

Lidský zrak, vnímání a reprezentace barev

Pavel Strachota

FJFI ČVUT v Praze

30. září 2022

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vnímání barev
- 3 Reprezentace barev
- 4 Hardwarově založené barevné modely
- 5 Další barevné modely
- 6 Reprodukce barev

Obsah

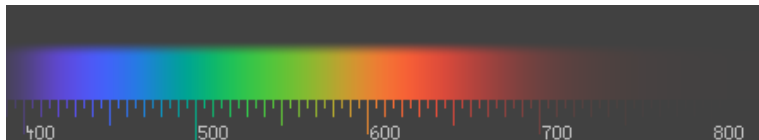
- 1 Úvod
- 2 Vnímání barev
- 3 Reprezentace barev
- 4 Hardwarově založené barevné modely
- 5 Další barevné modely
- 6 Reprodukce barev

Barvy

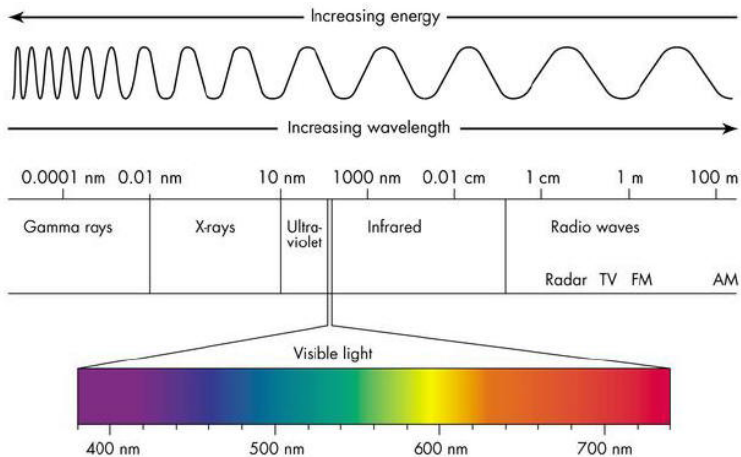


Co je barva?

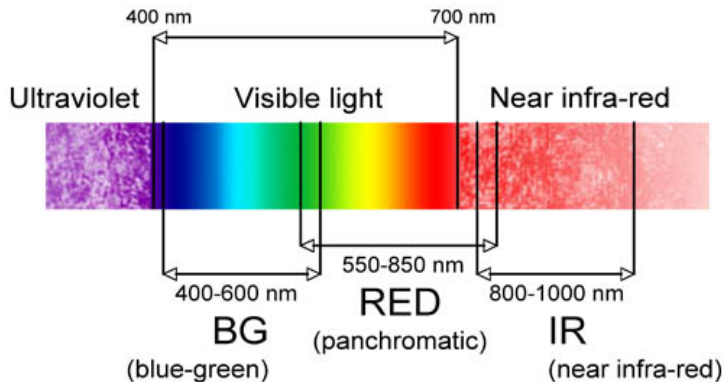
- lidské oko vnímá světla o vlnových délkách cca 380 – 720nm - **viditelné světlo**
- **barva** - zrakový vjem kombinace světelných paprsků o různých vlnových délkách, přicházejících ze stejného místa
- monochromatické světlo - světlo o jediné vlnové délce (frekvenci) \implies spektrum barev



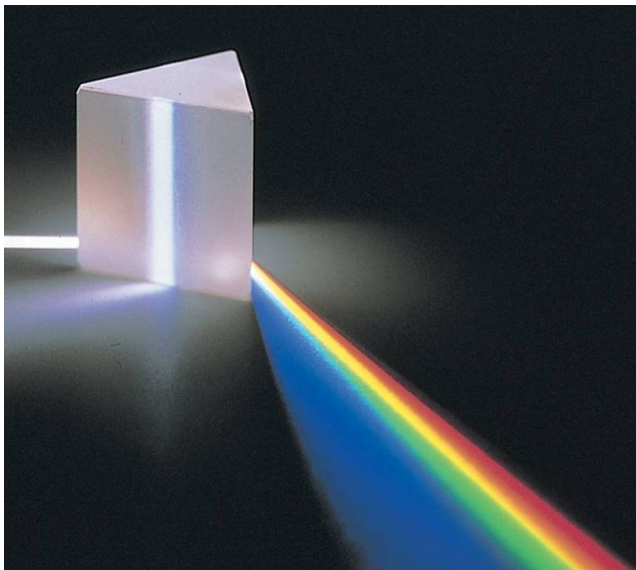
Spektrum EM záření



Spektrum barev



Spektrum barev



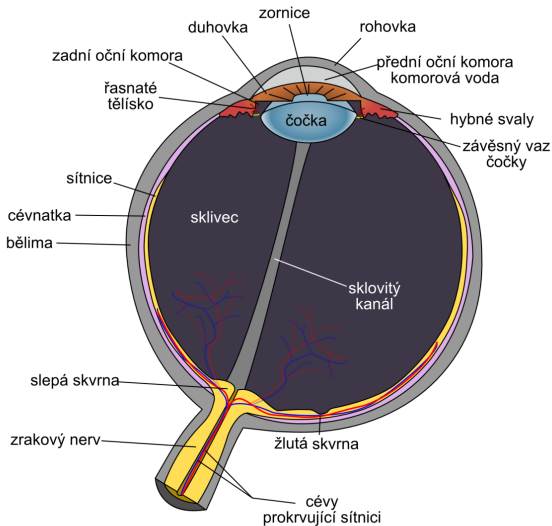
Cesta k počítačové reprezentaci barvy

- pochopit **mechanismus tvorby barevného vjemu** v lidském oku a mozku
- navrhnout zobrazovací **zařízení schopné produkovat barevné vjemy**
 - využít známá omezení lidských smyslů či další efekty vnímání (např. při dostatečné obnovovací frekvenci obrazu vidíme plynulý pohyb místo sekvence obrázků)
- v závislosti na aplikaci navrhnout vhodnou **číselnou reprezentaci barev**, se kterou může pracovat počítačový program

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vnímání barev**
- 3 Reprezentace barev
- 4 Hardwarově založené barevné modely
- 5 Další barevné modely
- 6 Reprodukce barev

Lidské oko

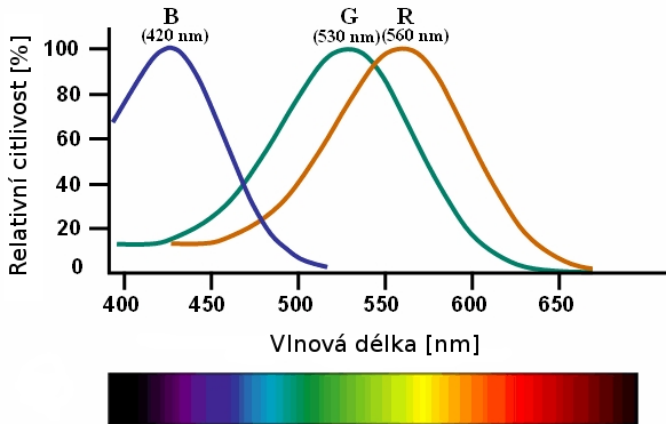


Stavba sítnice

- tenká fotocitlivá vrstva pokrývající asi 2/3 vnitřního povrchu oka
- obsahuje nervové buňky a **smyslové buňky** sítnice:
 - **tyčinky** (*rods*): asi 120 miliónů, 10× citlivější než
 - **čípky** (*cones*): asi 8 miliónů, **3 druhy** citlivé na různé vlnové délky
- kombinace signálů z čípků umožňuje **barevné vidění**
- citlivé tyčinky zprostředkovávají hlavně noční vidění - proto za šera nerozpoznáváme barvy

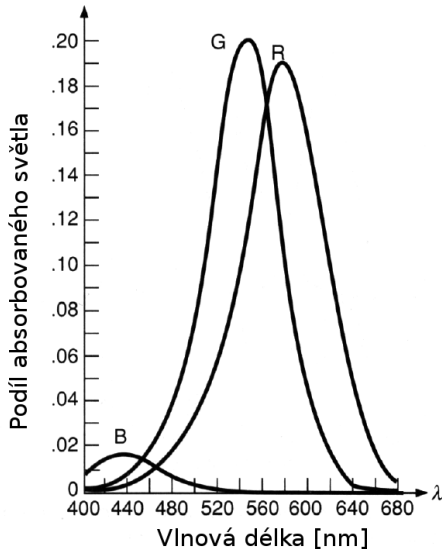
Tvorba barevného vjemu

- kombinace nervového vzruchu od 3 druhů čípků, každého s jiným průběhem citlivosti
- maximum citlivosti v oblasti **červeného** (resp. spíše **žlutého**), **zeleného** a **modrého** světla



Tvorba barevného vjemu

- kombinace nervového vzruchu od 3 druhů čípků, každého s jiným průběhem citlivosti
- maximum citlivosti v oblasti **červeného** (resp. spíše **žlutého**), **zeleného** a **modrého** světla

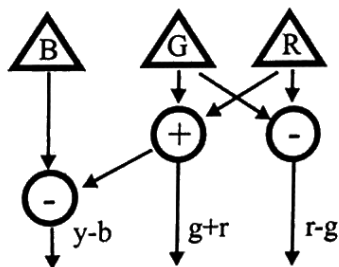


Důsledky principu vnímání barev

- barva vnímaná lidským okem - kombinace intenzit 3 nezávislých signálů (stimulů ze 3 druhů čípků)
 - místo analýzy spektra světla lze (teoreticky) libovolnou barvu rozeznatelnou **lidským** okem popsat pouze 3 parametry - mírami stimulace každého druhu čípků
- ⇒ množina všech barev rozlišitelných lidským okem tvoří trojrozměrný prostor
- většina savců má 2 typy čípků (včetně psa, kočky), někteří ptáci a hmyz mají 4 nebo 5 typů (senzitivní i na UV záření)
- ⇒ prostor barev vnímaných těmito živočichy je vícerozměrný

Další vlastnosti lidského zraku 1/3

- rovněž tyčinky mají míru absorpce závislou na frekvenci (nejvíce v oblasti zelené), ale nepoužijí se při barevném vnímání (jen okrajově při šeru)



- signály R,G,B jdou do mozku v rekombinované podobě

- světločivých buněk je \gg nervových vláken ve zrakovém nervu (cca 1 milion)

\implies už na sítnici dochází ke kompresi informace na principu rozpoznávání hran v obraze

Další vlastnosti lidského zraku 2/3

- **žlutá skvrna** (*fovea*) - malá část sítnice přímo naproti čočce, s největší koncentrací čípků (je tam více čípků než tyčinek)
 - zaručuje ostré vidění v malé oblasti
 - okolo vidíme s menším rozlišovací schopností (periferní vidění)
- **slepá skvrna** - místo napojení zrakového nervu, neobsahuje fotoreceptory
 - předměty promítající se na slepou skvrnu oko nevidí
 - mozek doplňuje obraz tak, že si slepé skvrny nevšimneme, lze ji však odhalit snadným pokusem
 - **Mariottův pokus** (zakryjte pravé oko, sledujte **X**, v určité vzdálenosti od monitoru zmizí **O**)



Další vlastnosti lidského zraku 3/3

- **adaptace** (duhovka, citlivost čípků) - schopnost zpracovat intenzity lišící se násobkem 10^{10} (práh vnímání za šera, mez oslnění), ovšem nikoliv současně (dynamický rozsah)
 - vnímaný jas je logaritmickou funkcí fyzikální intenzity (podobně u sluchu)
- **prostorové vnímání** (vnímání hloubky)
 - perspektiva, zaostření (stačí 1 oko)
 - relativní pohyb různě vzdálených objektů při pohybu pozorovatele (*motion parallax*) (stačí 1 oko - kývání hlavy u ptáků)
 - stereoskopické vnímání (*stereopsis*), konvergence (zacílení obou očí na stejný objekt \implies různé napětí extraokulárních svalů),
- **setrvačnost** (nevnímáme blikání televize) - fyzikálně založené (přirozené) průměrování signálu v čase

Optické efekty a klamy

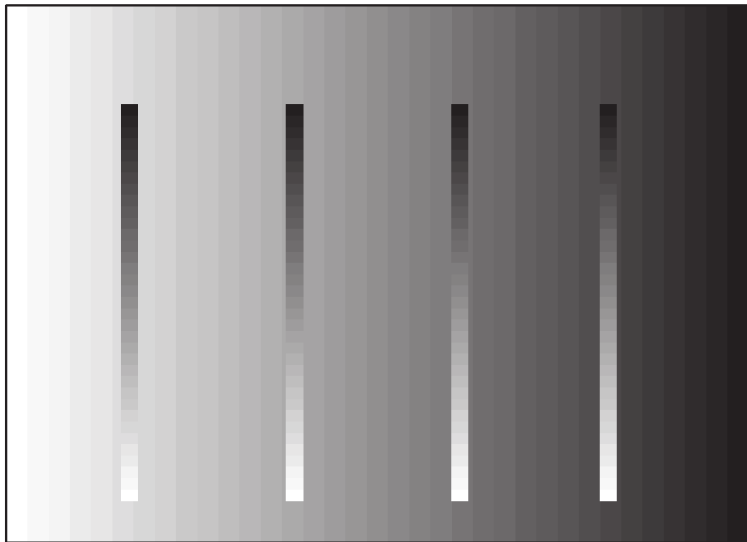
Modrý text se nečte příliš dobře.

Červený text se čte lépe.

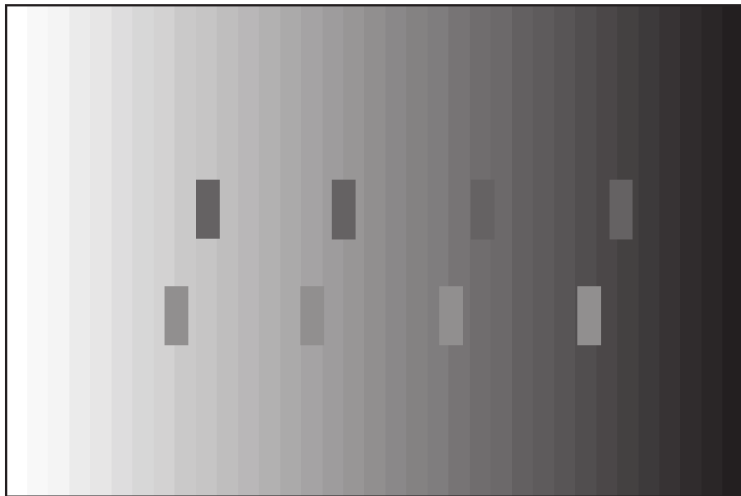
Zelený text se čte nejlépe.

Demonstrace různé citlivosti jednotlivých typů čípků

Optické efekty a klamy



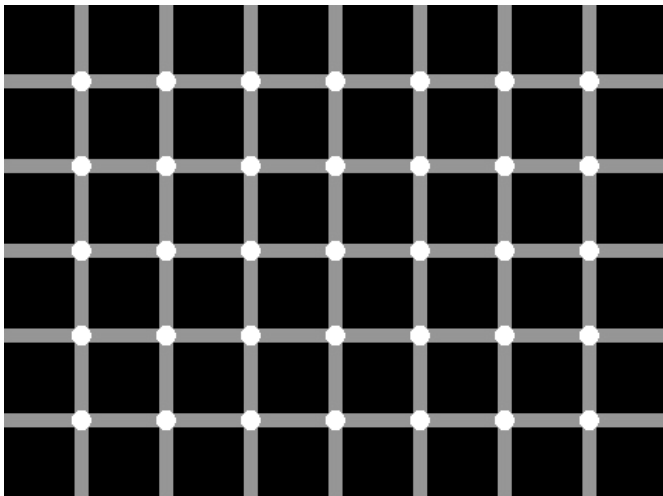
Optické efekty a klamy



Optické efekty a klamy

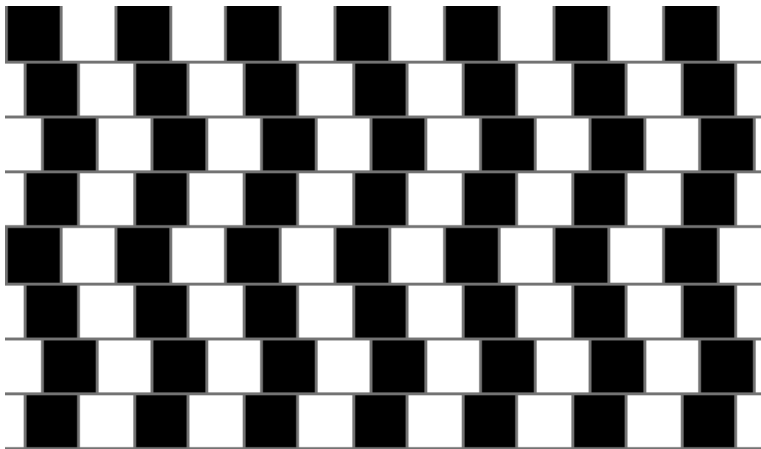


Optické efekty a klamy



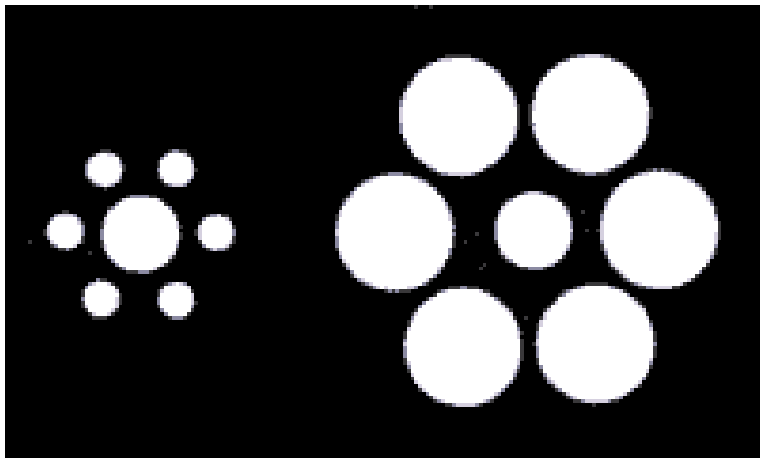
Spočítejte černé tečky.

Optické efekty a klamy



Jsou vodorovné čáry opravdu tak křivé?

Optické efekty a klamy



Která z prostředních teček je větší?

Optické efekty a klamy



Je modrá stěna vpředu, nebo vzadu?

Optické efekty a klamy



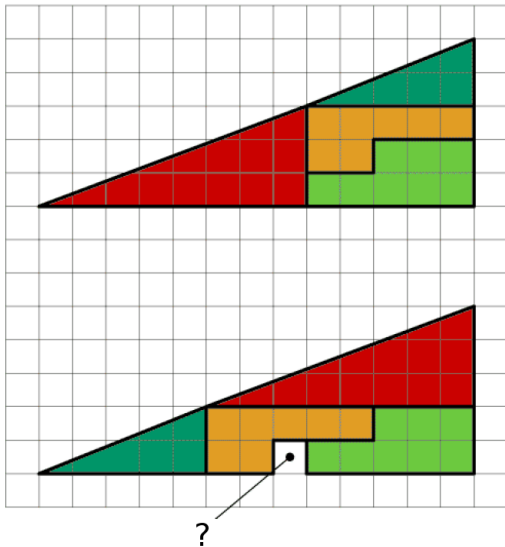
Co je na obrázku?

Optické efekty a klamy



Co je na obrázku?

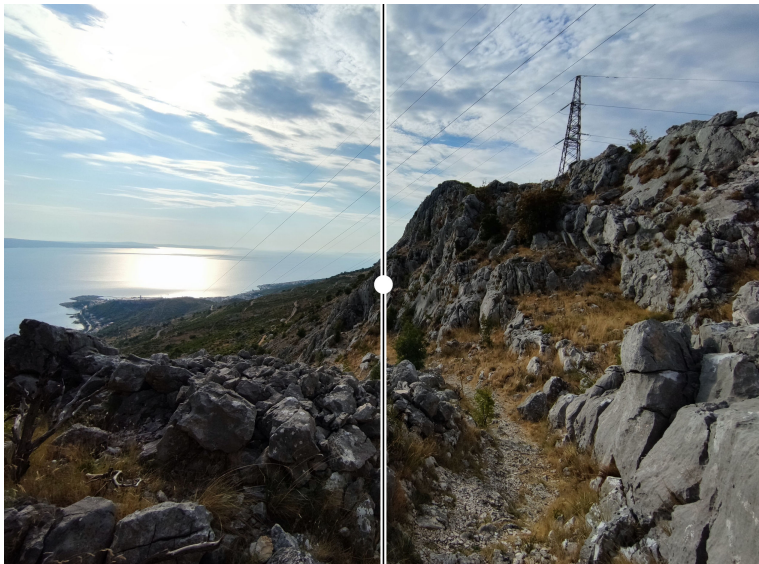
Optické efekty a klamy



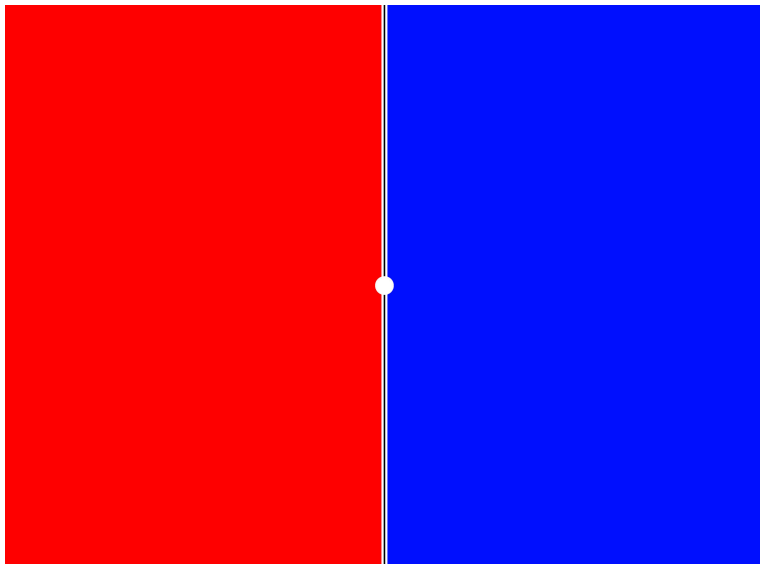
Optické efekty a klamy



Optické efekty a klamy



Optické efekty a klamy

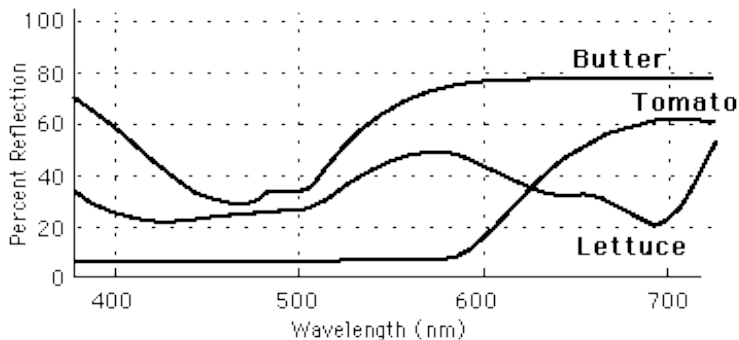


Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vnímání barev
- 3 Reprezentace barev**
- 4 Hardwarově založené barevné modely
- 5 Další barevné modely
- 6 Reprodukce barev

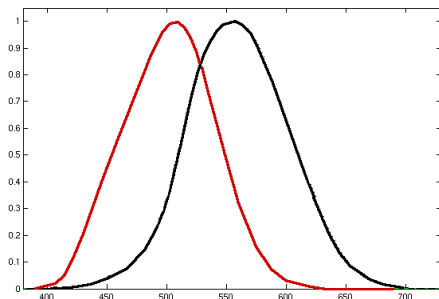
Radiometrie

- měření světla
- příchozí světlo (EM záření) obvykle obsahuje všechny frekvence, ale různě zastoupené
- (spektrální) **zářivá energie** (*radiant energy*) v závislosti na vlnové délce \implies funkce $C(\lambda)$
- další fyzikální veličiny: zářivý tok (*radiant flux*), zářivost (*radiance* - hustota zář. toku), ...



Fotometrie

- měření světla z hlediska vnímání lidským okem - **jas** (*brightness*)
- vážení fyzikálních veličin funkcí citlivosti lidského oka
- **luminozita** $V(\lambda)$ - průměrná citlivost lidského oka v závislosti na vlnové délce (neplést s luminozitou v astronomii - svítivost hvězd za jednotku času)



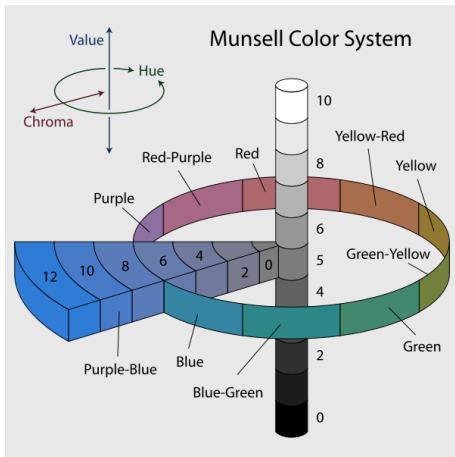
černě luminozita *fotopická* (běžné světlo), červeně *skotopická* (šero)

Kolorimetrie

- věda o barvách
 - **metamery** - rozdílná rozdělení **spektrální zářivé energie** $C(\lambda)$ vnímaná jako tatáž barva
- ⇒ není důležité skutečné rozdělení $C(\lambda)$, ale výsledný barevný vjem
- v zobrazovacích zařízeních (displeje, obrazovky, tiskárny) lze zvolit jeden vhodný metamer (který se snadno matematicky reprezentuje a fyzikálně realizuje)
 - snaha najít jednotnou reprezentaci barvy, nezávislou na světelných podmínkách, vlastnostech zobrazovacího zařízení atd.
- ⇒ standardy pro barvy a barevné prostory

Munsellův systém barev

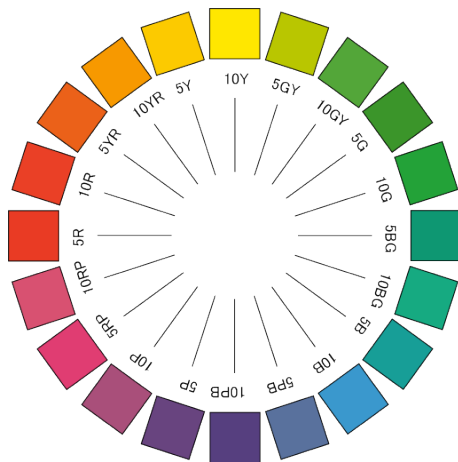
- zač. 20 století
- **klasifikace** a pojmenování barev na základě 3 charakteristik: odstín (*hue*), čistota barvy (*chroma*) - v podstatě sytost, hodnota (*value*) - světlost
- různé barvy pojmenovány tak, aby od sebe měly stejný subjektivní odstup
- další systémy: **NCS** (Natural Color System), **PMS** (Pantone Matching System), ...



Barevné souřadnice

Munsellův systém barev

- zač. 20 století
- **klasifikace** a pojmenování barev na základě 3 charakteristik: odstín (*hue*), čistota barvy (*chroma*) - v podstatě sytost, hodnota (*value*) - světlost
- různé barvy pojmenovány tak, aby od sebe měly stejný subjektivní odstup
- další systémy: **NCS** (Natural Color System), **PMS** (Pantone Matching System), ...



Barevné odstíny (max. sytost a světlost)

Skládání barvy z primárních barev

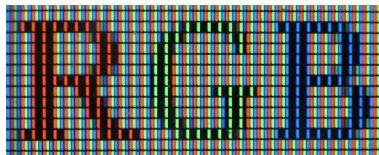
- díky 3 typům čípků máme 3-rozměrný barevný prostor (hodnoty stimulů jednotlivých typů čípků)
- ⇒ chceme barvu popsat 3 parametry, **vhodnými pro praktickou klasifikaci či rekonstrukci** barev
- myšlenka - princip **superpozice**: pomocí 3 parametrů vyrobíme barevný vjem odpovídající libovolné **barvě** C_λ **monochromatického** světla o vlnové délce λ . Pak lze vyrobit barvu odpovídající libovolné spektrální hustotě energie $P(\lambda)$
- většinu barev vnímaných lidským okem lze vyjádřit metamerem složeným ze 3 vhodně zvolených tzv. **primárních světél**, různě stimulujících 3 typy čípků
- množina barev, které lze nakombinovat z primárních světél - **gamut**
- nevhodná primární světla ⇒ malý gamut

Míchání barev RGB

- vhodná primární světla: monochromatická světla o vln. délkách odpovídajících červenému (**R**ed), zelenému (**G**reen) a modrému (**B**lue) světlu
- barvu C_λ monochromatického světla o vlnové délce λ nakombinujeme pomocí složení červeného, zeleného a modrého světla o intenzitách - hodnotách tzv. **srovnávacích funkcí** (*matching functions*) $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$

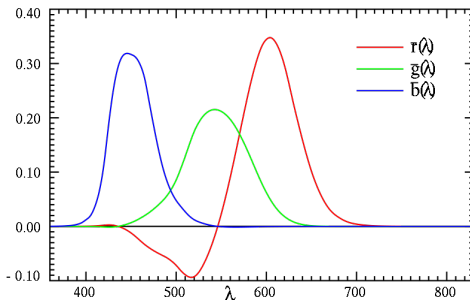
$$C_\lambda = \bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)$$

- hodnoty srovnávacích funkcí určeny experimentálně podle tzv. **standardního pozorovatele**



Barevný prostor CIE RGB

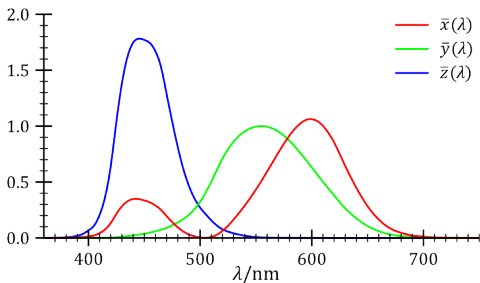
- **CIE** - Mezinárodní komise pro osvětlení (*Commission Internationale de l'Éclairage*)
- model CIE RGB obsahuje tvar funkcí $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$



- hodnota $\bar{r}(\lambda)$ je pro některá λ záporná \implies některé barvy nelze nakombinovat (mají moc červené, i když tam žádná není)

Barevný prostor CIE XYZ 1/2

- **abstraktní** srovnávací funkce $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ uměle definované tak, aby byly všude nezáporné



- srovnávací funkce **neodpovídají** primárním světlům (žádná barva C_{λ_0} nemá např. $x(\lambda_0) > 0$ a přitom $y(\lambda_0) = z(\lambda_0) = 0$). Zhruba odpovídají R,G,B.

Barevný prostor CIE XYZ 2/2

- obecné světlo o **spektrální hustotě energie** $P(\lambda)$ bude mít barvu definovanou souřadnicemi X, Y, Z

$$X = k \int_0^{+\infty} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda,$$

$$Y = k \int_0^{+\infty} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda,$$

$$Z = k \int_0^{+\infty} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda,$$

kde k je vhodná konstanta (pro objekty s vlastním vyzařováním CIE stanovuje $k = 680$)

⇒ barvu lib. světla lze **popsat** 3 parametry. Neurčují však, jak barvu **rekonstruovat** (oproti RGB jsou abstraktní).

Barevný prostor CIE xyY

- můžeme normalizovat

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

- potom

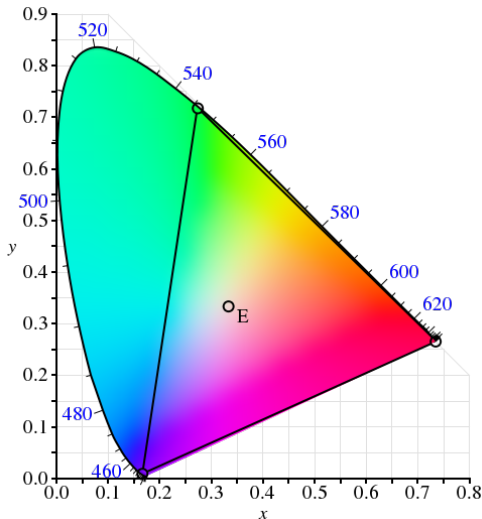
$$x + y + z = 1$$

a stačí tedy znát x, y . K rekonstrukci hodnot X, Y, Z lze použít např. původní složku Y , určující **jas**

⇒ barevný prostor **xyY**, pro daný jas Y zobrazitelný do roviny jako **chromatický diagram CIE 1931**

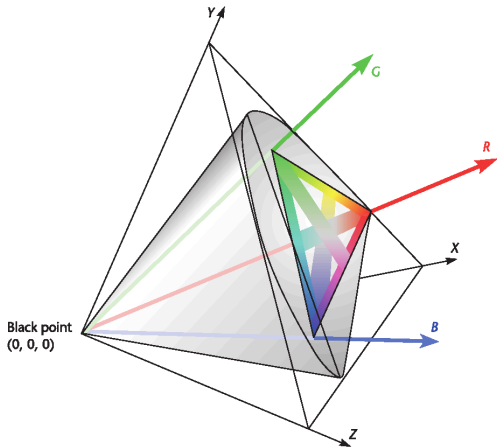
Chromatický diagram CIE 1931

- diagram v rovině x, y
- trojúhelník značí gamut prostoru CIE RGB
- směs barev leží na úsečce, která je spojuje
- po obvodu jsou monochromatické barvy



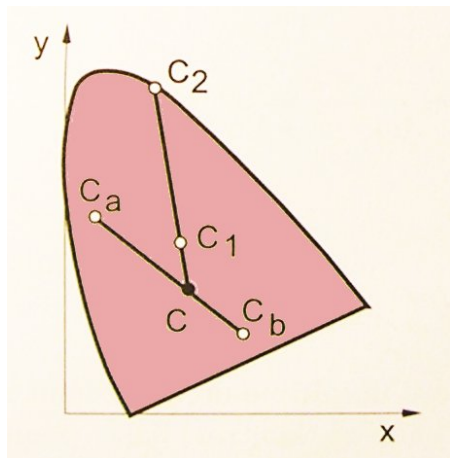
Chromatický diagram CIE 1931

- diagram v rovině x, y
- trojúhelník značí gamut prostoru sRGB (viz dále)
- směs barev leží na úsečce, která je spojuje
- po obvodu jsou monochromatické barvy



Vlastnosti barev v CIE 1931

- **sytnost** barvy C_1 : relativní vzdálenost od **referenčního bílého bodu** C na polopřímce spojující C a C_1 a protínající obalovou křivku v bodě C_2
- $\frac{C-C_1}{C-C_2} = \frac{1}{4} \implies$ sytnost je 25%
- dominantní vlnová délka C_1 : odpovídá bodu C_2
- doplňkové barvy C_a, C_b - leží na úsečce procházející bodem C

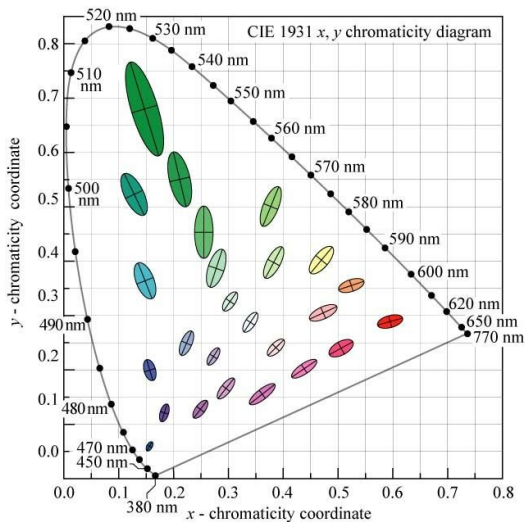


Uniformní modifikace prostoru CIE XYZ

- **uniformita** - prostorová (euklidovská) vzdálenost barev má odpovídat subjektivní vnímané vzdálenosti
- proč je důležité měřit barevné rozdíly
 - specifikace barevných tolerancí (součástky, laky, textil)
 - barevné označení (abychom si nespletli kabely)
- nové barevné prostory vzniklé nelineární transformací X, Y, Z
- CIE 1960 (UCS)
- CIE 1976: $L^*u^*v^*$ - „CIELUV“, $L^*a^*b^*$ - „CIELAB“
- $L^*a^*b^*$

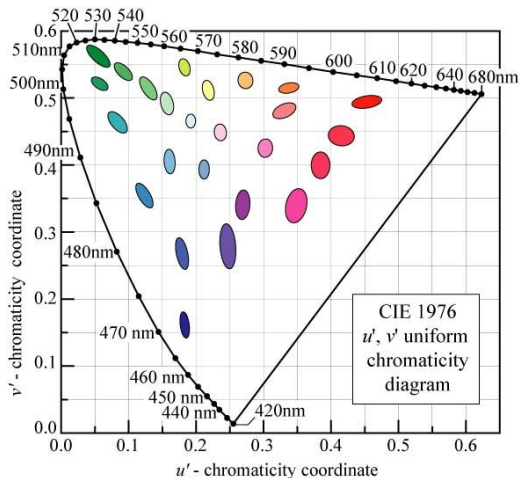
MacAdamovy elipsy

- oblasti v barevném diagramu s barvami pro běžné oko nerozlišitelnými
- poloosy elips jsou zde 10× zvětšeny
- (relativní) uniformita prostoru $L^*u^*v^*$
 \implies rozdíly ve velikosti elips v XYZ větší než v $L^*u^*v^*$



MacAdamovy elipsy

- oblasti v barevném diagramu s barvami pro běžné oko nerozlišitelnými
- poloosy elips jsou zde 10× zvětšeny
- (relativní) uniformita prostoru $L^*u^*v^*$
 \implies rozdíly ve velikosti elips v XYZ větší než v $L^*u^*v^*$



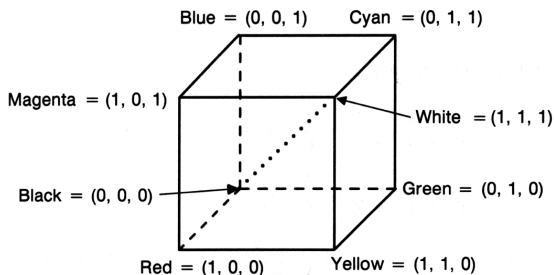
Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vnímání barev
- 3 Reprezentace barev
- 4 Hardwarově založené barevné modely**
- 5 Další barevné modely
- 6 Reprodukce barev

Barevný prostor RGB 1/2

- primární barvy **R, G, B**
- barevný prostor ve tvaru jednotkové krychle

souřadnice barvy
 $R, G, B \in [0, 1]$

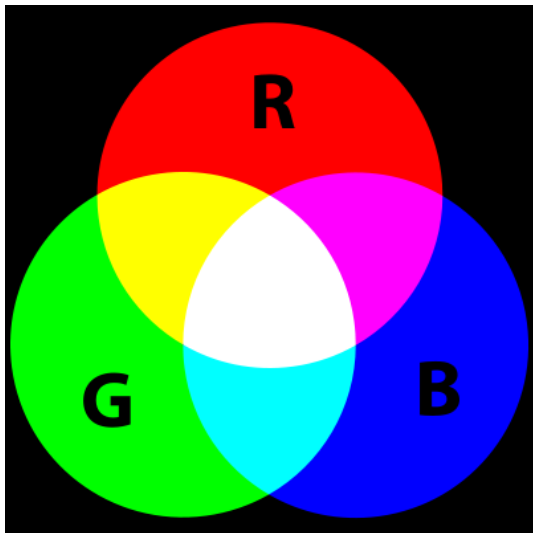


- kvůli rozdílné citlivosti jednotlivých typů čípků není intenzita výsledného světla $R + G + B$, ale (empirický vztah podle standardu)

$$I = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

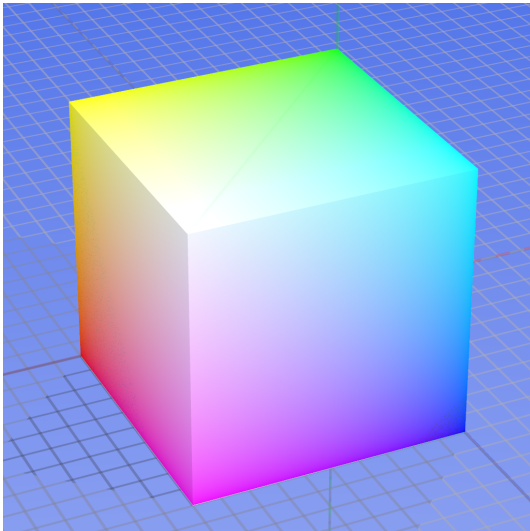
Barevný prostor RGB 2/2

Aditivní skládání primárních barev (sčítají se příspěvky od světelných zdrojů) - princip všech svítících barevných zobrazovacích zařízení



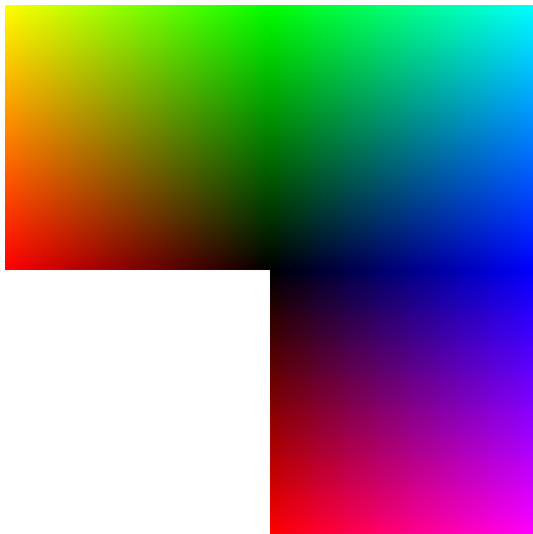
Barevný prostor RGB 2/2

Povrch barevného prostoru RGB ve tvaru krychle, pohled na vrchol $[1, 1, 1]$



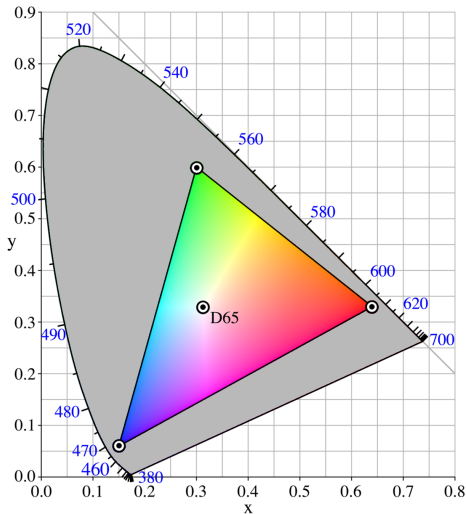
Barevný prostor RGB 2/2

Síť RGB krychle, tři stěny vycházející z vrcholu $[0,0,0]$



Barevný prostor RGB 2/2

Gamut standardizovaného barevného prostoru RGB (sRGB) - HP, Microsoft 1996



Datová reprezentace RGB barvy

- diskretizace oboru hodnot $[0, 1]$ - tzv. **kvantizace**
- **3-bit** RGB - teletext (8 základních barev včetně černé)
- **16-bit** RGB (*high color*) - R+G+B uloženo v 5+5+5 bitech (555 mode, 32768 barev) nebo v 5+6+5 bitech (565 mode, 65536 barev)
- **24-bit** RGB (*true color*) - 8 bitů na barevný kanál, $256^3 \doteq 16.7$ miliónů barev
- **32-bit** RGB (*true color*) - zarovnání hodnot na hranici 32-bitových slov za účelem efektivity operací, posledních 8 bitů se nepoužívá
- **48-bit** RGB - 16 bitů na kanál, použití ve zpracování obrazu

Vlastnosti RGB reprezentace

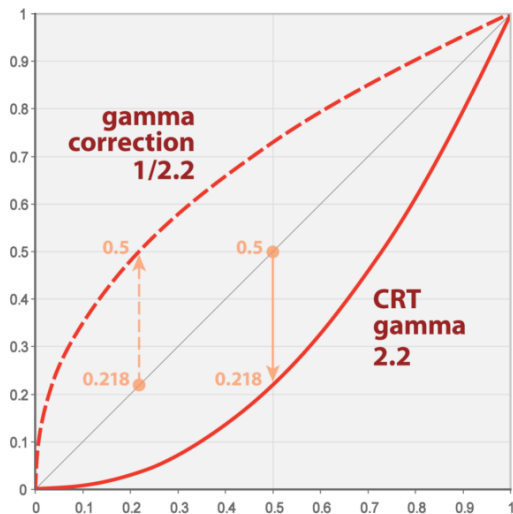
- reprezentace vlastní zobrazovacímu zařízení, jednoduchý a přímočarý popis (intenzity jednotlivých fosforů v pixelu)
- **neintuitivní** při definici barvy uživatelem, **neuniformní**
- souřadnice $[x, y, Y]$ v CIE 1931 barvy reprezentované pomocí $[R, G, B]$ lze vypočítat jen při znalosti polohy primárních světél v xyY diagramu
- primární světla (fosfory) v monitorech se liší:
 - CRT, LCD, plasma, ale i
 - 2 monitory na stejném principu,
 - od stejného výrobce, nebo dokonce
 - ze dvou sérií stejného typu
- **gama korekce**

Gama korekce

- korekce nelineární odezvy (výsledné světelné intenzity) fosforů v závislosti na vstupním signálu
- tmavé barvy na CRT se jeví ještě tmavější \implies zesvětlení transformací (tzv. *gamma encoding*, *gamma compression*)

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma}, \gamma < 1$$

- inverzní transformaci (*gamma expansion*) provádí monitor sám díky své konstrukci

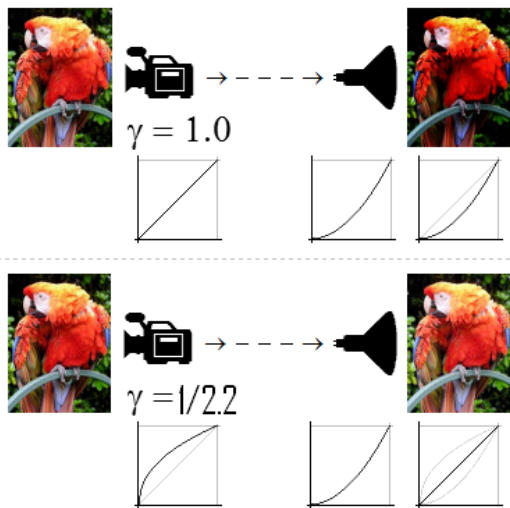


Gama korekce

- korekce nelineární odezvy (výsledné světelné intenzity) fosforů v závislosti na vstupním signálu
- tmavé barvy na CRT se jeví ještě tmavější \Rightarrow zesvětlení transformací (tzv. *gamma encoding*, *gamma compression*)

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma}, \gamma < 1$$

- inverzní transformaci (*gamma expansion*) provádí monitor sám díky své konstrukci



Gama korekce

- korekce nelineární odezvy (výsledné světelné intenzity) fosforů v závislosti na vstupním signálu
- tmavé barvy na CRT se jeví ještě tmavější \implies zesvětlení transformací (tzv. *gamma encoding*, *gamma compression*)

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma}, \gamma < 1$$



- inverzní transformaci (*gamma expansion*) provádí monitor sám díky své konstrukci

$$1/\gamma = 0.5$$

Gama korekce

- korekce nelineární odezvy (výsledné světelné intenzity) fosforů v závislosti na vstupním signálu
- tmavé barvy na CRT se jeví ještě tmavější \implies zesvětlení transformací (tzv. *gamma encoding*, *gamma compression*)

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma}, \gamma < 1$$

- inverzní transformaci (*gamma expansion*) provádí monitor sám díky své konstrukci

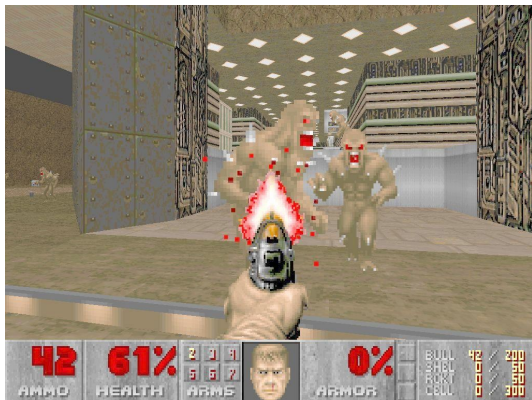


$1/\gamma = 1.0$ (originál)

Gama korekce

- korekce nelineární odezvy (výsledné světelné intenzity) fosforů v závislosti na vstupním signálu
- tmavé barvy na CRT se jeví ještě tmavější \implies zesvětlení transformací (tzv. *gamma encoding*, *gamma compression*)

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma}, \gamma < 1$$



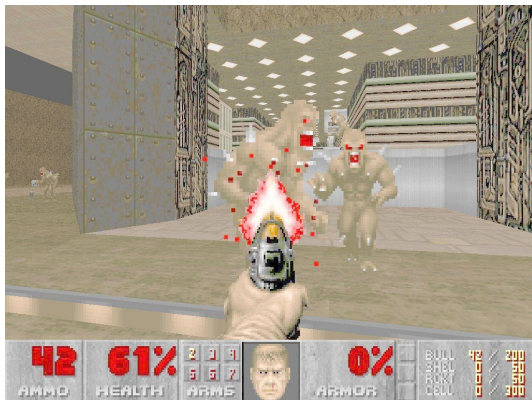
- inverzní transformaci (*gamma expansion*) provádí monitor sám díky své konstrukci

$$1/\gamma = 1.5$$

Gama korekce

- korekce nelineární odezvy (výsledné světelné intenzity) fosforů v závislosti na vstupním signálu
- tmavé barvy na CRT se jeví ještě tmavější \implies zesvětlení transformací (tzv. *gamma encoding*, *gamma compression*)

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma}, \gamma < 1$$

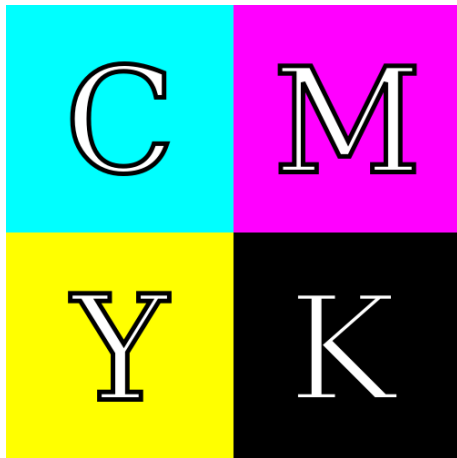


- inverzní transformaci (*gamma expansion*) provádí monitor sám díky své konstrukci

$$1/\gamma = 2.0$$

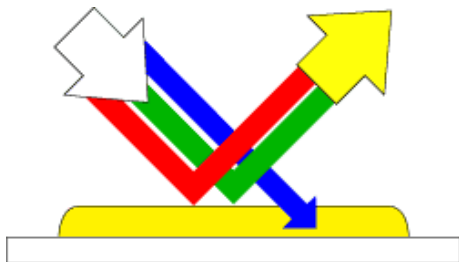
Barevný prostor CMY

- **subtraktivní** skládání barev (míchání **barviv** na papíře)
- každá z barev **pohlcuje** určité složky světla
- přidávání barev \implies pohlcování více složek světla
- primární barvy doplňkové k R,G,B
 - tyrkysová (**C**yan) - pohlcuje **R**
 - fuchsínová (**M**agenta) - pohlcuje **G**
 - žlutá (**Y**ellow) - pohlcuje **B**
- **CMYK** (navíc černá - *black*)
 - šetří barevný inkoust



Barevný prostor CMY

- **subtraktivní** skládání barev (míchání **barviv** na papíře)
- každá z barev **pohlcuje** určité složky světla
- přidávání barev \implies pohlcování více složek světla
- primární barvy doplňkové k R,G,B
 - tyrkysová (**C**yan) - pohlcuje **R**
 - fuchsínová (**M**agenta) - pohlcuje **G**
 - žlutá (**Y**ellow) - pohlcuje **B**
- **CMYK** (navíc černá - *blacK*)
 - šetří barevný inkoust



Subtraktivní skládání

Barevný prostor CMY

- **subtraktivní** skládání barev (míchání **barviv** na papíře)
- každá z barev **pohlcuje** určité složky světla
- přidávání barev \implies pohlcování více složek světla
- primární barvy doplňkové k R,G,B
 - tyrkysová (**C**yan) - pohlcuje **R**
 - fuchsínová (**M**agenta) - pohlcuje **G**
 - žlutá (**Y**ellow) - pohlcuje **B**
- **CMYK** (navíc černá - *blacK*)
 - šetří barevný inkoust



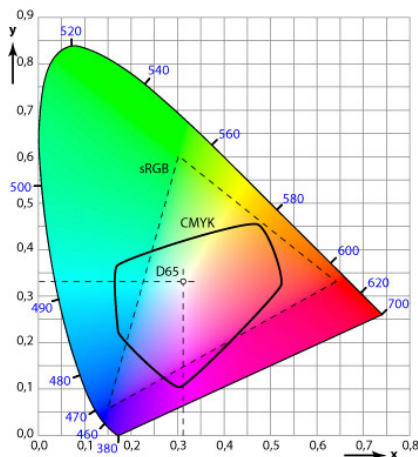
Barevný prostor CMY

- **subtraktivní** skládání barev (míchání **barviv** na papíře)
- každá z barev **pohlcuje** určité složky světla
- přidávání barev \implies pohlcování více složek světla
- primární barvy doplňkové k R,G,B
 - tyrkysová (**C**yan) - pohlcuje **R**
 - fuchsínová (**M**agenta) - pohlcuje **G**
 - žlutá (**Y**ellow) - pohlcuje **B**
- **CMYK** (navíc černá - *black*)
 - šetří barevný inkoust



Barevný prostor CMYK

- **subtraktivní** skládání barev (míchání **barviv** na papíře)
- každá z barev **pohlcuje** určité složky světla
- přidávání barev \implies pohlcování více složek světla
- primární barvy doplňkové k R,G,B
 - tyrkysová (**C**yan) - pohlcuje **R**
 - fuchsínová (**M**agenta) - pohlcuje **G**
 - žlutá (**Y**ellow) - pohlcuje **B**
- **CMYK** (navíc černá - *black*)
 - šetří barevný inkoust



Gamut CMYK

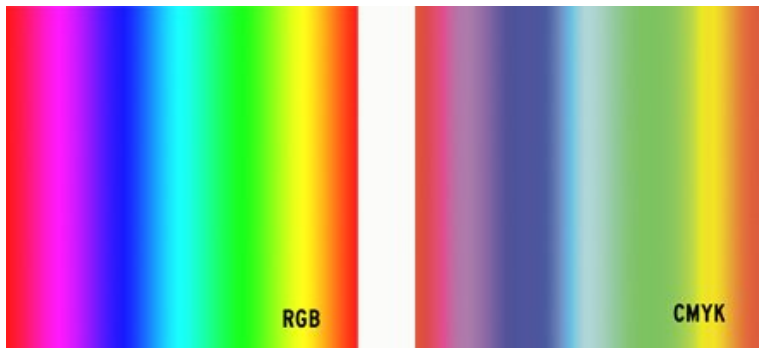
Barevný prostor CMY

- **subtraktivní** skládání barev (míchání **barviv** na papíře)
- každá z barev **pohlcuje** určité složky světla
- přidávání barev \implies pohlcování více složek světla
- primární barvy doplňkové k R,G,B
 - tyrkysová (**C**yan) - pohlcuje **R**
 - fuchsínová (**M**agenta) - pohlcuje **G**
 - žlutá (**Y**ellow) - pohlcuje **B**
- **CMYK** (navíc černá - *black*)
 - šetří barevný inkoust

Transformace mezi RGB a CMY:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Gamut RGB a CMYK



Gamut RGB a CMYK



Rozklad CMY a CMYK



Původní obrázek

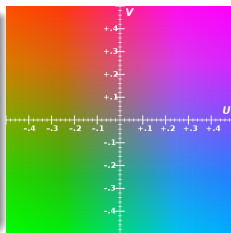


Barevné prostory YUV, YIQ, YC_BC_R

- barevné formáty pro přenos TV vysílání v normách (po řadě) PAL, NTSC, SECAM
 - YC_BC_R také pro kódování JPEG (viz další přednášky)
- **Y** - kanál pro **jas** (černobílá televize zobrazuje pouze tento kanál), ostatní dva kanály nesou barevnou informaci
- lze zapsat jako **lineární transformace** prostoru RGB (všimněte si prvního řádku matice - výpočet jasu)

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.141 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

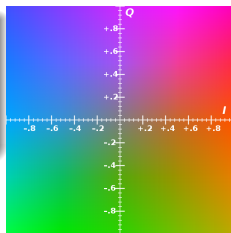
$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.493(B - Y) \\ 0.877(R - Y) \end{bmatrix}$$



Barevné prostory YUV, YIQ, YC_BC_R

- barevné formáty pro přenos TV vysílání v normách (po řadě) PAL, NTSC, SECAM
 - YC_BC_R také pro kódování JPEG (viz další přednášky)
- **Y** - kanál pro **jas** (černobílá televize zobrazuje pouze tento kanál), ostatní dva kanály nesou barevnou informaci
- lze zapsat jako **lineární transformace** prostoru RGB (všimněte si prvního řádku matice - výpočet jasu)

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & -0.311 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



Barevné prostory YUV, YIQ, YC_BC_R

- barevné formáty pro přenos TV vysílání v normách (po řadě) PAL, NTSC, SECAM
 - YC_BC_R také pro kódování JPEG (viz další přednášky)
- **Y** - kanál pro **jas** (černobílá televize zobrazuje pouze tento kanál), ostatní dva kanály nesou barevnou informaci
- lze zapsat jako **lineární transformace** prostoru RGB (všimněte si prvního řádku matice - výpočet jasu)

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

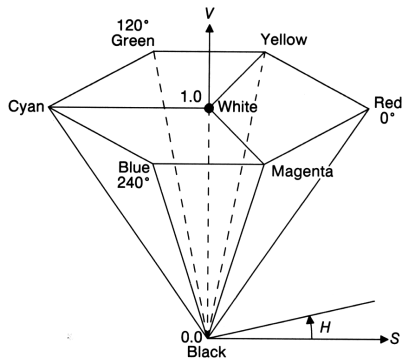
$$\begin{bmatrix} C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.564(B - Y) \\ 0.713(R - Y) \end{bmatrix}$$

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vnímání barev
- 3 Reprezentace barev
- 4 Hardwarově založené barevné modely
- 5 Další barevné modely**
- 6 Reprodukce barev

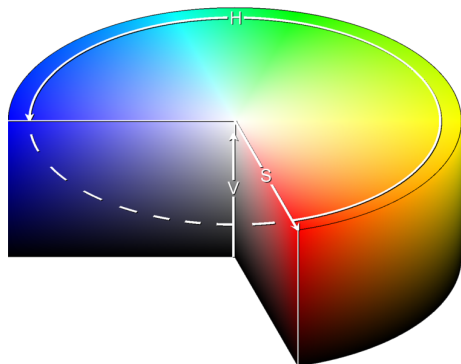
Barevný prostor HSV

- tři souřadnice:
 - odstín (**Hue**)
 - sytost (**Saturation**) - podíl bílého achromatického světla
 - hodnota (**Value**) - intenzita
- cylindrický souřadný systém
 - $h \in [0, 2\pi)$
 - $s \in [0, 1]$
 - $v \in [0, 1]$
- gamut RGB obsažen v jehlanu \subset HSV (což je válec)
- černá: $v = 0$, bílá: $v = 1, s = 0$



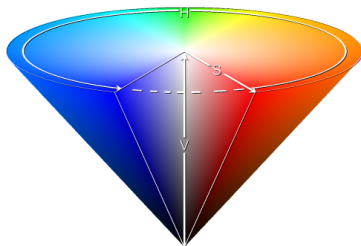
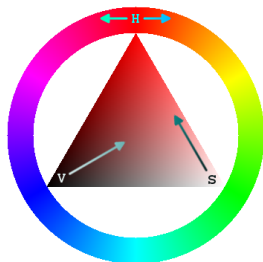
Barevný prostor HSV

- tři souřadnice:
 - odstín (**H**ue)
 - sytost (**S**aturation) - podíl bílého achromatického světla
 - hodnota (**V**alue) - intenzita
- cylindrický souřadný systém
 - $h \in [0, 2\pi)$
 - $s \in [0, 1]$
 - $v \in [0, 1]$
- gamut RGB obsažen v jehlanu \subset HSV (což je válec)
- černá: $v = 0$, bílá: $v = 1, s = 0$



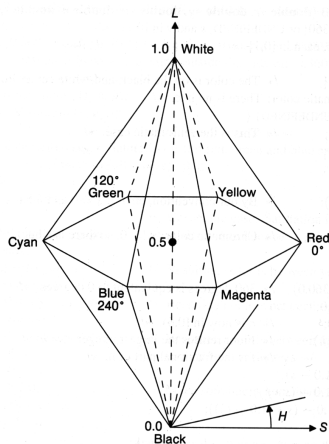
Barevný prostor HSV

- tři souřadnice:
 - odstín (**Hue**)
 - sytost (**Saturation**) - podíl bílého achromatického světla
 - hodnota (**Value**) - intenzita
- cylindrický souřadný systém
 - $h \in [0, 2\pi)$
 - $s \in [0, 1]$
 - $v \in [0, 1]$
- gamut RGB obsažen v jehlanu \subset HSV (což je válec)
- černá: $v = 0$, bílá: $v = 1, s = 0$



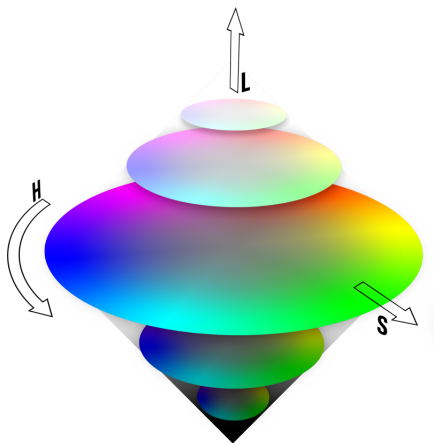
Barevný prostor HSL

- tři souřadnice:
 - odstín (**H**ue)
 - sytost (**S**aturation)
 - jas, světlost (**L**ightness)
- cylindrický souřadný systém
 - $h \in [0, 2\pi)$
 - $s \in [0, 1]$
 - $l \in [0, 1]$
- gamut RGB obsažen ve dvou jehlanech se společnou podstavou
- černá: $l = 0$, bílá: $l = 1$, čisté barvy: $l = 0.5$

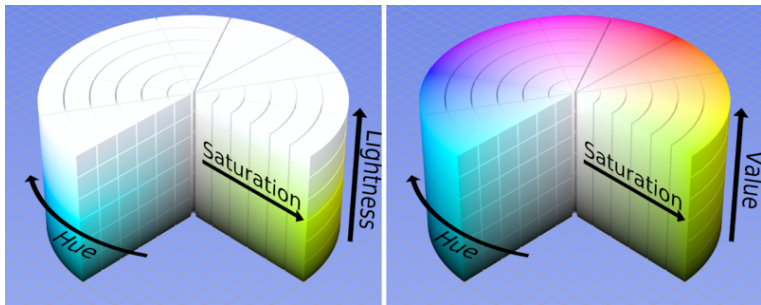


Barevný prostor HSL

- tři souřadnice:
 - odstín (**Hue**)
 - sytost (**Saturation**)
 - jas, světlost (**Lightness**)
- cylindrický souřadný systém
 - $h \in [0, 2\pi)$
 - $s \in [0, 1]$
 - $l \in [0, 1]$
- gamut RGB obsažen ve dvou jehlanech se společnou podstavou
- černá: $l = 0$, bílá: $l = 1$, čisté barvy: $l = 0.5$



Porovnání HSL a HSV



HSL

HSV

Interpolace barev


- v různých barevných prostorech
- volba prostoru záleží na efektu, který chceme dosáhnout
- jednoduché - RGB po složkách
 - není uniformní
- HSL, HSV
 - zachovává intuitivní veličiny (odstín, světlost)
- použití interpolace: morphing, Gouraudovo stínování (viz [POGR2](#), letní semestr)

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vnímání barev
- 3 Reprezentace barev
- 4 Hardwarově založené barevné modely
- 5 Další barevné modely
- 6 Reprodukce barev**

Reprodukce barev na reálném zařízení

Obrazovka

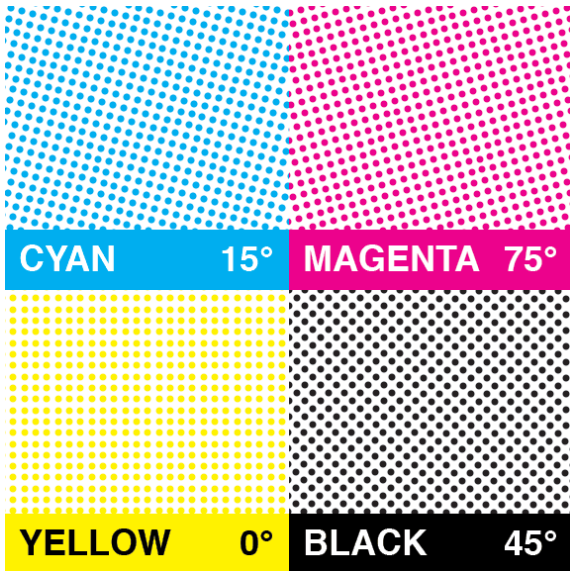
- využití **prostorové „integrace“** prováděné lidským okem - navzájem blízké zdroje ve velké dálce vnímáme jako jediný bod s odpovídající celkovou intenzitou
- reprodukce pomocí aditivního skládání barev **RGB**
- R,G,B segmenty prostorově odděleny, různé prostorové konfigurace (typy stínítka) - viz přednáška o HW 
- syté barvy nelze zobrazit plným jasem (např. červená: 2 ze 3 RGB segmentů nesvítí)
- vliv na věrnost reprodukce: barvy fosforů, barva a intenzita posvětlovací lampy, gama korekce monitoru, ...
- při znalosti daných parametrů lze přesnost reprodukce korigovat (na 2 různé monitory neposíláme stejná RGB data)
 - důležité při práci s fotografiemi

Reprodukce barev na reálném zařízení

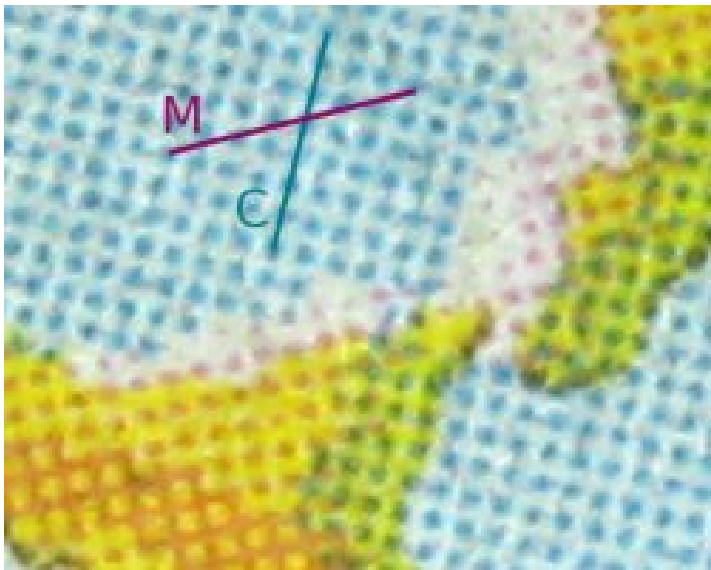
Tiskárna

- reprodukce pomocí subtraktivního skládání barev **CMYK**
- černá barva (**K**)
 - šetří barevnou náplň při tisku
 - vylepšuje výsledný obraz: CMY nejsou dokonale krycí, jejich kombinace **nikdy není úplně černá**
- tisk jednotlivých barev v **různě natočených mřížkách**
⇒ zamezení vzniku interferenčních vzorů
- vliv na věrnost reprodukce: inkoust (resp. toner), povrch a savost papíru, kalibrace tiskové hlavy (zarovnání barevných výstupů), ...

Mřížka pro tisk metodou CMYK

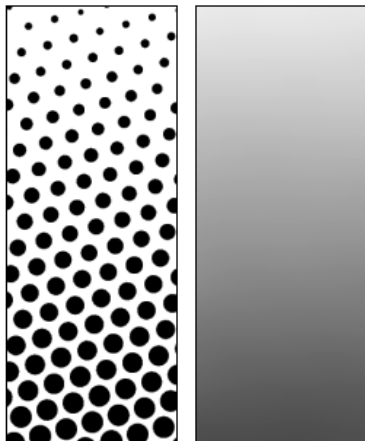


Mřížka pro tisk metodou CMYK

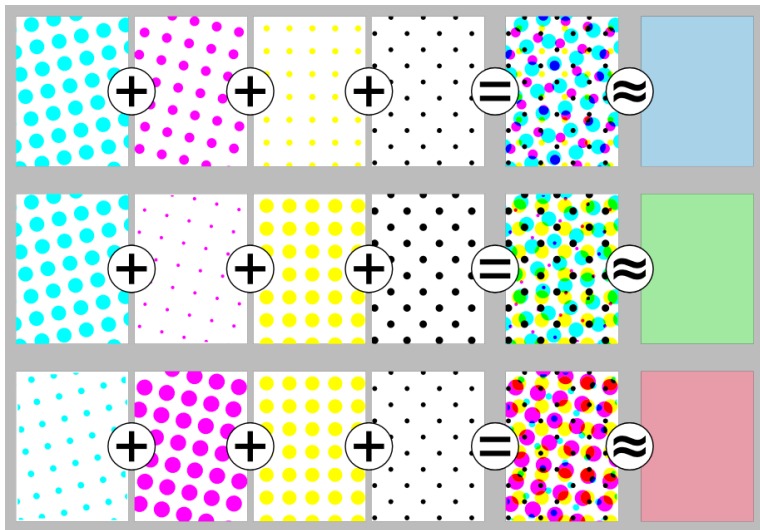


Halftoning

- „polotónování“
- opět využití prostorové integrace prováděné lidským okem
- simulace stupně šedi pomocí mřížky bodů různé velikosti
- fotografické polotónování vynalezeno již na přelomu 19. a 20. století
- moderní (počítačové) tiskárny implementují **digitální halftoning** a *dithering* (viz dále. Halftoning se někdy označuje jako *halftone dithering*)



Halftoning v barevném tisku



Dithering

- „rozptylování“, angl. *dither* = váhat, rozmýšlet se, chvět se
- opět využití prostorové integrace prováděné lidským okem
- simulace stupňů šedi v obraze **vhodným rozmístěním jednobarevných (černých) bodů stejné velikosti**
- aplikace v tisku, případně na displejích schopných zobrazit jen omezené množství odstínů („loga operátora“ na starých mobilních telefonech s ČB displejem)
- **Ize** aplikovat i **na barevné obrázky**
 - po složkách R,G,B
 - maticové rozptýlení s použitím palety barev (viz dále)

některé metody ditheringu

- **prahování** (*thresholding*)
- **náhodné rozptýlení** (*random dithering*)
- **maticové rozptýlení** (*ordered dithering*)
- **distribuce zaokrouhlovací chyby** (*error diffusion*)

Prahování

- předpokládejme vstupní šedotónový obrázek s intenzitou i, j -tého pixelu $I[i, j] \in [0, 1]$
- všechny pixely (body) s intenzitou nad jistou mez (práh, *threshold*) budou bílé, ostatní černé
- lze zobecnit na kvantování barev - mapování na nejbližší hodnotu v paletě

Pseudokód:

```
for each [i,j]  
  if( $I[i,j] > \text{threshold}$ )  $I[i,j]=1$ ;  
  else  $I[i,j]=0$ ;
```

Náhodné rozptýlení

- každý bod $[i, j]$ je s pravděpodobností úměrné své intenzitě, tj. $I[i, j]$ vykreslen jako bílý, jinak jako černý
- jestliže máme generátor (pseudo)náhodných čísel (*PRNG*) s rovnoměrným rozdělením v intervalu $[0, 1]$, potom distribuční funkce

$$F(x) = P(X < x) = x$$

Pseudokód:

```
for each  $[i, j]$   
  if(random() <  $I[i, j]$ )  $I[i, j]=1$ ;  
  else  $I[i, j]=0$ ;
```

Maticové rozptýlení 1/3

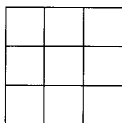
Clustered/dispersed dot ordered dither 1/5

- každý **pixel nahrazen maticí bodů** \implies **zvětšení** obrazu
- různé odstíny šedi nahrazovány různým počtem **černých** bodů v matici
- pro tmavší odstín lze jen přidat body, **nikoliv je v matici přerovnat** \implies nesprávné lokální zesvětlení/ztmavení, vznik artefaktů na rozhraní odstínů
- „**clustered**“ - body v rámci matice shluknuté u sebe - vhodné pro laserové tiskárny, kde se tiskové body vzájemně překrývají
- „**dispersed**“ - body mohou být i osamocené - vhodnější pro obrazovky
- vytváří vzory navozující dojem šrafování

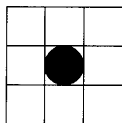
Maticové rozptýlení 1/3

Clustered/dispersed dot ordered dither 3/5

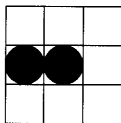
$$D = \begin{pmatrix} 6 & 8 & 4 \\ 1 & 0 & 3 \\ 5 & 2 & 7 \end{pmatrix}$$



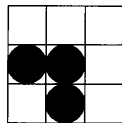
0



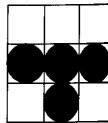
1



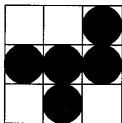
2



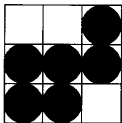
3



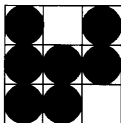
4



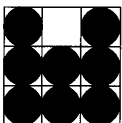
5



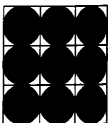
6



7



8

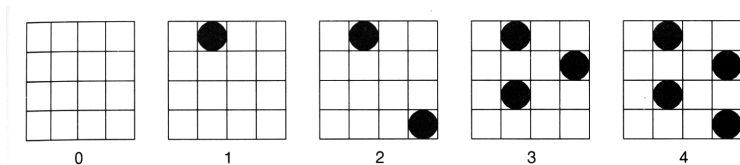


9

Maticové rozptýlení 1/3

Clustered/dispersed dot ordered dither 4/5 (příklady)

- *dispersed dot ordered dither* - nevhodné pro tiskárnu (docházelo by ke „slití“ bodů)



- matice vytvářející vzor křížkového šrafování

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 12 & 3 & 15 \\ 8 & 4 & 11 & 7 \\ 2 & 14 & 1 & 13 \\ 10 & 6 & 9 & 5 \end{pmatrix}$$

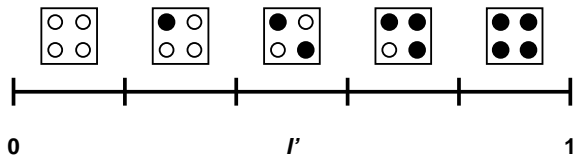
- různé prahovací mapy v závislosti na typu zařízení, výrobci

Maticové rozptýlení 1/3

Clustered/dispersed dot ordered dither 5/5

- pro matici $n \times n$ a původní bod s intenzitou I a „tmavostí“ $I' = 1 - I$ je kritérium **1** pro vytmavení každého jejího prvku $[k, l]$

$$D_{k,l} + 1 < I'(n^2 + 1)$$



- obrázek je pro $n = 2$ a

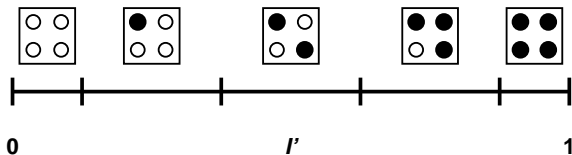
$$D = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Maticové rozptýlení 1/3

Clustered/dispersed dot ordered dither 5/5

- pro matici $n \times n$ a původní bod s intenzitou I a „tmavostí“ $I' = 1 - I$ je kritérium **2** pro vytmavení každého jejího prvku $[k, l]$

$$D_{k,l} + \frac{1}{2} < I' n^2$$



- obrázek je pro $n = 2$ a

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Maticové rozptýlení 2/3

Ordered dither

- použití prahovací mapy **bez zvětšení obrázku**
- **1 pixelu** v obraze přísluší pouze **jediný prvek prahovací masky** podle pozice v obrázku - pozice v masce se v obou směrech obrázku pravidelně opakuje
- generuje **šrafované vzory** závislé **jen na poloze** v obrazu
⇒ vhodné pro animace

Pseudokód:

n ... rozměr matice, % ... modulo

```
for each [i,j]
  if(D[i%n,j%n] + 0.5 < (1-I[i,j])*n^2)
    I[i,j]=0;
  else
    I[i,j]=1;
```

Maticové rozptýlení 3/3

Ordered dither v barvě 1/5

- paleta barev, kde umíme měřit vzdálenosti barevných odstínů (nechť je nejmenší vzdálenost 2 barev v paletě škálována na rozsah od 0 do 1)
 - potřeba najít **nejbližší barvu z palety k nějakému obecnému odstínu**
 - nutno znát souřadnice barev palety v nějakém barevném prostoru
(nejjednodušší: min. euklidovská vzdálenost v RGB)
- prahová mapa **D** slouží jako matice aditivních koeficientů
 - aplikuje se po složkách, pro každou složku může mít jiný tvar
- po přičtení odpovídajícího prvku **D** (opět se cyklicky opakuje) k barvě pixelu se nalezne nejbližší barva v paletě (výsledná barva se „zaokrouhlí“ na barvu z palety)

Maticové rozptýlení 3/3

Ordered dither v barvě 2/5

Pseudokód:

n ... rozměr matice, % ... modulo

C ... barva pixelu - struktura se složkami $\{C.r, C.g, C.b\}$

D ... prahová mapa, každý prvek $D[i, j]$ je struktura se složkami r, g, b

```
for each [i,j] {  
    new_color.r = C[i,j].r + D[i%n,j%n].r;  
    new_color.g = C[i,j].g + D[i%n,j%n].g;  
    new_color.b = C[i,j].b + D[i%n,j%n].b;  
    C[i,j]=find_closest_palette_entry(new_color);  
}
```

- rychlé zpracování v reálném čase
 - možnost vektorizace, paralelizace
- **detaily třeba rozmyslet (rozsah hodnot D apod.)**
 - **závisí na paletě**

Maticové rozptýlení 3/3

Ordered dither v barvě 3/5

- speciální případ pro šedotónový obrázek a „paletu“ {černá, bílá}
- aditivní hodnoty D nyní představují **ztmavení** intenzity (\implies konzistence s předchozími ČB variantami ditheringu)
- odvození „zaokrouhlovací“ formulace ekvivalentní podmínce vytmavení bodu $\mathbf{1}$ ($k = i \bmod n, l = j \bmod n$)

$$\text{orig.: } \mathbf{D}_{k,l} + 1 < I'(n^2 + 1) \implies \text{vytmav}[k, l]$$

$$0 < I'(n^2 + 1) - (\mathbf{D}_{k,l} + 1) \in [-n^2, n^2]$$

$$\frac{1}{2} < \frac{1}{2n^2} \{I'(n^2 + 1) - (\mathbf{D}_{k,l} + 1)\} + \frac{1}{2} \in [0, 1]$$

$$\text{nyní: } I'_{i,j} := \text{round}\left(\frac{1}{2n^2} \{I'(n^2 + 1) - (\mathbf{D}_{k,l} + 1)\} + \frac{1}{2}\right)$$

Maticové rozptýlení 3/3

Ordered dither v barvě 3/5

- speciální případ pro šedotónový obrázek a „paletu“ {černá, bílá}
- aditivní hodnoty D nyní představují **ztmavení** intenzity (\implies konzistence s předchozími ČB variantami ditheringu)
- odvození „zaokrouhlovací“ formulace ekvivalentní podmínce vytmavení bodu **2** ($k = i \bmod n, l = j \bmod n$)

$$\text{orig.: } \mathbf{D}_{k,l} + \frac{1}{2} < l' n^2 \implies \text{vytmav}[k, l]$$

$$0 < l' n^2 - \left(\mathbf{D}_{k,l} + \frac{1}{2} \right) \in \left[-n^2 + \frac{1}{2}, n^2 - \frac{1}{2} \right]$$

$$\frac{1}{2} < \frac{1}{2n^2 - 1} \left\{ l' n^2 - \left(\mathbf{D}_{k,l} + \frac{1}{2} \right) \right\} + \frac{1}{2} \in [0, 1]$$

$$\text{nyní: } l'_{i,j} := \text{round} \left(\frac{1}{2n^2 + 1} \left\{ l' n^2 - \left(\mathbf{D}_{k,l} + \frac{1}{2} \right) \right\} + \frac{1}{2} \right)$$

Maticové rozptýlení 3/3

Ordered dither v barvě 4/5

Pseudokód - původní algoritmus:

```

for each [i,j]
  if(D[i%n,j%n] + 0.5 < (1-I[i,j])*n^2)
    I[i,j]=0;
  else
    I[i,j]=1;
  
```

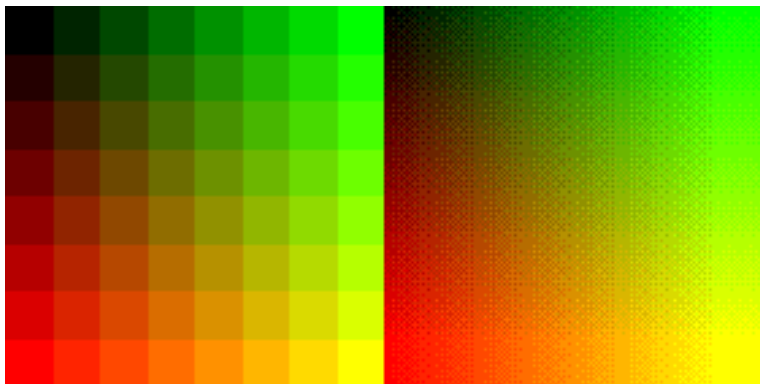
Pseudokód - modifikovaný algoritmus (kritérium 2):

```

for each [i,j]
  I[i,j] = 1 - round( 0.5 +
    (I[i,j]*n^2 - (D[i%n,j%n]+0.5)) / (2*n^2+1)
    );
  
```

Maticové rozptýlení 3/3

Ordered dither v barvě 5/5



Barevná škála mapovaná na paletu 8×8 barev

bez ditheringu

a

s ordered dither (vpravo)

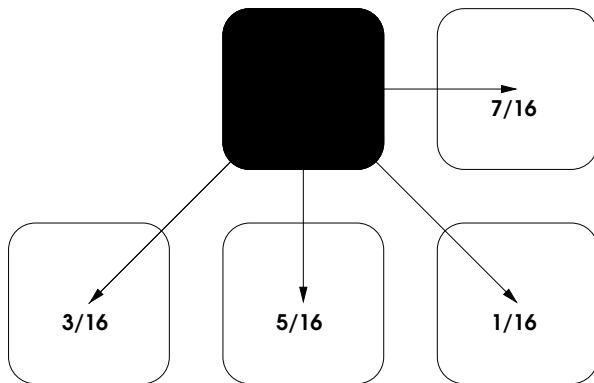
Distribuce zaokrouhlovací chyby

- sekvenční zpracování obrazu po řádcích
- barva (intenzita) I každého pixelu se zaokrouhlí na nejbližší hodnotu palety I_p (resp. černou/bílou)
- chyba zaokrouhlení $I - I_p$ se rozdělí mezi okolní **ještě nezpracované** pixely (přičte se)
 - ⇒ celková zokrouhlovací chyba je blízká nule
- různé rozdělení zaokrouhlovací chyby ⇒ různé algoritmy
- modifikace: střídání průchodů zleva doprava, zprava doleva na po sobě následujících řádcích

Distribuce zaokrouhlovací chyby

Floyd-Steinberg

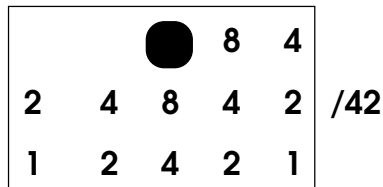
- klasický algoritmus z r. 1975
- rozdělení chyby mezi 4 okolní pixely v poměrech:



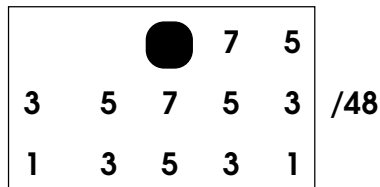
Distribuce zaokrouhlovací chyby

Další schémata

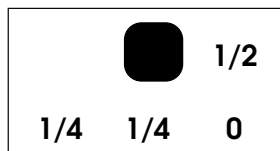
- Stucki

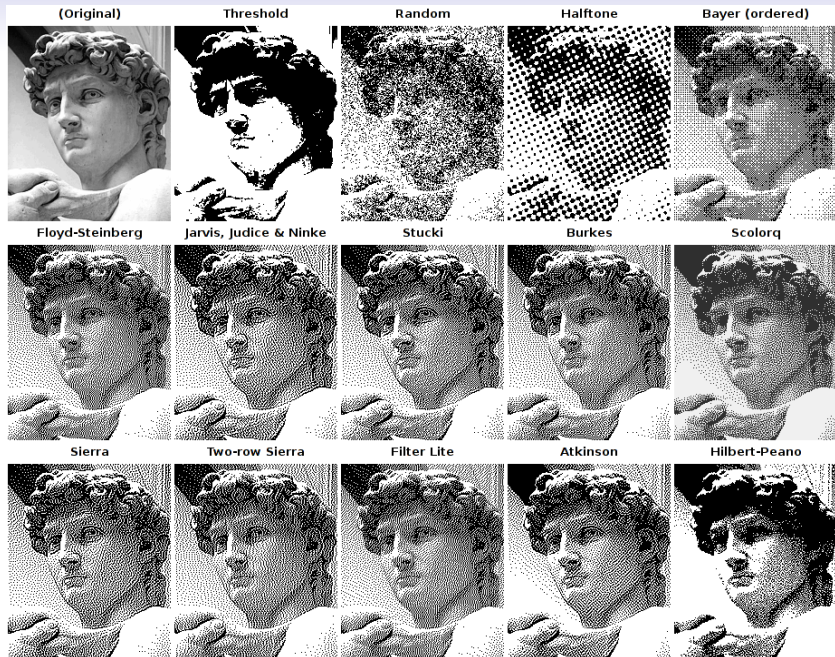


- Jarvis, Judice & Ninke



- Sierra





Zvýraznění hran

- vylepšení vizuálního výsledku předzpracováním obrazu

$$I_{i,j}^{enhanced} = \frac{I_{i,j} - \alpha \bar{I}_{i,j}}{1 - \alpha}, \alpha \geq 0,$$

kde $\bar{I}_{i,j}$ je průměr intenzit pixelu $[i,j]$ a jeho osmi sousedů:

$$\bar{I}_{i,j} = \frac{1}{9} \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} I_{k,l}$$

Výsledky zvýraznění hran



originál

Výsledky zvýraznění hran



bez zvýraznění hran



se zvýrazněním hran

náhodné rozptýlení

Výsledky zvýraznění hran



bez zvýraznění hran



se zvýrazněním hran

clustered dot ordered dither

Výsledky zvýraznění hran






bez zvýraznění hran



se zvýrazněním hran

maticové rozptýlení

Literatura

-  J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes: *Computer Graphics: Principles and Practice*, Addison Wesley, 1997.
-  D.E. Knuth: *Digital Halftones by Dot Diffusion*. ACM Trans. Graph. 6 (1987), 245–273.
-  Joel Yliluoma's arbitrary-palette positional dithering algorithm:
<http://bisqwit.iki.fi/story/howto/dither/jy/>