

Počítačová grafika

KMI/POGR

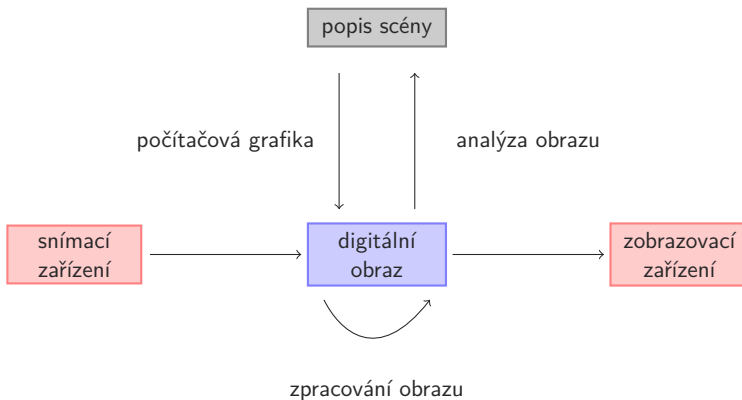
Eduard Bartl



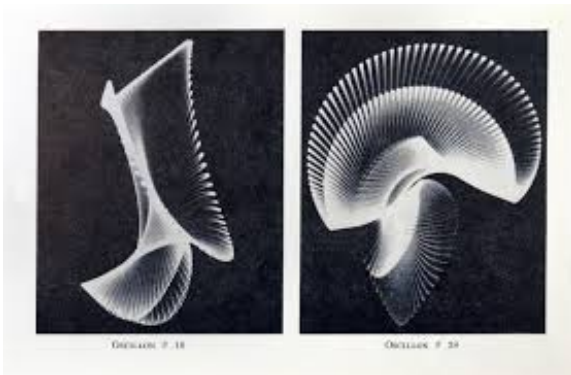
KATEDRA INFORMATIKY
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

- základy 2D grafiky, okrajově zpracování obrazu
- jako vždy: důraz na vysvětlení principů
- zápočet za splněné „miniúkoly“ (začátek řešení na semináři, případné dokončení doma)
- pro splnění úkolů je možné použít libovolný programovací jazyk
- odevzdání všech úkolů e-mailem nejpozději 1. prosince
- poslední 2 semináře (3. a 10. prosince) kontrola a osobní rozprava nad řešeními, zápočtový týden je rezerva

- 1 Agoston M. K. (2005). Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms. Springer. ISBN 1852338180
- 2 Burger W., Burge M. J. (2022). Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction. 3. vydání. Springer. ISBN 978-3-031-05743-4.
- 3 Martišek D (2002). Matematické principy grafických systémů. Littera. ISBN 8085763192.
- 4 Paseka J. Geometrické modelování. Učební text.
<http://www.math.muni.cz/paseka/ftp/lectures/PG/Pocgeom.pdf>
- 5 Žára J., Beneš B., Sochor J., Felkel P. (2004). Moderní počítačová grafika. 2. vydání. Computer Press, Brno. ISBN 80-251-0454-0.



1950



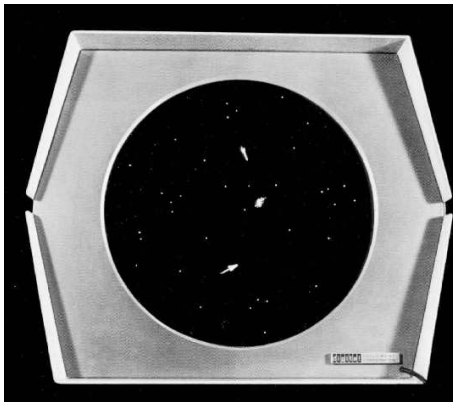
- Benjamin Francis Laposky (1914–2000), americký matematik a umělec, vytvořil pomocí osciloskopu první obrázky a krátké filmy
- osciloskop je *vektorový* displej

1951



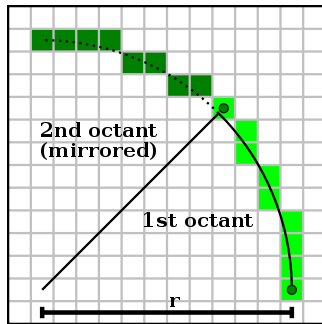
- Whirlwind (MIT) byl první počítač, který používal osciloskop pro zobrazování výstupních dat v reálném čase

1961



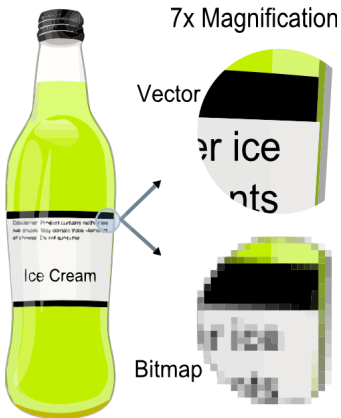
- byla vytvořena počítačová hra SpaceWar využívající osciloskop

1965



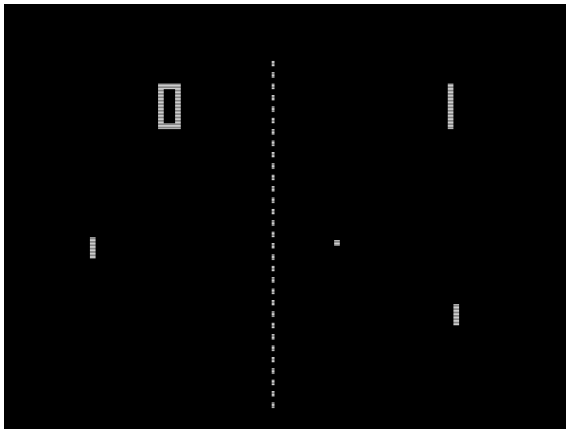
- Jack Elton Bresenham (narozen 1937) vytvořil algoritmus pro rychlé kreslení úseček a kružnic – *Bresenhamův rasterizační algoritmus*

1970



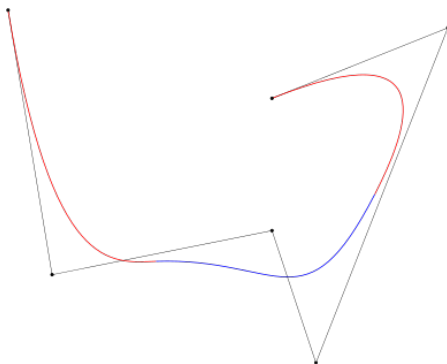
- začínají se objevovat rastrové displeje

1972



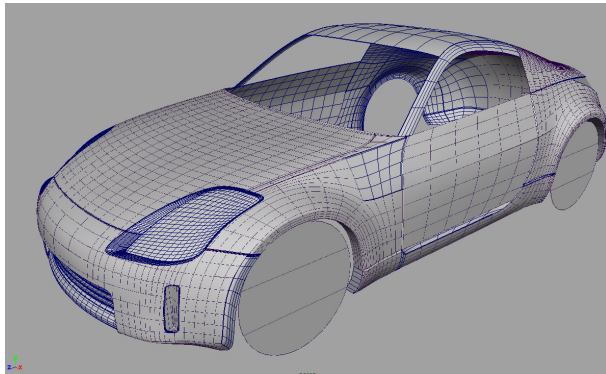
- Nolan Kay Bushnell (narozen 1943), zakladatel firmy Atari, naprogramoval arkádovou hru Pong

1975



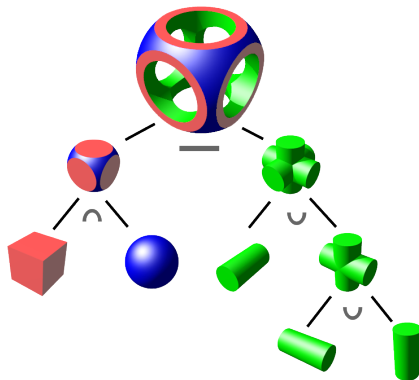
- Kenneth James Versprille napsal dizertační práci Computer-Aided Design Applications of the Rational B-Spline Approximation Form, ve které popsal matematický model reprezentující širokou třídu křivek

1975



- NURBS – neuniformní racionální B-spliny

1978



- H. Voelcker vyvinul standard pro constructive solid geometry

1985



- Pixar vytvořil krátký film Luxo, Jr.
- byl využit fotorealistický 3D renderovací software RenderMan
- používá pokročilé renderovací techniky – např. Monte Carlo ray tracing (path tracing)

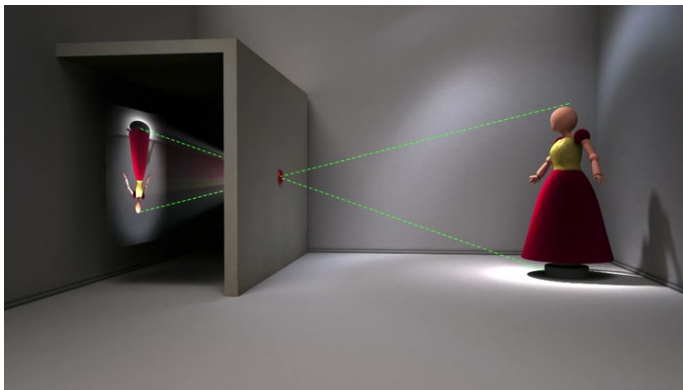
Dnes



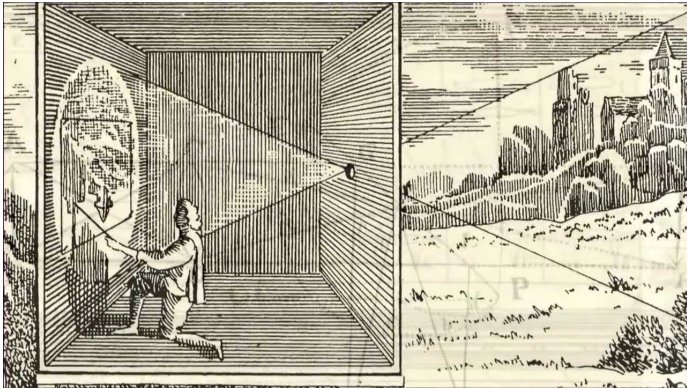
- vývoj počítačové grafiky v poslední době je podnícen především rozvojem harwaru
- díky výkonným GPU je možné např. provádět:
 - fyzikálně založené renderování (nepoužívají se triky, ale velmi přesné fyzikální modely)
 - ray tracing v reálném čase (Nvidia GeForce RTX, rok 2018)

- co je digitální obraz?
- jak získat digitální obraz?

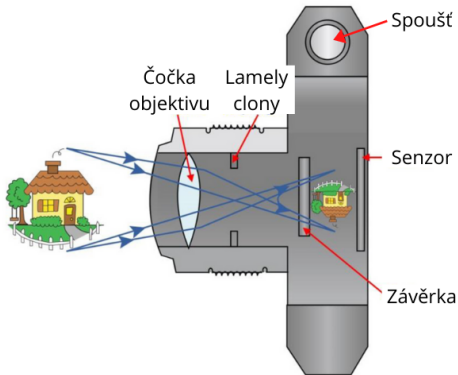
- základní princip: camera obscura (pinhole camera)
- známá již ve 13. století



- základní princip: camera obscura (pinhole camera)
- známá již ve 13. století



- klasické a digitální fotoaparáty využívají tohoto principu
- navíc: čočky objektivu, clona, závěrka, hledáček/LCD displej, film/CMOS (dříve CCD) čip
- možnost nastavovat expoziční čas, clonové číslo, ISO citlivost, ...



- na průmětně získáme dvourozměrný, časově závislý, spojitý obraz
- zafixujeme časový okamžik, obraz pak můžeme popsat pomocí *spojité obrazové funkce*:

$$f : M_1 \times M_2 \rightarrow N,$$

kde M_1 , M_2 a N jsou podmnožiny $\mathbb{R}$

- jak získáme *digitální obraz*?
- diskretizace (digitalizace) ... podrobnosti později
- diskretizace se provádí jak v definičním oboru f tak v oboru hodnot:
 - vzorkování – diskretizace definičního oboru
 - kvantování – diskretizace oboru hodnot
- získáme tak dvourozměrný, diskrétní obraz (rastrový obraz), který můžeme popsat *diskrétní obrazovou funkcí*, například:

$$f : \{1, \dots, 1024\} \times \{1, \dots, 768\} \rightarrow \{0, \dots, 255\}$$

- obdržíme tak dvourozměrné pole číselných hodnot, které můžeme uložit do paměti počítače s využitím nějakého obrazového formátu (BMP, PNG, TIFF, JPEG, ...)

Světlo

- světlo je elektromagnetické záření

Základní veličiny

- vlnová délka λ [m], frekvence f [Hz]
- vzájemný vztah

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla

- s frekvencí roste množství přenášené energie

Viditelné světlo

- viditelné světlo je úzké frekvenční pásmo viditelné lidským okem:
 - od 400 nm do 450 nm ... fialová barva
 - od 450 nm do 490 nm ... modrá barva
 - od 490 nm do 560 nm ... zelená barva
 - od 560 nm do 590 nm ... žlutá barva
 - od 590 nm do 700 nm ... červená barva



Viditelné světlo

- světelné zdroje vysílají paprsky různých frekvencí
- jsou-li frekvence ve viditelném spektru zastoupeny rovnoměrně, člověk je vnímá jako šedou, resp. bílou barvu (při dostatečně velké intenzitě) ... **achromatické světlo**

Barva

- dopadne-li světlo na předmět, určité frekvence mohou být pohlceny a určité odraženy
- odražené frekvence určují **barvu předmětu**, **odstín** (hue)
- např.:
 - budou-li odraženy pouze nízké frekvence, objekt se bude jevit jako červený
 - budou-li odraženy pouze vysoké frekvence, objekt se bude jevit jako fialový

Na co reaguje lidské oko?

- **jas**, **luminance** (luminosity) ... intenzita světla; čím větší intenzita, tím je světlo jasnější
- **syť** (saturation) ... čistota barvy světla; čím užší je frekvenční pásmo, tím sytější je barva
- **světlost** ... velikost achromatické složky ve světle

Čípky (cone cells)

- fotoreceptory citlivé při dobrém osvětlení
- každý čípek obsahuje jeden ze tří druhů **fotopigmentů** (světločivných buněk)
- podle obsaženého fotopigmentu pak rozlišujeme následující typy čípků:
 - **S-čípek** obsahující **modré fotopigmenty** je nejcitlivější v rozsahu 420-440 nm (modrá barva)
 - **M-čípek** obsahující **zelené fotopigmenty** je nejcitlivější v rozsahu 534-545 nm (zelená barva)
 - **L-čípek** obsahující **červené fotopigmenty** je nejcitlivější v rozsahu 564-580 nm (žlutá barva)¹
- každý barevný vjem může být vyjádřen pomocí tří parametrů ... **trichromazie**

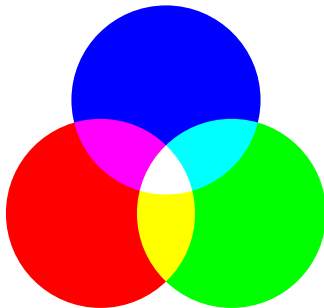
Tyčinky (rod cells)

- receptory citlivé při nízkém osvětlení
- jsou asi 10 krát citlivější než čípky
- maximální citlivost v rozsahu 490-495 nm

¹nejde o chybu, fotopigment nejcitlivější na žlutou barvu se skutečně nazývá červený

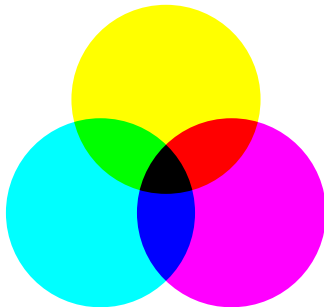
Aditivní skládání

- sčítá se intenzita barev
- čím více barev skládáme, tím dostaneme světlejší výsledek
- použití: barevné zdroje (monitory, projektory)



Subtraktivní skládání

- odečítá se intenzita barev
- čím více barev skládáme, tím dostaneme tmavější výsledek
- použití: malba, tisk



Technické modely

- přímá souvislost s funkčností hardwaru
- RGB, RGBA, CMY, CMYK, ...

Modely podle Munsella

- HSV, HSL

CIE modely

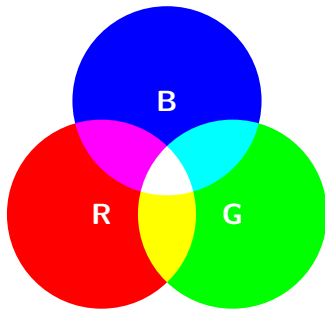
- CIE XYZ, CIE xy
- uniformní varianty CIE Lab, CIE Luv

RGB

- technický model používaný např. pro displeje
- používá aditivní skládání barev
- každá barva je tvořena kombinací tří **základních barev**:
 - červená ... R
 - zelená ... G
 - modrá ... B
- model nedefinuje, jak mají základní barvy vypadat
- absolutní modely (např. sRGB, Adobe RGB) základní barvy definují

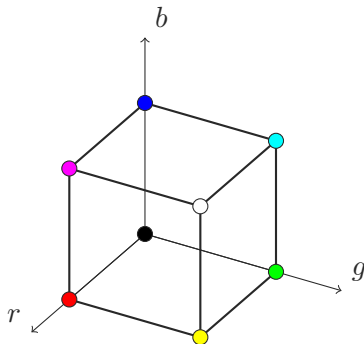
RGB

- složením dvou základních barev v plné intenzitě vzniknou **doplňkové barvy**:
modrá + zelená = azurová (cyan)
modrá + červená = purpurová (magenta)
zelená + červená = žlutá



RGB

- barvy se vyjadřují trojicí $\langle r, g, b \rangle$, kde $r, g, b \in [0, 1]$, hodnoty r, g, b určují intenzitu základních barev a zobrazují se jako body v jednotkové krychli
- v počátku černá barva, v protilehlém vrcholu bílá barva
- v dalších rozích základní a doplňkové barvy
- na diagonále stupně šedi (achromatické body)



RGB

- barvy se kódují různým počtem bitů (barevná hloubka, viz později):
- 16 bitů (5-6-5 bitů pro jednotlivé barevné složky) – **high colors**
- 24 bitů (1 byte pro každou složku) – **true colors**

YUV

- pro kódování barev v analogové televizi (americký systém NTSC, evropský systém PAL)

$$Y = 0,299r + 0,587g + 0,114b$$

$$U = 0,492 \cdot (B - Y)$$

$$V = 0,877 \cdot (R - Y)$$

- jde jen o historickou poznámku; zajímavý je ale výpočet Y (brzy zdůvodníme)

RGBA ($\text{RGB}\alpha$)

- RGB model doplněný o další složku: α -kanál definující průhlednost, $\alpha \in [0, 1]$
 - $\alpha = 0$... neprůhledný bod
 - $\alpha = 1$... průhledný bod
- používá se pro kombinování více obrázků

CMY

- RGB neodpovídá lidské zkušenosti s mícháním barev (přidáváním barevných pigmentů je barva tmavší)
- pro tiskařské techniky se proto využívá CMY model, který používá subtraktivní skládání barev
- každá barva je tvořena kombinací tří **základních barev**:
 - azurová – C
 - purpurová – M
 - žlutá – Y

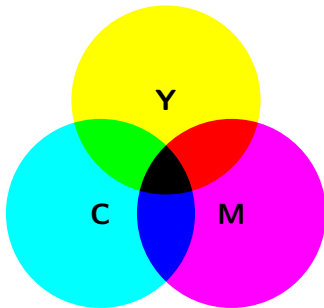
RGB

- složením dvou základních barev v plné intenzitě vzniknou **doplňkové barvy**:

žlutá + purpurová = červená

žlutá + azurová = zelená

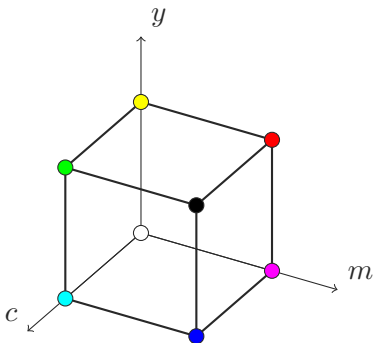
azurová + purpurová = modrá



CMY

- opět se používá jednotková krychle, která je doplňková (v následujícím smyslu) k RGB jednotkové krychli
- převodní vztah mezi modely CMY a RGB:

$$\langle c, m, y \rangle = \langle 1, 1, 1 \rangle - \langle r, g, b \rangle$$



CMYK

- při tisku jsou obrazy vytvářeny jako soutisk tří obrazů (každý pro jeden barevný kanál)
- barvy nesmí být dokonale krycí; složením všech základních barev nevznikne černá, ale tmavě hnědá
- proto se přidává další kanál pro černou barvu:
 - azurová ... C
 - purpurová ... M
 - žlutá ... Y
 - černá ... K

nevýhoda RGB a CMY(K): neintuitivní, např. stejně velká změna různých barev vede k odlišným výsledkům + změna jasu není lineární

HSV (HSB, HSI)

- nedefinuje barvy pomocí tří základních barev, lépe odpovídá intuici vytváření barev
- tři základní parametry:
 - barevný tón (hue) ... H
 - sytost (saturation) ... S
 - jasová hodnota (value) ... V
 - jas (brightness) ... B, označení používá např. Adobe
 - intenzita ... I
- pro zobrazení se používá šestiboký jehlan:
 - vrchol jehlanu ... černá barva
 - střed podstavy ... bílá barva
 - obvod podstavy ... čisté barvy: červená, zelená, modrá, žlutá, azurová, purpurová

HLS (HSL)

- tři základní parametry:
 - H – barevný tón (Hue)
 - L – jas (Luminance)
 - S – sytost (Saturation)
- pro zobrazení se používá dvojice šestibokých jehlanů:
 - dolní vrchol ... černá barva
 - horní vrchol ... bílá barva
 - obvod podstav ... čisté barvy: červená, zelená, modrá, žlutá, azurová, purpurová
- pozn: HSV i HLS je pohodlnější reprezentovat pomocí válce

- problém: tisk fotografie na barevné tiskárně
- potřebujeme reprezentaci barev, která je nezávislá na zařízení (na způsobu, jakým jsou barvy na daném zařízení vytvářeny) → kolorimetrické (kalibrované) barevné prostory

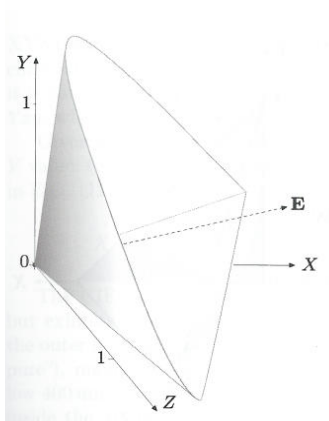
CIE XYZ

- CIE – Commission Internationale de l'Éclairage (Mezinárodní komise pro osvětlení)
- CIE XYZ (CIE 1931 XYZ) – mezinárodní standard základních barev vytvořený roku 1920, standardizovaný roku 1931
- standard určuje vztah mezi vlnovými délkami jednotlivých barev a barvami vnímanými lidským okem
- každá barva je lineární kombinací tří imaginárních barev X , Y , Z :

$$\text{barva} = aX + bY + cZ,$$

kde $a, b, c \geq 0$

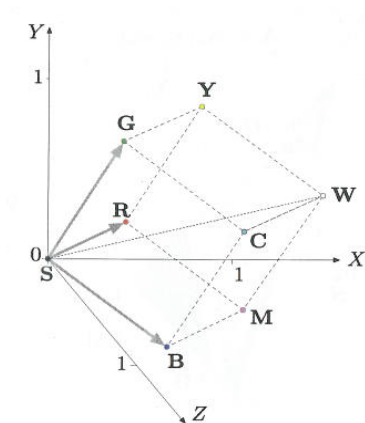
CIE XYZ



- všechny viditelné barvy je možno vyjádřit jako body v třírozměrném tělese barev, který má „kuželovitý“ tvar (přesný kužel to ale není)
- v počátku je černá barva

CIE XYZ

- (deformovaná) RGB krychle je uvnitř tohoto tělesa
- CIE XYZ tak umí vyjádřit i barvy, které nejsou v RGB modelu



Chromatický diagram CIE xy

- řez rovinou $X + Y + Z = konst.$ určuje barvy s konstantní světlostí
- barvy můžeme reprezentovat pouze pomocí odstínu a sytosti
- uvažujeme řez rovinou $X + Y + Z = 1$
- provedeme transformaci:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

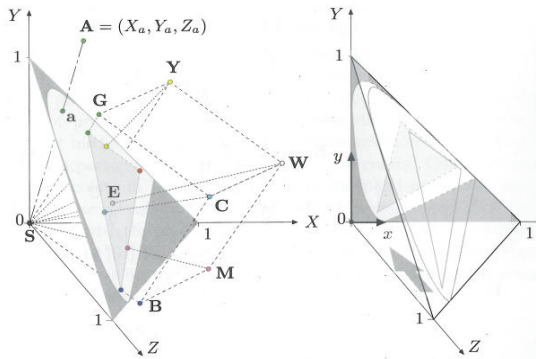
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

- zřejmě platí $x + y + z = 1$

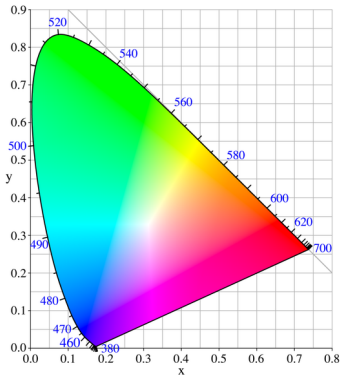
Chromatický diagram CIE xy

- transformací tak provádíme promítnutí bodu $\langle X, Y, Z \rangle$ do roviny $X + Y + Z = 1$ vzhledem k počátku:



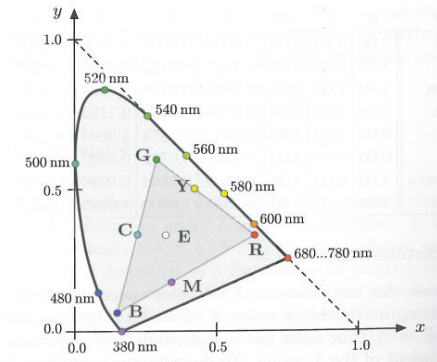
- protože platí $x + y + z = 1$, jedna souřadnice je nadbytečná
- provede se projekce do roviny XY
- vzniká tak diagram, ve kterém jsou vyznačeny lidským okem viditelné barvy ... gamut lidského vidění

Chromatický diagram CIE xy



- střed ... bílý bod
- zaoblený okraj (spektrální locus) ... monochromatické barvy (s maximální sytostí)
- spodní rovný okraj ... purple line

Chromatický diagram CIE xy



Chromatický diagram CIE xy

- pomocí chromatického diagramu můžeme určit:
 - dominantní vlnovou délku
 - sytost
 - barevný rozsah, gamut
 - aproximace barvy ležící mimo gamut určeného konkrétním modelem (např. RGB)
- pro zpětný výpočet potřebujeme zadat dodatečnou informaci, typicky je to hodnota Y :

$$X = x \cdot \frac{Y}{y}$$
$$Z = z \cdot \frac{Y}{y} = (1 - x - y) \cdot \frac{Y}{y}$$

Tabulka: Převod sRGB (D65) $\rightarrow$ CIE XYZ $\rightarrow$ CIE xy

barva	vzorek	R	G	B	X	Y	Z	x	y
černá		0	0	0	0	0	0	—	—
červená		1	0	0	0.4125	0.2127	0.0193	0.6400	0.3300
žlutá		1	1	0	0.7700	0.9278	0.1385	0.4193	0.5052
zelená		0	1	0	0.3576	0.7152	0.1192	0.3000	0.6000
cyan		0	1	1	0.5380	0.7873	1.0695	0.2247	0.3288
modrá		0	0	1	0.1804	0.0722	0.9503	0.1500	0.0600
magenta		1	0	1	0.5929	0.2848	0.9696	0.3209	0.1542
bílá		1	1	1	0.9505	1.0000	1.0888	0.3127	0.3290

Převedení na šedotónový obraz v RGB

- barvě $\langle r, g, b \rangle$ chceme přiřadit odpovídající barvu na diagonále $\langle y, y, y \rangle$
- průměr:

$$y = \frac{r + g + b}{3}$$

- vážený průměr (zelenou a červenou barvu vnímáme jasnější):

$$y = 0,299r + 0,587g + 0,114b$$

Desaturace barvy

- nahrazení barvy $\langle r, g, b \rangle$ desaturovanou barvou $\langle r_d, g_d, b_d \rangle$:

$$\langle r_d, g_d, b_d \rangle = \langle y, y, y \rangle + s \cdot \langle r - y, g - y, b - y \rangle,$$

kde $s \in [0, 1]$, *gray* je příslušná achromatická barva

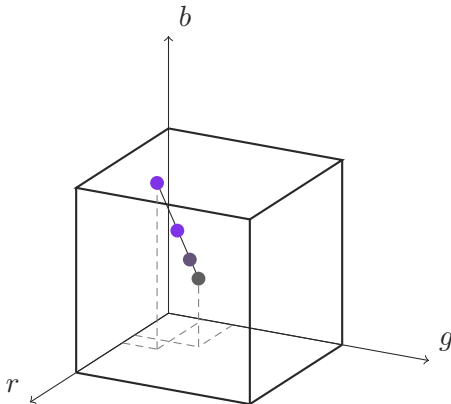
- geometrický význam?

Desaturace barvy – geometrický význam

- stačí malá úprava:

$$\langle r_d, g_d, b_d \rangle = (1 - s) \cdot \langle y, y, y \rangle + s \cdot \langle r, g, b \rangle,$$

- konvexní kombinace bodů $\langle y, y, y \rangle$ a $\langle r, g, b \rangle$



- na vstupu je barevný obrázek (použijte barevný model RGB)
- naprogramujte:
 - 1 převedení vstupního obrázku na šedotónový; experimentujte s různými hodnotami vah
 - 2 desaturaci barev v závislosti na zadaném parametru $s \in [0, 1]$
 - 3 „saturační vyrovnaní“ vstupního obrázku – všechny barvy budou stejně daleko od své achromatické barvy s výjimkou barev, které jsou již ve vstupním obrázku achromatické²

²toto možná nebude vizuálně zajímavé, přesto ale vyzkoušejte, jak to dopadne