

Počítačové vidění

Rozpoznávání a zpracování obrazu

doc. Ing. Josef Chaloupka, Ph.D.



Doporučená literatura

- Hlaváč V., Sedláček M.: Zpracování signálu a obrazu, Skripta FEL ČVUT, Praha, 2005
- Šonka M., Hlaváč V., Boyle R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, PWS Publishing, 2007, ISBN 0-534-953-93
- ...
- <https://elearning.fm.tul.cz/>

Počítačové vidění

- Napodobení schopnosti lidského vidění pomocí technických prostředků
- Součást kybernetiky a umělé inteligence
- Řešení špatně podmíněných úloh, velká algoritmická složitost a neurčitost
- Člověk >>> intelligence + předchozí zkušenosti
- Interpretace obrazových dat: pozorovaná obrazová data >>> model
- Obraz obsahuje pro nás zajímavé objekty
- Počítačová grafika >>> inverzní úloha – zobrazení informací z počítače, ve vstupních datech není šum

Problematika počítačového vidění

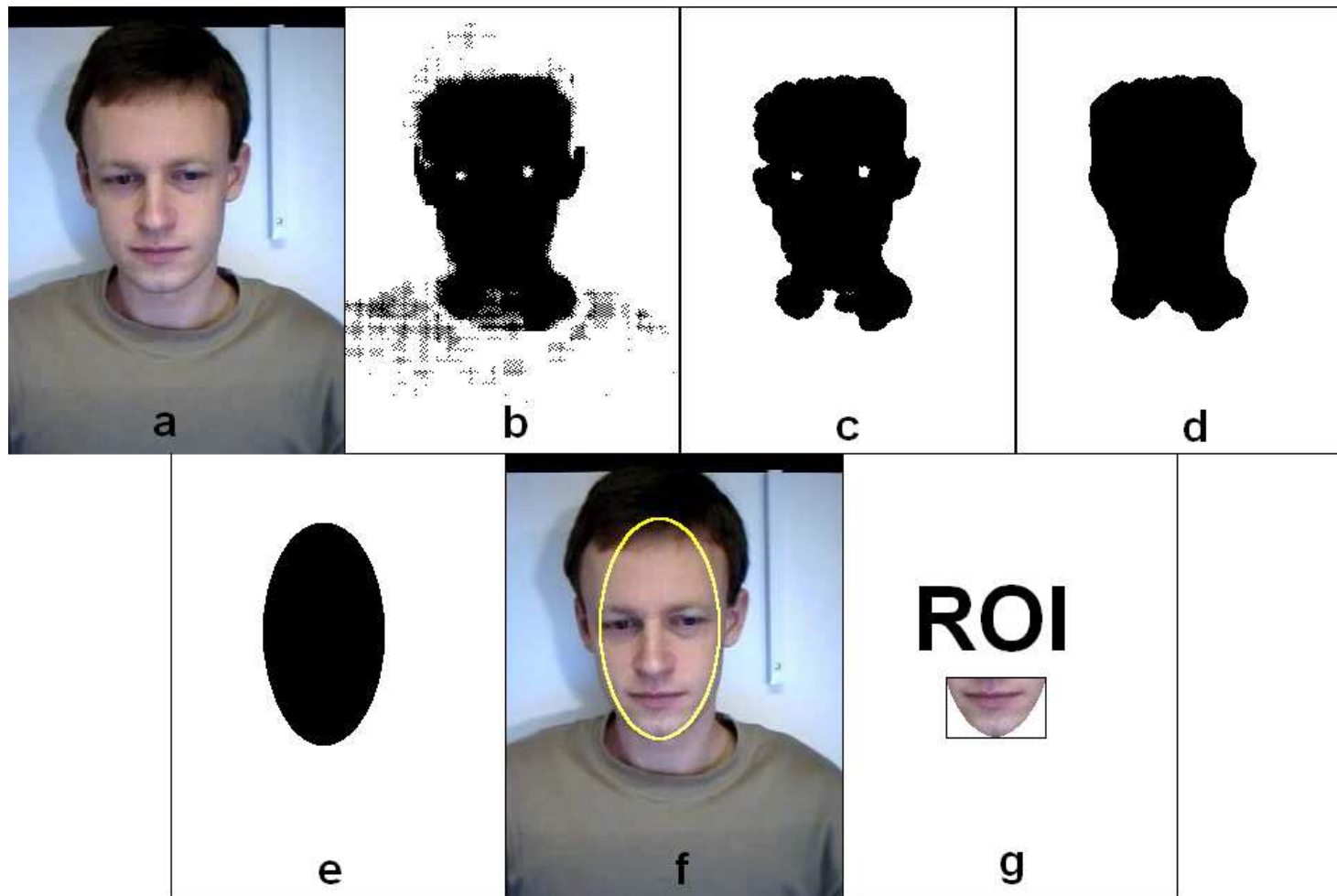


| | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.1333 | 0.1451 | 0.2314 | 0.2588 | 0.2706 | 0.262 |
| 0.1529 | 0.1882 | 0.2118 | 0.2471 | 0.2588 | 0.262 |
| 0.1647 | 0.2078 | 0.2471 | 0.2588 | 0.2706 | 0.262 |
| 0.1529 | 0.4706 | 0.4784 | 0.2706 | 0.262 | 0.262 |
| 0.4863 | 0.4980 | 0.5176 | 0.5333 | 0.5412 | 0.5172 |
| 0.5020 | 0.5137 | 0.5294 | 0.5412 | 0.5569 | 0.5172 |
| 0.4980 | 0.4039 | 0.4118 | 0.4510 | 0.5569 | 0.5172 |
| 0.4157 | 0.4431 | 0.4431 | 0.4510 | 0.5569 | 0.5172 |
| 0.4392 | 0.4471 | 0.4667 | 0.4824 | 0.523 | 0.5172 |
| 0.4471 | 0.4549 | 0.4510 | 0.4549 | 0.4745 | 0.4188 |
| 0.4471 | 0.4549 | 0.4627 | 0.4863 | 0.5137 | 0.523 |
| 0.5216 | 0.5882 | 0.6627 | 0.7333 | 0.7843 | 0.813 |
| 0.8314 | 0.8863 | 0.9098 | 0.9373 | 0.9412 | 0.94 |
| 0.9451 | 0.9647 | 0.9647 | 0.9765 | 0.9686 | 0.9 |
| 0.9922 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |

- Komplikovaný a nejednoznačný vztah mezi jasem a tvarem 3D objektu - **Jas bodu** závisí na mnoha vlivech (odrazivosti povrchu pozorovaného předmětu, poloze a vlastnostech zdrojů světla, orientaci povrchu vzhledem k pozorovateli), úloha určení 3D vlastností pozorovaných objektů na základě radiometrických měření je nedostatečně určená
- Velké množství obrazových dat
př: RGB obraz 1920x1080 pixelů, 1 pixel = 24 bit., 25 snímků/s výsledný tok dat: **155,52 MB/s**, 560 GB/hod.
- Šum v obraze

State of the Art?

Analýza obrazu na základě barvy obrazového bodu

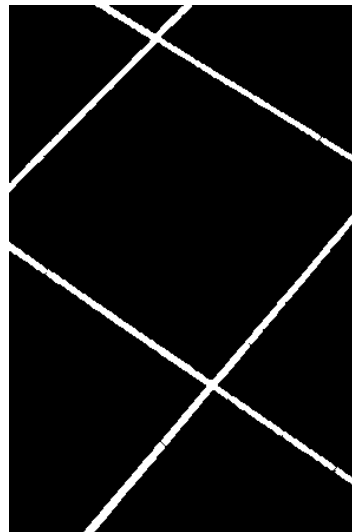
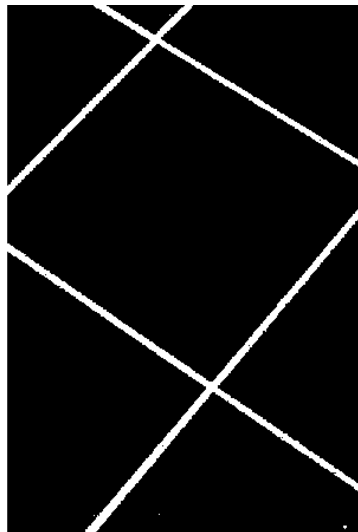


State of the Art?

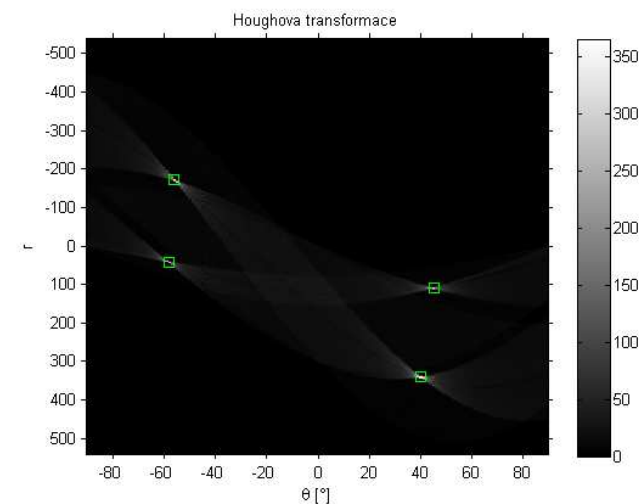
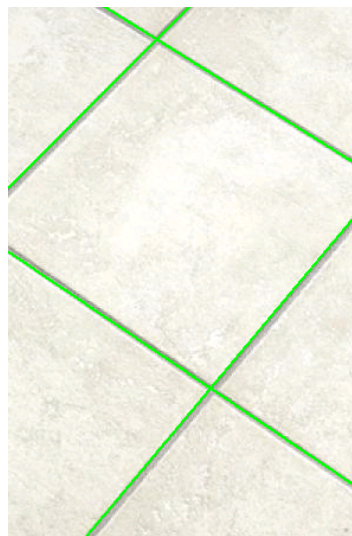
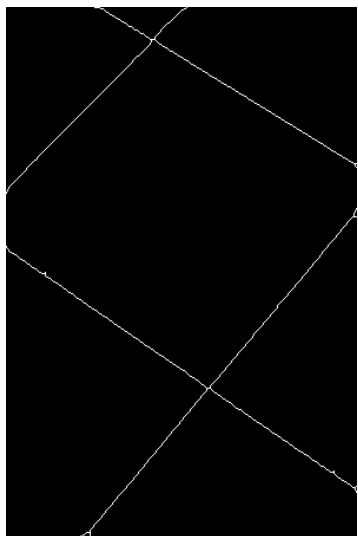
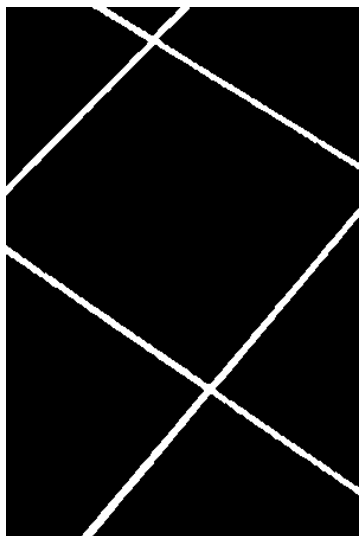
Oblast zájmu – ROI – klasifikace



State of the Art?



Detekce parametrických objektů



State of the Art?

Oblast zájmu – ROI – klasifikace – posuvné okno



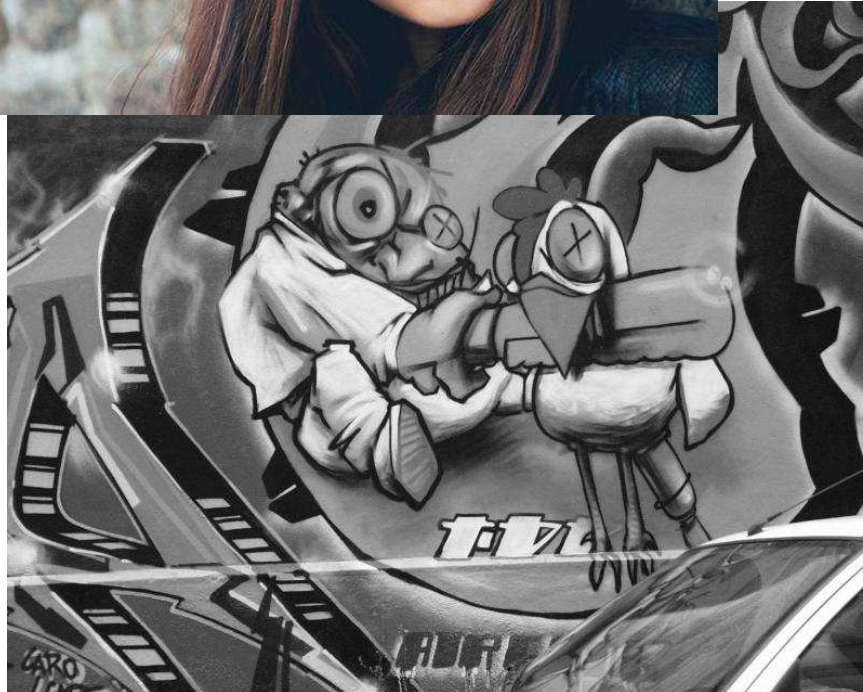
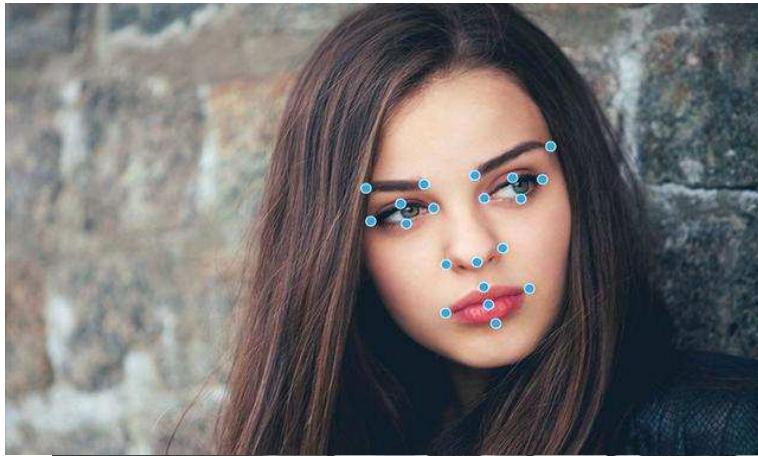
State of the Art?

Jak to dělá člověk?



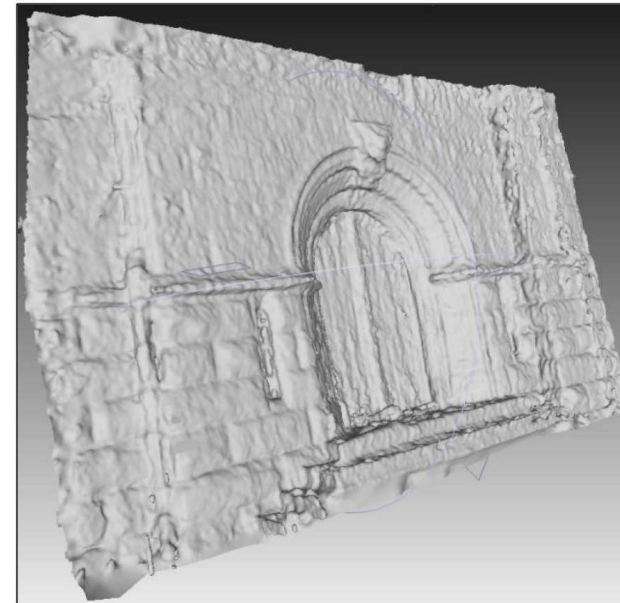
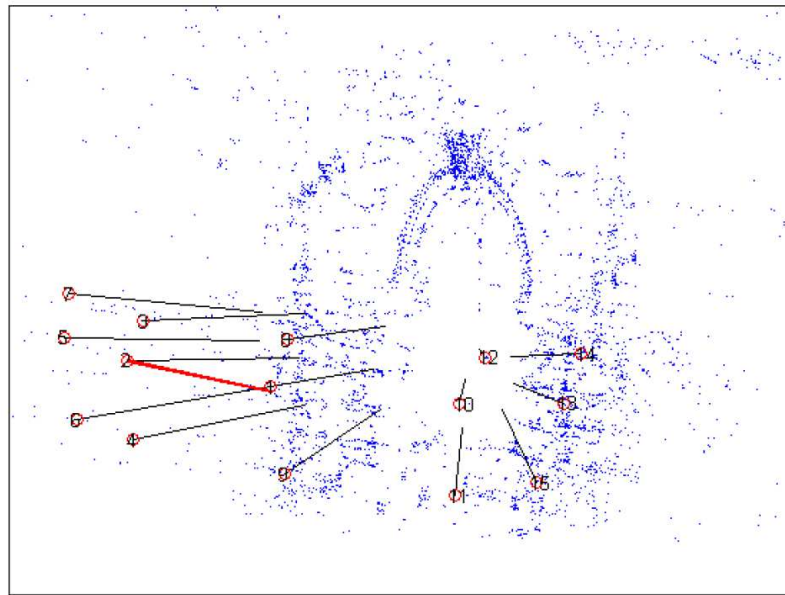
State of the Art?

Keypoint detection



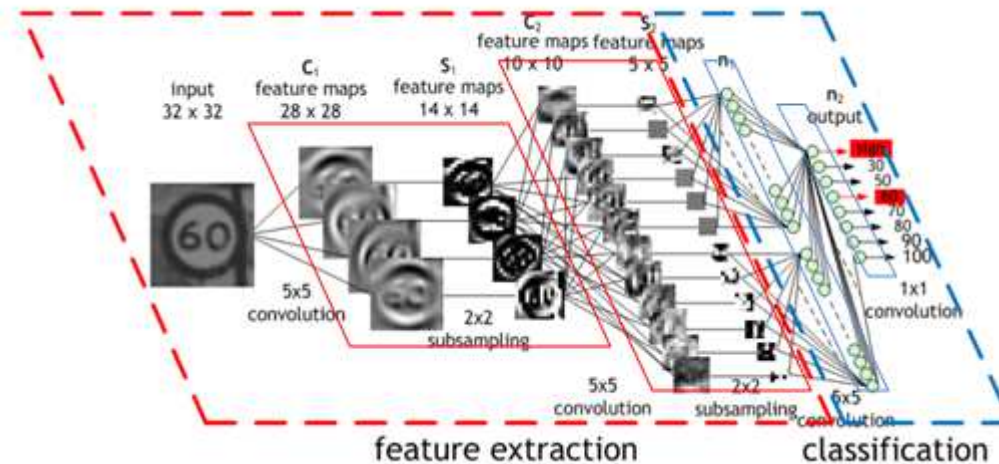
State of the Art?

3D vidění

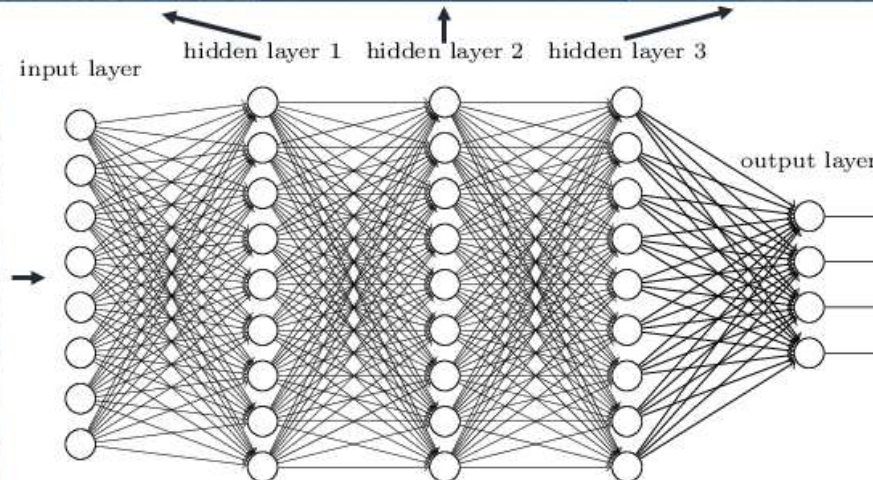
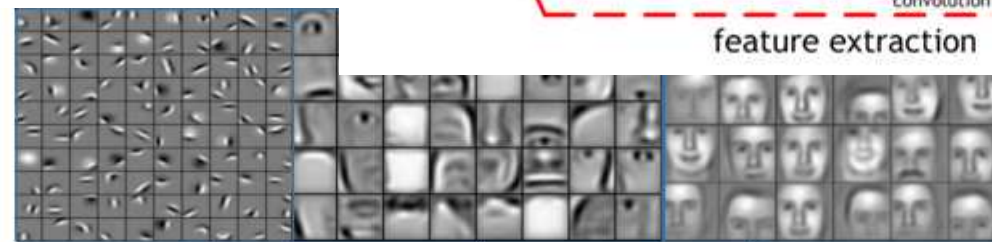


State of the Art?

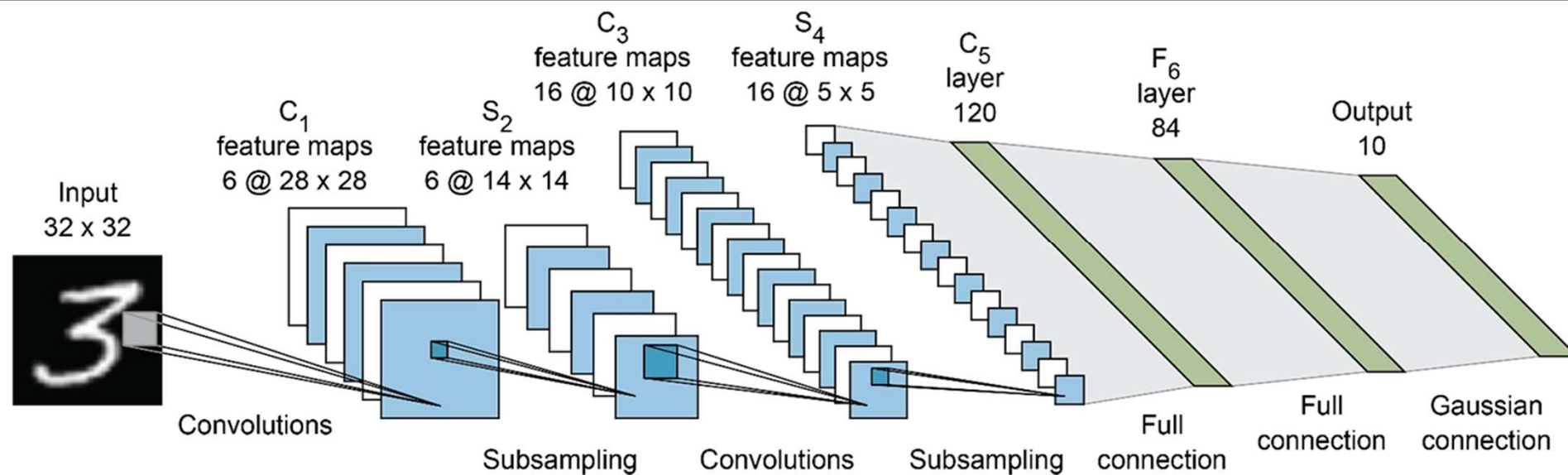
DNN, CNN



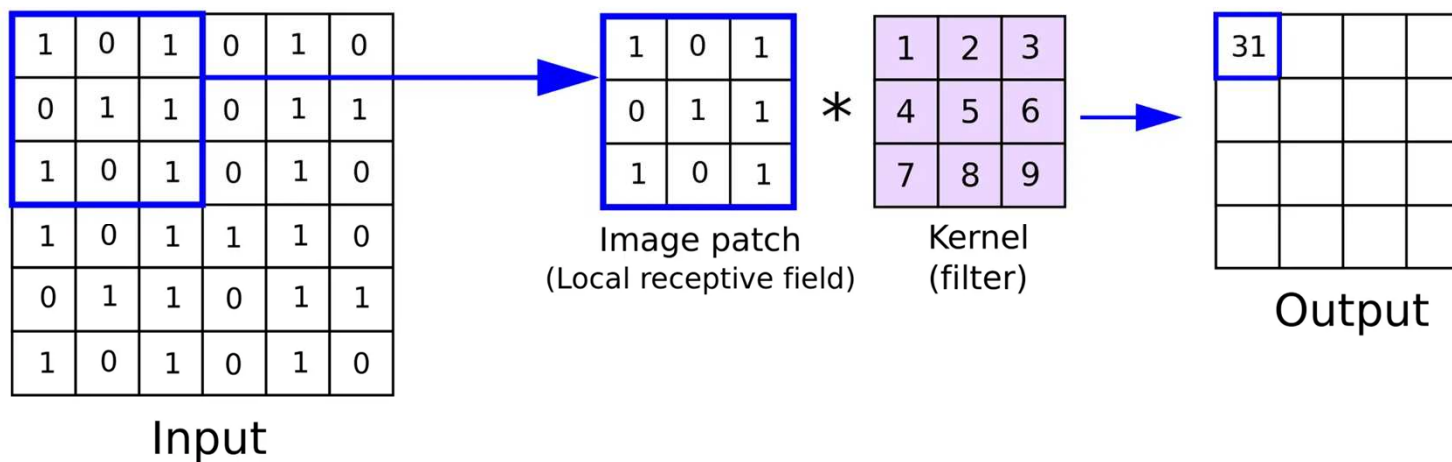
Deep neural networks learn hierarchical feature representations



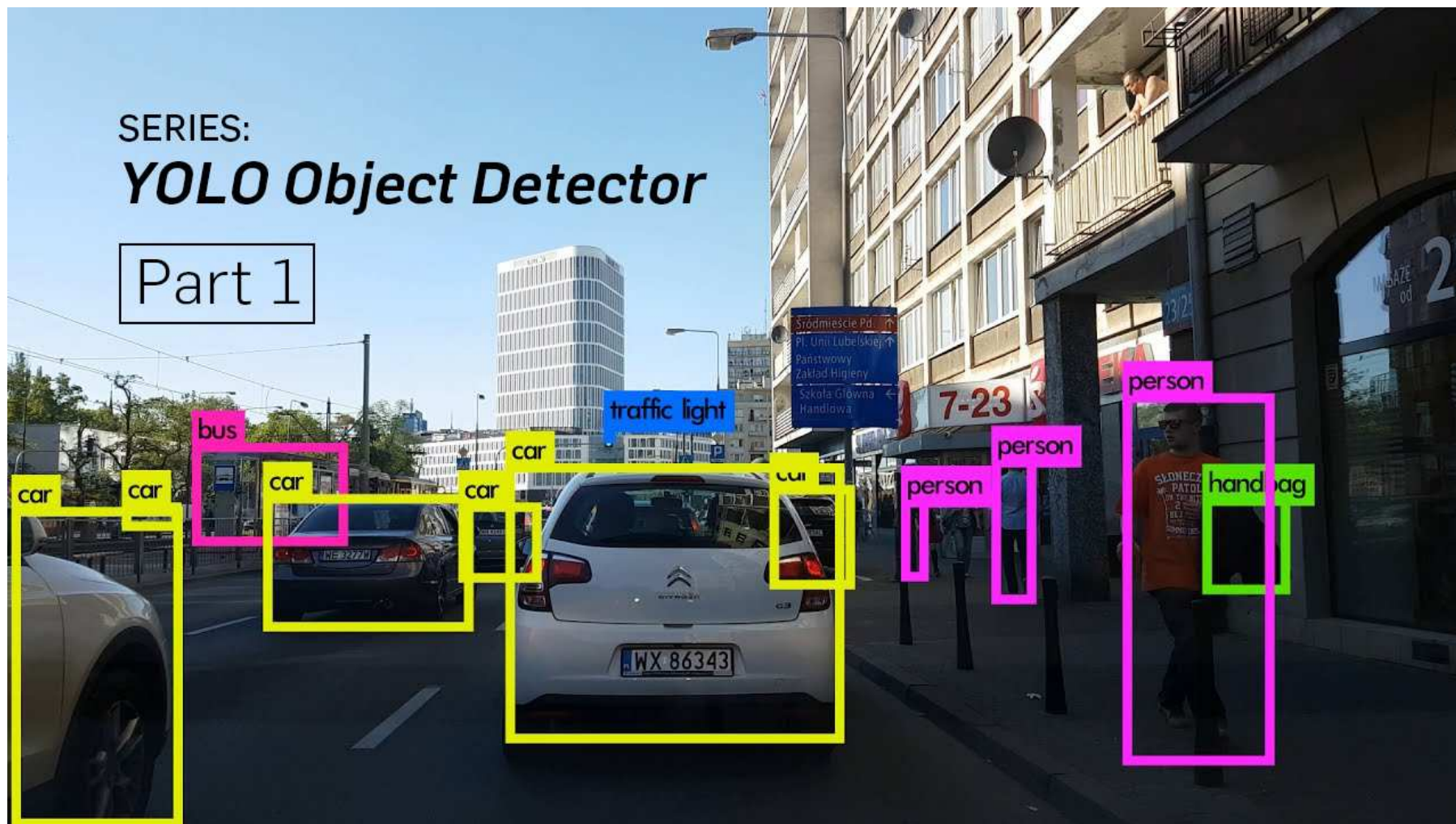
State of the Art?



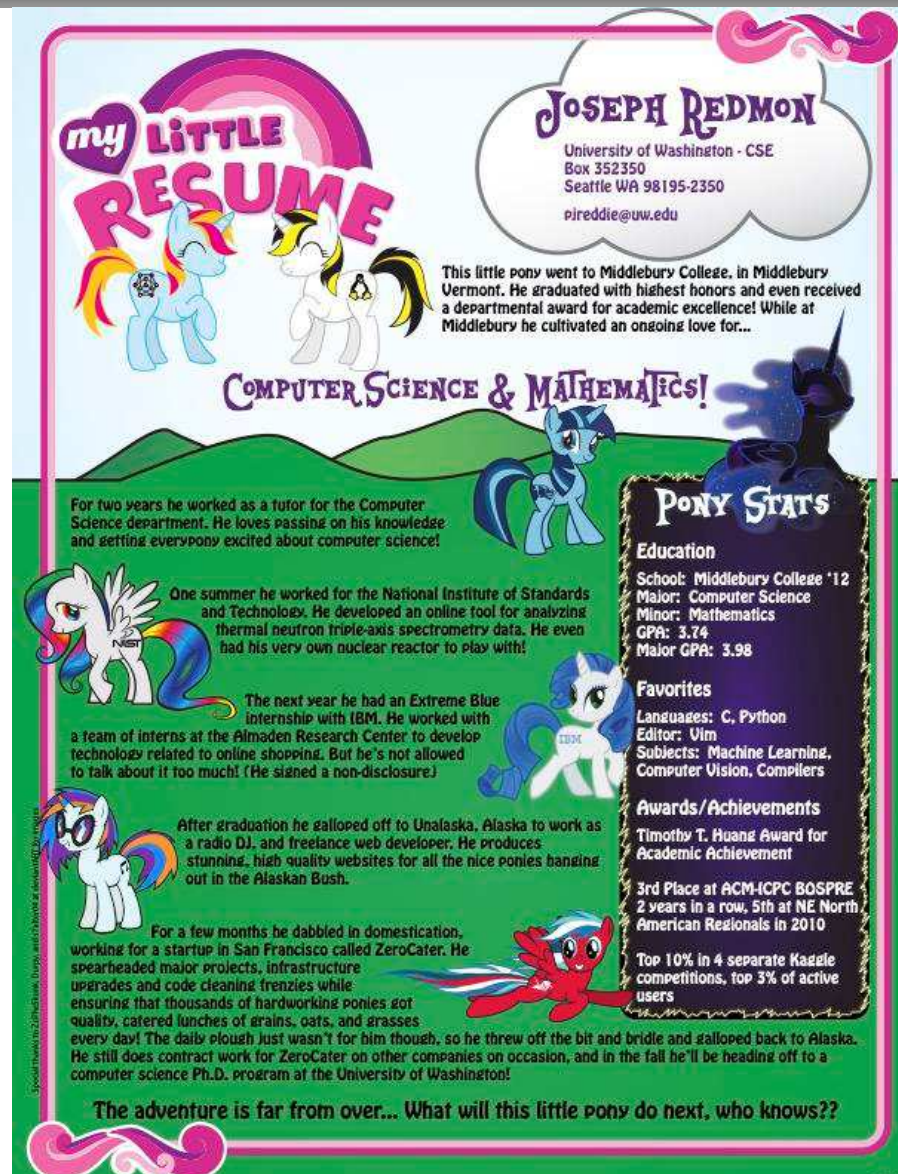
iq.opengenus.org



State of the Art?



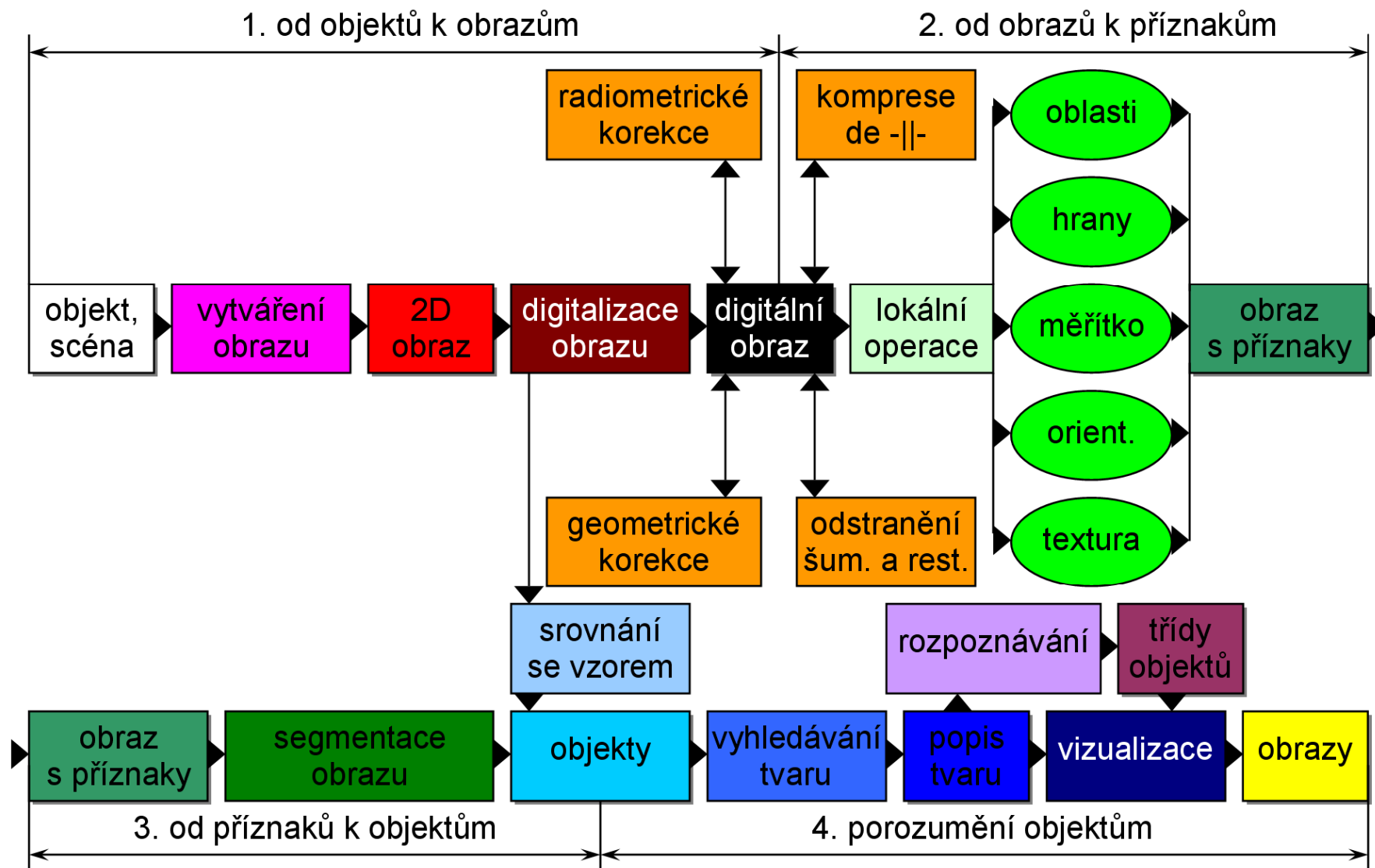
State of the Art?



State of the Art?

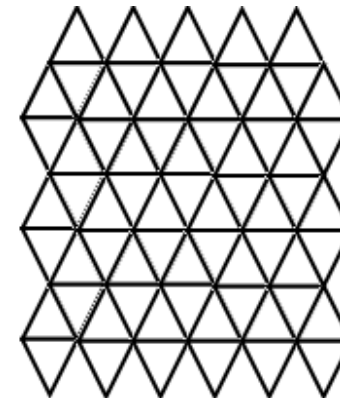
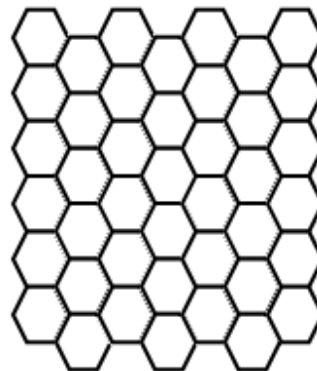
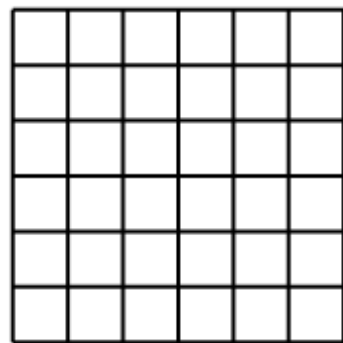


Digitální obrazy >>> příznaky >>> objekty >>> relační modely



Digitalizace obrazu

- **Vzorkování** obrazu v matici $M \times N$ bodů
- **Kvantování** spojité jasové úrovně každého vzorku do K intervalů
- Díky kvantování má jasová funkce celočíselné hodnoty v digitálním obraz
- Shanon – Kotelnikův **vzorkovací teorém**:
 - 1) vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát větší než největší zajímavá frekvence v signálu
 - 2) interval vzorkování musí být menší nebo roven polovině nejmenšího detailu v obraze
- **Vzorkovací mřížka** – čtvercová, šestiúhelníková, trojúhelníková



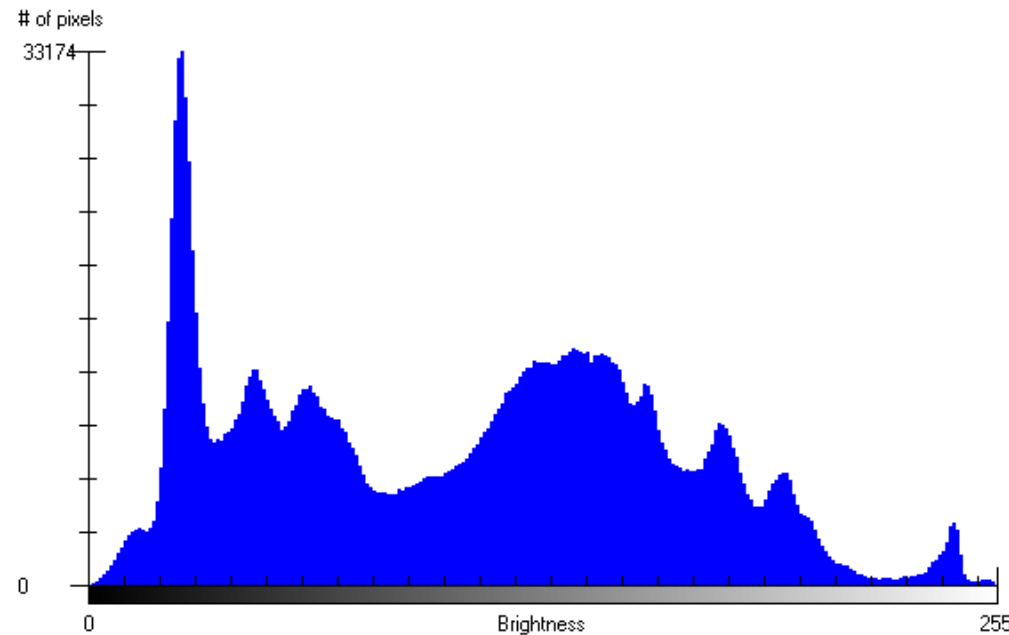
Digitalizace obrazu

- Kvantovací interval musí být dostatečně jemný
 - 1) vznik falešných obrysů v obraze
 - 2) zachování jemných detailů v obraze
 - 3) citlivost přibližně podobná jako u lidského oka
- K stejných intervalů $k = 2^b$, b – počet bitů, obvykle 8 bitů, někdy postačí 4 – 6 bitů, zřídka 12+
- Počet úrovní jasu < 50 , vznik falešných obrysů (pro lidské oko)
- Použití nelineárního kvantování – zřídka



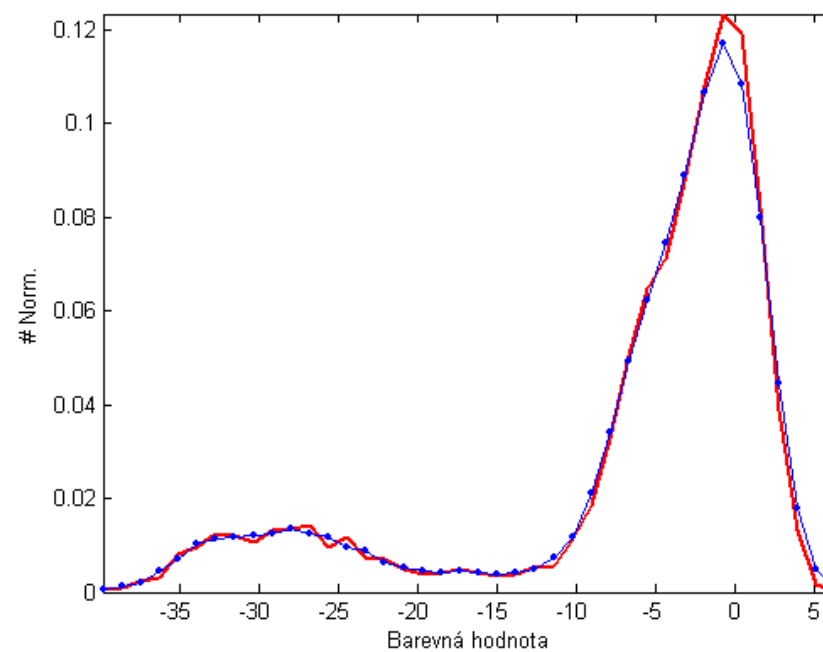
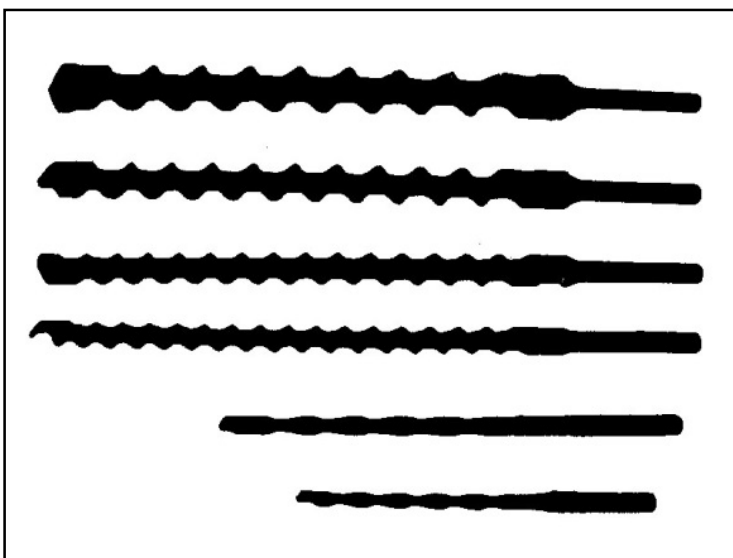
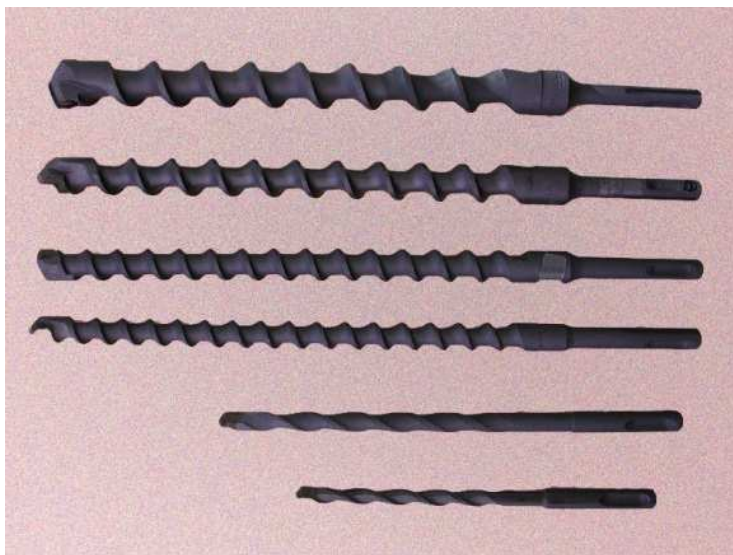
Obrazový histogram

- Histogram jasů >>> rozdělení jasových úrovní v digitálním obrazu
- Rozdělení pravděpodobnosti (hustota prvního řádu) $p_1(x, y, z)$ – pravděpodobnost, že pixel (x, y) má jas z , odhad $p_1(z)$ bez pozice (x, y) je histogram



- $h_f(z_i)$, $i = 0, 1, \dots, L - 1$, L – počet jasových úrovní
- 1 obraz = 1 histogram, 1 histogram \leftrightarrow 1obraz

Obrazový histogram



Barevný obraz

- Multispektrální obraz – více barev
- Pro každý bod (x,y) vektor barevných hodnot
- Lidské oko: 400 – 700 nm, < 400nm – ultrafialové světlo (motýli), >700 nm – infračervené světlo (hadi, ryby)
- Barevný obraz RGB, smíchání složek: červená R (Red), zelená G (Green), modrá B (Blue)
- R (vlnová délka $\lambda = 700$ nm), G ($\lambda = 546,1$ nm), B ($\lambda = 435,8$ nm)
- Zpracování obdobné jako u monochromatického obrazu, RGB2Y:
 $Y = 0,3.R + 0,59.G + 0,11.B$

Barevný obraz



RGB



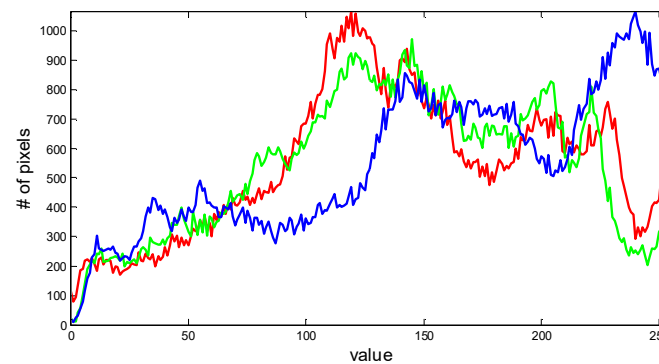
R



G



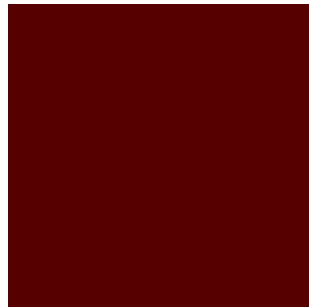
B



Barevný obraz

- Zpracování obdobné jako u monochromatického obrazu, RGB2Y:
 $Y = 0,3.R + 0,59.G + 0,11.B$

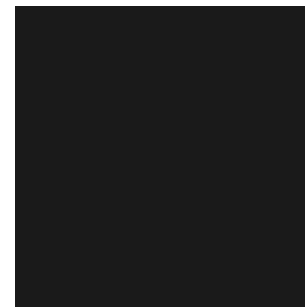
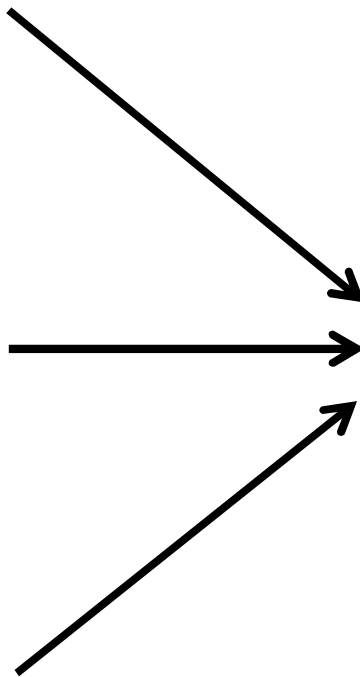
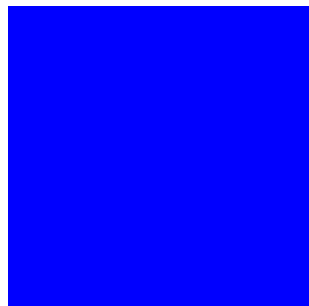
RGB = [93 0 0]



RGB = [0 47 0]

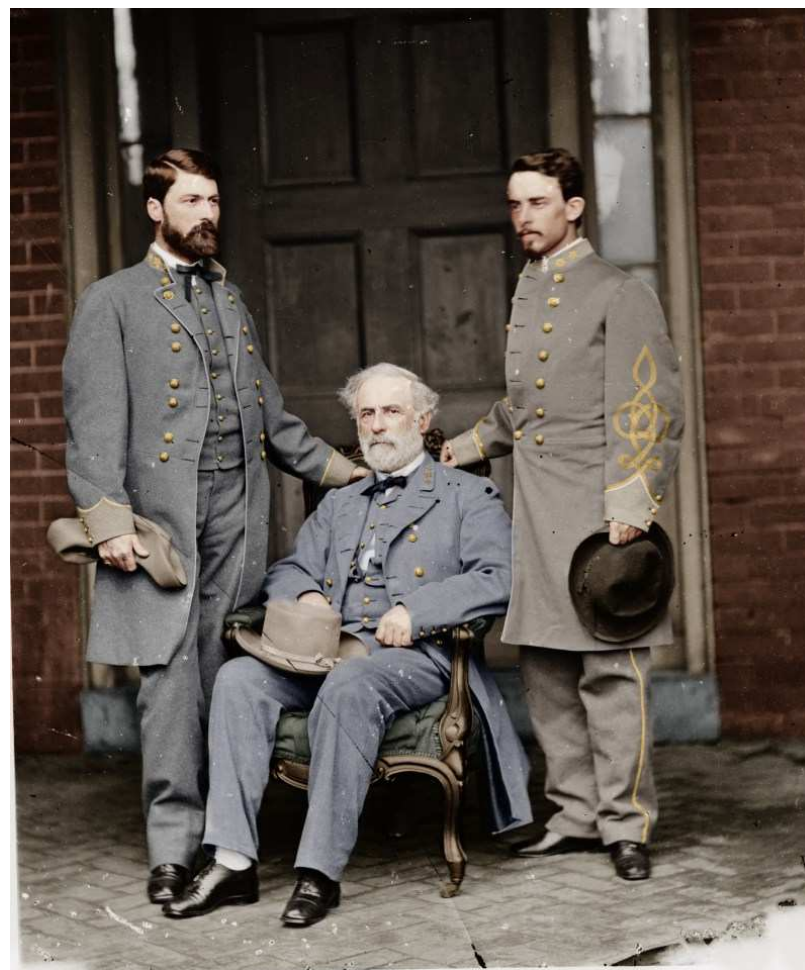


RGB = [0 0 255]



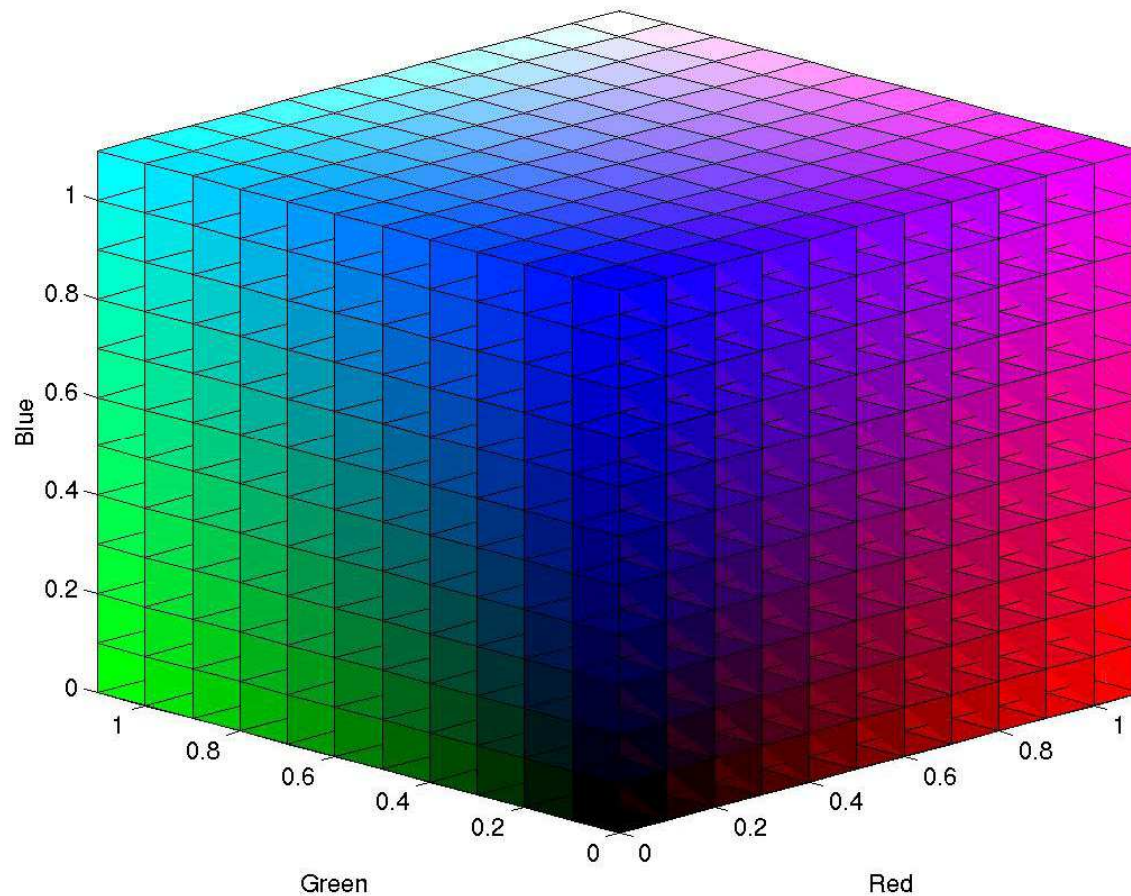
Y = 28

Barevný obraz



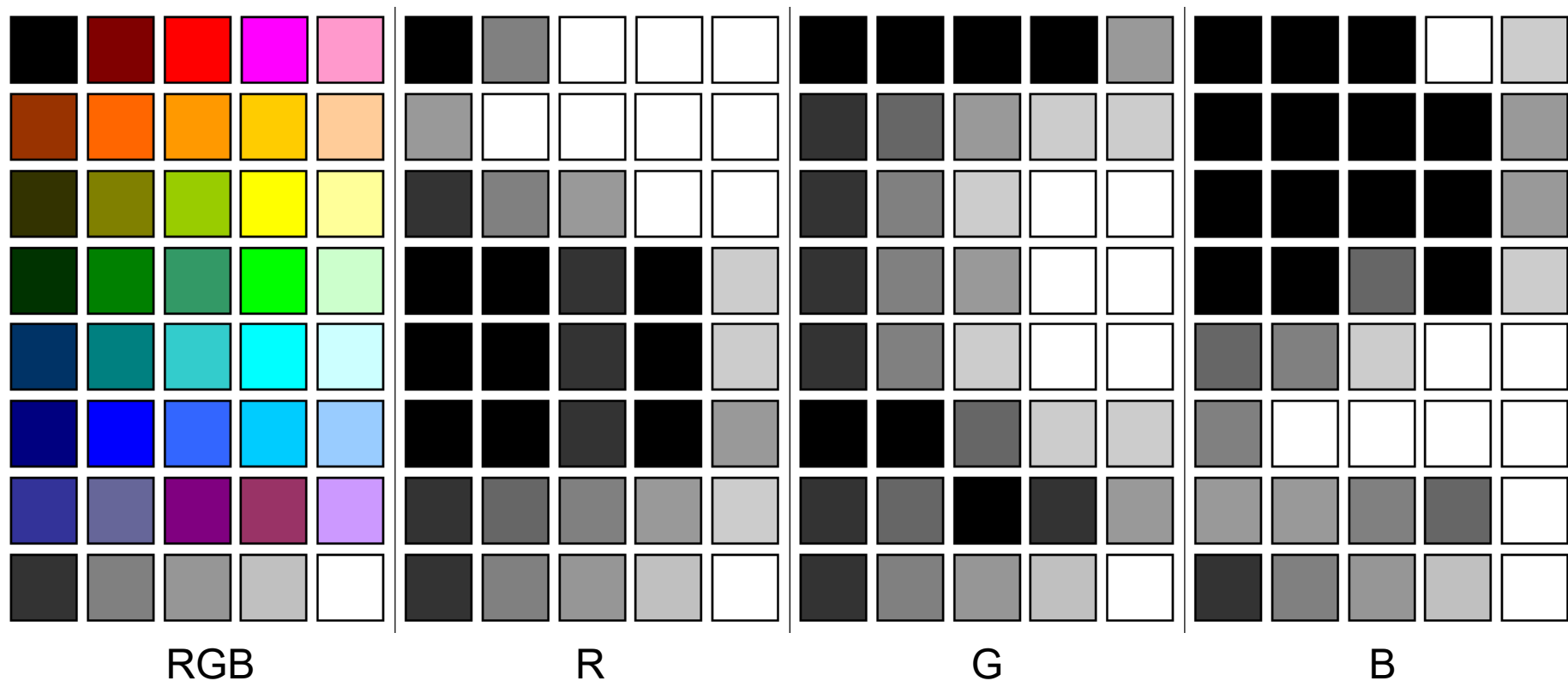
BAREVNÉ PROSTORY

- **RGB barevný prostor** >>> kombinace barevných složek červená – R (red), zelená – G (green), modrá – B (blue), rozsah (0..255, 0..255, 0..255), (0..1, 0..1, 0..1)...



BAREVNÉ PROSTORY

● RGB barevný prostor



BAREVNÉ PROSTORY

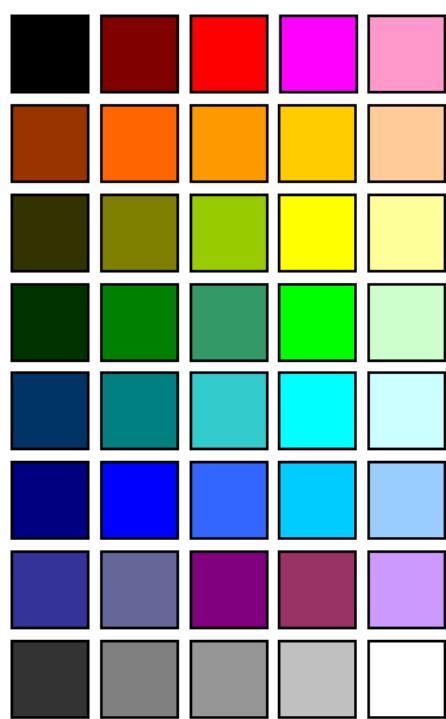
● RGB barevný prostor

| R | G | B | Barva |
|-----|-----|-----|---------------|
| 0 | 0 | 0 | Černá |
| 255 | 0 | 0 | Červená |
| 0 | 255 | 0 | Zelená |
| 0 | 0 | 255 | Modrá |
| 255 | 255 | 255 | Bílá |
| 255 | 255 | 0 | Žlutá |
| 255 | 0 | 255 | Purpurová |
| 0 | 255 | 255 | Akvamarínová |
| 255 | 127 | 0 | Oranžová |
| 255 | 0 | 127 | Fuchsiová |
| 127 | 255 | 0 | Světle zelená |
| 127 | 0 | 255 | Fialová |
| 0 | 127 | 255 | Světle modrá |
| 0 | 255 | 127 | Brčálová |
| 255 | 127 | 127 | Růžová |
| 127 | 255 | 127 | Jarní zeleň |
| 127 | 127 | 255 | Modro-fialová |

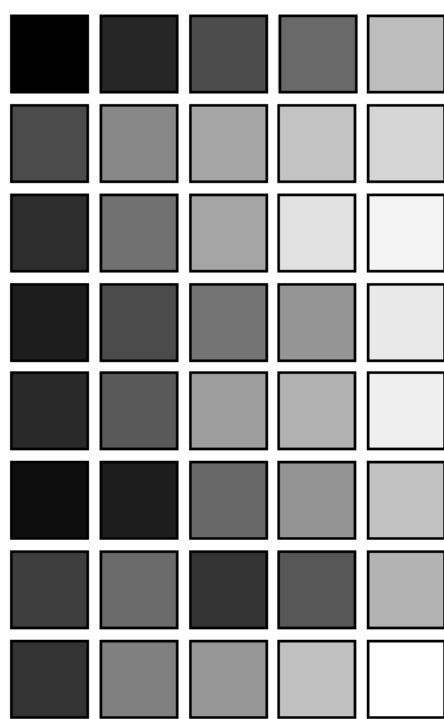
BAREVNÉ PROSTORY

● RGB >>> Jas

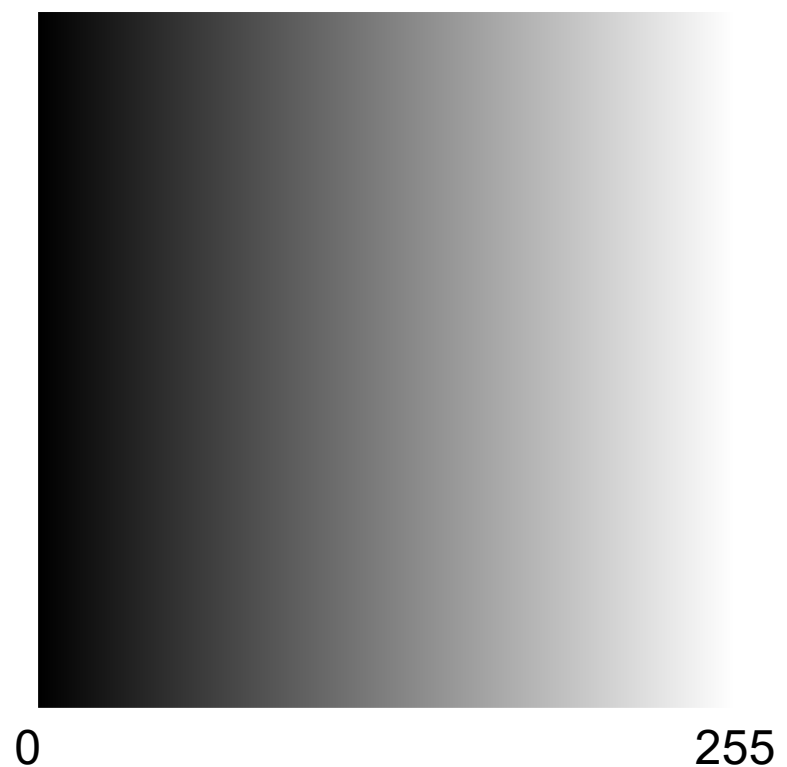
$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$$



RGB



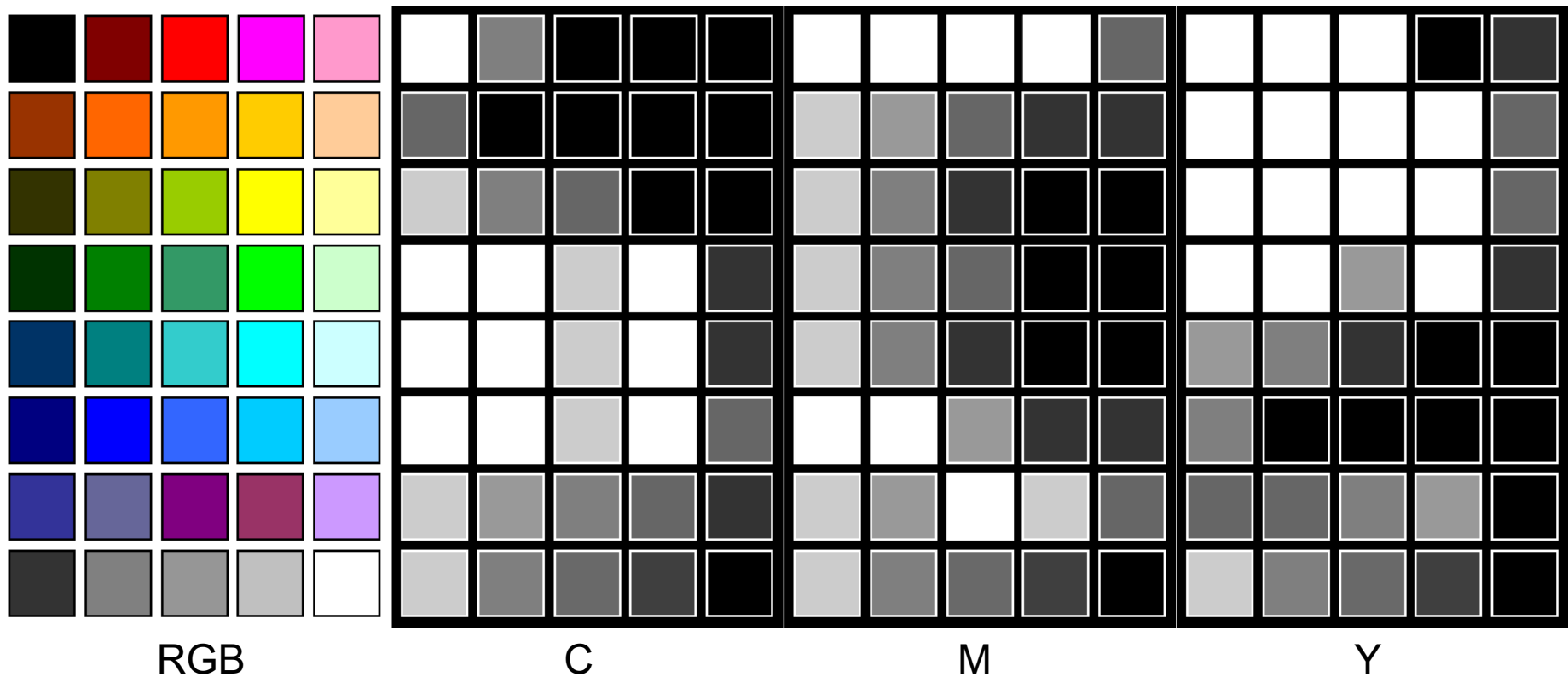
Jas Y



BAREVNÉ PROSTORY

● RGB >>> CMY

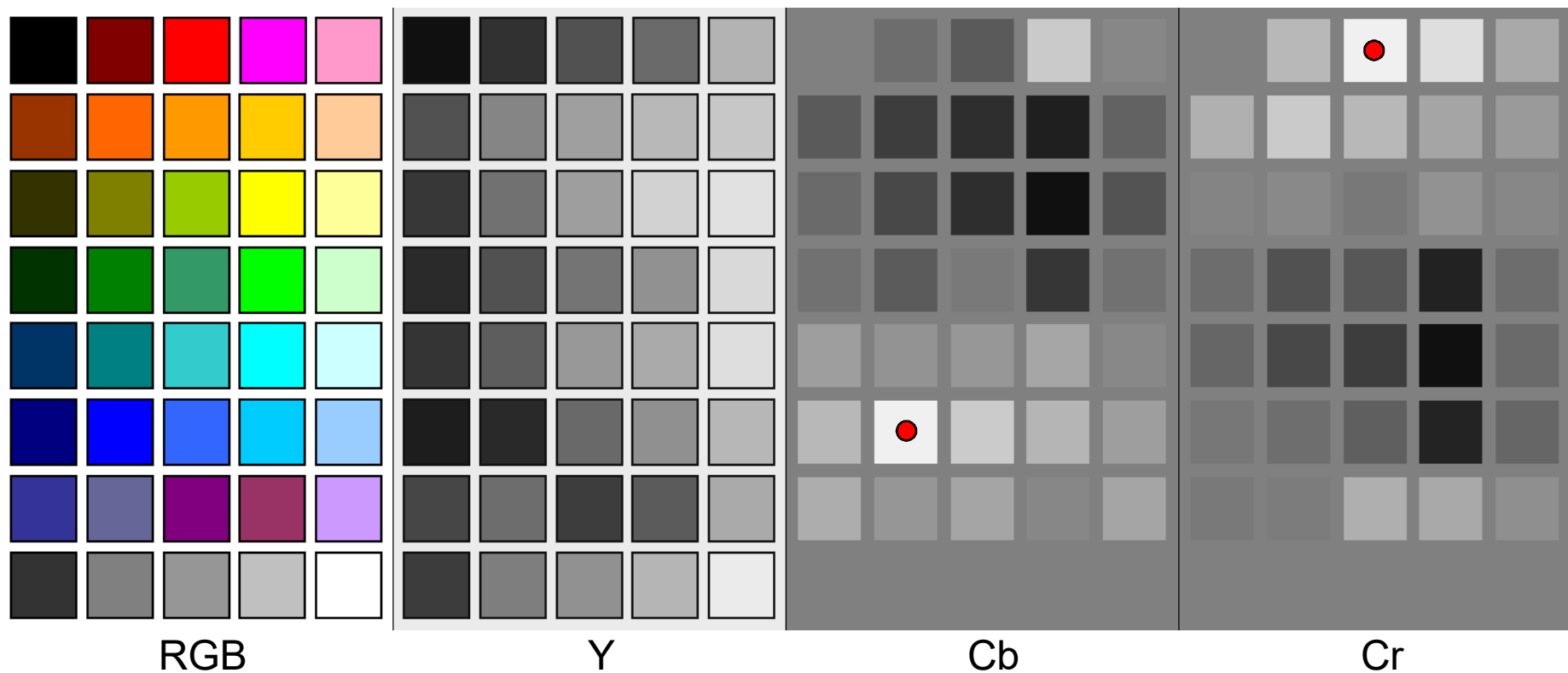
$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



BAREVNÉ PROSTORY

● **RGB >>> YCbCr**

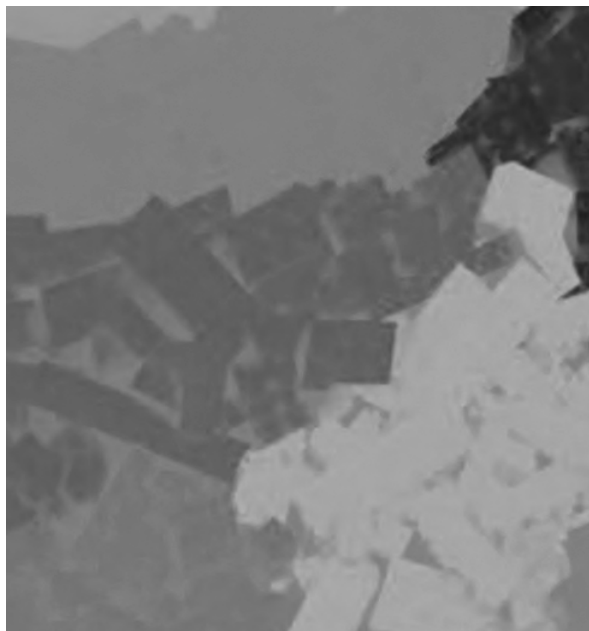
$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.504 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix}$$



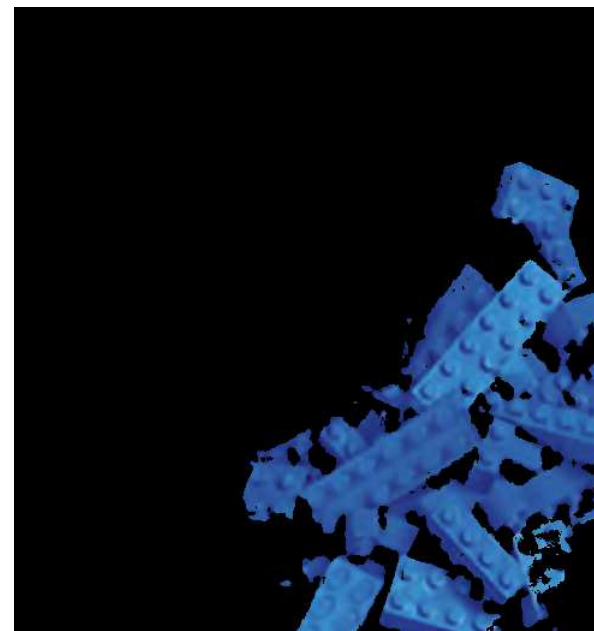
BAREVNÉ PROSTORY – YCbCr – Cb (1)



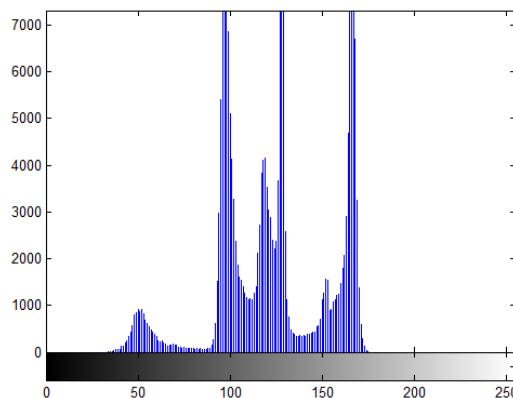
RGB



Cb



segmentace



BAREVNÉ PROSTORY – YCbCr – Cr (2)



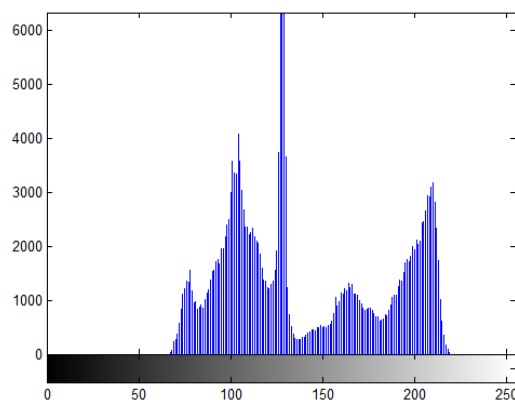
RGB



Cr



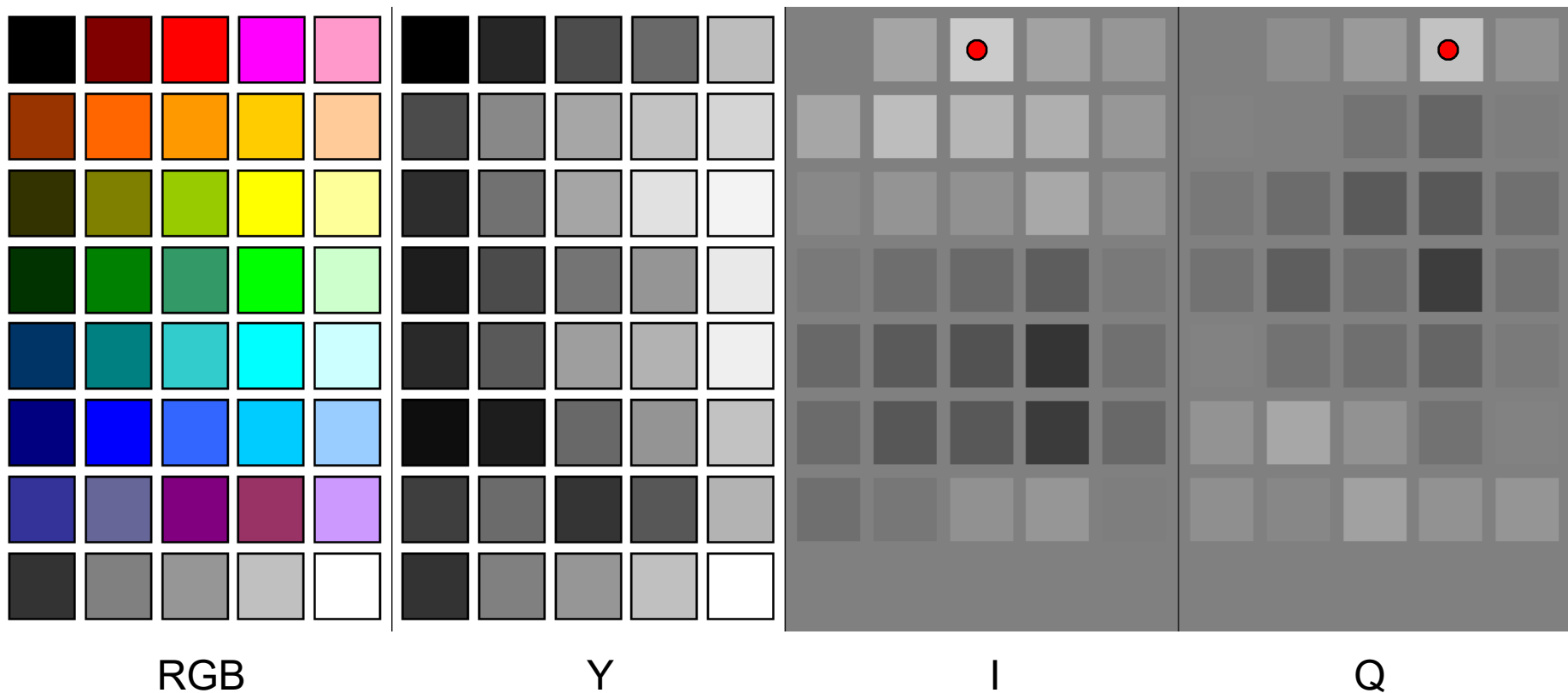
segmentace



BAREVNÉ PROSTORY

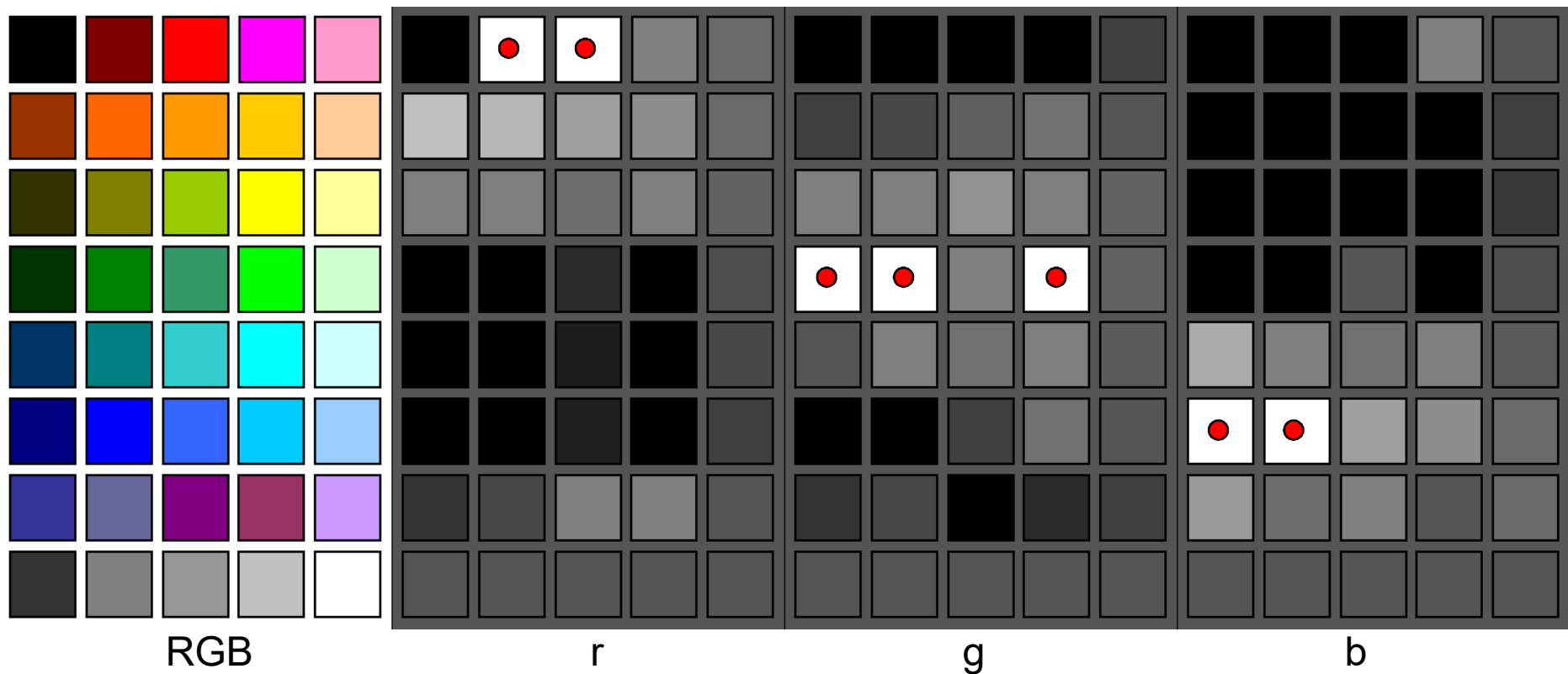
● **RGB >>> YIQ (NTSC)**

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



BAREVNÉ PROSTORY

● **RGB >>> rgb** $r = \frac{3 \cdot R}{R + G + B}, \quad g = \frac{3 \cdot G}{R + G + B}, \quad b = \frac{3 \cdot B}{R + G + B}, \quad \text{rozsah}(0,3)$



BAREVNÉ PROSTORY

● RGB >>> HSV

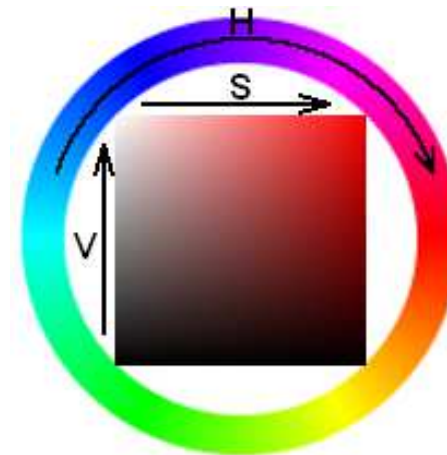
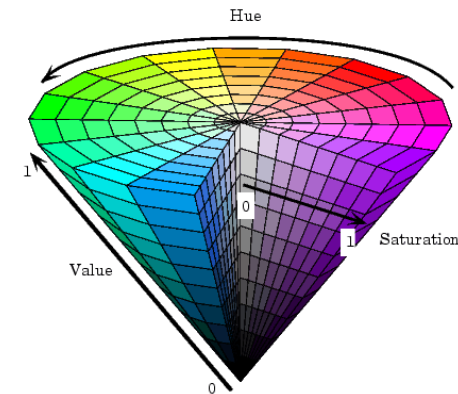
$$H = \begin{cases} 60 \cdot \left(0 + \frac{G - B}{MAX - MIN} \right), & \text{pokud } R = MAX \\ 60 \cdot \left(2 + \frac{B - R}{MAX - MIN} \right), & \text{pokud } G = MAX \\ 60 \cdot \left(4 + \frac{R - G}{MAX - MIN} \right), & \text{pokud } B = MAX \end{cases}$$

když $MAX - MIN = 0 \Rightarrow H = 0$

$$S = \frac{MAX - MIN}{MAX}$$

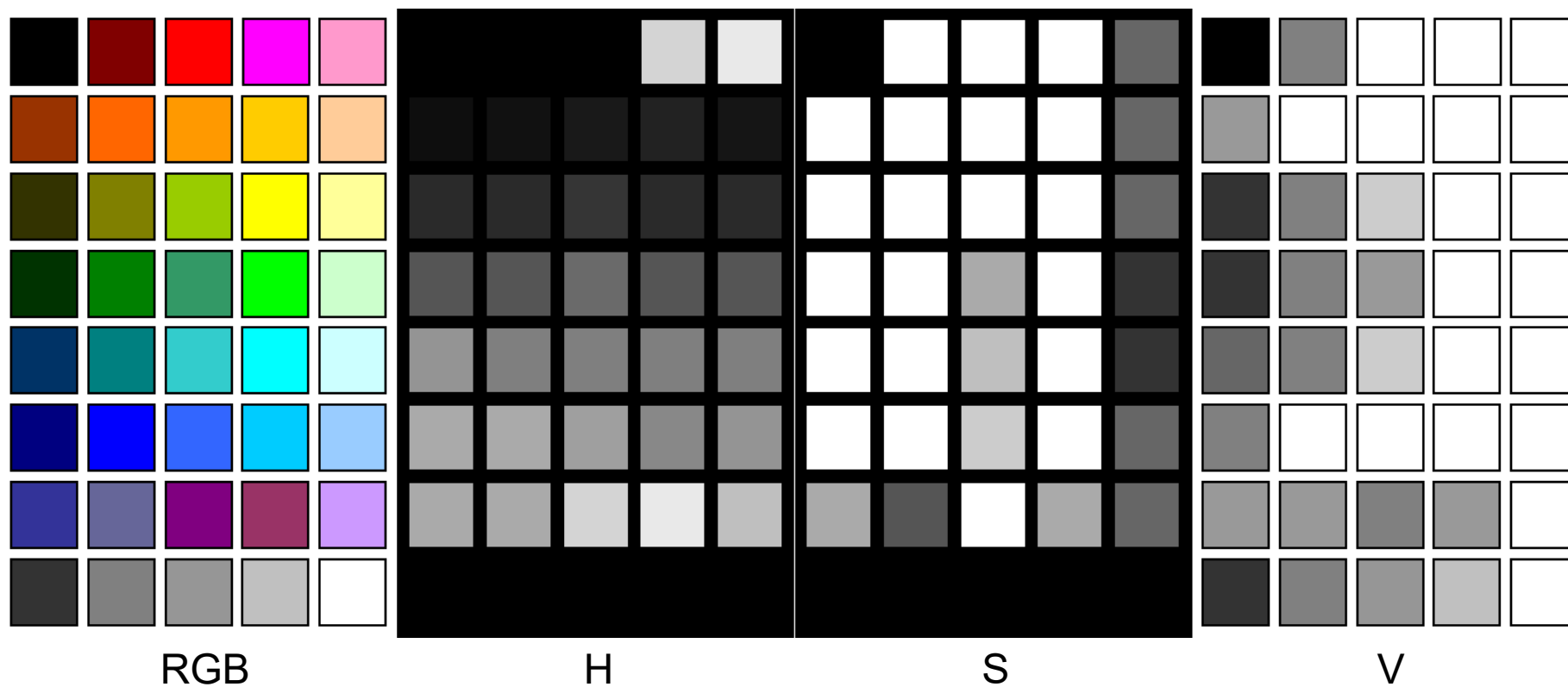
když $MAX = 0 \Rightarrow S = 0$

$$V = MAX$$



BAREVNÉ PROSTORY

● RGB >>> HSV



BAREVNÉ PROSTORY

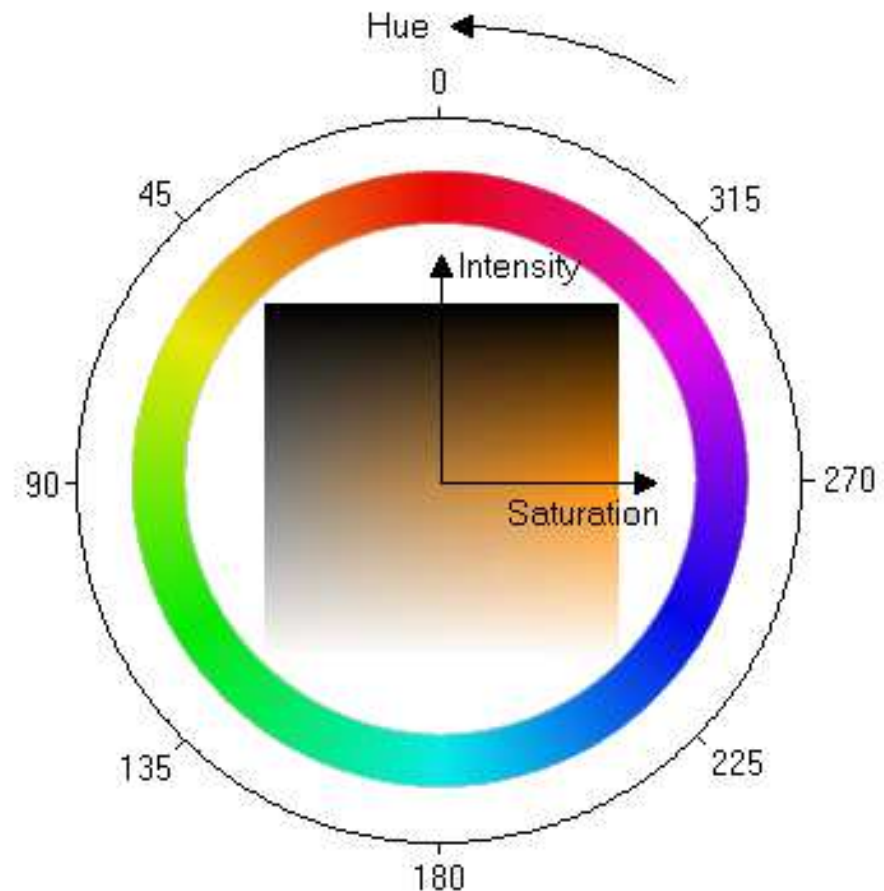
● RGB >>> HSI

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(r-g) + (r-b)]}{\left[(r-g)^2 + (r-b)(g-b) \right]^{1/2}} \right\}$$

$$S = 1 - \frac{3}{r+g+b} \min(r,g,b)$$

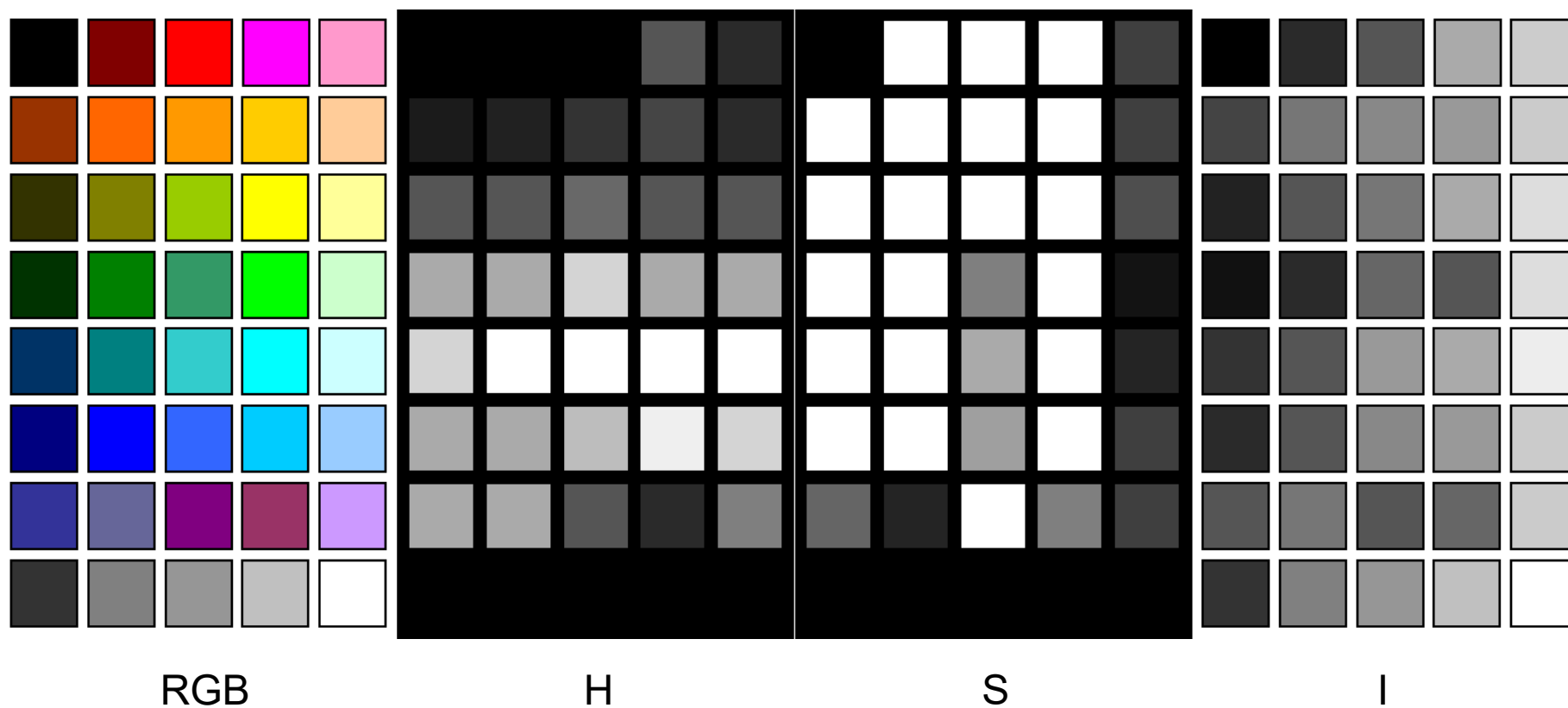
$$I = \frac{r+g+b}{3}$$

$$0 \leq r, g, b \leq 1$$



BAREVNÉ PROSTORY

● RGB >>> HSI



BAREVNÉ PROSTORY

- **Další barevné prostory**

CIE LAB, HSL, YPbPr...

- **Vlastní barevné prostory**

Lineární, nelineární převod RGB
Na základě statistiky FLDA

- **Převod barev**

Dle vzorce, převodní tabulka (Look Up Table)
 $Y = \text{tab}[R][G][B]$, $Y = \text{tab}[255][0][0] = 77$

- **Převod hodnot barevného prostoru do stupňů šedi**

$$Y(x, y) = \frac{Col(x, y) - \min(Col)}{\max(Col) - \min(Col)} \cdot 255$$

RADIOMETRIE

- Tok a přenos vyzářené energie
- Vznik obrazu díky odrazu záření od neprůhledných objektů
- Měření intenzity – jasu
- **Jas** >>> závisí na tvaru objektu, odrazivých vlastnostech jeho povrchu, poloze pozorovatele, poloze a typu světelných zdrojů
- Radiometrická analýza změn jasu – složitá
- Zjednodušení – nasvícení scény (oddělení zajímavých objektů)

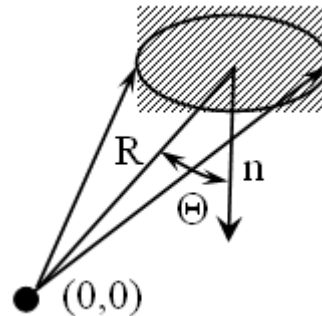
FOTOMETRIE

- Veličiny popisující odezvu vjemů zrakového smyslu
- **Zářivý tok** Φ [W] \leftrightarrow **světelný tok** Φ_{ph} [lm - lumen]. Převod $1W = 680 \text{ lm}$ pro $\lambda = 555 \text{ nm}$ a fotooptické (čípkové) vidění

$$\Phi_{ph} = \int_{\lambda} K(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda$$

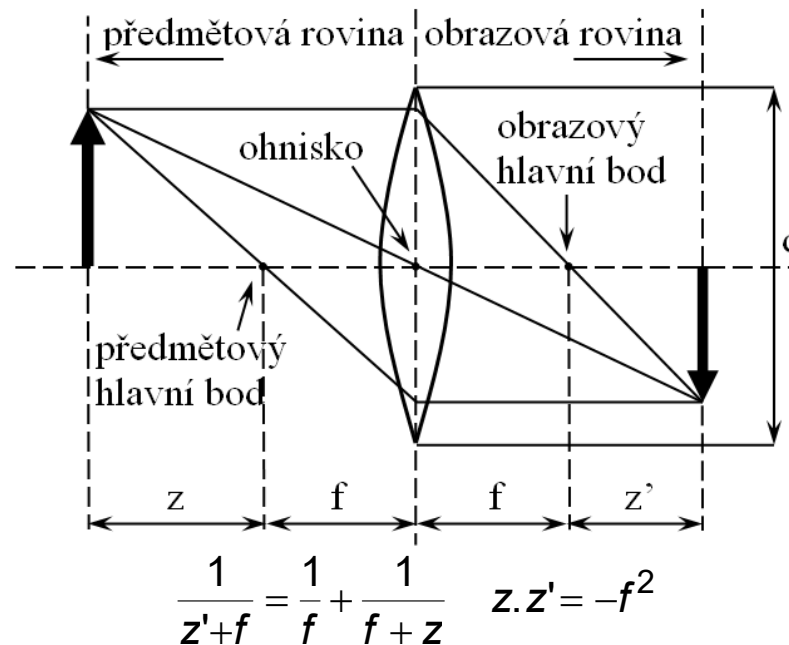
$S(\lambda)$ [W]...výkon zdroje záření, $K(\lambda)$ [lm.W-1]...světelná účinnost, λ [m]...vlnová délka

- Fotometrické veličiny závisí na pozorovateli, prostorový úhel odpovídající elementární plošce



OPTICKÁ ČÁST KAMERY

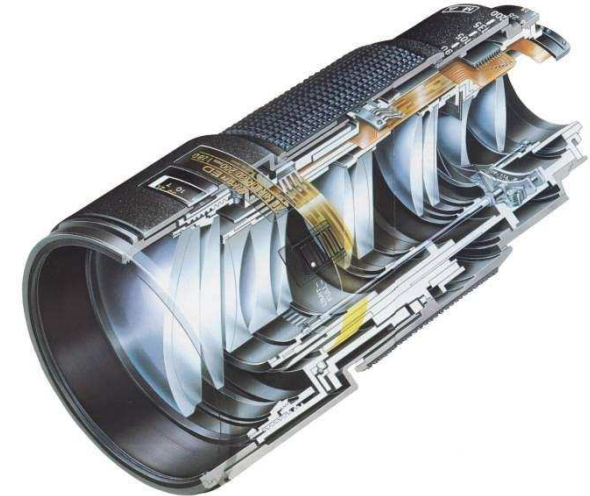
- Ideální model >>> dírková kamera (nereálné – ohyb (difrakce) světla)
- Rovinné zrcadlo zobrazuje body na body
- Ideální **tenká čočka** (soustřeďuje pouze paprsky vycházející z bodu v rovině kolmé k optické ose ve vzdálenosti z od středu promítání)



f – ohnisková vzdálenost, z' – vzdálenost mezi obrazovým hlavním bodem a obrazovou rovin.

OPTICKÁ ČÁST KAMERY

- Skutečné objektivy >>> **tlusté čočky**
>>> přední a zadní ohnisko
- Efektivní tloušťka tlusté čočky
>>> vzdálenost mezi předním a zadním ohniskem
- Paprsek vcházející do čoček přes přední ohnisko, vychází ze zad. ohniska pod stejným úhlem
- Při optickém měření rozměrů měřený předmět nemusí být v obrazové rovině >>> předmět se přiblíží - vypadá větší, předmět se vzdálí – menší
- **Optické vady** >>> z bodového předmětu nevznikne bodový obraz, distribuce intenzit v obraze – šířka měřicího stupně rozostření, posun středu distribuce (geometrické zkreslení)
- Průchod světla prostředím (vzduchem) >>> rozptyl >>> pokles vysokých frekvencí ve fourierovském spektru >>> kompenzace filtrem derivačního charakteru

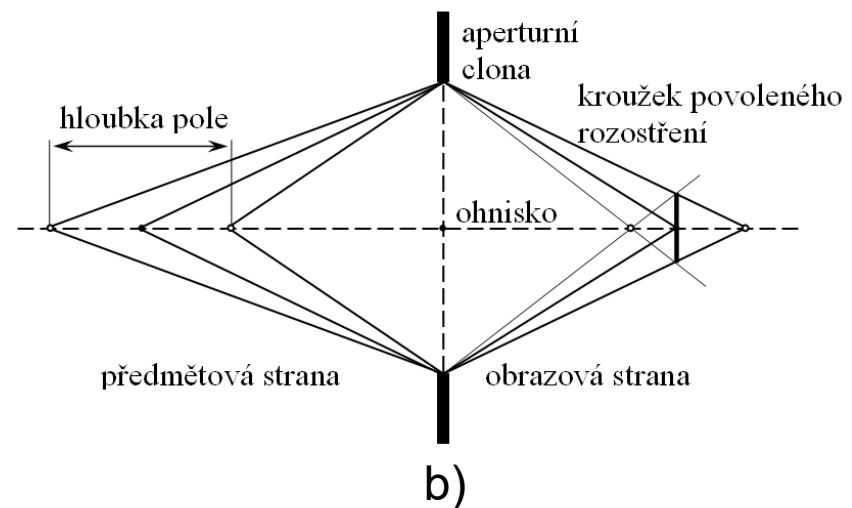
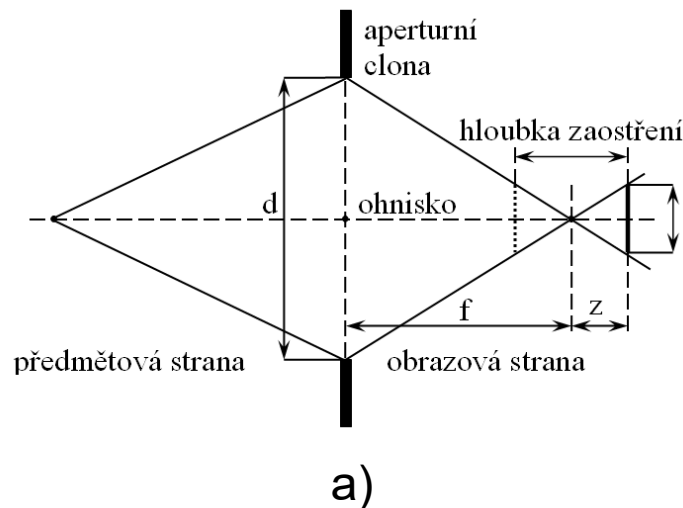


OPTICKÁ ČÁST KAMERY

- Zvětšení optické soustavy m : X ...velikost předmětu v předmětové rovině, x ...velikost obrazu předmětu v obrazové rovině

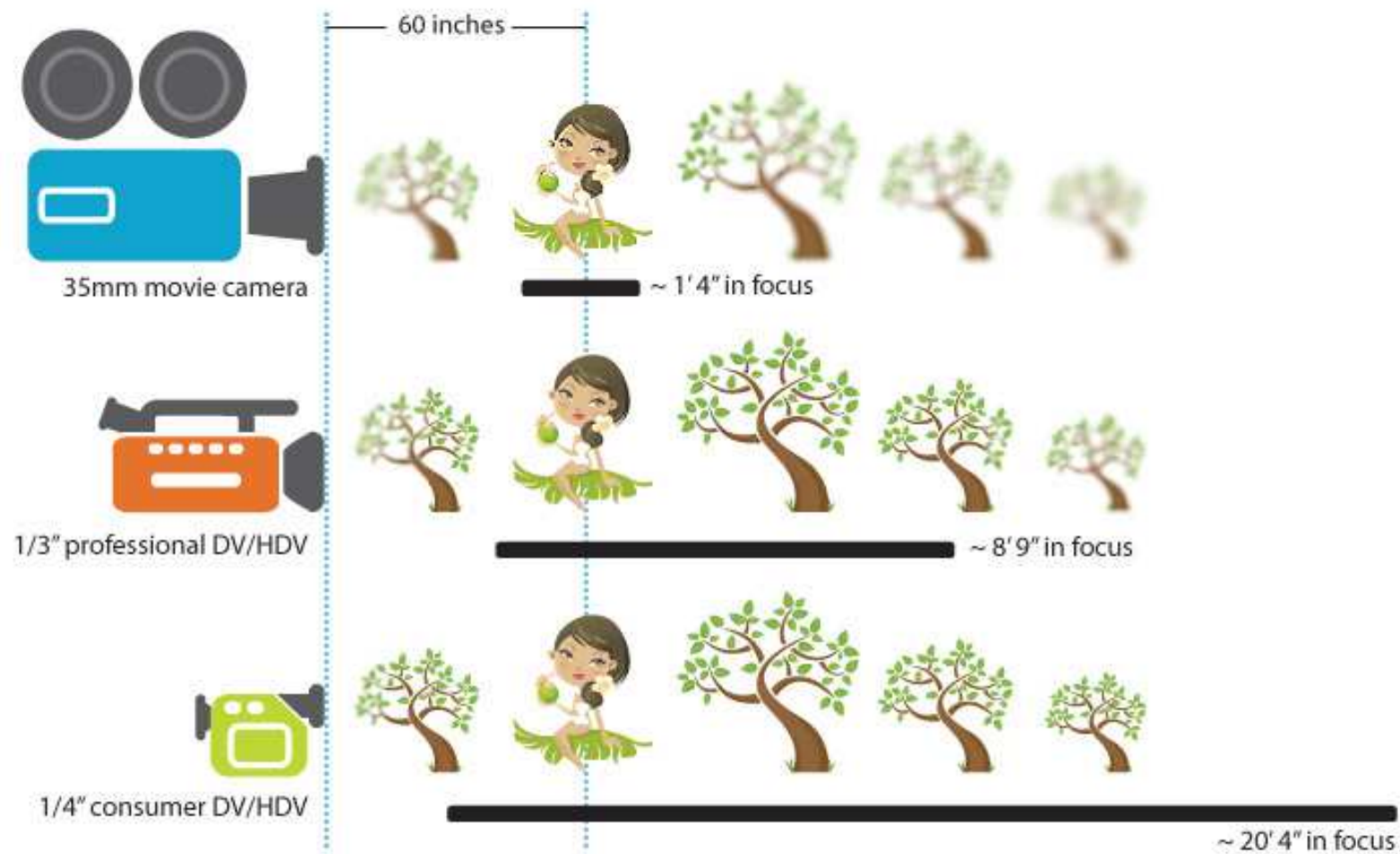
$$m = \frac{x}{X} = \frac{f}{z} = \frac{z'}{f}$$

- a) **Hloubka zaostření** na obrazové straně optické soustavy, rozostření obrazu >>> posunutí obrazové roviny mimo obrazový hlavní bod



- b) **Hloubka pole** >>> rozsah přípustných poloh pozorovaného předmětu při zachovaném požadavku na rozostření nejvýše o ε

OPTICKÁ ČÁST KAMERY – hloubka zaostření



OPTICKÁ ČÁST KAMERY – ohnisková vzdálenost



Rybí oko

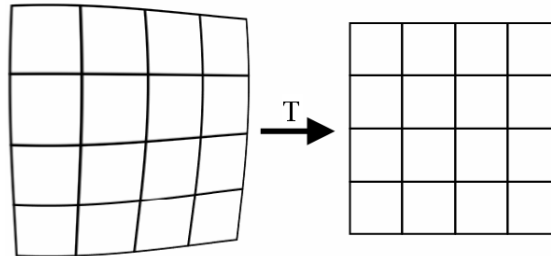
Ohnisková vzdálenost (přepočteno na 35mm kinofilmové políčko): 4 – 6mm (rybí oko), 14 – 35mm (širokoúhlý objektiv), 50mm (základní objektiv), 60 – 300mm (dlouhé ohnisko) >300mm ultradlouhé ohnisko

SNÍMAČE SVĚTELNÉ ENERGIE V KAMERÁCH

- Snímače na fotoemisivním principu >>> vnější fotoelektrický jev (přijetí fotonu – uvolnění elektronu), vákuové snímací elektronky a fotonásobiče
- Snímače na fotovoltaiickém nebo fotovodivostním principu >>> vnitřní fotoelektrický jev (energie fotonu způsobí, že elektron opustí svoje valenční pásmo, u fotovodivostních látek se dostane do vodivého pásma)
- Čidla >>> fotodioda, lavinová fotodioda (zesilovač světla, chováním podobná vakuovému fotonásobiči, zesiluje také šum, používá se např. v kamerách pro noční vidění), fotoodpor a Schottkyho fotodioda (důležitá součást CCD snímačů)
- **CCD snímače** (angl. Charge Coupled Devices), převod světelné energii na elektrický náboj, analogovým posuvný registr, **(-)** vzájemné ovlivňování nábojů v sousedních pixelech (blooming), malý rozsah intenzit (2 řády), **(+)** velká citlivost a poměrně nízký šum
- **CMOS snímače** kamera i procesor na jednom čipu, **(+)** větší rozsah intenzit (asi 4 řády), velká rychlost vyčítání (okolo 100 ns), náhodný přístup k pixelům **(-)** o řád větší šum než u CCD snímačů

GEOMETRICKÉ TRANSFORMACE

- Transformace >>> zvětšení, rotace, odstranění geometrického zkreslení obrazu



- Geometrická transformace** >> vektorová funkce >> zobrazí bod x, y do bodu x', y'
 $x' = T_X(x, y) \quad y' = T_Y(x, y)$
- T_x, T_y známé nebo je hledáme na základě znalosti původního a transformovaného obrazu >>> známé (vlíkové) body

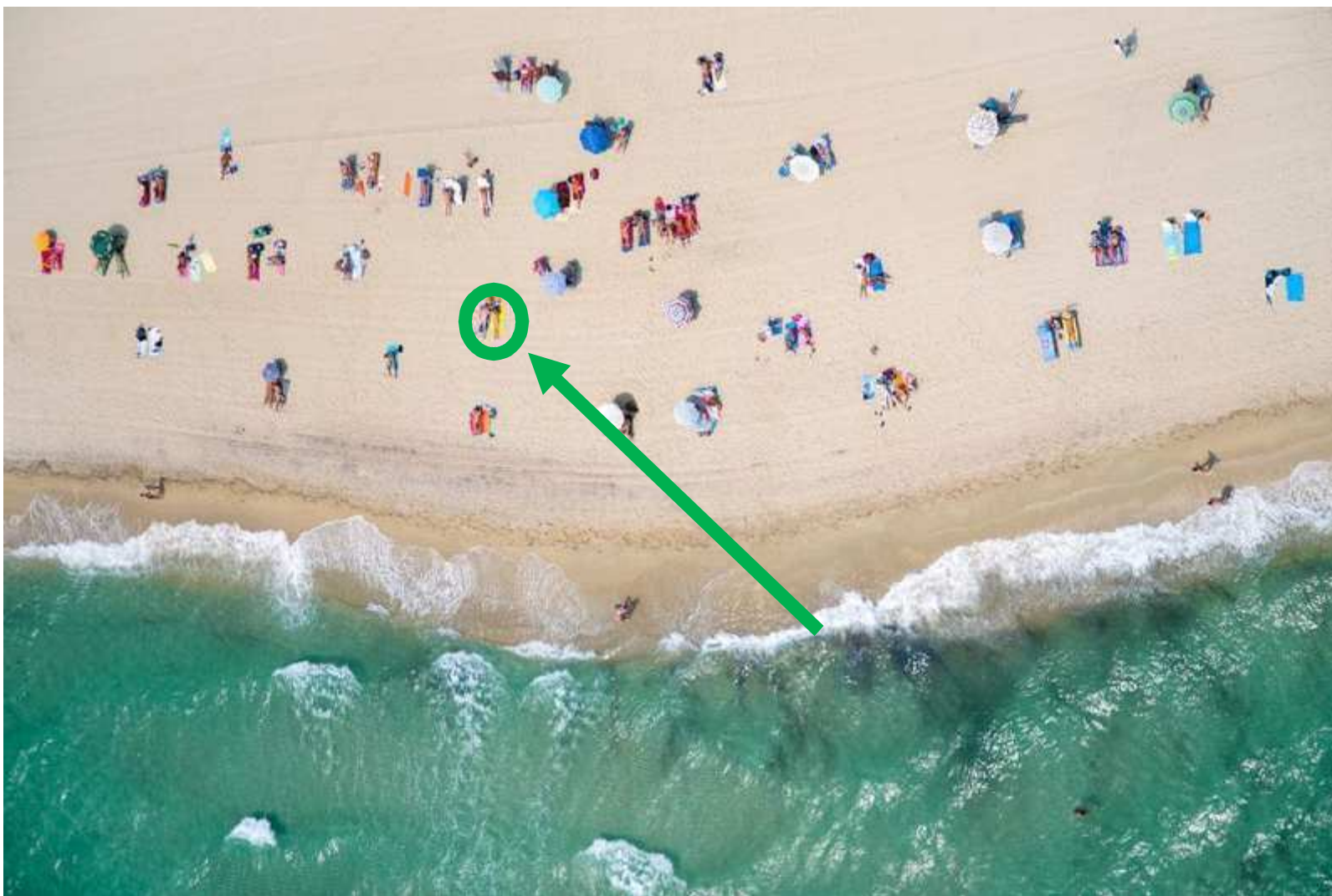
- Geometrická transformace 1) transformace souřadnic bodů
 2) aproximace jasové funkce

- Transformace souřadnic bodů**
$$x' = \sum_{r=0}^m \sum_{k=0}^{m-r} a_{rk} x^r y^k, \quad y' = \sum_{r=0}^m \sum_{k=0}^{m-r} b_{rk} x^r y^k$$

výpočet a_{rk}, b_{rk} metodou nejmenších

čtverců

GEOMETRICKÉ TRANSFORMACE



GEOMETRICKÉ TRANSFORMACE



OR



GEOMETRICKÉ TRANSFORMACE



TRANSFORMACE SOUŘADNIC BODŮ

- Jakobián J – informace o změně systému při geometrické transformaci

$$J = \left| \frac{\partial(x', y')}{\partial(x, y)} \right| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} \end{vmatrix}$$

singulární transformace $J = 0$
obraz invariantní vůči transformaci $J = 1$

$$J = a_1b_2 - a_2b_1 + (a_1b_3 - a_3b_1)x + (a_3b_2 - a_2b_3)y \quad \text{pro bilineární transformaci}$$

$$J = a_1b_2 - a_2b_1 \quad \text{pro afinní transformaci}$$

- Rotace** o úhel Φ proti originálnímu obrazu

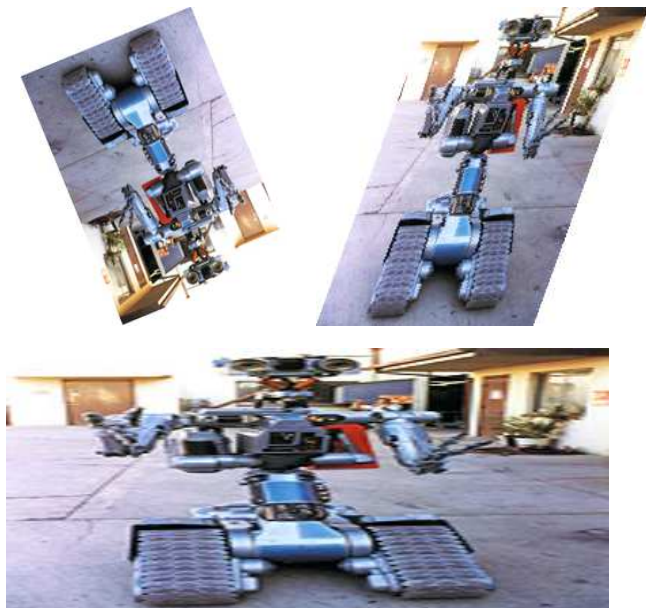
$$x' = x \cdot \cos \Phi + y \cdot \sin \Phi \quad y' = -x \cdot \sin \Phi + y \cdot \cos \Phi \quad J = 1$$

- Změna měřítka**

$$x' = ax \quad y' = by \quad J = ab$$

- Zkosení** o úhel Φ

$$x' = x + y \cdot \tan \Phi \quad y' = y \quad J = 1$$



APROXIMACE (INTERPOLACE) JASOVÉ STUPNICE

- Výpočet souřadnic v původním obraze

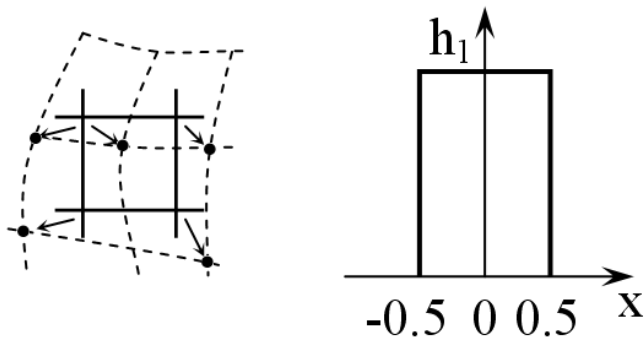
$$(x, y) = T^{-1}(x', y')$$

- Výsledný (interpolovaný) jas

$$f_n(x, y) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g_s(l\Delta x, k\Delta y) h_n\left(\frac{x - l\Delta x}{\Delta x}, \frac{y - k\Delta y}{\Delta y}\right)$$

(interpoláčn. jádro)

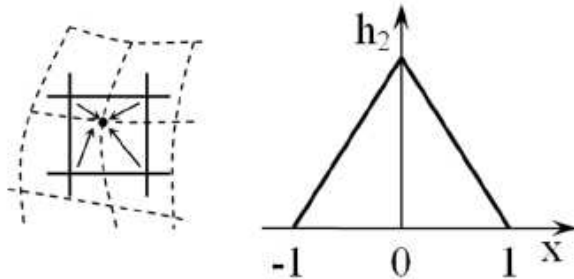
- **1) Metoda nejbližšího souseda**



$$f_1(x, y) = g_s(\text{round}(x), \text{round}(y))$$

APROXIMACE (INTERPOLACE) JASOVÉ STUPNICE

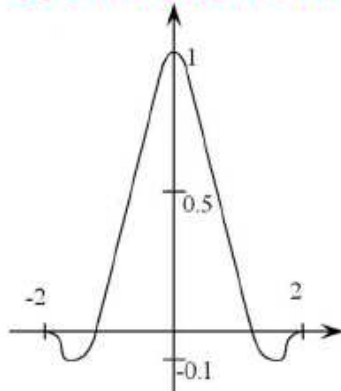
2) Lineární interpolace



$$f_2(x, y) = (1-a)(1-b).g_s(l, k) + a.(1-b).g_s(l+1, k) + b.(1-a).g_s(l, k+1) + a.b.g_s(l+1, k+1)$$

$$l = \text{round}(x) \quad k = \text{round}(y) \quad a = x - l \quad b = y - k$$

3) Bikubická interpolace - bikubický polynom, okolí 16 bodů



$$h_3 = \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3 & \text{pro } 0 \leq |x| < 1 \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3 & \text{pro } 1 \leq |x| < 2 \\ 0 & \text{jinde} \end{cases}$$

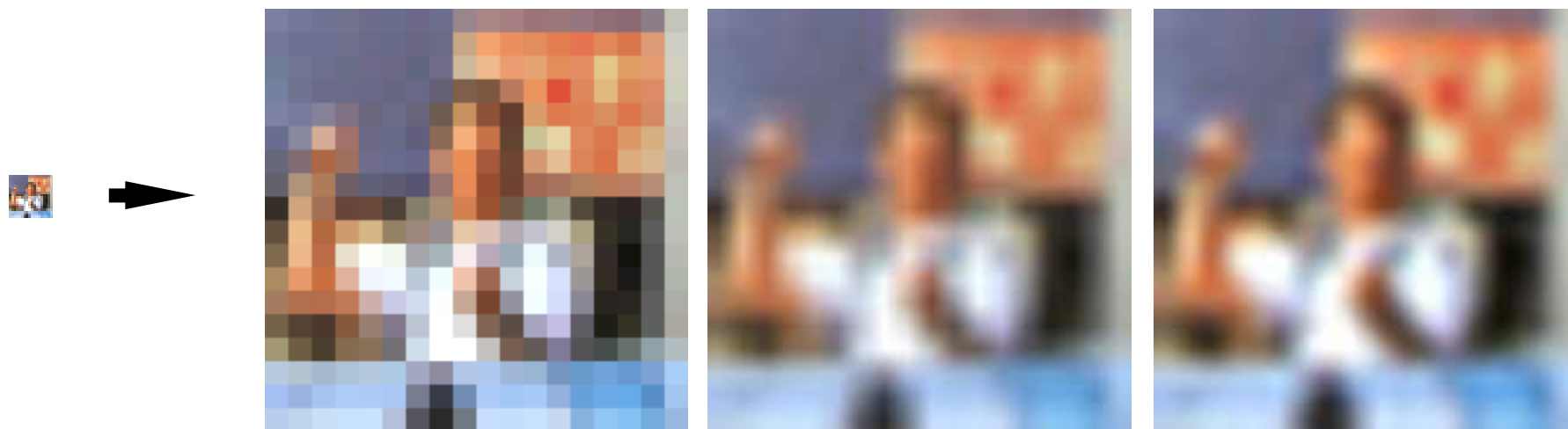
Další interpolace – fraktály...

APROXIMACE (INTERPOLACE) JASOVÉ STUPNICE

● **Bikubická interpolace** - algoritmus

- 1) $id = i' \cdot (w / w')$
 $jd = j' \cdot (h / h')$
 w (šířka), h (výška) originálního obrazu
 w' (šířka), h' (výška) nového obrazu
- 2) $ic = c.č(id)$ $id=1.8 \rightarrow ic = 1$
 $jc = c.č(jd)$
- 3) $dx = id - ic$
 $dy = jd - jc$
- 4) $f(i', j') = f(ic + m, j + n) \cdot R(m - dx) \cdot R(dy - n)$
- 5) $R(x) = (1/6) \cdot [P(x + 2)^3 - 4 P(x + 1)^3 + 6 P(x)^3 - 4 P(x - 1)^3]$
- 6) $P(x) = x$, pro $x > 0$
 $P(x) = 0$, pro $x \leq 0$

APROXIMACE (INTERPOLACE) JASOVÉ STUPNICE



Nejbližší soused

Lineární interpolace

Bikubická interpolace