logiky jde obohatit o další pigmenty

DEFINICE BAREVNOSTI

SYSTÉMY „BAREVNÝ ODSTÍN – JAS“

- obvykle tříložkové systémy
- jedna složka udává (relativní) jas, nebo měrou světlost (či její aproximací)
- zbylé dvě složky udávají barevný odstín (chrominanci) nezávislý na jasu

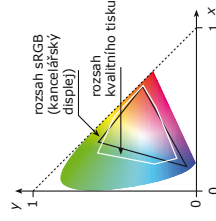
• příklad: CIExyY

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$Y = Y$$

- tzv. xy diagram se často používá pro popis barevných rozsahů displejů apod. (obvykle nevhodně)



DEFINICE BAREVNOSTI

- triviální příklad:
 $Y_{\text{triviální}} = 0,21R + 0,72G + 0,07B$ (aproximace jasu)
 $U_{\text{triviální}} = B - Y_{\text{triviální}}$ („dekorelace“ B a jasu)
 $V_{\text{triviální}} = R - Y_{\text{triviální}}$ („dekorelace“ R a jasu)
- mimořádně užitečné pro distribuci obrazu slučitelnou s černobílými displeji
- základ přechodu od černobílé k barevné televizi
 - vysílání jasové složky Y' a chrominancních složek U, V (pro různé televizní standardy různé názvosloví)
 - čb přijímač nedokázal U, V složky přijmout ani zpracovat
 - barevný přijímač z Y', U, V rekonstruoval R', G', B'

DEFINICE BAREVNOSTI

- korektní barevný zobrazovací řetězec:
 - vstup: světlo se spektrem $\Phi(\lambda)$
 - snímač: tvorba koeficientů R, G, B
 - tvorba koeficientů Y, U, V (lineární kombinace R, G, B)
 - gama kódování: tvorba Y', U', V'
 - přenos
 - gama dekódování: rekonstrukce Y, U, V
 - rekonstrukce R, G, B (lineární kombinace Y, U, V)
 - gama kódování: tvorba R', G', B'
 - odeslání R', G', B' na displej (displeje typicky vyžadují gama kódovaný vstup, u CRT to bylo dáno podstatou displeje)
- na straně zobrazení je gama kódování i dekódování

DEFINICE BAREVNOSTI

- praktický barevný zobrazovací řetězec:
 - vstup: světlo se spektrem $\Phi(\lambda)$
 - snímač: tvorba koeficientů R, G, B
 - gama kódování: tvorba R', G', B'
 - tvorba koeficientů Y', U', V' (lineární kombinace R', G', B') (Aproximace: Nebudou stejné jako korektně vytvořené!)
 - přenos
 - rekonstrukce R', G', B' (lineární kombinace Y', U', V')
 - odeslání R', G', B' na displej
- strana zobrazení podstatně jednodušší \Rightarrow levnější
- kvůli aproximaci není oddělení jasu a chrominance dokonalé \Rightarrow černobílý obraz (zobrazení Y') není tak dobrý \Rightarrow při poškození chromančního signálu poškozen i jas
- výhody ale větší než nevýhody

DEFINICE BAREVNOSTI

- nejčastěji používaný aproximační systém: $Y'C_B C_R$
 - konkrétní převodní vztahy mezi $R'G'B'$ a $Y'C_B C_R$ závisí na rozsahu (kvantizaci) koeficientů, primárních barvách, gama kódování, ...
 - pro studio-swing $Y'C_B C_R$ a $R', G', B' \in [0, 1]$ je podle Rec. 709

$$\begin{bmatrix} Y' \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 46,559 & 156,629 & 15,812 \\ -25,664 & -86,336 & 112 \\ 112 & -101,730 & -10,270 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R'_{709} \\ G'_{709} \\ B'_{709} \end{bmatrix}$$

- složky C_B, C_R jsou jen škálované rozdíly $B' - Y', R' - Y'$
- systém $Y'P_{B'R}$ (viz např. označení konektorů) se používá pro elektrické (analogové) signály: rozsah koeficientů $[0, 1]$

DEFINICE BAREVNOSTI

- systém jas-chrominance má fyziologické opodstatnění
 - signály z čípků L , M , S procházejí dalším zpracováním
 - mj. tvorba signálu „jas“ a rozdílových signálů
- pro tvorbu „jasového“ signálu stačí jeden čípek
- pro tvorbu „rozdílového“ signálu je třeba několik čípků
 - ⇒ „chrominance“ má nižší rozlišení detailů než „jas“
- teoretický základ podvzorkování barvosného signálu (chroma subsampling)
- terminologie:
 - k přípravě složek $Y' C_b C_r$, se nepoužil korektní postup
 - „luma“ = nekorektně vytvořená aproximace měrné světlosti (ze složek R' , G' , B')
 - „chroma“ = nekorektní aproximace chrominance

MHS – Bitmapový obraz 2

51 / 59

DEFINICE BAREVNOSTI

CHROMA SUBSAMPLING

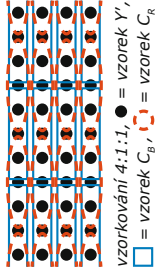
- přenos Y' v plném rozlišení, přenos $C_b C_r$ v redukovaném
- redukce rozlišení: lowpass filtr, vynechání vzorků
- standardní typy podvzorkování – označení trojicí $A : B : C$
 - $A : B$ – poměr podvzorkování $Y' : C_b C_r$ horizontálně
 - $B = C \Rightarrow C_b C_r$ má stejné vertikální rozlišení jako Y'
 - $C = 0 \Rightarrow C_b C_r$ má poloviční vertikální rozlišení než Y'
- 4:4:4 – počítačová grafika, scan, RGB i $Y' C_b C_r$
- 4:2:2 – studiové video podle Rec. 601, Rec. 709
- 4:1:1 – uživatelské video, NTSC (dnes se prakticky nepoužívá)
- 4:2:0 – uživatelské video, JPEG, MPEG-1, MPEG-2
- 3:1:1, 3:1:0 – některé videokamery

MHS – Bitmapový obraz 2

52 / 59

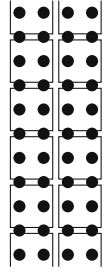
DEFINICE BAREVNOSTI

- vizualizace procesu výpočtu vzorků C_B, C_R



vzorkování 4:1:1, ● = vzorek Y' ,
 □ = vzorek C_B , □ = vzorek C_R

vzorkování 4:2:2, ● = vzorek Y' ,
 □ = vzorek C_B , □ = vzorek C_R



vzorkování 4:2:0, varianta 2

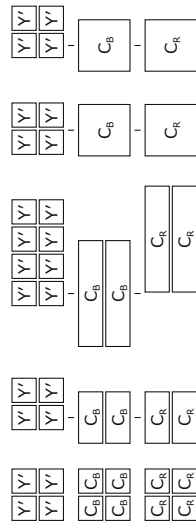
● = vzorek Y' , □ = vzorek C_B , □ = vzorek C_R

vzorkování 4:2:0, varianta 1

● = vzorek Y' , □ = vzorek C_B , □ = vzorek C_R

DEFINICE BAREVNOSTI

- alternativní vizualizace



4:2:0 (MPEG-1)

4:1:1

4:2:2

4:4:4

DEFINICE BAREVNOSTI

PŘÍKLAD

- chroma subsampling 4:2:2
- v řádce obrazu pixely M N O P Q

• luma:

$$Y'(M) \quad Y'(N) \quad Y'(O) \quad Y'(P) \quad Y'(Q)$$

- chroma (výpočty pro C_B a C_R napsány pod sebou):

$$\frac{1}{4}C_B(M) + \frac{1}{2}C_B(N) + \frac{1}{4}C_B(O) \quad \frac{1}{4}C_B(O) + \frac{1}{2}C_B(P) + \frac{1}{4}C_B(Q)$$

$$\frac{1}{4}C_R(M) + \frac{1}{2}C_R(N) + \frac{1}{4}C_R(O) \quad \frac{1}{4}C_R(O) + \frac{1}{2}C_R(P) + \frac{1}{4}C_R(Q)$$

- pro n pixelů v řádce n koeficientů Y' , $n/2$ koeficientů C_B ,
 $n/2$ koeficientů $C_R \Rightarrow 2n$ koeficientů $\Rightarrow 2/3$ úspora proti RGB

DEFINICE BAREVNOSTI



bez chroma podvzorkování



chroma podvzorkování 4:2:2

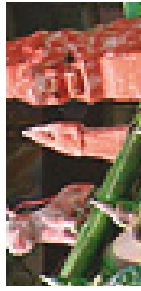


chroma podvzorkování 4:2:0

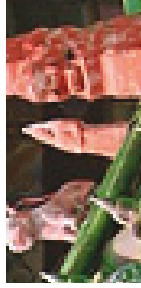


chroma podvzorkování 4:1:1

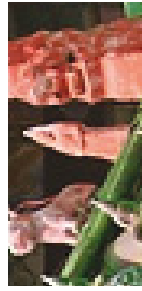
DEFINICE BAREVNOSTI



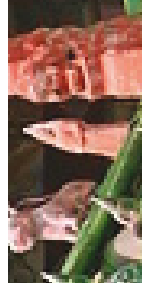
bez chroma podvzorkování



chroma podvzorkování 4:2:2



chroma podvzorkování 4:2:0



chroma podvzorkování 4:1:1

DEFINICE BAREVNOSTI



bez chroma podvzorkování



chroma podvzorkování 4:2:2



chroma podvzorkování 4:2:0



chroma podvzorkování 4:1:1

DEFINICE BAREVNOSTI

- značení 4:4:4 apod. obvyklé ve videu
- ve světě počítačů obvyklejší značení, kde se současně specifikuje i pořadí složek při ukládání
 - planární formáty: napřed uloženy všechny vzorky Y' , pak všechny $C_{B'}$, pak všechny C_R (případně jiné pořadí)
např.: I420, YV12, I422, I444
 - prokládané formáty: jednotlivé koeficienty ukládány za sebou (podobně jako v RGB datech)
např. pro 4:2:2 (na 2 Y' složky 1 $C_{B'}$ 1 C_R složka) UYVY, YUYV (= YUY2), YVYU
 - částečně prokládané formáty: napřed všechny vzorky Y' , pak proložené vzorky $C_{B'}$ C_R
např. NV12 (ukládání $C_{B'}$ C_R při podvzorkování 4:2:0)
NV21 (ukládání $C_{B'}$ C_B při podvzorkování 4:2:0)