

# Metody zpracování dat z RGB kamery

Pavel Krsek

březen 2024

- ◆ Matematický popis transformací
- ◆ Obraz z kamery a barevný prostor
- ◆ Segmentace a popis oblastí (objektů)

**Zkoušeli jste již spusti roobot ?**

A Ne, zatím jsem se k tomu nedostal

B Ano, na počítači v laboratoři

C Ano, nas svém počítači

**Byli jste úspěšní (pokud jste se pokusili) ?**

A Ano

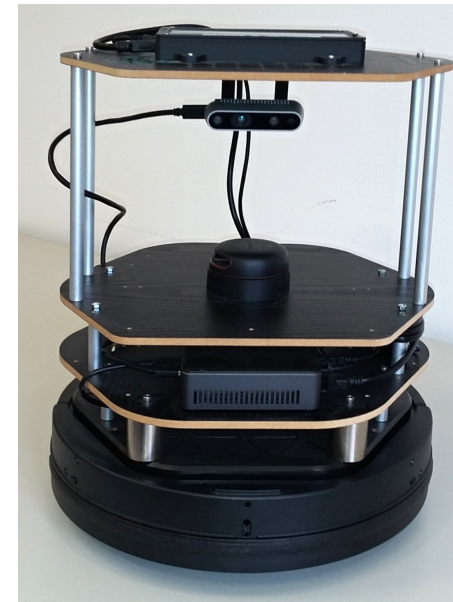
B Částečně

C Ne

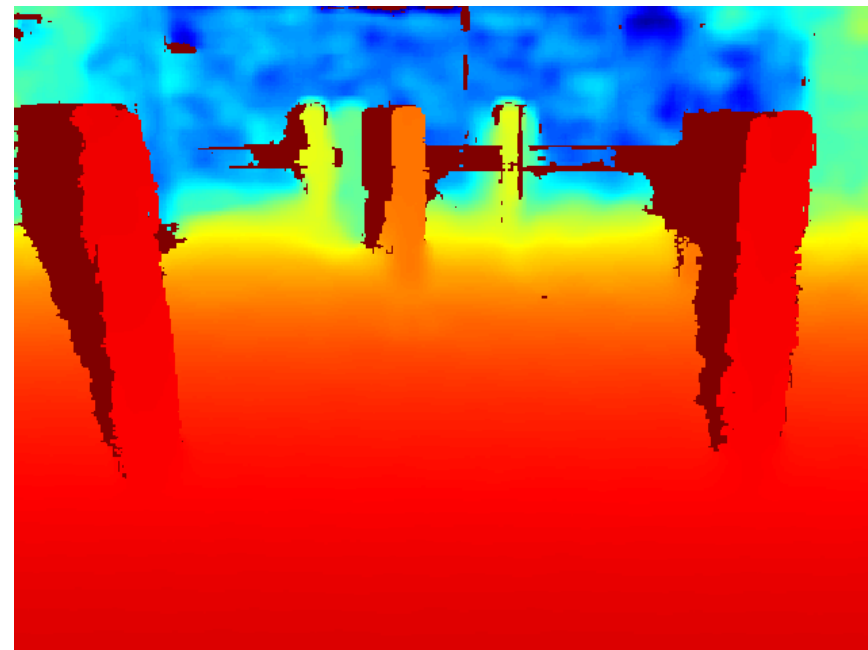


## Důležité senzory

- ◆ Intel RealSens (Astra)
  - RGB kamera (640x480)
  - 3D hloubková kamera (různé rozlišení)
- ◆ Nárazník v přední části



RGB snímek



Hloubkový snímek

## Matematické vztahy

bod, vektor, rovina, transformace,  
homogenní souřadnice

# Bod a jeho souřadnice

5/28

Eukleidovský prostor (kartézský prostor)  $\mathbb{R}^2$ ,  $\mathbb{R}^3$ , ortonormální báze

$\mathbb{R}^2$

$\mathbb{R}^3$

Bod v prostoru

$$\mathbf{p} = [x, y]$$

$$\mathbf{p} = [x, y, z]$$

Lineární transformace

$$\begin{aligned}x' &= ax + by + c \\y' &= dx + ey + f\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x' &= ax + by + cz + d \\y' &= ex + fy + gz + h \\z' &= ix + jy + kz + l\end{aligned}$$

Maticový zápis

$$\begin{aligned}\mathbf{p}' &= \mathbf{R}\mathbf{p} + \mathbf{t} \\ \mathbf{p} &= [x, y]^T, \mathbf{p}' = [x', y']^T\end{aligned}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix}, \mathbf{t} = [c, f]^T$$

$$\begin{aligned}\mathbf{p}' &= \mathbf{R}\mathbf{p} + \mathbf{t} \\ \mathbf{p} &= [x, y, z]^T, \mathbf{p}' = [x', y', z']^T\end{aligned}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ e & f & g \\ i & j & k \end{bmatrix}, \mathbf{t} = [d, h, l]^T$$

$\mathbf{R}$  se nazývá transformační matice a  $\mathbf{t}$  je translační vektor.

## Vztah vektorů v $\mathbb{R}^3$

Máme dvojici vektorů v  $\mathbb{R}^3$ :  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3]$ ,  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]$

### Vzájemný úhel dvou vektorů - Skalární součin

Skalární součin:  $\mathbf{p} \cdot \mathbf{q} = p_1q_1 + p_2q_2 + p_3q_3 = \|\mathbf{p}\| \|\mathbf{q}\| \cos \alpha$

Úhel vektorů:

$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{\|\mathbf{p}\| \|\mathbf{q}\|}$$

### Vektor kolmý na dvojici vektorů - Vektorový součin

Vektorový součin:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} \times \mathbf{q} &= \mathbf{n} \|\mathbf{p}\| \|\mathbf{q}\| \sin \alpha \\ \mathbf{p} \times \mathbf{q} &= \begin{bmatrix} p_2q_3 - p_3q_2 \\ p_3q_1 - p_1q_3 \\ p_1q_2 - p_2q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -p_3 & p_1 \\ p_3 & 0 & -p_2 \\ -p_1 & p_2 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \end{aligned}$$

Normálový vektor:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{p} \times \mathbf{q}}{\|\mathbf{p}\| \|\mathbf{q}\| \sin \alpha}, \quad \|\mathbf{n}\| = 1$$

# Homogenní souřadnice

**Definice:** Uspořádanou  $n$ -tici čísel  $[h_1, h_2, \dots, h_n]$  nazýváme homogenními souřadnicemi bodu  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_{n-1}]$  v  $\mathbb{R}^{n-1}$  pokud platí že  $h_1/h_n = p_1$ ,  $h_2/h_n = p_2$ , ...,  $h_{n-1}/h_n = p_{n-1}$ , kde  $p_1$  až  $p_{n-1}$  jsou kartézské souřadnice bodu  $\mathbf{p}$ .

## Vlastnosti homogenních souřadnic

- ◆ Rozšíření prostoru  $\mathbb{R}^2 \Rightarrow \mathbb{R}^3$  resp.  $\mathbb{R}^3 \Rightarrow \mathbb{R}^4$
- ◆ Popis bodu není jednoznačný:  $\mathbf{p}_H = [h_1, h_2, \dots, h_n] \sim \lambda[h_1, h_2, \dots, h_n]$ ,  $\lambda \neq 0$
- ◆ Převod z/do homogenních souřadnic

$$\begin{array}{l} \mathbb{R}^2 \\ \mathbf{p} = [u, v] \Rightarrow \mathbf{p}_H = [u, v, 1] \\ \mathbf{p}_H = [u, v, w] \Rightarrow \mathbf{p} = \left[\frac{u}{w}, \frac{v}{w}\right] \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \mathbb{R}^3 \\ \mathbf{p} = [x, y, z] \Rightarrow \mathbf{p}_H = [x, y, z, 1] \\ \mathbf{p}_H = [x, y, z, w] \Rightarrow \mathbf{p} = \left[\frac{x}{w}, \frac{y}{w}, \frac{z}{w}\right] \end{array}$$

- ◆ Lineární transformace souřadnic

$$\mathbb{R}^2 : \quad \mathbf{p}'_H = \mathbf{P}^{3 \times 3} \mathbf{p}_H \qquad \mathbb{R}^3 : \quad \mathbf{p}'_H = \mathbf{P}^{4 \times 4} \mathbf{p}_H$$

# Transformace souřadnic

## Euklidova (rigid) transformace souřadnic

$$\mathbf{p}'_H = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{p}_H, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

kde  $\mathbf{R}$  je rotační matice

Maticový zápis v homogenních a kartézských souřadnicích

$$\mathbf{p}'_H = \mathbf{H} \mathbf{p}_H$$

$$\mathbf{p}' = \mathbf{R} \mathbf{p} + \mathbf{t}$$

Opačná (inverzní) transformace

$$\mathbf{p}_H = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{p}'_H$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}^T (\mathbf{p}' - \mathbf{t})$$

## Afinní a projektivní transformace

$$\mathbf{p}'_H = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{p}_H$$

a

$$\mathbf{p}'_H = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{t} \\ \mathbf{v}^T & v \end{bmatrix} \mathbf{p}_H$$



$\mathbb{R}^2$  - přímka

$\mathbb{R}^3$  - rovina

**Parametrické vyjádření (parametry  $s, t$ )**

$$\begin{aligned}u &= u_0 + a_1s \\v &= v_0 + a_2s\end{aligned}$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 + \mathbf{a}s$$

$$\begin{aligned}x &= x_0 + a_1s + b_1t \\y &= y_0 + a_2s + b_2t \\z &= z_0 + a_3s + b_3t\end{aligned}$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 + \mathbf{a}s + \mathbf{b}t$$

**Obecná rovnice (maticově v homogenních souřadnicích)**

$$au + bv + c = 0$$

$$\mathbf{A}\mathbf{p}_H = \mathbf{0}, \text{ kde } \mathbf{A} = [a, b, c]$$

$$ax + by + cz + d = 0$$

$$\mathbf{A}\mathbf{p}_H = \mathbf{0}, \text{ kde } \mathbf{A} = [a, b, c, d]$$

**Normála  $\mathbf{n}$**

$$\mathbf{n} = [a, b] / \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\mathbf{n} = [a, b, c] / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

**Vzdálenost  $\Delta$  bodu  $\mathbf{p}_1$**

$$\Delta = \frac{|ax_1 + by_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$\Delta = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

## Přímka v $\mathbb{R}^3$

### Parametrické vyjádření (parametr $s$ )

$$\begin{aligned}x &= x_0 + a_1s \\y &= y_0 + a_2s \quad \equiv \quad \mathbf{p} = \mathbf{p}_0 + \mathbf{a}s \\z &= z_0 + a_3s\end{aligned}$$

### Průsečnice dvou rovin (řešení soustavy lineárních rovnic)

$$\begin{aligned}a_1x + b_1y + c_1z + d_1 &= 0 \\a_2x + b_2y + c_2z + d_2 &= 0\end{aligned}$$

### Řešení soustavy homogenních lineárních rovnic (SVD)

- ◆ Soustava rovnic:  $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{0}$ , matice  $\mathbf{A}$  je známá, hledáme řešení, kde  $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ .
- ◆ SVD dekompozice:  $\mathbf{A} = [\mathbf{U}|\mathbf{U}_0]_{m \times m} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{n \times n} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} [\mathbf{V}|\mathbf{V}_0]_{n \times n}^T$
- ◆ Vektor  $\mathbf{V}_0$  je pravým singulárním vektorem, který odpovídá nulovému vlastnímu číslu matice  $\mathbf{A}$ . Potom řešením rovnice je  $\mathbf{x} = \mathbf{V}_0$ .
- ◆ Pokud matice  $\mathbf{A}$  nemá nulové vlastní číslo a  $\mathbf{V}_0$  odpovídá nejmenšímu z vlastních čísel, pak je řešením rovnice  $\mathbf{x} = \mathbf{V}_0$ . Toto řešení minimalizuje normu  $\mathbf{A}\mathbf{x}$ .

## Obraz z kamery

Pořízení obrazu a jeho reprezentace

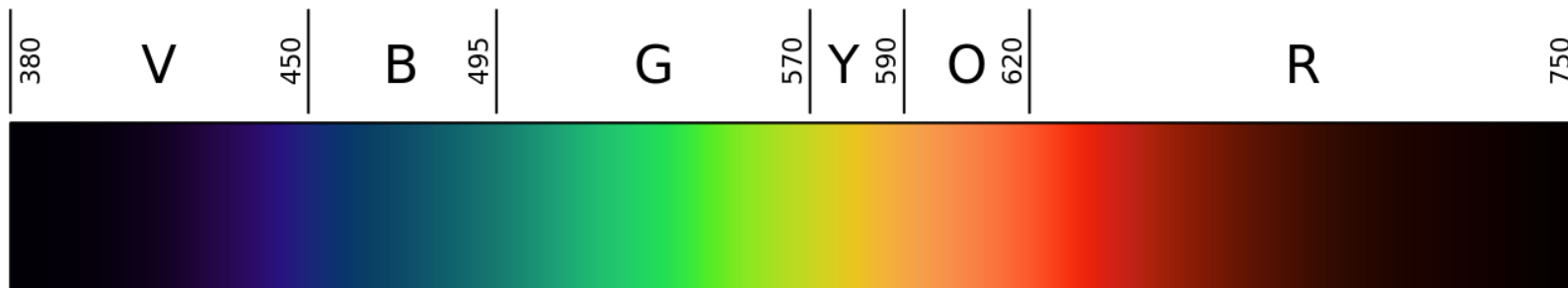
# Světlo

**Světlo = elektromagnetické záření**

**Viditelná část spektra: 390 – 760 nm (390–790 THz)**

**Parametry záření:**

- ◆ Vlnová délka (frekvence) záření je detekována kamerou nepřímo.
- ◆ Amplituda (intenzita) je přímo kamerou snímána.
- ◆ Polarizace (příčné vlny) se detekuje pomocí polarizačních filtrů.
- ◆ Fáze má význam jen pro koherentní světlo/zobrazení (holografie, interferometrie).



vlnová délka uvedena v nanometrech [nm]

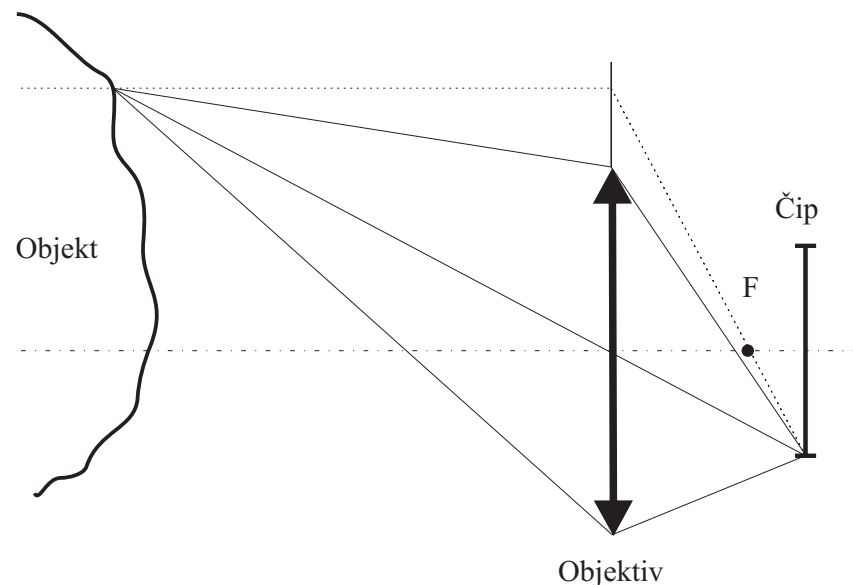
# Formování obrazu

## Klasický objektiv

- ◆ Vzdálenost objektu od scény  $\gg$  ohnisková vzdálenost.
- ◆ Objektiv modelujeme jako tenkou čočku (středové promítání)

## Vznik obrazu

- ◆ Světlo se odráží od povrchu objektu.
- ◆ Odražené světlo promítá objektiv na čip (snímač).
- ◆ Snímač převádí světlo (fotony) na elektrický signál.

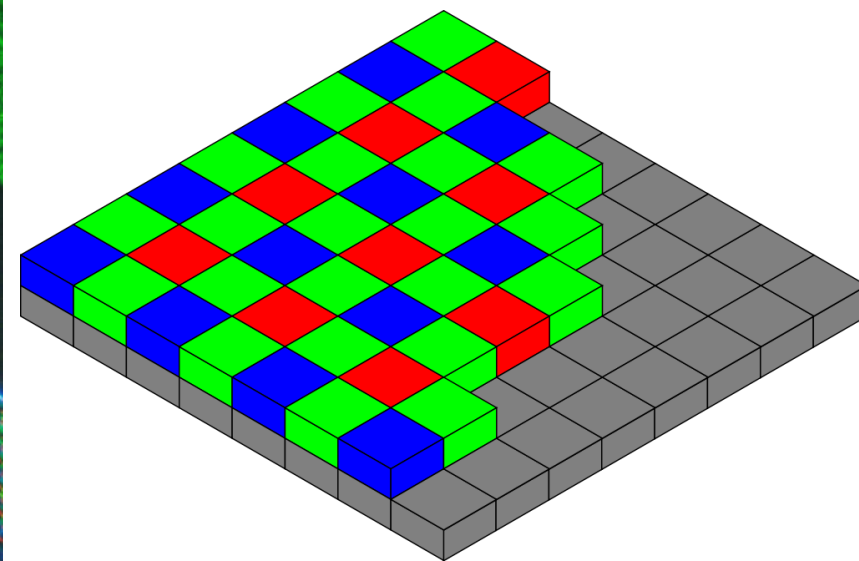
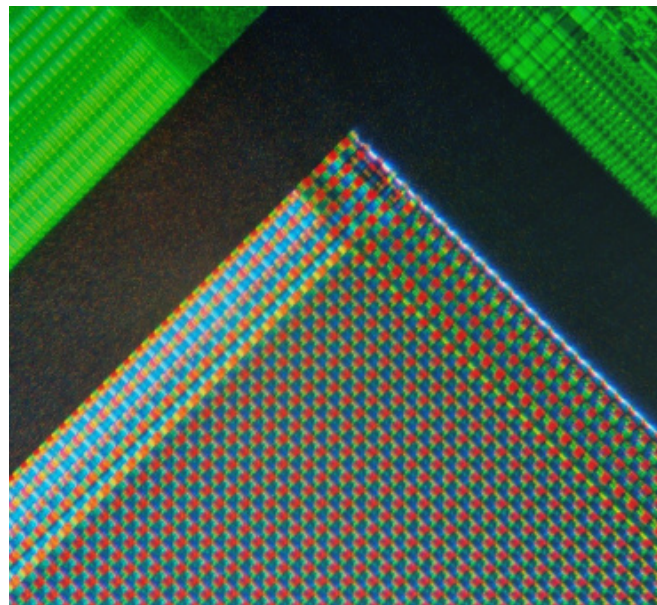
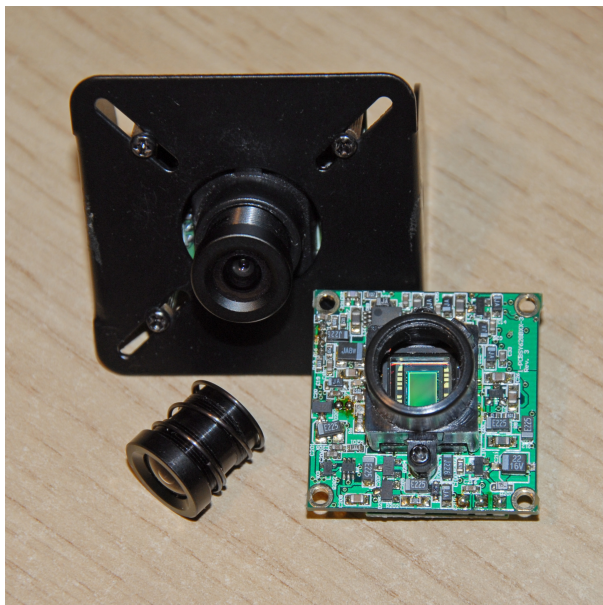


# Snímač - obrazový senzor

14/28

## Obvyklá realizace snímače

- ◆ Snímač se skládá z jednotlivých citlivých buněk - obrazových bodů (pixelů).
- ◆ Dopadající světlo (fotony) se v polovodiči mění na nábojové páry (elektron-díra).
- ◆ Nábojové páry se ve statickém elektrickém poli mění na proudové impulzy.
- ◆ Impulzy jsou po dobu expozice integrovány (nabíjení/vybíjení kondenzátoru).
- ◆ Obrazové body tvoří pravoúhlou síť se stejnými rozestupy v obou směrech.



# Odrazivost povrchu

## Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

Obousměrná distribuční funkce odrazu světla

$$f(\omega_i, \omega_e, \lambda) = \frac{dL_e(\omega_e, \lambda)}{dE_i(\omega_i, \lambda)} = \frac{dL_e(\omega_e, \lambda)}{L_i(\omega_i, \lambda) \cos \Theta_i d\omega_i}$$

$$dL_e(\omega_e, \lambda) = f(\omega_i, \omega_e, \lambda) \cdot L_i(\omega_i, \lambda) \cos \Theta_i d\omega_i$$

- $f(\omega_i, \omega_e, \lambda)$  ... **BRDF**, obvykle  $< 1$
- $\lambda$  ... vlnová délka světla
- $\omega_i$  ... směr dopadajícího paprsku
- $\omega_e$  ... směr k pozorovateli - odražený paprsek
- $L_e(\omega_e, \lambda)$  ... odražená zář (radiance)
- $E_i(\omega_i, \lambda)$  ... ozáření povrchu (irradiance)
- $L_i(\omega_i, \lambda)$  ... zář (radiance) dopadající na povrch ze směru  $\omega_i$
- $\Theta_i$  ... úhel mezi dopadajícím paprskem a normálou povrchu



# Vliv osvětlení na obraz

16/28

## Rubikova kostka

- ◆ Osvětlení sluncem.
- ◆ Stín zprava osvětlen navíc žárovkou.
- ◆ Různé nastavení vyvážení bílé.



## Barevné spektrum

- ◆ Osvětlení sluncem.
- ◆ Stín vlevo osvětlen navíc žárovkou.

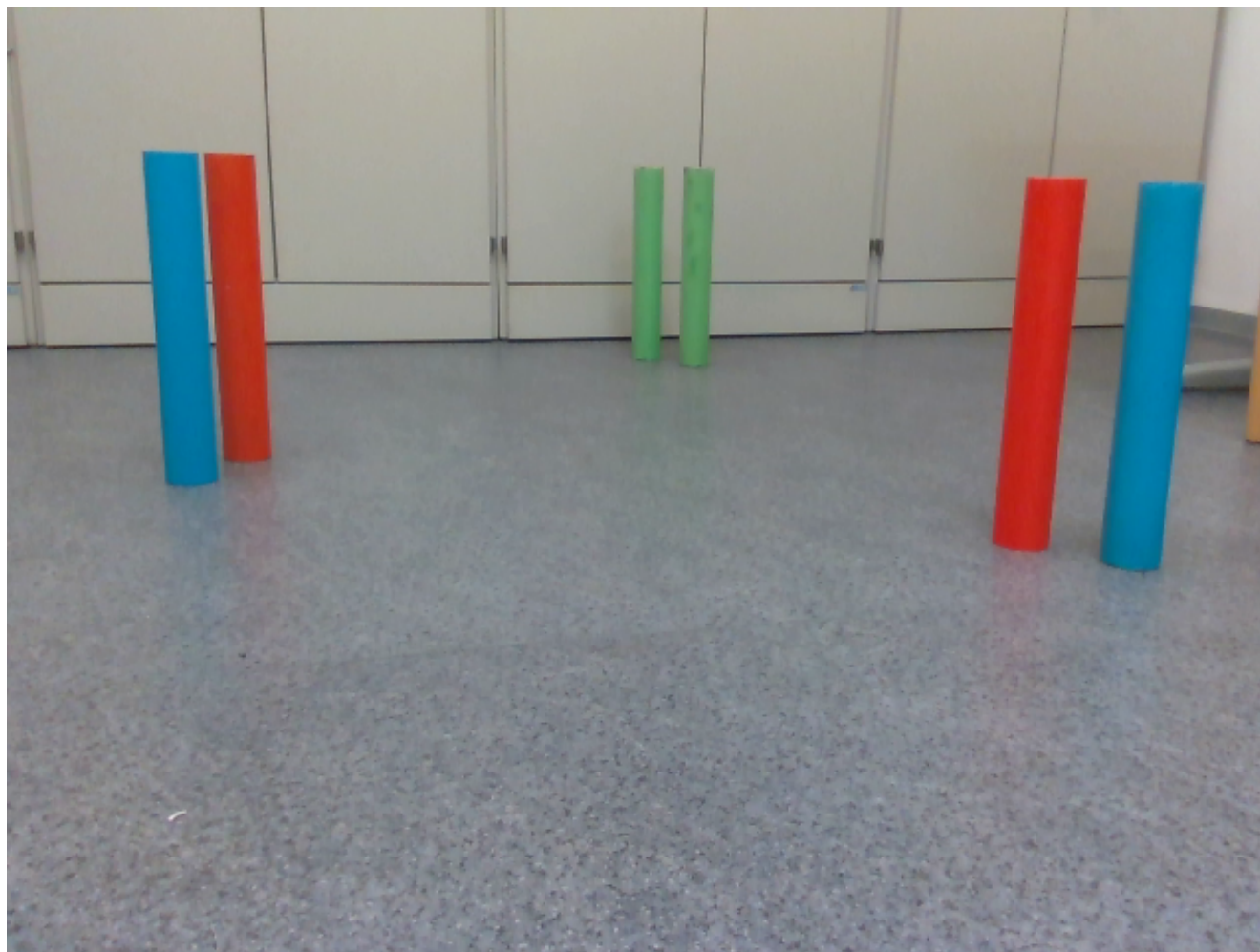




# Obraz z kamery na robotu

17/28

## RGB snímek



```
I = turtle.get_rgb_image()
```

```
element = I [řádek, sloupec, barva] ∈ ⟨0; 255⟩
```

```
barva ∈ [0, 1, 2] ≡ B, G, R
```

## Segmentace a popis objektů

Prahování v prostoru HSV, spojitě oblasti,  
popis objektů

# Segmentace

19/28

## Princip segmentace

- ◆ Podstatou je rozdělit obraz na popředí (objekty zájmu) a pozadí.
- ◆ Výstupem segmentace je binární obrázek.
- ◆ Obrazové body popředí/pozadí jsou obvykle reprezentovány log. 1/0.
- ◆ Existuje řada různých metod segmentace



## Příklady segmentačních metod:

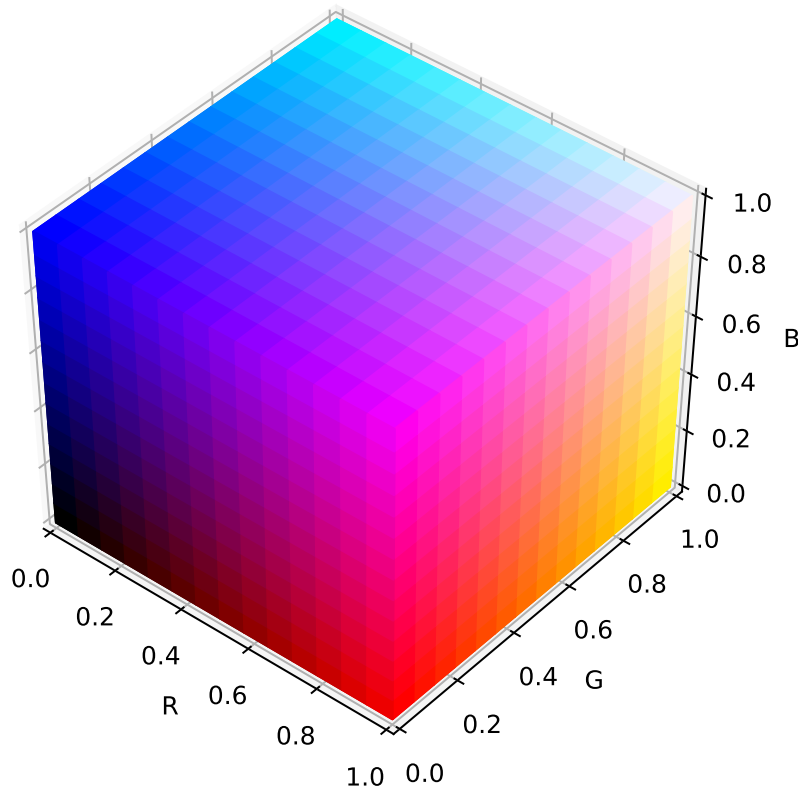
- ◆ Prahování (tresholding)
- ◆ Shluková analýza (K-means)
- ◆ Hranová detekce (edge detection)
- ◆ Aktivní kontury (active contours)
- ◆ Narůstání oblastí na základě podobnosti bodů
- ◆ Statistické metody (Markov random fields,...)



# Barevný prostor

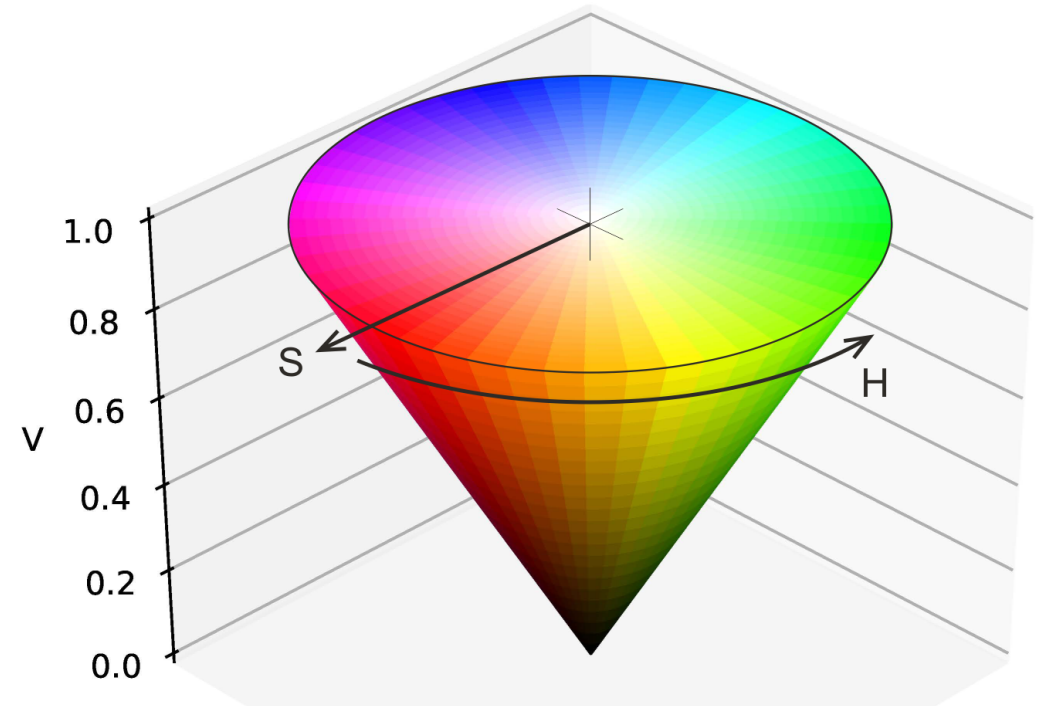
20/28

## RGB



- ◆ Red - intenzita červeného kanálu.
- ◆ Green - intenzita zeleného kanálu.
- ◆ Blue - intenzita modrého kanálu.

## HSV

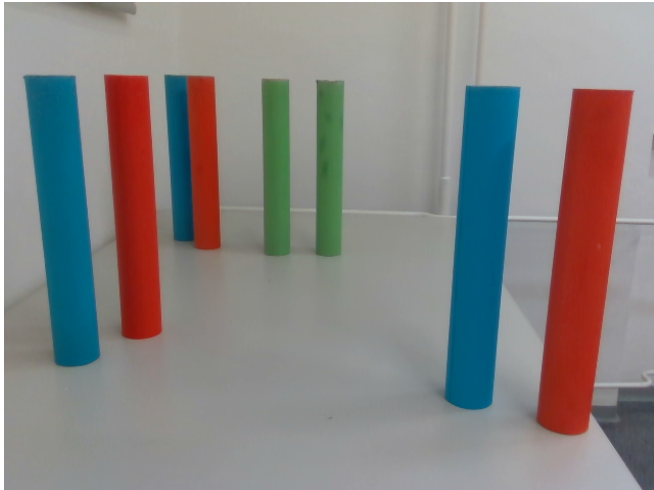


- ◆ Hue - odstín barvy odpovídá dominantní vlnové délce (spektrální barvě).
- ◆ Saturation - sytost barvy popisuje, jak je barva vzdálena od neutrální šedé/bílé
- ◆ Value - hodnota jasu vyjadřuje kolik světla/energie se přenáší (barva odráží).

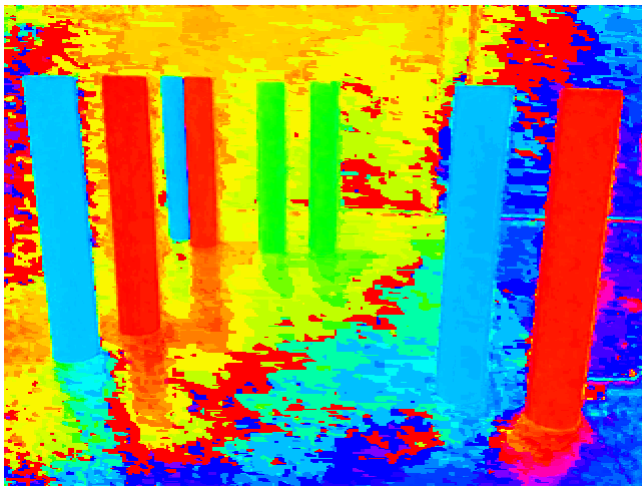
## Snímek v prostoru HSV

21/28

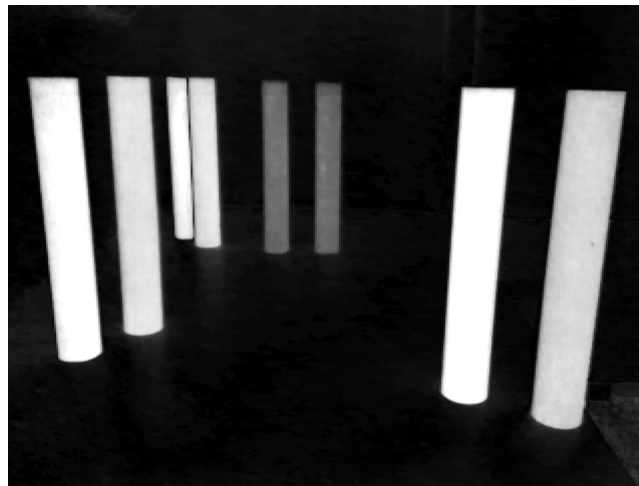
element =  $I^{HSV}$  [řádek, sloupec, barva], barva  $\in [0, 1, 2] \equiv H, S, V$



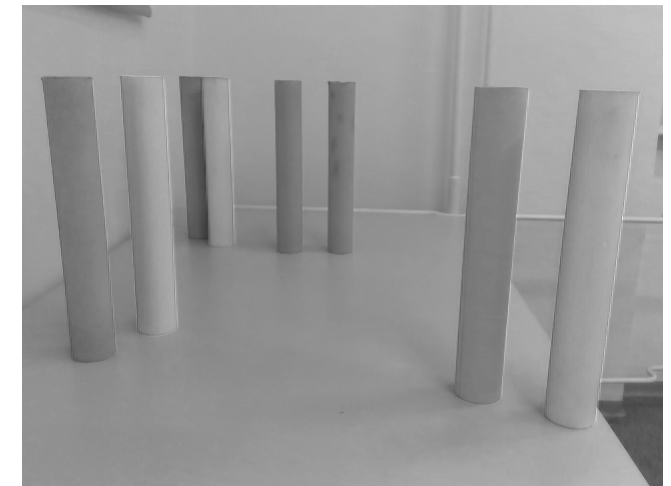
	BGR	HSV
Modrá:	[255, 0, 0]	[120, 255, 255]
Zelená:	[0, 255, 0]	[60, 255, 255]
Červená:	[0, 0, 255]	[0, 255, 255]
Fialová:	[255, 0, 255]	[150, 255, 255]
Bílá:	[255, 255, 255]	[0, 0, 255]



$H \in \langle 0; 179 \rangle$



$S \in \langle 0; 255 \rangle$



$V \in \langle 0; 255 \rangle$

### Převod z RGB do HSV

```
hsv = cv2.cvtColor(im, cv2.COLOR_BGR2HSV)
```

## Segmentace prahování (thresholding)

22/28

Segmentujeme na základě barvy hledaného objektu.  
Pracujeme v barevném prostoru HSV.

◆ Zvolíme referenční barvu (fialová)

$$I_{ref}^{BGR} = [22, 38, 158] \rightarrow I_{ref}^{HSV} = [4, 220, 158]$$

◆ Definujeme podmínky

1. Odstín barvy je podobný referenční barvě:

$$|I_{ref}^H - I^H| < t_1$$

2. Tmavé oblasti (nejistá barva) nejsou popředím:

$$I^V > t_2$$

3. Hledané objekty jsou barevně saturované:

$$I^S > t_3$$

◆ Stanovíme jednotlivé prahy

- Prahы nastavujeme na základě výsledku segmentace
- Vždy nutno testovat na větším počtu snímků (pořízeny za různých podmínek)



Mírný práh



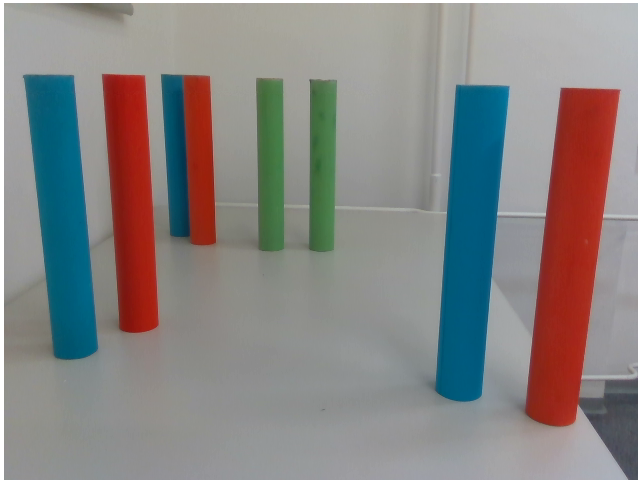
Optimální práh



Přísný práh



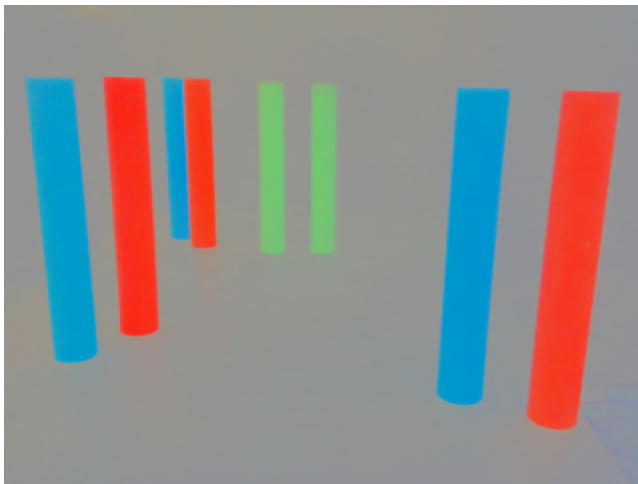
## Segmentace v RGB



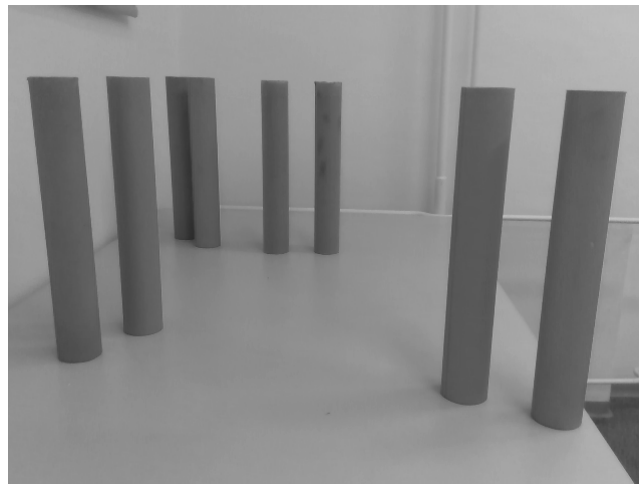
- ◆ RGB snímek normalizujeme intenzitou  

$$I_{u,v} = \|I_{u,v}^{BGR}\|, \bar{I}_{u,v}^{BGR} = I_{u,v}^{BGR} / I_{u,v}$$
- ◆ Referenční barva:  $I_{ref}^{BGR} = [22, 38, 158]$
- ◆ Referenční barva transformovaná:  

$$I_{ref} = 164.0, \bar{I}_{ref}^{BGR} = [0.134, 0.232, 0.963]$$
- ◆ Prahování:  $I_{u,v} > t_1$  a  $\|\bar{I}_{u,v}^{BGR} - \bar{I}_{ref}^{BGR}\| < t_2$



RGB normalizované



Intenzita



Segmentace

## Označení spojitých oblastí (labeling)

24/28

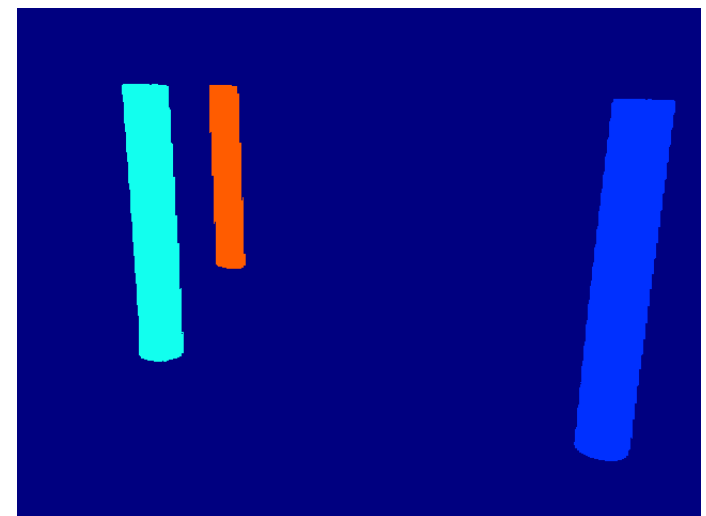
- ◆ Vstupem je binární obraz (pozadí/popředí)
- ◆ Výstupem je obraz s indexy (labels) spojitých oblastí
- ◆ Obrazové body každé spojité oblasti jsou označeny vlastním indexem
- ◆ Spojitost oblastí: 4-okolí, 8-okolí



### Realizace v OpenCV

```
out = cv2.connectedComponentsWithStats( binary_mask.astype(np.uint8) )
```

out[0] ... počet oblastí,  
 out[1] ... obraz s indexy oblastí  
 out[2] ... parametry oblastí  
 [bod nejvíce vlevo, bod nejvýše, šířka, výška, plocha],  
 out[3] ... střed / těžiště oblasti.  
 PZOR: První oblast je pozadí (index 0)





# Popis oblastí

OpenCV počítá většinu parametrů na základě obrysu (countour).

```
img_map, contours, hierarchy =  
    cv2.findContours(interest, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_NONE)  
cnt = contours[k]
```

## Parametry spojitých oblastí (Area & Contour Properties)

- ◆ Plocha  $S$  a obvod  $O$

$$\text{Kompaktnost (compactness)} = \frac{O^2}{S}$$

```
area = cv2.contourArea(cnt)  
lng = cv2.arcLength(cnt, True)
```

- ◆ Střed oblasti (těžiště)

```
M = cv2.moments(cnt)  
cu = (M['m10']/M['m00'])  
cv = (M['m01']/M['m00'])
```

- ◆ Momenty spojitě oblasti

$$m_{pq} = \sum_u \sum_v u^p v^q I_b(u, v)$$
$$\mu_{pq} = \sum_u \sum_v (u - \bar{u})^p (v - \bar{v})^q I_b(u, v)$$

```
x, y, w, h = cv2.boundingRect(cnt)
```

- ◆ Nejmenší opsaný obdélník (strany  $a$ ,  $b$ )

$$\text{Pravoúhlost (rectangularity)} = \frac{a \cdot b}{S}$$

```
rect = cv2.minAreaRect(cnt)  
box = cv2.boxPoints(rect)
```

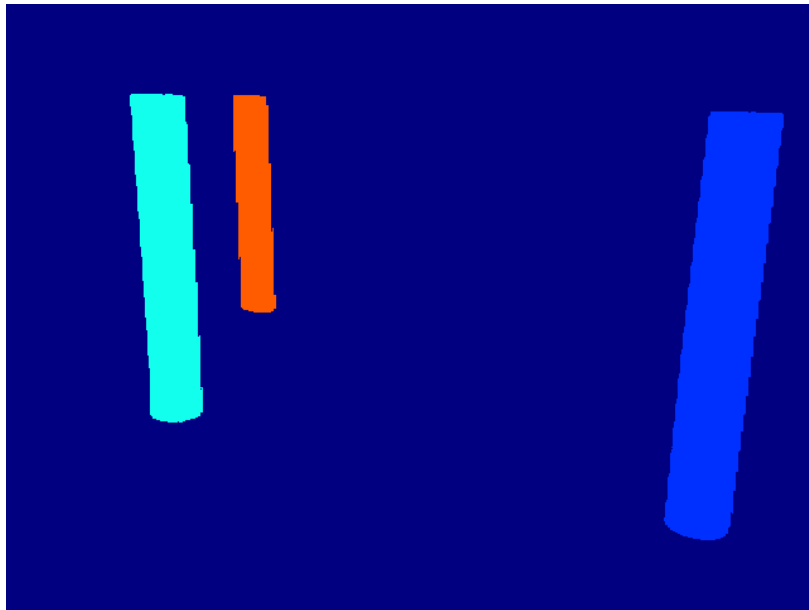
- ◆ Konvexní obal (plocha  $H$ , obvod)

$$\text{Členitost (solidity)} = \frac{S}{H}$$

```
hull = cv2.convexHull(cnt)
```

## Výběr oblastí zájmu

Základní parametry poskytuje “labeling”



Parametry oblastí (řazeno dle plochy):

$[-, -, \text{šířka}, \text{výška}, \text{plocha}, c_v, c_u]$

[ 0, 0, 640, 480, **266997** , 312.90, 241.69]

[ 518, 84, 100, 352, **20520** , 565.92, 254.10]

[ 96, 70, 68, 282, **12578** , 128.85, 206.27]

[ 180, 71, 44, 224, **6286** , 198.56, 175.78]

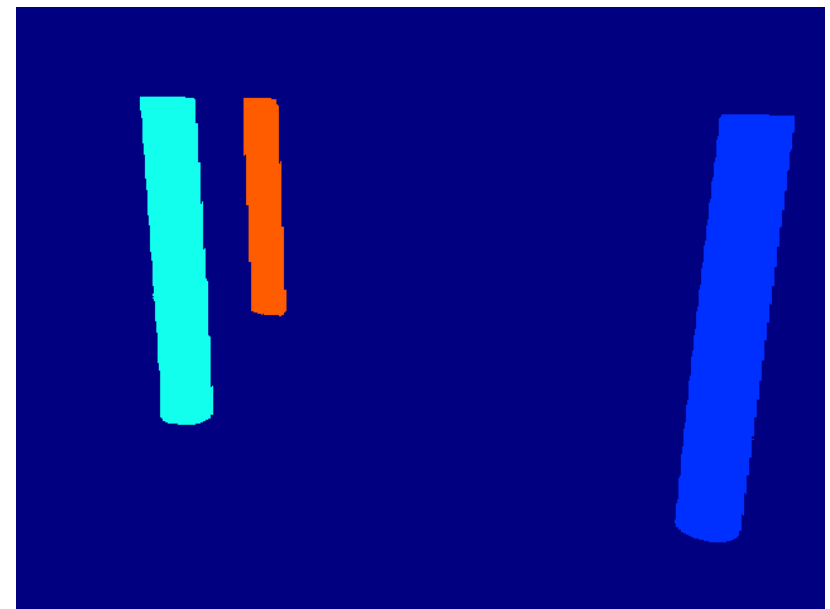
[ 0, 342, 20, 15, **156** , 7.14, 348.53]

[ 88, 7, 24, 10, **133** , 98.91, 11.74]

[ 0, 322, 14, 12, **100** , 4.18, 328.30]

### Identifikace objektů

- ◆ Hledáme objekty relativně velké.
- ◆ Stanovíme podmínku na plochu:  $S > t_4$
- ◆ Sloupky jsou v obraze svislé a tenké.
- ◆ Stanovíme minimální poměr šířky a výšky:  
 $\frac{h}{w} > t_5$



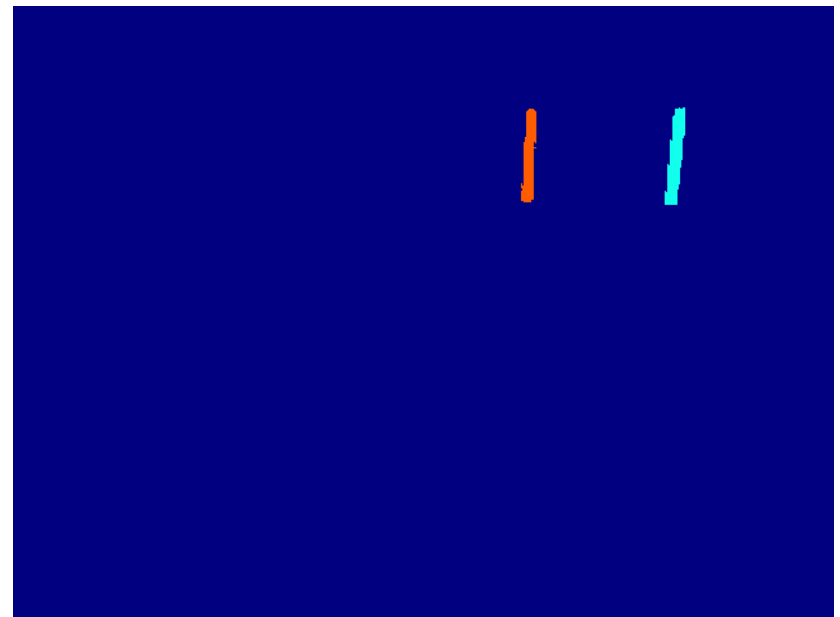
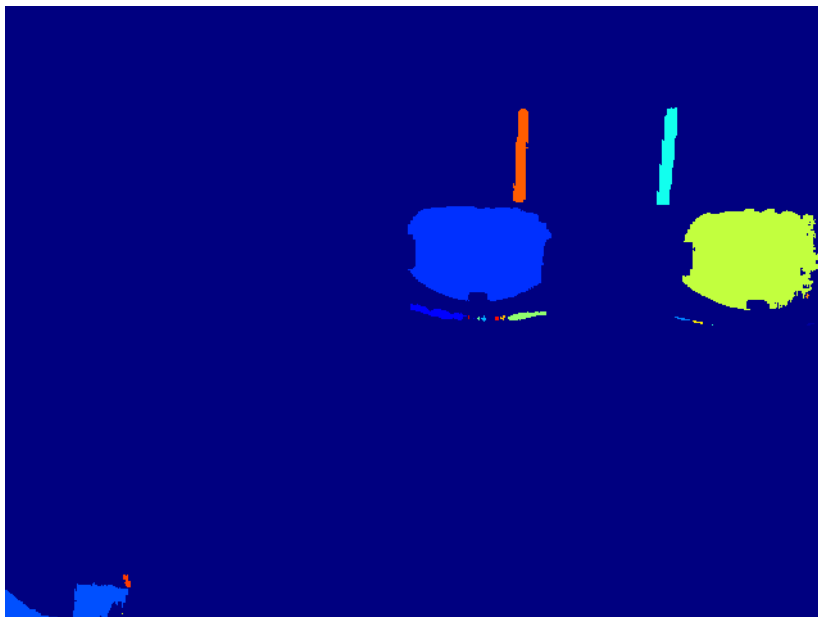
# Segmentace v RGB



Parametry oblastí (řazeno dle plochy):

$[-, -, \text{šířka}, \text{výška}, \text{plocha}, c_v, c_u]$

[ 0, 0, 640, 480, **290648** , 313.04, 241.03]  
[ 314, 156, 112, 74, **6686** , 368.57, 190.28]  
[ 528, 158, 112, 79, **6609** , 581.55, 194.96]  
[ 0, 449, 96, 31, **1465** , 51.03, 466.71]  
[ 508, 79, 16, 76, **729** , 515.99, 117.23]  
[ 396, 80, 12, 73, **605** , 401.96, 117.16]  
[ 316, 232, 44, 13, **220** , 336.57, 238.59]



## Zpracování obrazu

[Sonka1993] Mialn Sonka, Vaclav Hlavac a Roger Boyle. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. ISBN: 978-0-412-45570-4, Springer US, 1993.

[Zanuttigh2016] Pietro Zanuttigh, Giulio Marin, Carlo Dal Mutto, Fabio Dominio, Ludovico Minto a Guido Maria Cortelazzo. *Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras: Technology and Applications*. ISBN: 978-3-319-30971-2, Springer, 2016.

## Houghova transformace

[DudaHart1972] R.O. Duda a P.E. Hart. *Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures*. Communications of the ACM, 15(1):11 - 15, 1972.

[Ballard1981] D.H. Ballard. *Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes*. Pattern Recognition, ISSN: 0031-3203, 13(2):111 - 122, 1981