

ZPRACOVÁNÍ DIGITALIZOVANÉHO OBRAZU

KKY/ZDO

KATEDRA KYBERNETIKY

učební text (přednášky)

Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.

UK509 (377632548)

E-mail: zelezny@kky.zcu.cz

WWW: <http://www.kky.zcu.cz/cs/courses/zdo>

Literatura:

- Milan Šonka, Václav Hlaváč, Roger Boyle: Image Processing, Analysis and Machine Vision, CL-Engineering, 2007
- Linda G. Shapiro, George C. Stockman: Computer vision, Prentice Hall, 2001

verze souboru 130215

OBSAH

OBSAH	1
1 ÚVOD	3
1.1 CO JE VIDĚNÍ.....	3
1.2 VLASTNOSTI SVĚTLA JAKO ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.	3
1.3 PROČ JE VIDĚNÍ TĚŽKÉ	5
1.4 ZÁKLADNÍ POJMY.....	6
1.5 SMĚRY ZDO.....	10
2 PŘEDZPRACOVÁNÍ	11
2.1 JASOVÉ CHARAKTERISTIKY - HISTOGRAMY	11
2.2 BODOVÉ JASOVÉ TRANSFORMACE	13
2.2.1 JASOVÉ KOREKCE	13
2.2.2 JASOVÉ TRANSFORMACE	14
2.3 GEOMETRICKÉ TRANSFORMACE	16
2.4 LOKÁLNÍ OPERACE PŘEDZPRACOVÁNÍ	19
2.4.1 VYHLAZOVÁNÍ (FILTRACE)	19
2.4.2 GRADIENTNÍ OPERÁTORY	20
2.5 FREKVENČNÍ ANALÝZA.....	24
2.5.1 FOURIEROVA TRANSFORMACE	24
2.6 BARVA	25
2.6.1 STANDARDIZACE BAREV	26
2.6.2 MÍSENÍ BAREV.....	27
2.6.3 REPREZENTACE BAREV	28
2.7 MATEMATICKÁ MORFOLOGIE.....	29
2.7.1 DILATACE A EROZE	30
2.7.2 OTEVŘENÍ A UZAVŘENÍ	32
2.7.3 SKELET.....	34
2.8 SEGMENTACE.....	36
2.8.1 PRAHOVÁNÍ.....	37
2.8.2 SEGMENTACE NA ZÁKLADĚ DETEKCE HRAN	39
2.8.3 SEGMENTACE NARŮSTÁNÍM OBLASTÍ.....	39
2.8.4 SEGMENTACE SROVNÁVÁNÍM SE VZOREM	41
3 POPIS OBJEKTŮ	42
3.1 IDENTIFIKACE OBLASTÍ.....	42
3.2 POPIS TVARU NA ZÁKLADĚ HRANICE OBLASTÍ	44
3.2.1 SLEDOVÁNÍ HRANICE	44
3.2.2 JEDNODUCHÉ GEOMETRICKÉ POPISY HRANICE	44

3.2.3	POPIS HRANICE POSLOUPNOSTÍ SEGMENTŮ	44
3.2.4	FREEMANOVY ŘETĚZOVÉ KÓDY.....	45
3.3	REPREZENTACE A POPIS TVARU VYCHÁZEJÍCÍ Z OBLASTI OBRAZU.....	45
3.3.1	JEDNODUCHÉ SKALÁRNÍ POPISY OBLASTÍ	46
3.3.2	MOMENTOVÝ POPIS.....	49
3.3.3	KONVEXNÍ OBAL	50
4	<u>KLASIFIKACE.....</u>	<u>51</u>
4.1	PŘÍZNAKOVÉ ROZPOZNÁVÁNÍ.....	51
4.1.1	KLASIFIKÁTOR	51
4.1.2	UČENÍ S UČITELEM.....	52
4.1.3	UČENÍ BEZ UČITELE (SHLUKOVÁ ANALÝZA)	52
4.2	STRUKTURÁLNÍ (SYNTAKTICKÉ) METODY	52
5	<u>ANALÝZA POHYBU</u>	<u>54</u>
5.1	ROZDÍLOVÉ METODY ANALÝZY POHYBU	55
5.2	OPTICKÝ TOK	55
5.3	ANALÝZA POHYBU NA ZÁKLADĚ DETEKCE VÝZNAMNÝCH BODŮ	56
6	<u>3D VIDĚNÍ.....</u>	<u>57</u>
7	<u>APLIKACE</u>	<u>62</u>
8	<u>HARDWARE PRO SNÍMÁNÍ OBRAZU</u>	<u>64</u>

1 ÚVOD

1.1 CO JE VIDĚNÍ

Dvě úrovně zpracování:

❖ **Nižší úroveň = DIGITÁLNÍ ZPRACOVÁNÍ OBRAZU**

- ♦ vstupem a výstupem jsou obrazová data (popř. jednoduché charakteristiky obrazu)
- ♦ není využíváno žádné apriorní informace o obrazu
- ♦ využívá se technik zpracování signálů
- ♦ patří sem:
 - komprese obrazu
 - filtrace šumu
 - ostření obrazu
 - jednoduché metody pro hledání objektů v obraze

❖ **Vyšší úroveň = POČÍTAČOVÉ VIDĚNÍ**

- ♦ opírá se o znalosti, cíle, plány k jejich dosažení
- ♦ vytváří reprezentaci / model reálného světa
- ♦ využívá zpětné vazby
- ♦ využívá technik UI
- ♦ inspiruje se v biologickém vidění

Úloha počítačového vidění

Z jednoho obrazu(ů) stojící(ho) objektu sledované(ho) jedním stojícím(i)
sekvence obrazu(ů) pohybující(ho) se scény pohybuje(ho) více pohybujícím(i) se

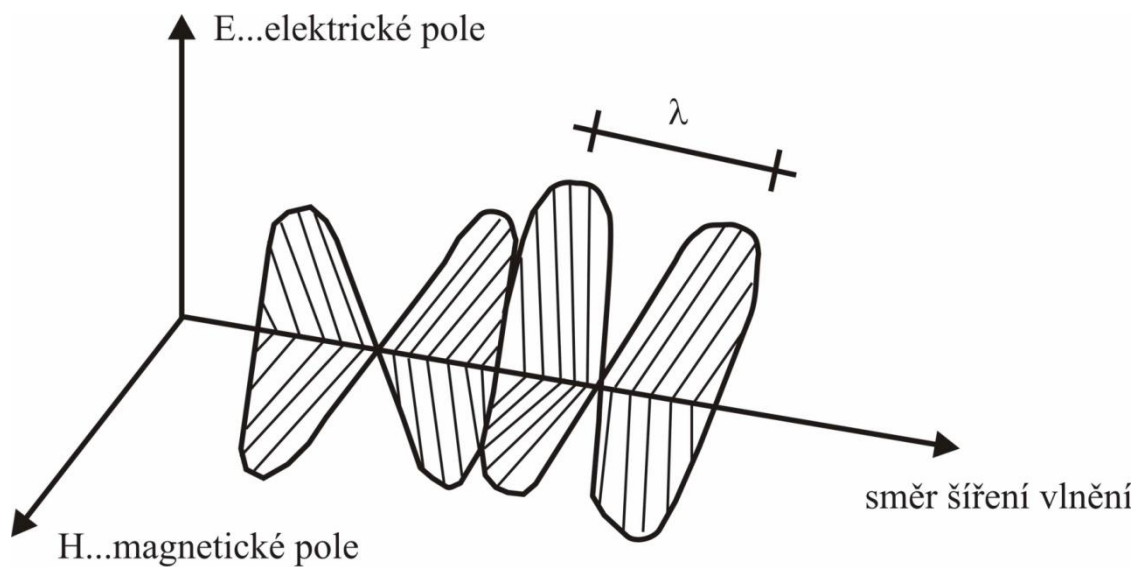
pozorovatelem(li) **POROZUMĚT** objektu a jeho (jejím) (3D) vlastnostem.
scéně

Příbuzné obory:

- ♦ umělá inteligence
- ♦ teorie řízení
- ♦ zpracování signálů
- ♦ neurofyziologie
- ♦ psychologie
- ♦ biologie

1.2 VLASTNOSTI SVĚTLA JAKO ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.

Nositelem informace je elektromagnetické záření, tvořené elektromagnetickými vlnami.



Obr. 1

Základní vlastnosti:

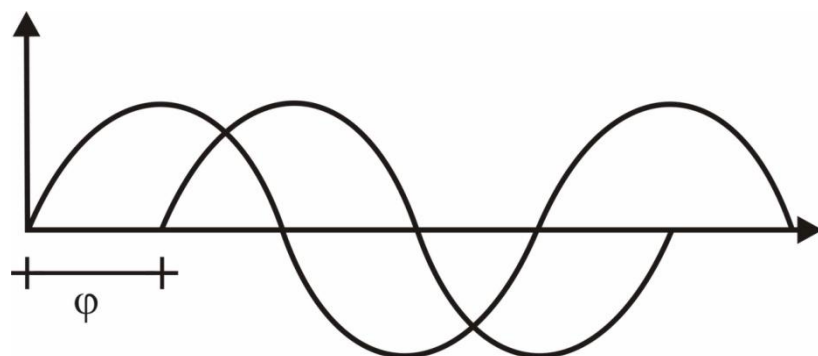
Vlnová délka λ [m]

Frekvence $f = \frac{c}{\lambda}$, kde $c = 299792.46 \text{ km/s} \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ je rychlost světla

Intenzita – velikost záření (bílé světlo – maximální intenzita, černé světlo – nulová intenzita)

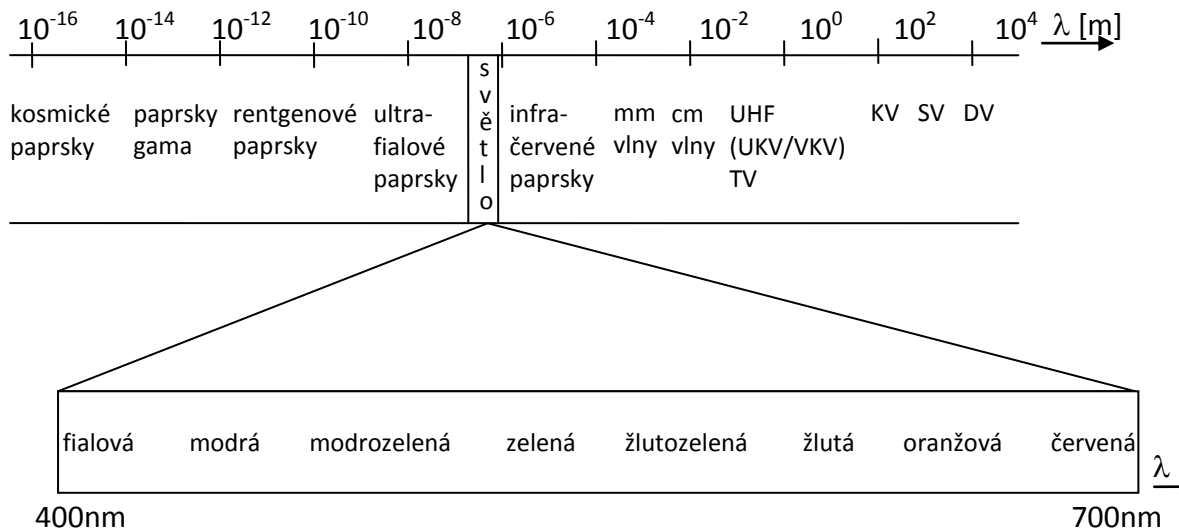
Polarizace – orientace směru vektoru E vzhledem k zemskému povrchu

Fáze



Obr. 2

Spektrum elektromagnetického záření

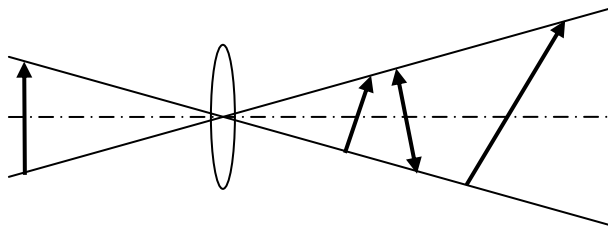


Obr. 3

Viditelné spektrum $\lambda \in \langle 400, 700 \rangle$ nm

1.3 PROČ JE VIDĚNÍ TĚŽKÉ

- Ztráta informace díky perspektivní projekci



řešení:

- 2 kamery \rightarrow stereovidění
- 3 kamery – stačí k úplnému popisu a výpočtu blízkých pohledů
- Měřená jednotka (jas) je veličina závislá na mnoha faktorech:
 - poloze kamery
 - poloze a typu světelného zdroje
 - odrazivosti povrchu
 - orientaci (natočení) povrchu
- Množství dat
 - statický obraz 512 x 512 b / 1B / bod = 256 jasových úrovní 256 kB
 - A4 300dpi / 1B / bod 8 MB
 - digitalizovaný b/w TV signál 768 x 512b / 1B / bod 9600 kB/s

řešení:

hrubá síla – paralelní zpracování

redukce dat – využitím znalosti

- Nejistota
 - přítomnost šumu ztěžuje zpracování
 - nutný stochastický přístup

- ROZPOZNÁVÁNÍ vs. REKONSTRUKCE

Rozpoznávání

- ♦ klasifikuje objekty do několika tříd
- ♦ třídy bývají předem známé

Rekonstrukce

- ♦ hledá fyzické parametry scény – hloubka orientace, barva, odrazivost a další vlastnosti povrchu a zdrojů osvětlení
- ♦ hledá relace mezi objekty

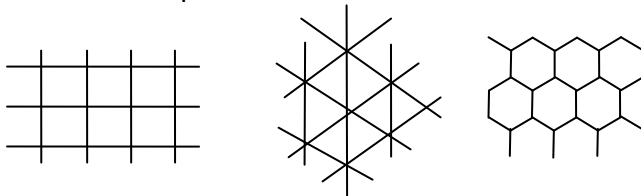
1.4 ZÁKLADNÍ POJMY

Obrazová funkce $f(i, j)$ nebo $f(i, j, t)$ (t je čas)

- ♦ $f(x, y, t) = \int_0^{\infty} e(x, y, t) \cdot S(\lambda) d\lambda$
- ♦ kde: λ ... vlnová délka
- ♦ f ... jas
- ♦ e ... energetické rozložení zdroje světla

Digitalizace obrazu

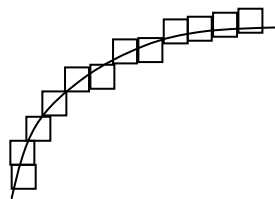
- ♦ vzorkování
 - rozložení bodů v ploše



- ♦
 - čtvercová síť způsobuje topologické problémy – vzdálenost R sousedních bodů
 - hustota bodů
- ♦ vzorkovací teorém
- ♦ ve skutečnosti požadujeme, aby tloušťka čáry byla 4-5 obrazových bodů
- ♦ aliasing / antialiasing



- ♦ měření s vyšší přesností, než je skutečné rozlišení vzorkovacího zařízení
- ♦ (subpixel accuracy)



aproximace
nejmenší čtverce

- ♦
- ♦ kvantizace
- ♦ běžné CCD 5-6 bitů
- ♦ lidské oko 50 úrovní
- ♦ astronomie – vysoká přesnost: 1024, někdy až 32 000 úrovní
- ♦ rovnoměrné rozložení

Oblast – souvislá množina bodů

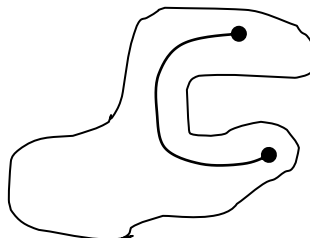
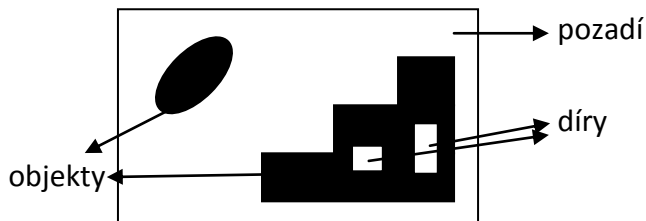
objekty $R = \bigcup_i R_i$, R_i – objekt, region

pozadí R^c

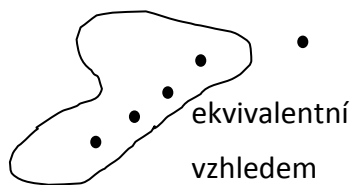
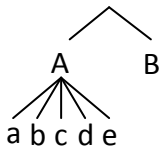
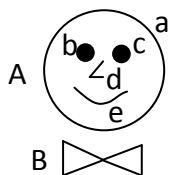
Pozn.: někdy má pozadí dvě části:

pozadí – spojené s okraji obrazu

díry:



Topologie

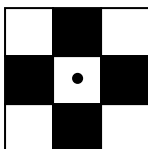


Vzdálenost

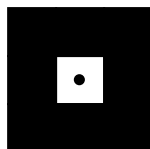
- ♦ *euklidovská:* $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$
- ♦ *city block:* $|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$
- ♦ *chessboard:* $\max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|)$

Sousednost

4 - sousednost



8 - sousednost

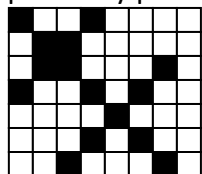


hexagonální

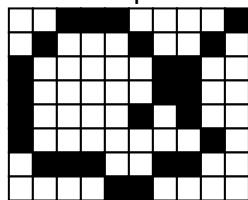


Paradoxy souvislosti

- ♦ přímkový paradox



- ♦ Jordanův paradox



Hranice objektu – množina bodů

hraniční bod – bod oblasti, který má ve svém okolí bod, který už do oblasti nepatří

Vzdálenostní transformace

myšlenka: všechny body pozadí očíslovat číslem, které vyjadřuje vzdálenost k nejbližšímu objektu

3	2	2	1	2	3	3	4
2	1	1	1	1	2	2	3
1	1	1	1	1	1	1	2
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	2	1	1	1	1	2

1.5 SMĚRY ZDO

3D vidění

- vnímání scény
- pohyb robota v prostoru

rozpoznávání – klasifikace objektů do daného počtu tříd

např.:

- rozpoznávání textu (OCR optical character recognition)
- rozpoznávání otisků prstů

segmentace a popis

- segmentace - rozdělení obrazu na objekty a pozadí
- barvení oblastí

3D rekonstrukce obrazu

získání modelu 3D scény, která je snímána 2D kamerou (kamerami)

restaurace obrazu

oprava chyb, způsobených např. špatným zaostřením objektivu, pohybem objektu při příliš dlouhé době expozice apod.

obohacení obrazu

zkvalitnění obrazu pro jeho další pozorování člověkem

počítačová grafika

DTP – desktop publishing – publikování „na stole“

přenos dat

archivace dat

2 PŘEDZPRACOVÁNÍ

DIGITAL IMAGE PROCESSING

(PICTURE)

- ♦ zpracování na nízké úrovni abstrakce
- ♦ vstupem obraz $f(i, j)$
- ♦ výstupem ve většině případů obraz $g(i, j)$

„Nejlepší předzpracování je žádné předzpracování.“

Nejvíce informace je vždy obsaženo v původním obrazu, s každým předzpracováním informace klesá.

CÍL: Úpravy obrazu, které:

- potlačí zkreslení
- zvýrazní rysy obrazu, které jsou důležité pro jeho další zpracování

Dělení metod *podle velikosti okolí bodu* použitého při výpočtu:

Bodové jasové transformace

Geometrické transformace

Lokální operace (filtrace průměrováním, ostření)

Frekvenční analýza

Zpracování obrazu *usnadňuje* apriorní znalost o podmínkách jeho získání a o charakteru poruch.

2.1 JASOVÉ CHARAKTERISTIKY - HISTOGRAMY

Histogram $H(p)$ je funkcí jasu, vyjadřuje četnost bodů s daným jasem

absolutní

$$H(p) = \sum_{i,j} h(i, j, p)$$

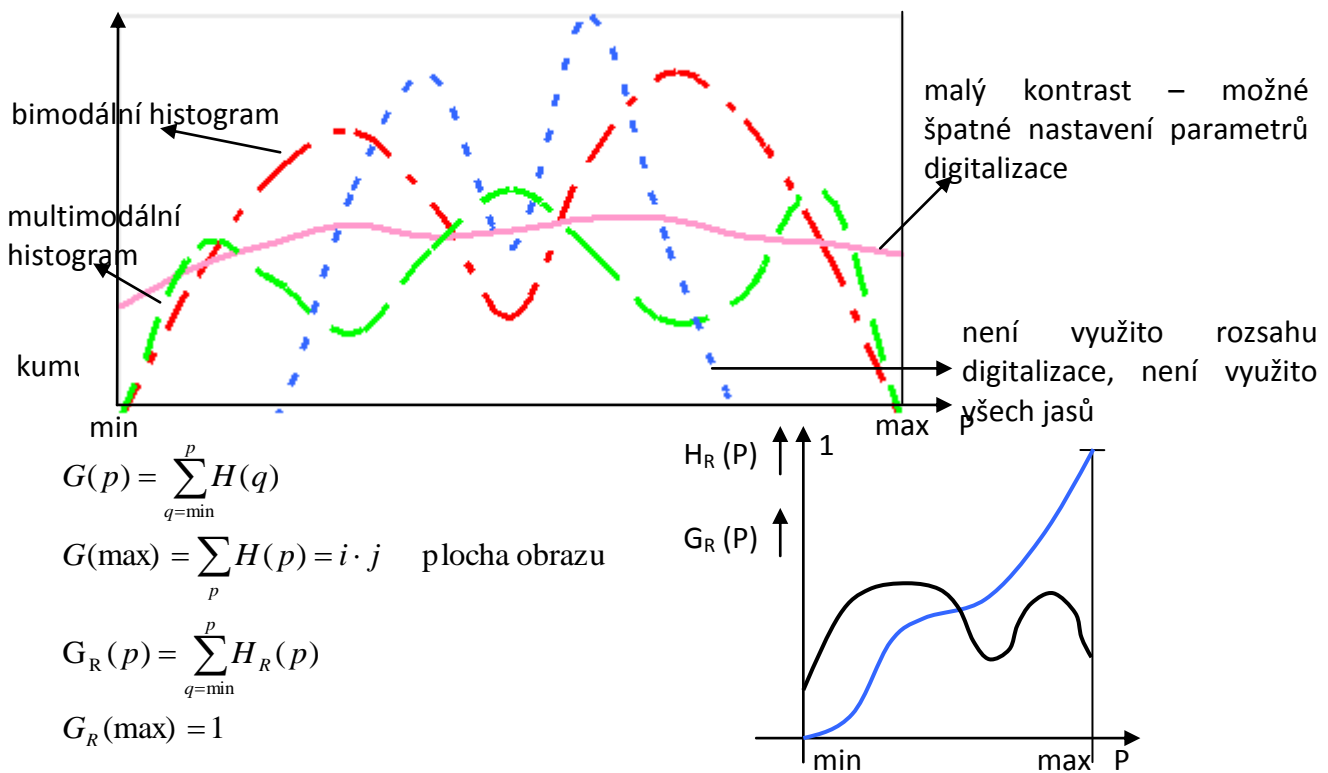
$$h(i, j, p) = \begin{cases} 1 & \text{pro } f(i, j) = p \\ 0 & \text{pro } f(i, j) \neq p \end{cases}$$

relativní

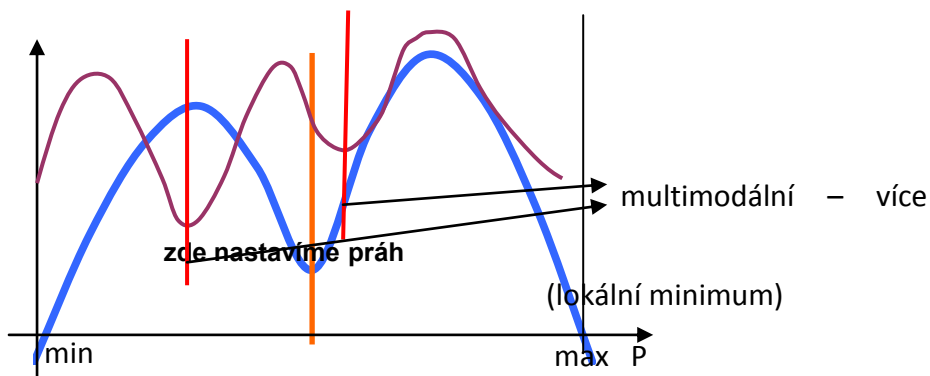
$$H_R(p) = \frac{H(p)}{\sum_p H(p)} = \frac{H(p)}{i \cdot j}$$

$$\sum_p H_R(p) = 1$$

↑ plocha obrazu



Využití histogramu pro segmentaci



Matice sousednosti (cooccurrence matrix)

$$S = [s_{pq}] \quad s_{pq} = \sum_{i,j} g(i, j, p, q)$$

$$g(i, j, p, q) = \begin{cases} 0 & f(i, j) \neq p \\ 0 & f(i, j) = p \\ \wedge \nexists [k, l] : [k, l] \in O_8(i, j) : f(k, l) = q, & \text{kde } O_8(i, j) \text{ je osmiokolí} \\ & f(i, j) = p \\ \text{počet bodů } [k, l] \in O_8(i, j) : f(k, l) = q \end{cases}$$

Vlastnosti matice sousednosti:

- ♦ prvek matice – vyjadřuje, kolikrát jas p sousedí s jasnem q
- ♦ symetrická
- ♦ prvky na diagonále – jas sousedí sám se sebou – měřítko velikosti souvislých ploch
- ♦ součet prvků v daném řádku mimo diagonálního – měřítko hranovosti

Použití:

Rozplav

r - referenční jas

$f(i,j) = r$, jestliže

$K \geq |f(i,j) - r|$... obousměrný rozplav

$K \geq f(i,j) - r \geq 0$... jednosměrný rozplav

světlá \rightarrow tmavá

$0 \geq f(i,j) - r \geq -K$... tmavá \rightarrow světlá,

kde K je počet kroků

Metoda přebarvování

postup:

- na diagonále MS nalezneme nejmenší prvek s_{pp} , pro nějž platí:

$H(p) > 0$

$$\sum_q s_{pq} > 0$$

- v jeho řádku největší prvek mimo diagonálu s_{pq} , $q \neq p$
- všechny body s jasnem p přebarvíme na jas q
- opakujeme tak dlouho, až např. zůstanou pouze 2 barvy (segmentace)
- při posledním kroku pouze jedna barva – souvislá plocha

2.2 BODOVÉ JASOVÉ TRANSFORMACE

2.2.1 Jasové korekce

nový jas bodu je funkcí polohy a jasu

$g(i,j) = \text{FUNC}(i, j, f(i,j))$

nejčastěji:

$$g(i,j) = f(i,j) \cdot OPR(i,j)$$

OPR – matice opravných koeficientů

použití:

- ♦ oprava systematických chyb snímacího řetězce

postup :

- ♦ *Kalibrace* – na snímacím zařízení nasnímáme obraz se známými hodnotami. Z těchto známých správných hodnot a z naměřených hodnot vypočteme matici opravných koeficientů:

$$13 \quad OPR(i,j) = \frac{spr(i,j)}{nam(i,j)}$$

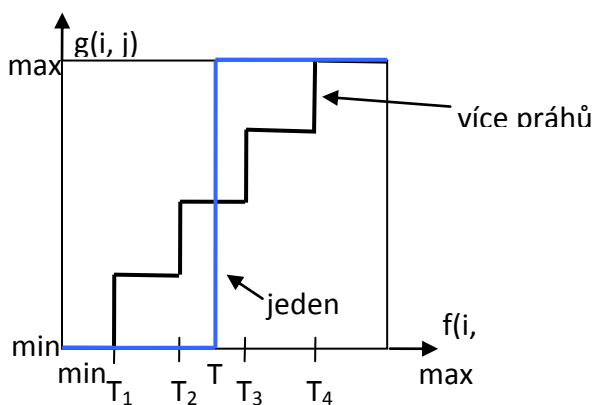
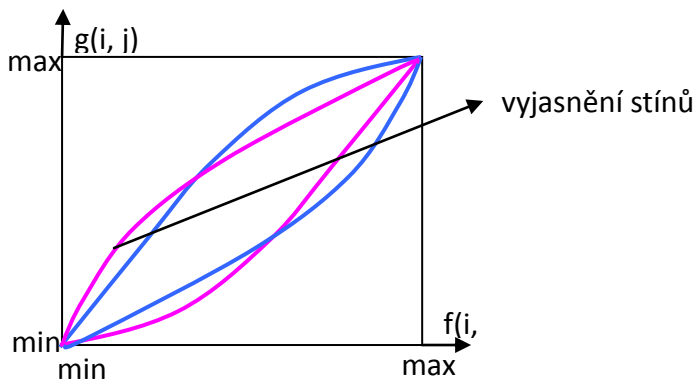
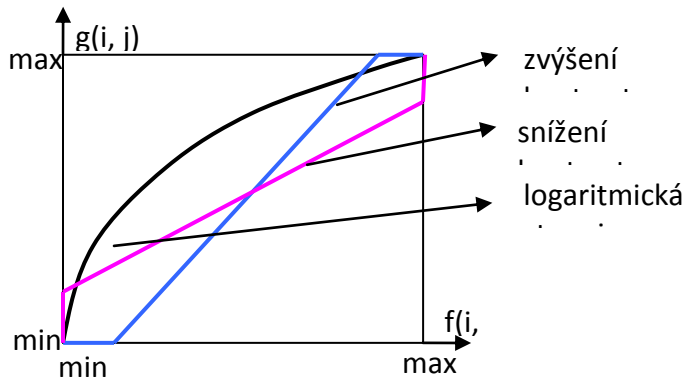
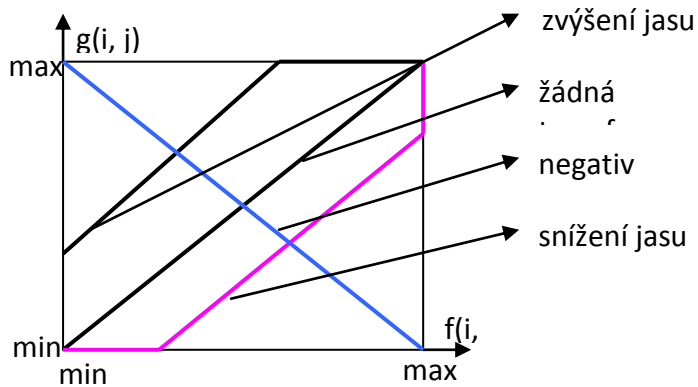
- ♦ každý další snímaný obrázek násobíme takto získanou maticí

2.2.2 Jasové transformace

funkce stejná pro všechny body obrazu

$$g(i,j) = \text{FUNC}(f(i,j)) \quad \text{FUNC nezávisí na } i, j$$

Vyhledávací / převodní tabulka (LookUp Table - LUT)

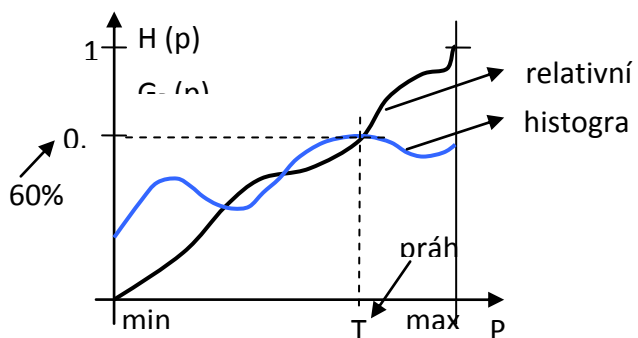


Prahování

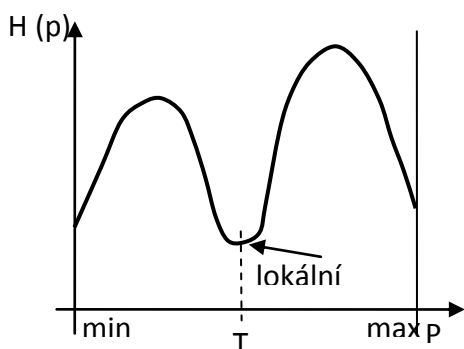
- ♦ segmentace – rozdělení obrazu na oblasti, které souvisejí s reálnými objekty
- ♦ možné postupy volby prahu:

ručně

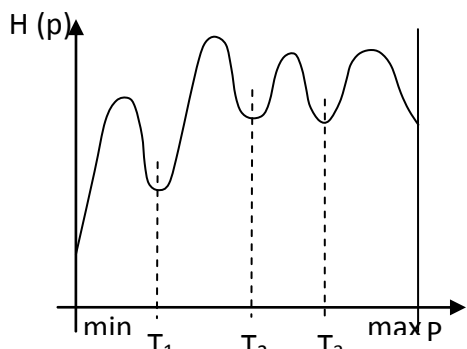
známe podíl zastoupení pozadí a objektů v obraze



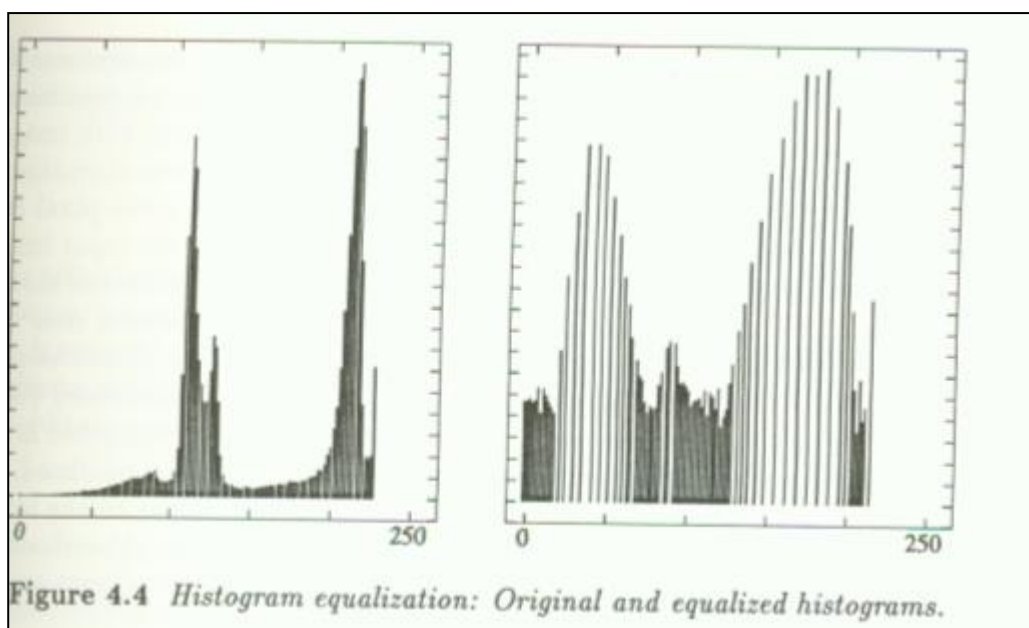
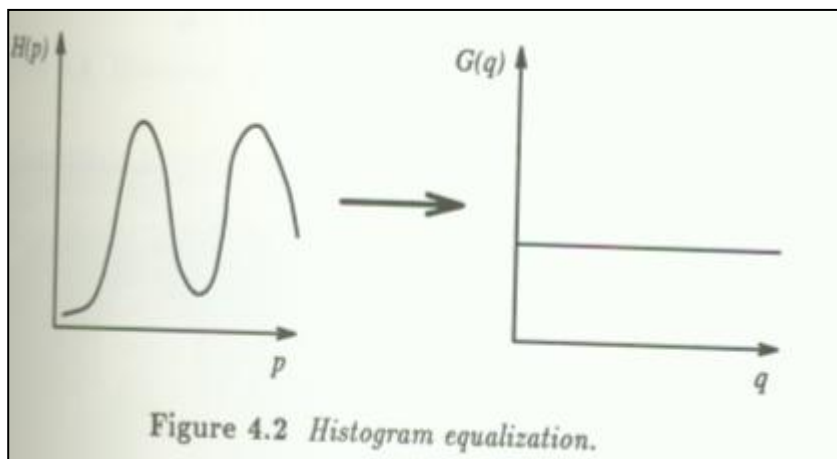
lokální minimum



multimodální histogram



Ekvalizace histogramu

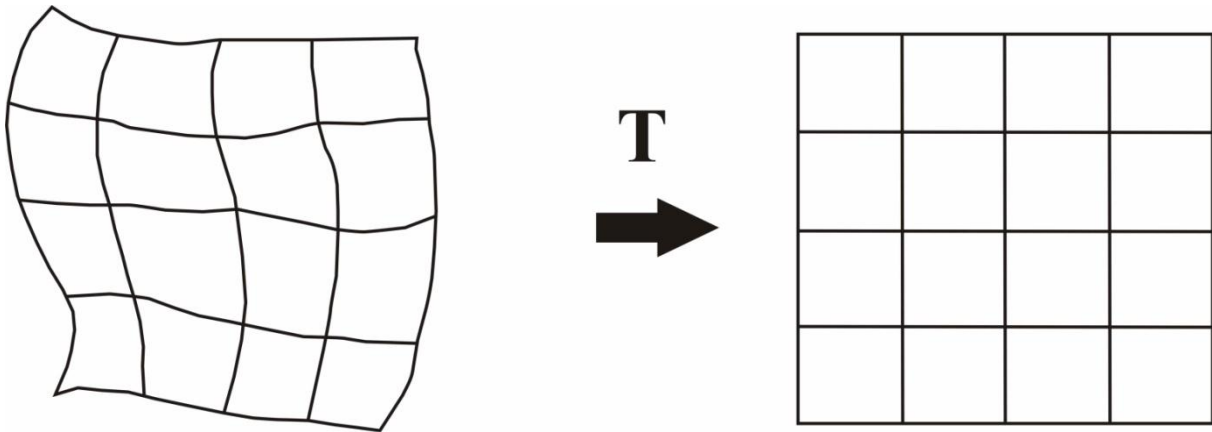


2.3 GEOMETRICKÉ TRANSFORMACE

$$T_G: \quad i' = u(i,j)$$

$$j' = v(i,j)$$

$$g(i',j') = f(i,j)$$



vztah znám - např. rotace, posun, zvětšení, ...

vztah se hledá na základě původního a transformovaného obrazu

- **např.:** *dálkový průzkum země* – korespondence souřadnic na družicovém snímku a na mapě
- **pozn.:** používají se tzv. *vlíčovací body*

2 kroky:

plošná transformace

$$x' = \sum_{r=0}^m \sum_{k=0}^{m-r} a_{rk} x^r y^k \quad y' = \sum_{r=0}^m \sum_{k=0}^m b_{rk} x^r y^k$$

polynom m- tého stupně

bilineární

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy$$

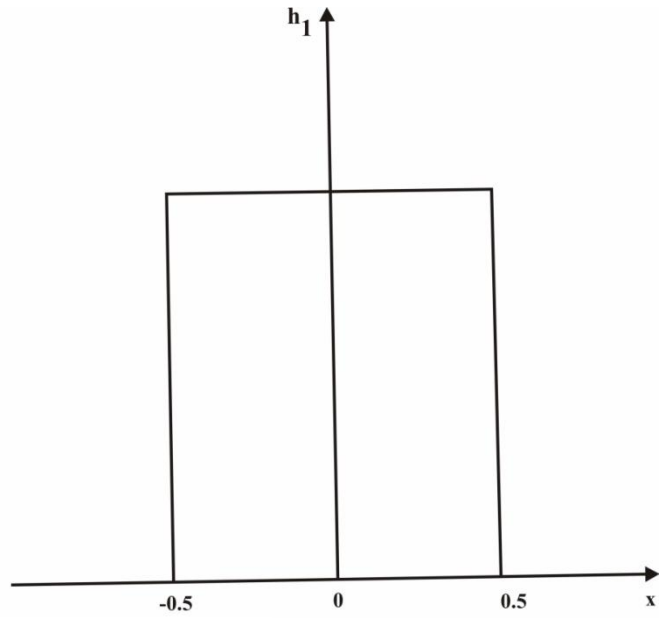
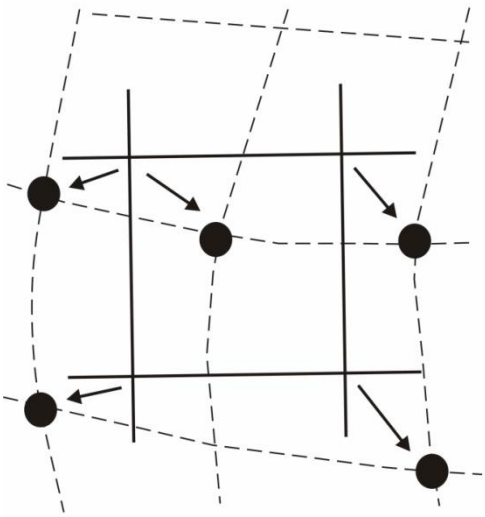
afinní – sem patří např. rotace, posun, zvětšení, zkosení atd.

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y$$

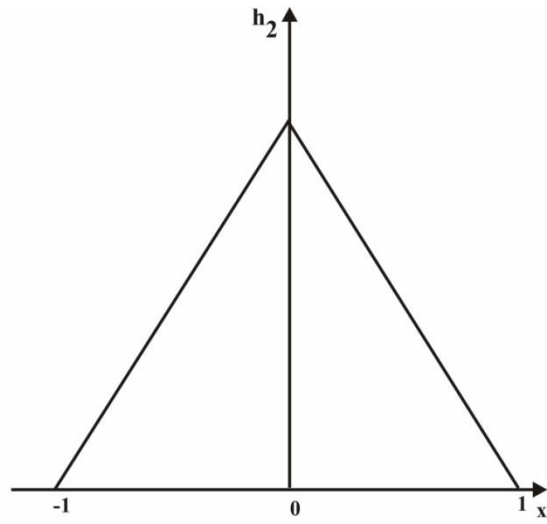
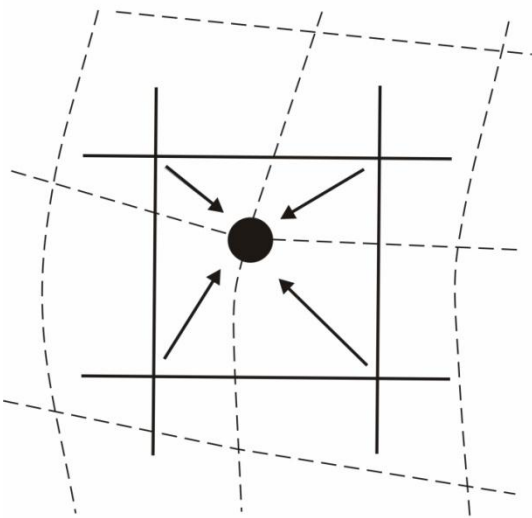
$$y' = b_0 + b_1x + b_2y$$

interpolace jasů

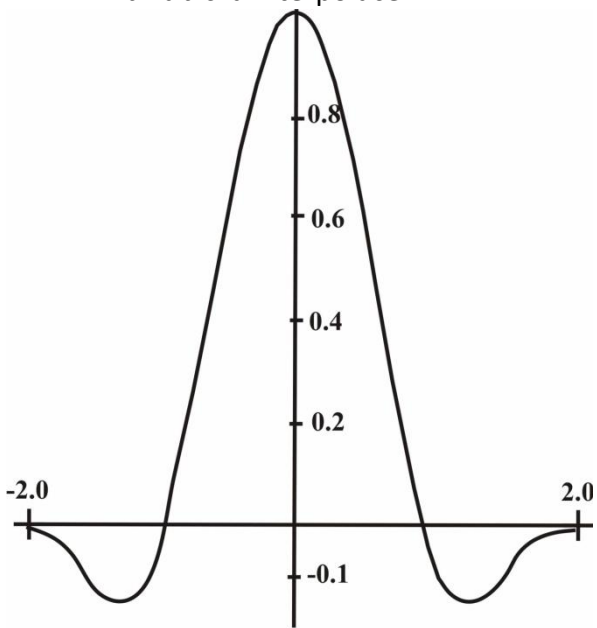
- *nejbližší soused* - většinou se postupuje tak, že se udělá inverzní transformace a odečte se nejbližší hodnota v původním obrazu



• bilineární interpolace



• bikubická interpolace



Pozn.: Geometrické transformace jsou z principu ztrátové. V některých speciálních případech (jako např. otočení o násobek 90°) je informace zachována, obecně to však neplatí.

Využití:

- dálkový průzkum země
- desktop publishing

2.4 LOKÁLNÍ OPERACE PŘEDZPRACOVÁNÍ

diskrétní konvoluce

$$g(i, j) = \sum_{(m,n) \in \mathcal{O}} f(i-m, j-n) \cdot h(m, n)$$

vyhlazování

gradientní operátory

h – maska

+1	×	×	×
0	×	×	×
-1	×	×	×
	-1	0	+1

Pozn.: někdy se setkáme s problémem, jak počítat konvoluci co nejrychleji (např. při požadavku na zpracování v reálném čase). Tento problém částečně řeší tzv. box–algorithm (Šlesinger)

2.4.1 Vyhlažování (filtrace)

Cíl: potlačení šumu

aditivní šum v s $\mu = 0$

myšlenka:

$$n \text{ bodů okolí} \quad f_i' = f_i + v_i$$

$$\frac{f_1 + f_2 + \dots + f_n}{n} + \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}$$

průměrování přes více snímků

$$g(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f_k(i, j)$$

f_k – obrazová funkce k -tého snímku

$n \sim$ řádově desítky (30 až 50)

lokální průměrování - v daném okolí

nevýhoda: rozostří se hrany, ztratí se detaily \Rightarrow velikost masky by měla být menší, než je nejmenší detail v obraze, který chceme zachovat

$$h = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad h = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad h = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad h = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

a) rovnoměrná maska

b) zvýhodnění středového bodu

c) zvýhodnění středového bodu a bodů v hlavních směrech

d) znevýhodnění středového bodu

c) a d) mají navíc výhodu výpočetní rychlosti, neboť dělení 8 nebo 16 lze v počítači realizovat jako bitový posun o 3 popř. 4 bity a tedy velmi rychle

maximální zastoupení - výsledkem filtrace je jas, který se v daném okolí vyskytuje nejčastěji

př.:

$$f(i, j) = \begin{bmatrix} 22 & 31 & 31 \\ 22 & 25 & 31 \\ 27 & 30 & 36 \end{bmatrix}, \quad g(i, j) = 31$$

problémy

$$f(i, j) = \begin{bmatrix} 21 & 22 & 25 \\ 23 & 24 & 26 \\ 27 & 28 & 29 \end{bmatrix}, \quad f(i, j) = \begin{bmatrix} 8 & 19 & 26 \\ 8 & 18 & 26 \\ 8 & 19 & 26 \end{bmatrix},$$

výběrové kvantily – výsledkem filtrace je **MEDIÁN** jasu v daném okolí

př.:

$$f = \begin{bmatrix} 100 & 90 & 85 \\ 93 & 99 & 110 \\ 154 & 86 & 79 \end{bmatrix}, \quad \text{seřadím vzestupně}$$

79 85 86 90 [93] 99 100 110 154



prostřední prvek je medián

- ♦ řeší problém výskytu jedné nebo více vychýlených hodnot
- ♦ je nelineární
- ♦ porušuje tenké čáry a trhá rohy

2.4.2 Gradientní operátory

též diferenciální operátory, hranové detektory

detekce nespojitosti šedé úrovně v obraze

Ize využít pro segmentaci

- požadavky: ♦ velikost gradientu
♦ směr gradientu

Gradient

ve spojitém případě

$$|\text{grad}g| = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2}$$

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{\partial g}{\partial y} / \frac{\partial g}{\partial x}\right)$$

v diskrétním případě

$$\Delta_x g(i,j) = g(i,j) - g(i, j-1)$$

$$\Delta_y g(i,j) = g(i,j) - g(i-1, j)$$

$$|\text{grad } g| = \sqrt{(\Delta_x g)^2 + (\Delta_y g)^2}$$

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{\Delta_y g}{\Delta_x g}\right)$$

3 typy gradientních operátorů:

aproximace derivací diferencemi (1. a 2.)

srovnání s parametrickým modelem hran

průchody nulou 2. derivace obrazové funkce (*Marrova teorie hranové detekce*)

2.4.2.1 Gradientní operátory – aproximace derivací diferencemi

Roberts

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$g(i,j) = |f(i,j) - f(i+1, j+1)| + |f(i, j+1) - f(i+1, j)|$$

Laplace

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

aproximace Laplaceova operátoru:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

$$\Delta_x^2 f(i,j) = f(i, j+1) + f(i, j-1) - 2 f(i,j)$$

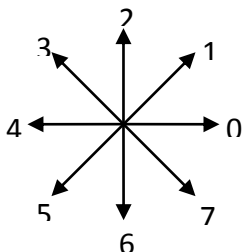
$$\Delta_y^2 f(i,j) = f(i+1, j) + f(i-1, j) - 2 f(i,j)$$

$$\nabla^2 f(i,j) = \Delta_x^2 f(i,j) + \Delta_y^2 f(i,j) = f(i, j+1) + f(i, j-1) + f(i+1, j) + f(i-1, j) - 4 f(i,j)$$

Udává pouze velikost hrany, ale ne její směr. Chceme-li znát i směr hrany, použijeme směrově závislý gradientní operátor.

2.4.2.2 Gradientní operátory – srovnání s parametrickým modelem hran

označíme směry:



$$|grad g| \hat{=} \max_{k=0..7} \{g * h_k\}$$

$$\varphi \hat{=} k^* = \arg \max_{k=0..7} \{g * h_k\} \quad \dots \text{získáme směr hrany}$$

Prewitt

$$\begin{aligned} h_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & h_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} & h_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & h_3 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ h_4 &= \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & h_5 &= \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} & h_6 &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & h_7 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

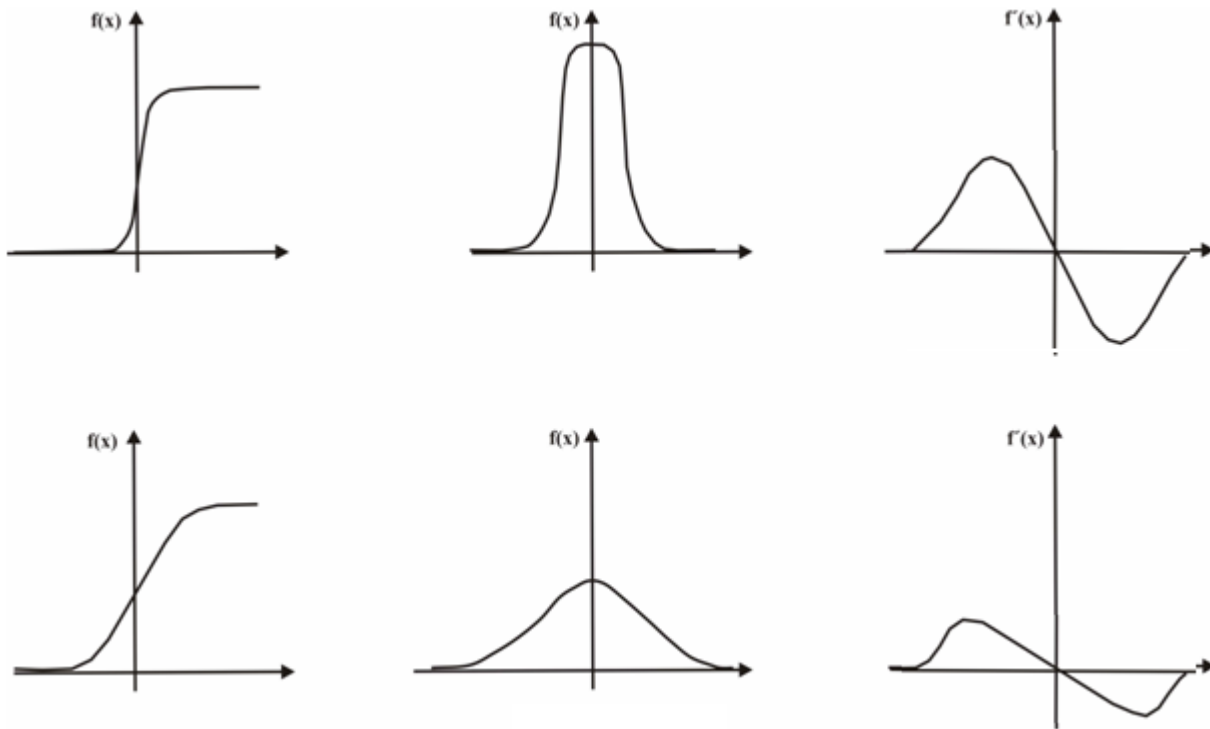
Sobel

$$\begin{aligned} h_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} & h_1 &= \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix} & h_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & h_3 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ h_4 &= \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} & h_5 &= \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} & h_6 &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & h_7 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Kirsch

$$\begin{aligned} h_0 &= \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 0 & 3 \\ -5 & -5 & -5 \end{bmatrix} & h_1 &= \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 0 & -5 \\ 3 & -5 & -5 \end{bmatrix} & h_2 &= \begin{bmatrix} 3 & 3 & -5 \\ 3 & 0 & -5 \\ 3 & 3 & -5 \end{bmatrix} & h_3 &= \begin{bmatrix} 3 & -5 & -5 \\ 3 & 0 & -5 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix} \\ h_4 &= \begin{bmatrix} -5 & -5 & -5 \\ 3 & 0 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix} & h_5 &= \begin{bmatrix} -5 & -5 & 3 \\ -5 & 0 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix} & h_6 &= \begin{bmatrix} -5 & 3 & 3 \\ -5 & 0 & 3 \\ -5 & 3 & 3 \end{bmatrix} & h_7 &= \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 \\ -5 & 0 & 3 \\ -5 & -5 & 3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2.4.2.3 Marrova teorie hranové detekce



Průchody nulou druhé derivace obrazové funkce (na obrázku 1D zobrazení)

2.4.2.4 Masky pro detekci čáry

$$h_0 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad h_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad h_2 = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad h_3 = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

2.4.2.5 Masky pro detekci bodu

$$h = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

2.5 FREKVENČNÍ ANALÝZA

2.5.1 Fourierova transformace

Fourierovy řady:

- ♦ pro periodické signály
- ♦ periodický signál $y(t)$ s periodou T lze vyjádřit jako součet sinů a kosinů frekvencí, jež jsou násobkem základní frekvence $f=1/T$

$$y(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) + B_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \right]$$

♦

Fourierova transformace:

- ♦ existuje vždy – je zobecněním Fourierových řad na nekonečný interval
- ♦ Fourierova transformace pro dvě proměnné (2D)
- ♦
$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot e^{-2\pi i \cdot (xu + yv)} dx dy$$
- ♦ u, v ... plošné frekvence
- ♦
- ♦ vztah Fourierovy transformace a konvoluce
- ♦ Fourierova transformace konvoluce je součin a součinu je konvoluce
- ♦ $h(x, y) = f(x, y) * g(x, y) \Rightarrow H(u, v) = F(u, v) \cdot G(u, v)$
- ♦ $H(u, v) = F(u, v) * G(u, v) \Rightarrow h(x, y) = f(x, y) \cdot g(x, y)$
- ♦

Diskrétní Fourierova transformace (DFT):

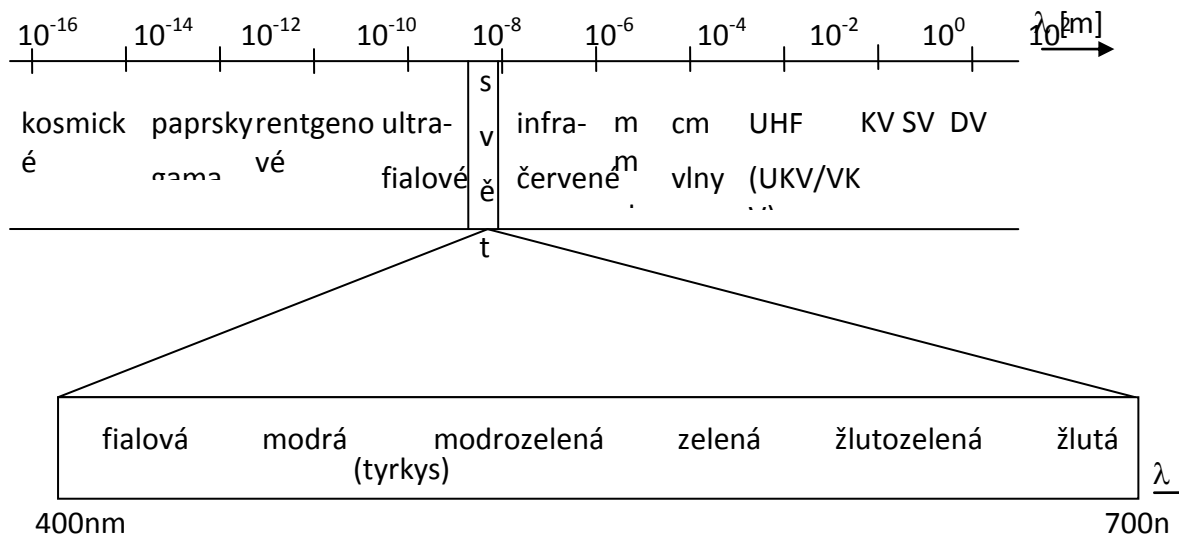
- ♦ Používá se k výpočtu Fourierovy transformace vzorkované (diskrétní) funkce v diskrétních frekvenčních bodech
- ♦
$$F(u, v) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} f(n, m) \cdot e^{-2\pi i \cdot \left(\frac{nu}{N} + \frac{mv}{M}\right)}$$
- ♦ DFT je výpočetně velmi náročná
- ♦

Rychlá Fourierova transformace (FFT):

- ♦ Rychlý algoritmus výpočtu Fourierovy transformace

2.6 BARVA

světlo = elektromagnetické vlnění



Viditelné spektrum

$$\lambda \in \langle 400, 700 \rangle \text{ nm}$$

měření – štěrbin, mřížka, spektrometr

2.6.1 Standardizace barev

1931 Commision Internationale de l'Ecairage (CIE)

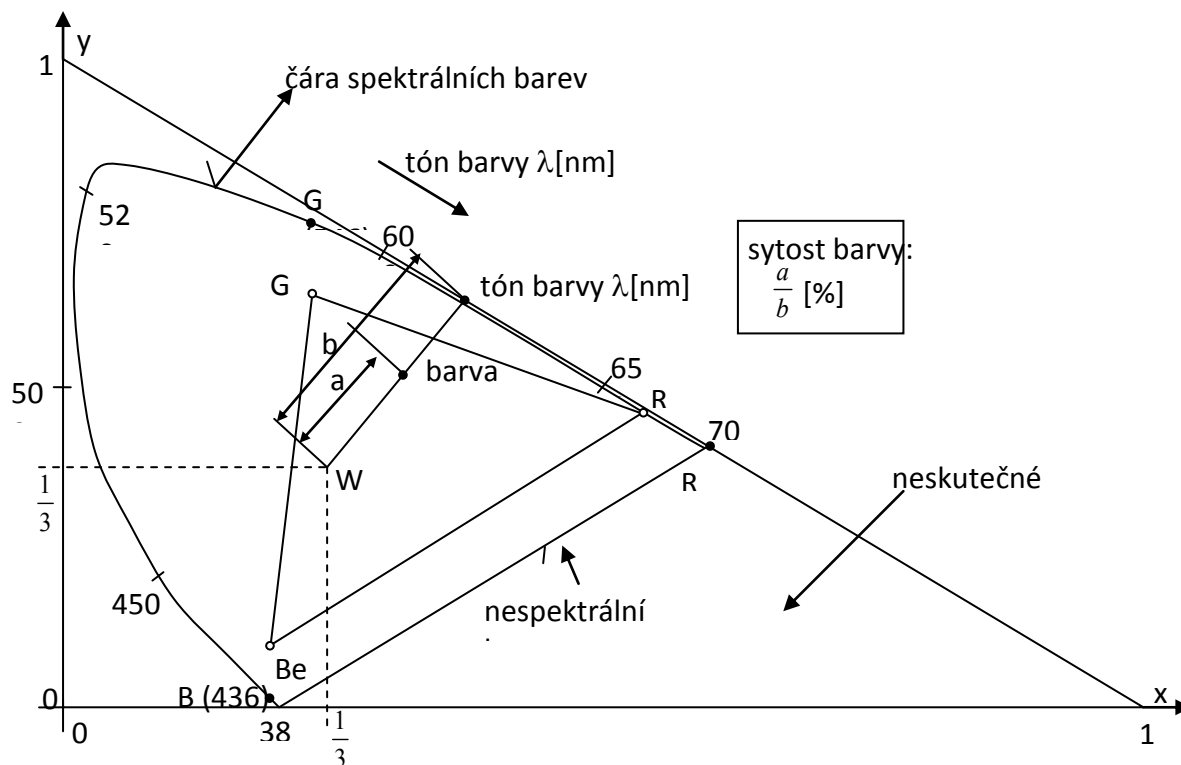
$X, Y, Z; X + Y + Z = I$ (intesity)

Normalizace intenzitou:

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

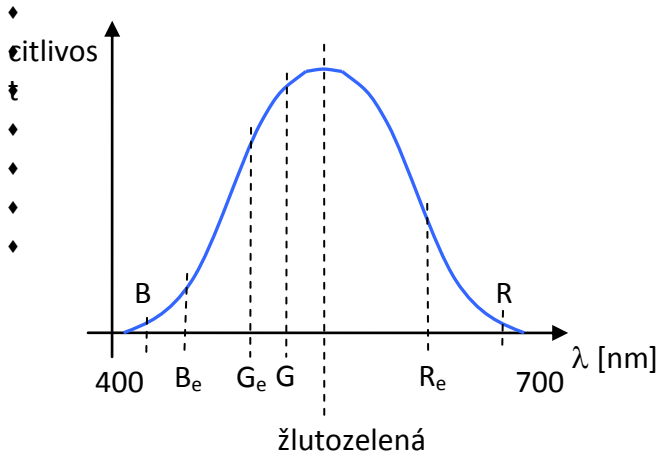
$x + y + z = 1 \Rightarrow$ rovina v 3D prostoru

Zobrazení barev souřadnicemi x, y v trojúhelníku MKO



- ♦ **spektrální barvy** – čisté, maximálně syté barvy
- ♦ **nespektrální barvy** – nejsou obsaženy ve slunečním spektru, vznikají mísením barev z obou konců viditelného spektra
- ♦ **směrem do středu** – barvy se zmenšenou sytostí
- ♦ $x = \frac{1}{3}, y = \frac{1}{3} \Rightarrow$ **izoenergické** (stejný obsah všech vlnových délek) **světlo – bílé**
- ♦ **Televizní kolorimetrie** – pro reprodukci barev vyskytujících se v přírodě potřebujeme několik základních barev, jejichž mísením vznikne daná barva. V našem případě jsou voleny více směrem k viditelné oblasti spektra, zelená je volena jako méně sytá žlutozelená barva \Rightarrow rozsah reprodukováných barev je menší

- ♦ JAS
- ♦ \approx světelný výkon [W]



světelný tok = součet energií jednotlivých vlnových délek vážený jejich poměrnou účinností

jednotka – *lumen* [lm]

osvětlení plochy = lux [lx]

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / 1 \text{ m}^2$$

svítivost – světelný tok, pozorovaný v jednotkovém prostorovém úhlu – *kandela* [cd]

jas – svítivost vztažená na jednotkový povrch zdroje světla

ČBTv – jasový signál

příspěvky barevných signálů pro jasový (ryze černobílý) signál

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$$

2.6.2 Mísení barev

Součtové (Aditivní)

- ♦ mísení zdrojů světla
- ♦ všechny složky nulové – černá
- ♦ všechny složky maximální - bílá

Rozdílové (Subtraktivní)

- ♦ z dopadajícího světla se odečítají určité barevné složky, takže odražené nebo prosté světlo poskytuje oku dojem barevného povrchu
- ♦ všechny složky nulové – bílá
- ♦ všechny složky maximální - černá

2.6.3 Reprezentace barev

Umělci

- ♦ vztah k základní (syté) barvě
- ♦ *TINT* odstín – výsledek přidání bílého pigmentu do čistého pigmentu → snižuje sytost
- ♦ *SHADE* stín – výsledek přidání černého pigmentu do čistého pigmentu → snižuje jas
- ♦ *TONE* tón – výsledek postupného přidání bílého a černého pigmentu do čistého pigmentu

Stroje

- ♦ *IHS* model
- ♦ Intenzita (*intensity*) $\approx R+G+B$
- ♦ *Hue* – průměrná vlnová délka
- ♦ *Saturation* (sytost) – úbytek bílé barvy

Součtové mísení

- ♦ *RGB* model
- ♦ použití: Tv, monitory

Rozdílové mísení

- ♦ *CMY* model
- ♦ *C* – cyan (modrozelená, tyrkysová)
- ♦ *M* – magenta (fialová)
- ♦ *Y* – yellow (žlutá)
- ♦ použití: barevný tisk
- ♦ většinou se v tiskárnách používá model *CMYK* (*K* – black) – zvýšená spotřeba černé barvy při tisku černých ploch:
- ♦ *C+M+Y* nebude úplně černá
- ♦ zbytečná spotřeba barevného pigmentu

Teplota barvy

- ♦ teplotou barvy se rozumí teplota ideálního zářiče zahřátého tak, že vydává stejnou barvu světla, udává se v *kelvinech* [K]
- ♦ červená 2000 K
- ♦ bílá 6000 – 7000 K
- ♦ modrá 10 000K

2.7 MATEMATICKÁ MORFOLOGIE

poměrně samostatná oblast analýzy obrazu

opírá se o teorii bodových množin

- ♦ *binární obraz* – bodová množina v E_2
- ♦ obraz s více úrovněmi jasu – bodová množina v E_3

ve středu pozornosti je tvar objektů

- ♦ identifikace tvaru
- ♦ optimální rekonstrukce tvaru, který je porušen

snadná hardwarová realizace

rychlejší než klasický přístup

matematická morfologie pro binární obrazy -

prostřední část zpracování. Obrazy jsou obvykle nejprve předzpracovány standardními technikami a metodami segmentace jsou nalezeny objekty (výsledek je reprezentován binárním obrazem). Nyní se použijí morfologické postupy.

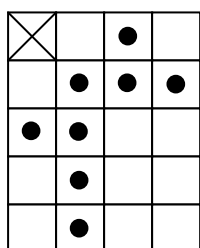
použití především pro:

- ♦ předzpracování (odstranění šumu, zjednodušení tvaru objektů)
- ♦ zdůraznění struktury objektů (kostra, ztenčování, zesilování, výpočet konvexního obalu, označování objektů)
- ♦ popis objektů číselnými charakteristikami (plocha, obvod, projekce atd.)


Binární obraz

bodová množina X – objekty
 X^c – pozadí, včetně děr
v objektech

Př.:



$$X = \{ (0, 2), (1, 1), (1, 2), (1,3), (2, 0), (2, 1), (3, 1), (4, 1) \}$$

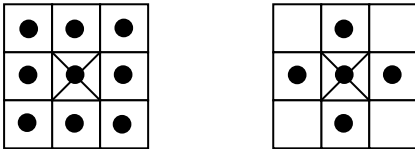
počátek (0, 0) 

Realizace morfologické transformace

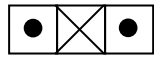
relace s jinou, menší bodovou množinou B , nazývanou *STRUKTURNÍ ELEMENT*

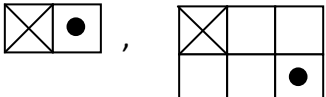
Př.:

často používané strukturní elementy



Pozn.: počátek nemusí být bodem strukturního elementu



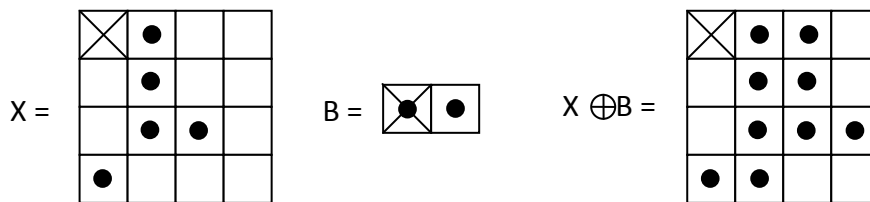
- ♦ Elementy, které mají stejné vlastnosti pro různé směry, nazýváme *izotropické*.
- ♦ Morfologickou transformaci si představíme, jako bychom pohybovali strukturním elementem B systematicky po celém obraze W . Bod obrazu, který se shoduje s počátkem souřadnic strukturního elementu, nazýváme *okamžitý bod*. Výsledek relace mezi obrazem a strukturním elementem zapíšeme do okamžitého bodu obrazu.
- ♦ Ke každé morfologické transformaci $\Phi(x)$ existuje duální transformace $\Phi^*(x)$
- ♦ $\Phi(x) = (\Phi^*(x^c))^c$
- ♦ Základní transformace: posunutí, dilatace, eroze, otevření, uzavření
- ♦ Posunutí (*translace*) bodové množiny X o vektor h se označuje X_h
- ♦ $X_h = \{d \in E^2; d = x + h \text{ pro } x \in X\}$
- ♦ např.: $H =$ 

2.7.1 Dilatace a Eroze

Dilatace \oplus - skládá body dvou množin pomocí vektorového součtu (Minkowského množinový součet)

$$X \oplus B = \{d \in E^2; d = x + b, x \in X, b \in B\}$$

Př.: $X = \{(0,1), (1,1), (2,1), (2,2), (3,0)\}$
 $B = \{(0,0), (0,1)\}$
 $X \oplus B = \{(0,1), (0,2), (1,1), (1,2), (2,1), (2,2), (2,3), (3,0), (3,1)\}$



- ♦ Nejčastěji používaný strukturní element – 3x3, obsahující všech 9 bodů osmiokolí
- ♦ objekty se rozrostou o jednu slupku na úkor pozadí
- ♦ díry a zálivy tloušťky 2 body se zaplní

- ♦ Vlastnosti dilatace
- ♦ komutativní: $X \oplus B = B \oplus X$
- ♦ asociativní: $(X \oplus B) \oplus D = X \oplus (B \oplus D)$
- ♦ dilataci lze vyjádřit jako sjednocení posunutých bodových množin:

$$X \oplus B = \bigcup_{b \in B} X_b$$
- ♦ posunutí je dilatace strukturním elementem, který obsahuje právě jeden bod
- ♦ - invariantní vzhledem k posunutí:

$$X_h \oplus B = (X \oplus B)_h$$

Eroze \ominus - skládá dvě bodové množiny s využitím rozdílu vektorů

je duální transformací k dilataci

NENÍ INVERZNÍ transformací k dilataci:

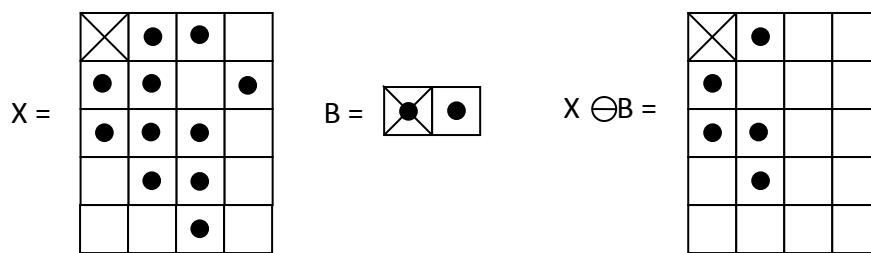
$$X \ominus B = \{d \in E^2; d + b \in X \quad \forall b \in B\}$$

Př.:

$$X = \{(0,1), (0,2), (1,0), (1,1), (1,3), (2,0), (2,1), (2,2), (3,1), (3,2), (4,2)\}$$

$$B = \{(0,0), (0,1)\}$$

$$X \ominus B = \{(0,1), (1,0), (2,0), (2,1), (3,1)\}$$



Nejčastěji: používaný strukturní element – 3x3

- ♦ zmizí objekty (čáry) tloušťky 2 a osamělé body
- ♦ objekty se zmenší o 1 slupku
- ♦ odečteme-li od původního obrazu jeho erozi, dostaneme obrysy objektu
- ♦ Vlastnosti eroze
- ♦ je-li počátek obsažen ve strukturním elementu, je *antiextenzivní*:
- ♦ $(0,0) \in B \Rightarrow X \ominus B \subseteq X$ \ominus
- ♦ invariantní vůči posunutí:

$$X_h \ominus B = (X \ominus B)_h \quad \ominus \quad \ominus$$
- ♦
$$X \ominus B_h = (X \ominus B)_{-h} \quad \ominus \quad \ominus$$
- ♦ erozi lze vyjádřit jako průnik *posunutých bodových množin*:
- ♦
$$X \ominus B = \bigcap_{b \in B} X_{-b} \quad \ominus$$

Duální vlastnosti dilatace a eroze:

- ♦ *symetrická množina* $B^\sim = \{b; -b \in B\}$

- ♦ duální transformace:

$$(X \ominus Y)^c = X^c \oplus Y^c$$

- ♦ eroze na rozdíl od dilatace *není* komutativní:

$$X \ominus B \neq B \ominus X$$

- ♦ průnik a dilatace:

$$(X \cap Y) \oplus B \subseteq (X \oplus B) \cap (Y \oplus B)$$

$$B \oplus (X \cap Y) \subseteq (B \oplus X) \cap (B \oplus Y)$$

- ♦ průnik a eroze:

$$(X \cap Y) \ominus B \subseteq (X \ominus B) \cap (Y \ominus B)$$

$$B \ominus (X \cap Y) \subseteq (B \ominus X) \cap (B \ominus Y)$$

- ♦ sjednocení a dilatace:

$$B \oplus (X \cup Y) = (B \oplus X) \cup (B \oplus Y)$$

- ♦ sjednocení a eroze:

$$(X \cup Y) \ominus B \subseteq (X \ominus B) \cup (Y \ominus B)$$

$$B \ominus (X \cup Y) = (B \ominus X) \cap (B \ominus Y)$$

- ♦ použijeme-li pro dilataci / erozi postupně dva strukturální elementy, nezáleží na tom, který použijeme dříve

2.7.2 Otevření a Uzavření

kombinace dilatace a eroze

výsledný obraz obsahuje *méně detailů*

Otevření - eroze následovaná dilatací

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B$$

Uzavření - dilatace následovaná erozí

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B$$

- ♦ Pokud se obraz nezmění po otevření / uzavření strukturálním elementem B , říkáme, že je otevřený / uzavřený vzhledem k B .

- ♦ Otevření oddělí objekty, spojené úzkou šíjí, odstraní malé detaily.

- ♦ Uzavření spojí objekty, které jsou blízko u sebe, zaplní malé díry a úzké zálivy

- ♦ Význam pojmů „malý“, „úzký“, „blízky“ závisí na velikosti strukturálního elementu.

- ♦ Vlastnosti:

- ♦ otevření i uzavření je *invariantní* vzhledem k *posunu*

- ♦ otevření je *antiextenzivní* zobrazení:

$$X \circ B \subseteq X$$

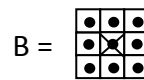
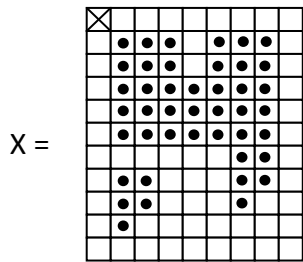
- ♦ uzavření je *extenzivní* zobrazení:

$$X \subseteq X \bullet B$$

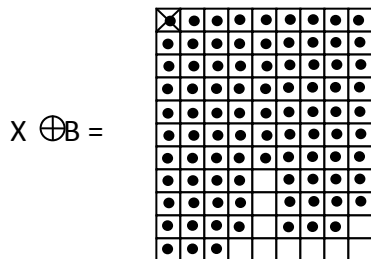
- ♦ otevření i uzavření je *idempotentní*, tj. opakovaným použitím těchto operací se nezmění výsledek:

$$(X \circ B) \circ B = X \circ B$$

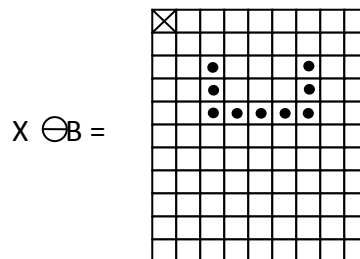
$$(X \bullet B) \bullet B = X \bullet B$$



Dilatace

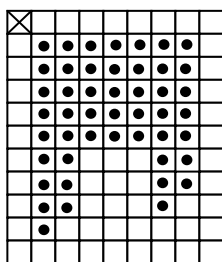


Eroze



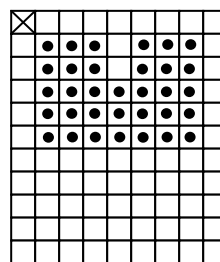
Uzavření

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B$$



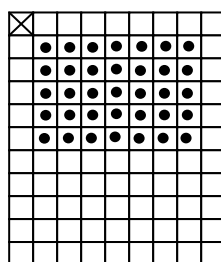
Otevření

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B$$



Otevření

$$(X \bullet B) \circ B =$$



Uzavření

$$= (X \circ B) \bullet B$$

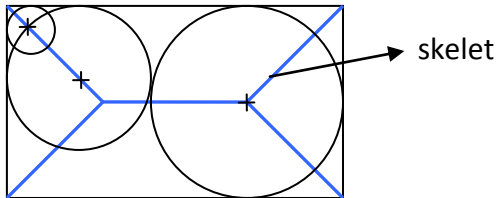
V tomto případě se rovnají.
(obecně **NE** !)

2.7.3 Skelet

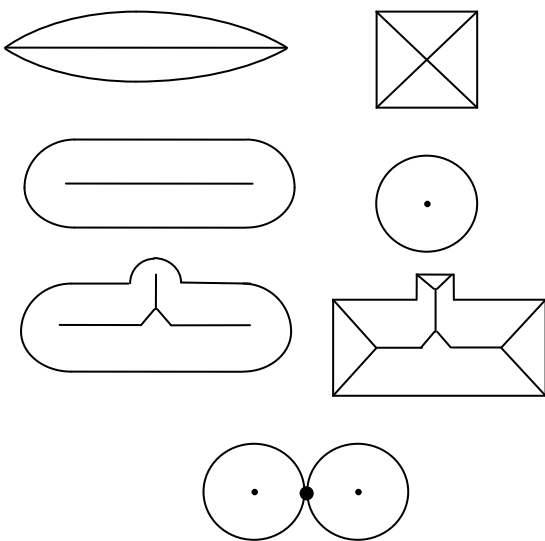
Skelet $S(Y)$ je množina bodů – středů kružnic, které jsou obsaženy v Y a dotýkají se hranice Y alespoň ve 2 bodech.

Př.:

obdélník



další objekty



- ♦ Skelet lze vytvořit pomocí erozí a dilatací, ale takto získaný skelet může být složen z čar *tlustších než jeden bod*.
- ♦ Často se skelet nahrazuje množinou, zpracovanou sekvenčním *homotopickým* zpracováním
- ♦ Hit or miss transformace
- ♦ složený strukturní element $B = (B_1, B_2)$
- ♦ hledáme zda $B_1 \subset X$ a zároveň $B_2 \subset X^C$
- ♦ definice:
- ♦ $X \otimes B = \{x : B_1 \subset X \wedge B_2 \subset X^C\}$
- ♦ vyjádření pomocí dilatací a erozí:
- ♦ $X \otimes B = (X \ominus B_1) \cap (X^C \ominus B_2) = (X \ominus B_1) | \sim (X \oplus B_2)$

($|$ je jednostranný rozdíl množin $X | Y = X \cap Y^C$)

Ztenčování \oplus složeným strukturním elementem:

$$B = (B_1, B_2)$$

$$X \oplus B = X \mid (X \otimes B)$$

Zesilování \odot

$$X \odot B = X \cup (X \otimes B)$$

Ztenčování a zesilování jsou duální transformace:

$$(X \odot B)^C = X^C \oplus B^*, \text{ kde } B^* = (B_2, B_1)$$

Ztenčování a zesilování se často používají opakovaně:

- ♦ dána posloupnost strukturních elementů:
- ♦ $\{B_{(i)}\} = \{B_{(1)}, B_{(2)}, \dots, B_{(I)}\}$ kde $B_{(i)} = (B_{i1}, B_{i2})$
- ♦ jsou složené strukturní elementy
- ♦ sekvenční ztenčování
- ♦ $X \oplus \{B_{(i)}\} = (\dots ((X \oplus B_{(1)}) \oplus B_{(2)}) \dots \oplus B_{(I)})$
- ♦ sekvenční zesilování
- ♦ $X \odot \{B_{(i)}\} = (\dots ((X \odot B_{(1)}) \odot B_{(2)}) \dots \odot B_{(I)})$
- ♦ existuje několik pro praxi velmi významných posloupností strukturních elementů

pro jednoduchost budeme popisovat složené strukturní elementy jednou maticí

1 označuje, že bod patří k elementu B_1 (srovnává se s body objektů)

0 označuje, že bod patří k elementu B_2 (pozadí)

* označuje, že bod nemá na srovnání vliv

sekvenční ztenčování a zesilování konverguje do konečného stavu. Počet iterací závisí na objektu a velikosti strukturního elementu. Konečný stav je indikován tím, že se výsledek dvou po sobě jdoucích iterací neliší

sekvenční ztenčování elementem L se používá jako náhrada skeletu. Objekty mají v konečném stavu tloušťku 1

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad L_2 = \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 1 & * \end{bmatrix} \quad L_3 = \begin{bmatrix} 1 & * & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & * & 0 \end{bmatrix} \quad L_4 = \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad L_6 = \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & * \end{bmatrix} \quad L_7 = \begin{bmatrix} 0 & * & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & * & 1 \end{bmatrix} \quad L_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \end{bmatrix}$$

velkou rozeklanost náhrady skeletu, vytvořené pomocí elementu L lze odstranit sekvenčním ztenčováním elementem E

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & E_2 &= \begin{bmatrix} 0 & * & * \\ 0 & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & E_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & * \end{bmatrix} & E_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & * \\ 0 & * & * \end{bmatrix} \\
 E_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ * & 1 & * \end{bmatrix} & E_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & 0 \\ * & * & 0 \end{bmatrix} & E_7 &= \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 \end{bmatrix} & E_8 &= \begin{bmatrix} * & * & 0 \\ * & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Dojde k okleštění skeletu o izolované body a krátké čáry z konců skeletu („krátké“ závisí na počtu iterací). V konečném stavu skelet obsahuje pouze uzavřené křivky.

většinou se použije sekvenční ztenčování elementem L až do konečného stavu a pak elementem E podle potřeby (řádově jednotky iterací)

2.8 SEGMENTACE

VSTUP: INTENZITNÍ OBRAZ

VÝSTUP: OBRAZ ROZČLENĚNÝ NA ČÁSTI, KTERÉ MAJÍ SOUVISLOST S OBJEKTY REÁLNÉHO SVĚTA

Kompletní segmentace

- ♦ vytvořené oblasti jednoznačně korespondují s objekty ve vstupním obraze
- ♦ obecně nezbytná spolupráce s vyšší úrovní zpracování, využití znalostí o řešeném problému
- ♦ v případě, kdy je obraz tvořen kontrastními objekty na pozadí konstantního jasu – dobré výsledky kompletní segmentace i na nižší úrovni zpracování
- ♦ **Příklad:** text, krevní buňky, počítání šroubků

Částečná segmentace

- ♦ vytvořené oblasti jsou homogenní vzhledem k určitým zvoleným vlastnostem (jas, barva, textura, apod.)
- ♦ oblasti se obecně mohou překrývat
- ♦ je třeba aplikovat další postupy na vyšší úrovni zpracování
- ♦ **Příklad:** scéna s polem a lesem při pohledu z okna – po segmentaci neodpovídá objektu jedna oblast

Pro segmentaci se využívá znalost o řešeném problému

čím více, tím lépe

možnosti:

požadovaný tvar

požadovaná pozice, orientace

znám počáteční a koncový bod hranice

vztah oblasti k ostatním oblastem s požadovanými vlastnostmi

příklady:

- hledání lodí na moři
- typické vlastnosti železničních tratí, dálnic (např. maximální zakřivení, ap.)
- řeky se neprotínají

Segmentační techniky

- prahování
- určování / hledání hranic mezi oblastmi
- vytváření oblasti
- srovnávání se vzorem
- texturní segmentace

2.8.1 Prahování

- ⊕ nejjednodušší a nejstarší metoda segmentace
- ⊕ nejčastěji používaná
- ⊕ nenáročná hardwarová realizace
- ⊕ nejrychlejší metoda, lze provádět v reálném čase
- volba prahu – úloha, kterou lze obecně jen velmi obtížně provádět automaticky
- lze použít pouze na určitou třídu obrazů (objekty a pozadí jsou jasově snadno rozlišitelné)

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{pro } f(i, j) \geq T \\ 0 & \text{pro } f(i, j) < T \end{cases}$$

T – práh (*threshold*) – předem určená konstanta

Určení prahu

- ♦ *interaktivně* – manuálně obsluhou
- ♦ automaticky
- ♦ někdy nelze použít jednu hodnotu prahu na celý obraz (vliv např. nerovnoměrného osvětlení)

Modifikace

- ♦ $g(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{pro } f(i, j) \in D \\ 1 & \text{jinak} \end{cases}$
- ♦ D – množina jasů odpovídajících pozadí

- ♦ **Př.:** snímky krevních buněk – cytoplazma se jeví v určitém intervalu jasů, pozadí je světlejší, jádro je tmavší

prahování více prahy

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{pro } f(i, j) \in D_1 \\ 2 & \text{pro } f(i, j) \in D_2 \\ \vdots & \\ n & \text{pro } f(i, j) \in D_n \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

$$D_i \cap D_j = \emptyset \quad i \neq j$$

poloprahování

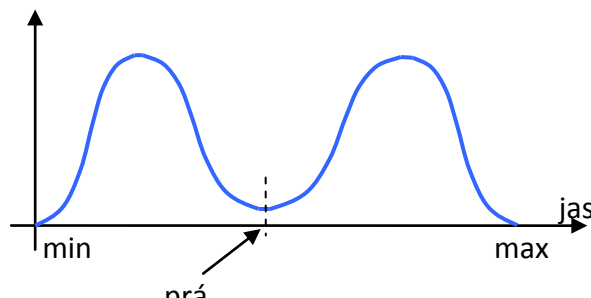
$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j) & \text{pro } f(i, j) \in D \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

- ♦ odstraníme pozadí, v objektech však zachováme rozložení jasů
- ♦ používá se při vizuálním hodnocení výsledků člověkem

$f(i, j)$ nemusí být pouze jasová funkce (např. hodnota gradientu, lokální texturní vlastnosti, hloubková mapa, barva – RGB, hue, saturace ap.)

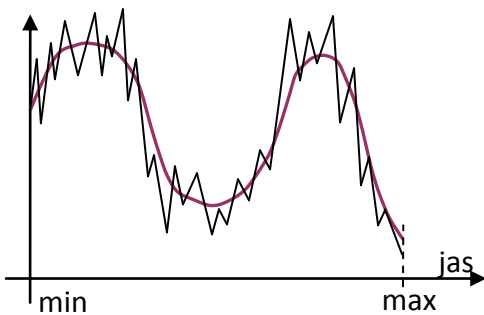
Metody určování prahu

- ♦ Histogram
- ♦ ideální bimodální histogram
- ♦



Hledáme lokální minimum mezi dvěma největšími dostatečně vzdálenými lokálními maximy. Často nelze rozhodnout jednoznačně o významu lokálních maxim a minim

(vyhlazování histogramu)



Procentní prahování

- ♦ Máme apriorní znalost o tom, kolik procent plochy obrazu pokrývají objekty (např. průměrné pokrytí plochy stránky textem se pohybuje kolem 5 %). Práh potom nastavíme tak, aby právě tolik procent obrazových bodů mělo barvu objektů, zbytek barvu pozadí.

2.8.2 Segmentace na základě detekce hran

Hrany – místa obrazu, kde dochází k určité nespojitosti, většinou v jasů, ale také v barvě, textuře, apod.

Obraz hran vznikne aplikací některého hranového operátoru.

V dalším zpracování spojujeme hrany do řetězců, které lépe odpovídají průběhu hranic.

- ♦ Pokud je k dispozici nějaká *apriorní informace*, jsou hrany a jejich vztahy k ostatním částem určeny tak, aby splňovaly podmínky dané touto apriorní informací.
- ♦ Pokud *není apriorní informace* k dispozici, musí segmentační metoda brát v úvahu lokální vlastnosti obrazu spolu s obecnými znalostmi specifickými pro určitou aplikační oblast.

Prahování obrazu hran

- ♦ obvykle jen velmi málo míst v obraze má nulovou hodnotu velikosti hrany. Důvodem je přítomnost šumu
- ♦ metoda prahování obrazu hran potlačí nevýrazné hrany malé velikosti a zachová pouze významné hrany (význam slov „malé“, „významné“ souvisí s velikostí prahu)
- ♦ hodnotu prahu lze určovat např. metodami procentního prahování
- ♦ někdy se aplikuje následné zpracování výsledku – např. vypuštění hran kratších než jistá hodnota

Určení hranice s využitím znalosti její polohy

předpokládáme informaci o předpokládané nebo pravděpodobné poloze a tvaru hranice, získanou např. díky znalostem vyšší úrovně nebo jako výsledek segmentačních metod aplikovaných na obraz nižšího rozlišení

Jednou z možností je určovat polohu hranice jako polohu významných hranových buněk, které se nacházejí v blízkosti předpokládaného umístění hranice a které mají směr blízký předpokládanému směru hranice v daném místě. Podaří-li se najít dostatečný počet obrazových bodů, vyhovujících těmto podmínkám, je těmito body proložena vhodná aproximační křivka – *zpřesněná hranice*.

Jiná možnost nastane, pokud známe koncové body hranice a předpokládáme malý šum a malé zakřivení hranice. Možný přístup je postupné dělení spojnic již detekovaných sousedních elementů hranice a hledání dalšího hraničního elementu na normále vedené středem této spojnice. Hranový element, který je nejbližší spojnice dosud detekovaných bodů a má nadprahovou velikost hrany, je považován za nový element hranice a iterační proces se opakuje.

2.8.3 Segmentace narůstáním oblastí

(region growing)

Lze uplatnit v obrazech se šumem, kde se obtížně hledají hranice

Významnou vlastností **HOMOGENITA**

Rozdělení obrazu do maximálních souvislých oblastí tak, aby tyto oblasti byly z určitého hlediska homogenní.

Kritérium homogenity

- ♦ založeno na jasových vlastnostech, komplexnějších způsobech popisu nebo dokonce na vytvářeném modelu segmentovaného obrazu
- ♦ většinou pro oblasti požadujeme splnění těchto podmínek:

(1) $H(R_i) = TRUE$ pro $i = 1, 2, \dots, l$

(2) $H(R_i \cup R_j) = FALSE$ pro $i, j \leq 1, 2, \dots, l$ $i \neq j$ R_i sousedí s R_j

Kde:

l počet oblastí

R_i jednotlivé oblasti

$H(R_i)$ dvouhodnotové vyjádření kritéria homogenity

→ oblasti musí být (1) homogenní a (2) maximální

Spojování oblastí

Nejpřirozenější metoda spojování oblastí vychází z počátečního rozložení, kdy každý obrazový element představuje samostatnou oblast, čímž při splnění (1) nesplní (2). Dále spojujeme vždy dvě sousední oblasti, pokud oblast vzniklá spojením těchto dvou oblastí bude vyhovovat kritériu homogenity.

Výsledek spojování závisí na pořadí, v jakém jsou oblasti předkládány k spojování.

Nejjednodušší metody vycházejí z počáteční segmentace obrazu na oblasti 2x2, 4x4 nebo 8x8.

Popis většinou založen na statistických jasových vlastnostech (histogram jasu v oblasti).

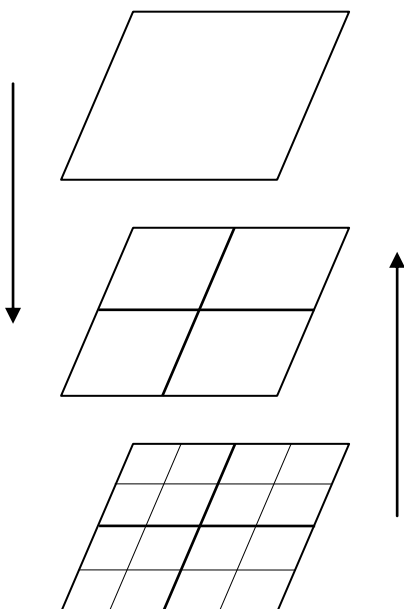
Popis oblasti je srovnáván pomocí statistických testů s popisem sousední oblasti. Při shodě dojde ke spojení obou oblastí a vznikne nová oblast. V okamžiku, kdy nelze spojit žádné dvě oblasti, proces končí.

Štěpení a spojování

(split and merge)

Může zachovat dobré vlastnosti obou uvedených přístupů.

Využívá pyramidální reprezentaci obrazu. Oblasti jsou čtvercové a odpovídají elementu dané úrovně pyramidální datové struktury.



Na počátku určíme nějaké počáteční rozložení obrazu.

Platí-li pro oblast R i -té úrovně pyramidální struktury $H(R) = FALSE$ (oblast není homogenní), rozdělíme R na 4 oblasti $(i + 1)$.úrovně.

Existují-li sousední oblasti R_i a R_j takové, že $H(R_i \cup R_j) = TRUE$, spojíme R_i a R_j do jedné oblasti.

Nelze-li žádnou oblast spojit ani rozdělit, algoritmus končí.

2.8.4 Segmentace srovnáváním se vzorem

(template matching)

- ♦ úloha má za úkol nalézt známé objekty (vzory) v obraze. Objekty (vzory) mají většinou charakter obrazu.
- ♦ další možnosti kromě hledání objektů – srovnávání dvou snímků z různých míst (*stereoskopie*), určování relativního pohybu objektů
- ♦ pokud by obraz byl bez šumu, úloha by byla velmi snadná, protože bychom v obraze našli přesnou kopii hledaného vzoru
- ♦ jako míru souhlasu většinou používáme vzájemnou korelaci:

$$C_1(u, v) = \frac{1}{\max_{(i, j) \in V} |f(i+u, j+v) - h(i, j)|}$$

$$C_2(u, v) = \frac{1}{\sum_{(i, j) \in V} |f(i+u, j+v) - h(i, j)|}$$

$$C_3(u, v) = \frac{1}{\sum_{(i, j) \in V} |f(i+u, j+v) - h(i, j)|^2}$$

- ♦ Testujeme souhlas obrazu f se vzorem h umístěným v poloze (u, v) . Pro každou polohu vzoru h v obraze f určíme hodnotu míry souhlasu vzoru s danou částí obrazu
- ♦ lokální maxima, která jsou větší než určený práh, reprezentují polohu v obraze
- ♦ problémy nastanou, pokud se vzor v obraze vyskytuje natočený, s jinou velikostí nebo s geometrickým zkreslením. V takovém případě bychom museli testovat míru souhlasu pro všechna možná natočení, velikosti, geometrická zkreslení ap. Tento problém lze částečně řešit v případě, kdy je hledaný vzor složen z několika částí spojených pružnými spojkami. Pak testujeme nejprve jednotlivé (menší) části a pak teprve hledáme pružná spojení
- ♦ metodu lze urychlit zrychleným prováděním testů v hrubším rozlišení a v místě lokálního maxima pak přesným doměřením polohy $(u, v)^*$, pro kterou nastává největší hodnota míry souhlasu vzoru s částí obrazu.

3 POPIS OBJEKTŮ

Cílem popisu je určit:

- ♦ číselný vektor příznaků
- ♦ nečíselný syntaktický popis

charakterizující tvarové i jiné vlastnosti popisovaného objektu. Takový popis objektu/oblasti je potom předkládán klasifikátoru k rozpoznání.

Tvarové vlastnosti jsou ve většině případů určovány jen dvourozměrně.

Problematika definice tvaru

Dosud se o tvaru hovořilo nejčastěji slovně (kulatý, podlouhlý, s ostrými rohy) nebo pomocí obrázků. S nástupem počítačů vyvstala potřeba popsat i složité tvary tak, aby s nimi mohla výpočetní technika pracovat.

Přes existenci řady prakticky použitelných metod popisu tvaru nebyla dosud vytvořena obecná metodologie, dosavadní přístupy mají své klady i zápory.

Rozdělení:

charakter vstupní reprezentace:

- ♦ oblast
- ♦ hranice

zachování informace:

- ♦ lze rekonstruovat tvar objektu
- ♦ nelze

metody:

- ♦ matematické
- ♦ heuristické

způsob reprezentace vede k popisu

- ♦ příznakovému
- ♦ syntaktickému

3.1 IDENTIFIKACE OBLASTÍ

- ♦ je nutným předpokladem k popisu
- ♦ možnost jednoznačné odvolávky / ukazatele na každou oblast obrazu

Obvyklá metoda:

každou oblast opatříme neopakujícím se přirozeným číslem – pozadí má číslo 0, oblastem jsou přiřazena čísla od 1, takže největší identifikační číslo oblasti udává počet oblastí v obraze; tato identifikace bývá nazývána *barvením*

Jiná možnost barvení oblastí:

Použijeme menší počet identifikačních čísel; pouze zajistíme, aby žádné dvě sousední oblasti neměly stejně identifikační číslo; teoreticky stačí čtyři barvy / čísla pro takové obarvení; pro identifikaci oblastí je pak třeba mít pro každou oblast uloženou informaci o poloze některého jejího bodu.

Barvení je sekvenční proces

první průchod

procházíme obraz po řádcích a každému nenulovému obrazovému elementu přiřadíme hodnotu podle

hodnoty všech jeho již obarvených sousedů

- ♦ jsou-li všechny nulové, přiřadíme bodu dosud nepřidělenou barvu
- ♦ pokud je jeden nenulový, nebo je více nenulových, ale se stejnou barvou, přiřadíme bodu tuto jeho/jejich barvu
- ♦ pokud je více nenulových s různou barvou, přiřadíme bodu jednu z těchto barev a zaznamenáme barvy do tzv. **tabulky ekvivalence barev** (došlo k tzv. *kolizi barev*)

- ♦ maska pro 4-okolí



- ♦ maska pro 8-okolí



- ♦ kolize barev (4-okolí)

0	0	1	0	2
0	0	1	0	2
0	0	1	0	2
0	3	2	1	5

ekvivalence
barev

- ♦ **Pozn.:** ke kolizi barev dochází v praxi velmi často –
- ♦ - u objektů tv.



druhý průchod

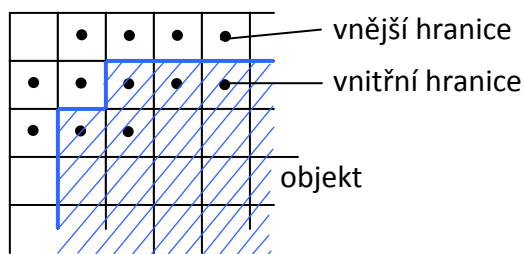
projdeme znovu celý obraz po řádcích a přebarvíme obrazové body kolizních barev podle *tabulky ekvivalence barev* → každé oblasti odpovídá označení jedinou, v jiné oblasti se nevyskytující barvou

Chceme-li barvením zároveň zjistit počet objektů, musí být při přebarvování přidělovány barvy z množiny přirozených čísel vzestupně tak, aby žádné nebylo vynecháno.

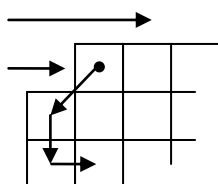
3.2 POPIS TVARU NA ZÁKLADĚ HRANICE OBLASTÍ

3.2.1 Sledování hranice

- ♦ používá se v případě, kdy není znám tvar hranice, ale kdy byly určeny oblasti
- ♦ cílem může být určení vnitřní nebo vnější hranice



- ♦
- ♦ Postup:
 - procházíme obraz po řádcích, dokud nenalezneme obrazový element, náležící nové oblasti
 - pak procházíme body, které jsou částí hranice proti směru hodinových ručiček



3.2.2 Jednoduché geometrické popisy hranice

Délka – základní vlastností hranice

nejjednodušší případ – založen na reprezentaci *Freemanovým kódem*, sudé posuvy (horizontální a vertikální) jsou ohodnoceny délkou 1, liché (diagonální) délkou $\sqrt{2}$

délka uzavřené hranice – *obvod oblasti*

Pozn.: délka bude větší v 4-okolí, protože diagonální posuvy jsou ohodnoceny 2

Přímost hranice

Poměr mezi celkovým počtem buněk hranice a počtem buněk, ve kterých hranice mění směr.

3.2.3 Popis hranice posloupností segmentů

Jednou z variant je popis *posloupností segmentů* daných vlastností. Je-li znám typ každého segmentu, je hranice popsána řetězem typů segmentů – vhodné pro syntaktické rozpoznávání.

Popis úseky konstantního zakřivení.

K přímkovým úsekům přibudou úseky, které lze nahradit polynomiální aproximací druhého řádu – části kružnic, elips atd. Výsledný popis je řetěz *primitiv* (typ úseků) vhodný pro syntaktické rozpoznávání

polygonální popis

Polygonální popis aproximuje oblast *mnohoúhelníkem*, oblast je reprezentována jeho vrcholy. Segmenty jsou v tomto případě úseky, které lze nahradit úsečkou (lze použít aproximace s různou přesností).

Postup nahrazování přímkovými úseky

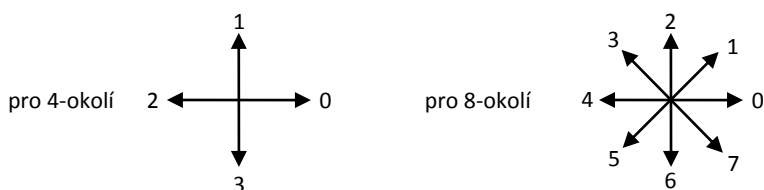
Aglomerativní přístup: k segmentu jsou postupně přidávány body (úseky) hranice, dokud segment neztratí přímkový charakter. V tomto případě je založen nový segment.

Divizní přístup: opačný přístup – **rekurzivní štěpení**. Vycházíme z koncových bodů a dělíme hranici na menší úseky tak dlouho, až všechny segmenty mají přímkový charakter (vyjádřený kritériem)

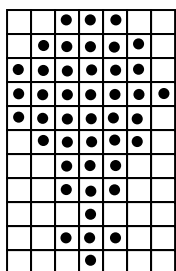
3.2.4 Freemanovy řetězové kódy

Hranice je určena počátečním bodem a posloupností symbolů odpovídajících úsečkám jednotkové délky.

Přiřazení symbolů jednotlivým směrům



Příklad:



5566776757131212132344

Má-li být popis uzavřených hranic použit pro porovnání, musí být nezávislý na volbě počátečního bodu popisu. Jednou z užívaných metod je určit počáteční bod popisu tak, aby řetěz interpretovaný jako číslo v osmičkové (čtyřkové) soustavě bylo nejmenší číslo ze všech možných řetězů reprezentujících hranici.

1212132344556677675713

Otočení o k – násobek 45° (90°) – přičtení k ke každému symbolu řetězu *modulo 8* (4)

Má-li být popis nezávislý na natočení, lze použít derivaci (1. *diferenci modulo 8* (4)), což je posloupnost čísel, která ukazují změny směru hranice.

0101071622261717271101

diferenční nezávislý na volbě počátečního bodu

0101010716222617172711

Freemanův řetězový kód lze použít také k popisu skeletu.

Tento popis je vhodný pro syntaktické (strukturální) metody rozpoznávání.

3.3 REPREZENTACE A POPIS TVARU VYCHÁZEJÍCÍ Z OBLASTI OBRAZU

Jednoduché, heuristikami motivované postupy:

velikost, pravouhlost, podlouhlost, apod.

Tyto charakteristiky jsou jednoduché a dávají dobré výsledky pro jednoduché tvary, pro složitější tvary však selhávají a je třeba volit postupy, které složité oblasti nejprve rozdělí na jednodušší části, které lze pospat samostatně. Objekt složený z takových částí lze popsat např. *rovinným grafem*, jehož uzly odpovídají částem vzniklým dekompozicí objektu. Dvě možné cesty – *kostra* nebo *dekompozice* (např. pomocí získávání konvexních podoblastí) → vytvoření grafu s uzly vázanými nějakou relací sousednosti.

Výhody reprezentace oblastí grafem

- ♦ nezávislost na poloze a natočení, přitom obě vlastnosti mohou být do popisu grafem zahrnuty
- ♦ necitlivost vůči konkrétnímu provedení daného tvaru
- ♦ nezávislost na velikosti (pokud nedochází ke kolizi s rozlišením obrazu)
- ♦ člověku blízká tvarová reprezentace, ze které lze snadno určit významné prvky popisu
- ♦ vhodná pro syntaktické rozpoznávání

Z uvedených vlastností plyne i složitost získávání tvarového popisu. Chceme-li se přiblížit skutečnému počítačovému vidění, jiné cesty pravděpodobně není.

3.3.1 Jednoduché skalární popisy oblastí

Většinou vedou k příznakovému popisu oblastí v jednoduchých úlohách, ale může jich být využito i ve složitějších úlohách např. pro popis jednotlivých dekomponovaných částí objektu.

Velikost

- ♦ nejjednodušší a zcela přirozená vlastnost
- ♦ dána počtem obrazových elementů, obsažených v oblasti
- ♦ při znalosti velikosti obrazového bodu, lze zjistit i skutečnou velikost oblasti (velikost bodu nemusí být stejná pro všechny body obrazu – např. družicový snímek)
- ♦ Výpočet velikosti v obarveném obraze:
- ♦
$$\text{velikost} = \sum_i \sum_j g(i, j, p)$$
- ♦
$$g(i, j, p) = \begin{cases} 1 & \text{pro } f(i, j) = p \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$
- ♦ p – barva (identifikační číslo)

Eulerovo číslo

$$E = S - N$$

S – počet souvislých částí oblasti

N – počet děr

Projekce, výška, šířka

horizontální projekce:

$$p_H(i) = \sum_j g(i, j, p)$$

vertikální projekce:

$$p_v(j) = \sum_i g(i, j, p)$$

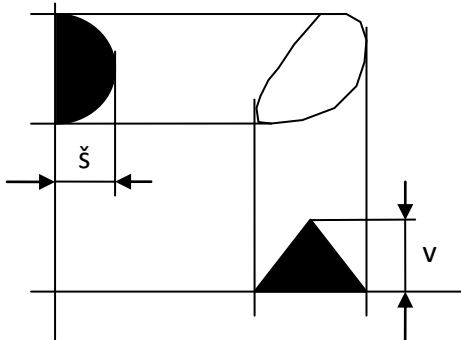
p – číslo oblasti

výška: $v = \max_j p_v(j)$

šířka: $\check{s} = \max_i p_H(i)$

Feretovy průměty – pro určitý úhel pohledu.

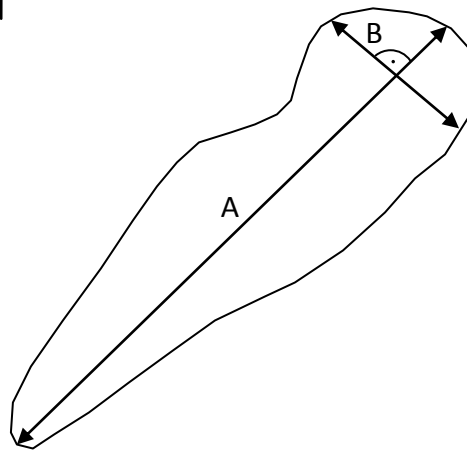
Nejprve se provede rotace objektu o daný úhel a pak se spočítá horizontální projekce.



Výstřednost

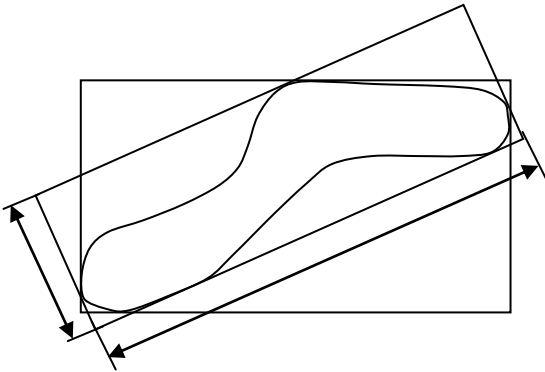
poměr délek nejdelší tětivy A

a nejdelší k ní kolmé tětivy B



Podlouhlost

poměr mezi délkou a šířkou pravouhelníku opsaného oblasti, který má nejmenší plochu ze všech pravouhelníků, které lze oblastí opsat



Pravouhlost

F_k – poměr mezi velikostí oblasti a plochou opsaného pravouhelníka ve směru (natočení) k

k měníme diskrétně, postačí měnit v rozmezí 0° - 90°

$$\text{pravoúhlost} = \max_k F_k$$

$$\text{pravoúhlost} \in (0,1) \quad \rangle$$

pravoúhlost = 1 - dokonale pravoúhlá oblast

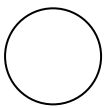
Směr

- ♦ má smysl jen pro podlouhlé oblasti
- ♦ směr delší strany opsaného obdélníku použitého pro výpočet podlouhlosti / pravoúhlosti

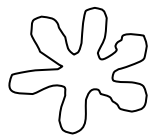
Nekompaktnost

$$\text{nekompaktnost} = \frac{(\text{délka hranice oblasti})^2}{\text{velikost}}$$

nejkompaktnější v Euklidově prostoru – *kruh*



kompaktní objekt



nekompaktní objekt

3.3.2 Momentový popis

Interpretujeme normalizovanou jasovou funkci obrazu jako hustotu pravděpodobnosti dvojrozměrné náhodné veličiny.

Vlastnosti této veličiny lze vyjádřit pomocí statistických vlastností – *momentů*

Lze použít pro binární i šedotónové obrazy

Obecný moment

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q \cdot f(x, y) dx dy$$

v digitálních obrazech:

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q \cdot f(i, j)$$

není invariantní vůči změně velikosti, natočení, posunutí, ani šedotónovým transformacím

Centrální moment

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - x_t)^p \cdot (y - y_t)^q \cdot f(x, y) dx dy$$

v digitálních obrazech:

$$\mu_{pq} = \sum_i \sum_j (i - i_t)^p \cdot (j - j_t)^q \cdot f(i, j)$$

$$x_t = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad y_t = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

$$i_t = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad j_t = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

je *invariantní* vůči posunu

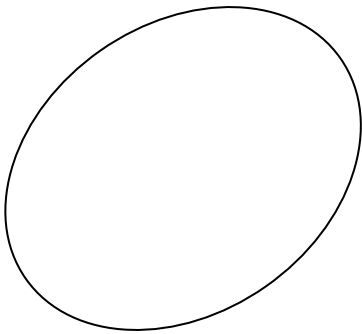
Normovaný centrální moment

$$\mathcal{G}_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{(\mu_{00})^\gamma} \quad \gamma = \text{celá část} \left(\frac{p+q}{2} \right) + 1$$

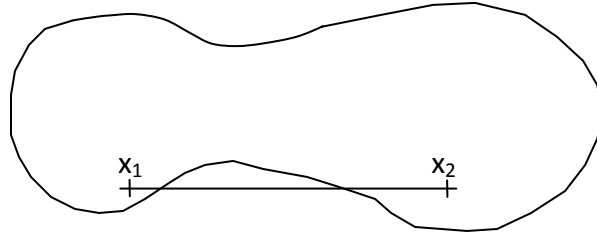
je navíc *invariantní* vůči změně měřítka

3.3.3 Konvexní obal

Oblast R je *konvexní* právě tehdy, když pro každé dva body $x_1, x_2 \in R$ platí, že všechny body úsečky $x_1 x_2$ také patří do R .

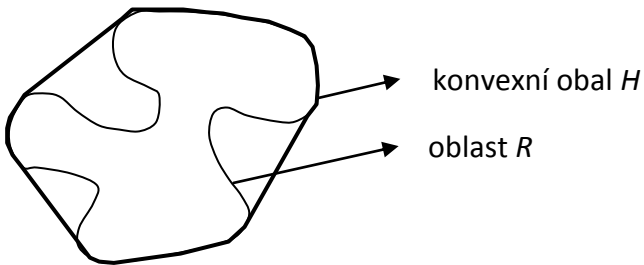


konvexní oblast



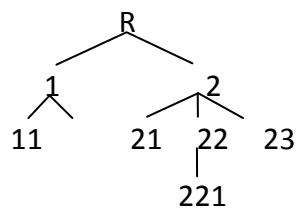
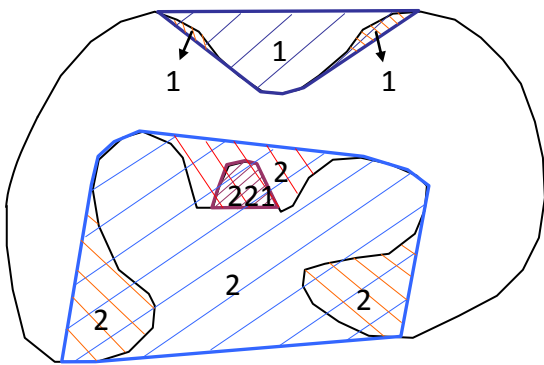
konkávní oblast

Konvexní obal – nejmenší konvexní oblast H taková, že $R \subset H$



Jiný způsob popisu tvarových vlastností – *strom konkávnosti oblastí*

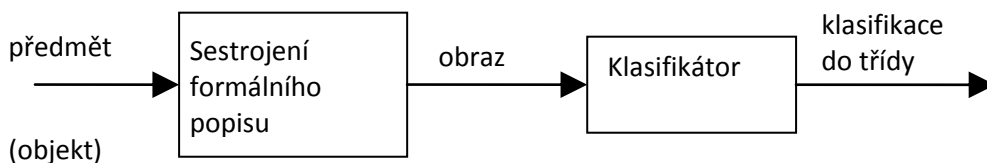
vytváříme konvexní obal oblastí, konvexní obal konkávní části, obal konkávních částí těchto částí, atd.



4 KLASIFIKACE

Rozpoznávání (klasifikace, angl. *Pattern recognition*) – zařazování předmětů do tříd

Klasifikátor nerozeznává objekty, nýbrž jejich obrazy.



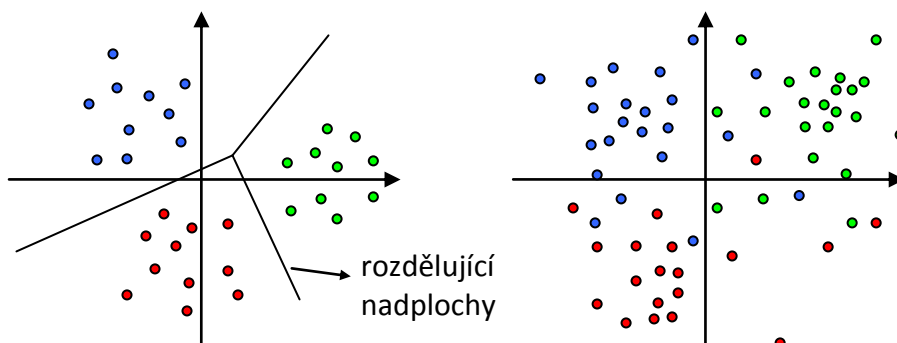
4.1 PŘÍZNAKOVÉ ROZPOZNÁVÁNÍ

Obrazy jsou charakterizovány vektorem, jehož souřadnice tvoří hodnoty jednotlivých příznaků.

Množina všech možných obrazů vytváří n -rozměrný obrazový prostor.

Při vhodném výběru příznaků je podobnost předmětů v každé třídě vyjádřena geometrickou blízkostí jejich obrazů.

Pokud lze obrazy jednotlivých tříd (různých) od sebe oddělit rozdělující nadplochou (mluvíme o *separabilních* množinách obrazů), je úloha klasifikace relativně jednoduchá a lze očekávat bezchybnou klasifikaci. Ve valné většině případů však množiny obrazů nejsou stoprocentně separabilní a část předmětů bude vždy chybně klasifikována.



4.1.1 Klasifikátor

Metoda nejbližšího souseda (NN)

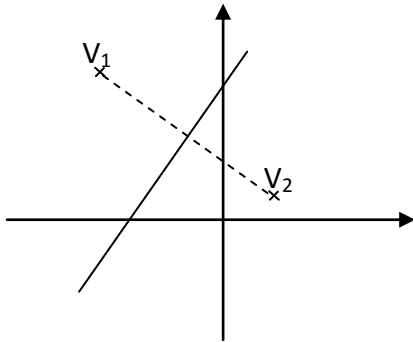
pro každou třídu je dána množina vzorových obrazů

při klasifikaci porovnáme neznámý obraz se všemi vzorovými obrazy všech tříd a zařadíme ho do stejné třídy, do jaké patří jemu nejbližší vzorový obraz.

nevýhoda: neřeší problém vychýlených vzorových obrazů, částečná náprava – metoda k -nejbližších sousedů

Metoda minimální vzdálenosti

každá třída je reprezentována jedním vzorovým obrazem, který lze vypočítat např. průměrem všech vzorových obrazů dané třídy.



4.1.2 Učení s učitelem

Základem je trénovací množina vzorových obrazů, kdy u každého je uvedeno zařazení do správné třídy.

Na základě této trénovací množiny je pak určena reprezentace tříd, např. pro metodu minimální vzdálenosti jsou vypočteny *centroidy* (průměry) vzorových obrazů pro jednotlivé třídy.

4.1.3 Učení bez učitele (shluková analýza)

U trénovací množiny není udána informace o příslušnosti obrazů k třídám.

Snahou je rozdělit obrazy do k tříd tak, aby byla minimalizována hodnota *kritéria optimality* (globální minimum nelze z výpočetních důvodů nalézt, snažíme se alespoň o přijatelné lokální minimum).

Metody lze rozdělit na:

hierarchické – vytvářejí shlukovací strom

- ♦ *aglomerativní* – vycházíme od jednotlivých obrazů a postupně spojujeme menší shluky do větších
- ♦ *divizní* – vycházíme od celé trénovací množiny jako jednoho shluku a postupně dělíme větší shluky na menší

nehierarchické – různé iterační metody – např. MacQueenův algoritmus

4.2 STRUKTURÁLNÍ (SYNTAKTICKÉ) METODY

Syntaktický popis je vhodný tam, kde potřebujeme zachytit strukturu objektů nebo kde pro jejich složitost chceme využít strukturu pro rozpoznávání.

Syntaktický popis objektu je hierarchická struktura jeho elementárních vlastností. Tyto elementární vlastnosti se nazývají primitiva.

Obraz je většinou reprezentován řetězcem primitiv. Množina všech primitiv bývá nazývána abecedou. Množina všech řetězců, pomocí nichž lze charakterizovat obrazy jedné třídy, se nazývá jazyk popisu. Jazyk

je generován nějakou gramatikou. Gramatika je soubor pravidel, pomocí nichž lze ze symbolů abecedy vytvářet řetězce, charakterizující možné tvary objektů.

Učení

Na základě znalosti úlohy, zkušenosti, případně trénovací množiny je třeba zkonstruovat gramatiku generující řetězce, reprezentující možné tvary objektu. Tato úloha je převážně prováděna ručně. Úloha automatické inference (odvozování) gramatik je jen velmi obtížně řešitelná.

Rozpoznávání

Příslušnost neznámého obrazu do dané třídy testujeme procesem tzv. syntaktické analýzy. Při ní se snažíme pomocí gramatiky charakterizující danou třídu vygenerovat neznámý řetězec.

5 ANALÝZA POHYBU

Vstupem je posloupnost obrazů snímaných po sobě v následujících časových okamžicích → velký nárůst objemu dat.

Tři hlavní typy úloh

- ♦ *detekce pohybu* – např. automatický hlídač, detekující jakýkoliv pohyb ve snímaném prostoru (např. ostraha)
- ♦ *nalezení umístění pohybujících se objektů*, případně popis a rozpoznávání těchto objektů, složitější úlohou je pak sledování trajektorie objektu
- ♦ určování 3D vlastností objektů s využitím jejich 2D projekcí získaných v různých časových okamžicích pohybu

Analýza pohybu může probíhat

- ♦ bez ohledu na polohu pohybujících se objektů – v tomto případě se nejprve hledají významné body obrazu a pak se hledá jejich korespondence v sekvenci obrazů
- ♦ v závislosti na detekci objektů využíváme těchto předpokladů
- ♦ předpoklad maximální rychlosti
- ♦ vzdálenost, ve které můžeme hledat bod pohybujícího se objektu v následujícím obrazu je $v \cdot dt$, kde v je rychlost pohybu a dt je časový interval mezi po sobě jdoucími obrazy
- ♦ předpoklad malého zrychlení
- ♦ vzhledem k nenulové hmotnosti je změna rychlosti za čas dt malá
- ♦ předpoklad společného pohybu a pevné shody
- ♦ tuhá tělesa mají na následujících snímcích stabilní konfiguraci bodů, které se pohybují stejným směrem

5.1 ROZDÍLOVÉ METODY ANALÝZY POHYBU

Rozdílový obraz

binární obraz d

$$d(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{pro } |f_1(i, j) - f_2(i, j)| < e \\ 1 & \text{jinak} \end{cases}$$

Příčiny, které způsobují hodnotu 1 v rozdílovém obrazu:

- ♦ $f_1(i, j)$ byl prvkem pozadí a $f_2(i, j)$ prvkem pohybujícího se objektu (nebo naopak)
- ♦ $f_1(i, j)$ byl prvkem pohybujícího se objektu a $f_2(i, j)$ prvkem jiného pohybujícího se objektu
- ♦ $f_1(i, j)$ i $f_2(i, j)$ byly prvkem téhož pohybujícího se objektu, ale v místech s různým jasem
- ♦ vlivem přítomnosti šumu se budou vyskytovat nesprávné detekované body s hodnotou 1

Akumulativní rozdílový obraz

$$d_{akum}(i, j) = \sum_{l=1}^L a_l \cdot |f_R(i, j) - f_l(i, j)|$$

f_R – tzv. referenční obraz

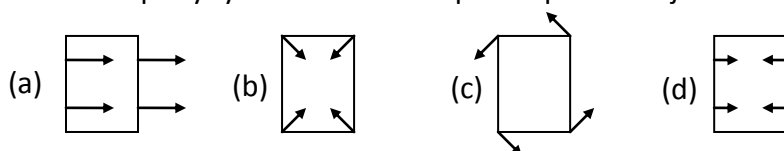
f_l – posloupnost L obrazů

a_l – váhové koeficienty, označují významnost jednotlivých obrazů posloupnosti

Referenční obraz – obraz zpracovávané scény, který obsahuje pouze stacionární objekty. Pokud je pohyb na scéně nepřetržitý, lze získat referenční obraz tak, že nahradíme oblasti odpovídající pohybujícím se objektům odpovídajícími oblastmi z jiných snímků. Druhou možností je určit referenční obraz interaktivně.

5.2 OPTICKÝ TOK

- ♦ zachycuje všechny změny obrazu za čas dt
- ♦ každému bodu obrazu odpovídá dvojrozměrný vektor rychlosti, který vypovídá o směru a velikosti rychlosti pohybu v daném místě obrazu
- ♦ výpočet optického toku je nutným předpokladem zpracování vyšší úrovně, které umožňuje pracovat se statickým i pohyblivým umístěním pozorovatele a určit parametry pohybu, relativní vzdálenosti předmětů v obraze apod.
- ♦ druhy pohybu, které se v dynamických obrazech vyskytují, lze popsat kombinací čtyř základních pohybů – translační pohyb v rovině kolmé na osu pohledu **(a)**, translace do dálky **(b)**, rotace kolem osy pohled **(c)** a rotace kolmá na osu pohledu **(d)** – při analýze pohybu z optického toku lze tyto základní pohyby od sebe odlišit aplikací poměrně jednoduchých operátorů



5.3 ANALÝZA POHYBU NA ZÁKLADĚ DETEKCE VÝZNAMNÝCH BODŮ

Základem je vyřešit problém *vzájemné korespondence* sobě odpovídajících částí objektů v různých okamžicích pohybu. Z toho lze snadno vytvořit obraz *rychlostního pole*.

V prvním kroku je třeba nalézt významné body – takové, které jsou co nejméně podobné svému okolí – vrcholy, hranice objektů apod.

Následujícím úkolem je nalézt pomocí postupů srovnání korespondenci významných bodů v po sobě jdoucích obrazech a postupně tak vytvořit rychlostní pole

Detekce významných bodů

Moravcův operátor

$$g(i, j) = \frac{1}{8} \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} |f(i, j) - f(k, l)|$$

- dává dobré výsledky na hranách a v rozích

Vzájemná korespondence

Proces hledání začíná určením všech potenciálních korespondencí mezi dvojicemi významných bodů dvou po sobě jdoucích obrazů. Každá dvojice korespondujících bodů je ohodnocena jistou pravděpodobností udávající věrohodnost jejich korespondence. Tyto pravděpodobnosti jsou iterativně zpřesňovány na základě principu společného pohybu. Iterační proces skončíme tehdy, když pro každý významný bod z jednoho obrazu existuje právě jeden odpovídající významný bod z následujícího obrazu. Dále bereme v úvahu předpoklad maximální rychlosti. Do nalezení korespondence je také důležitá konzistence dvojic bodů, tzn. minimální rozdíl rychlosti pohybu těchto bodů.

6 3D VIDĚNÍ

Rekonstrukce

nalezení geometrických a fyzikálních parametrů objektů ve 3D scéně tak, aby bylo možno rekonstruovat jejich 3D tvar

Rozpoznávání

nalezení a klasifikace objektů ve scéně, často také určení polohy, popř. orientace

V praktických úlohách se často snažíme vyhnout 3D vidění, převést úlohu na 2D. Důvodem jsou požadavky na robustnost, nízkou cenu a velkou efektivitu využití systémů počítačového vidění.

Vstupy

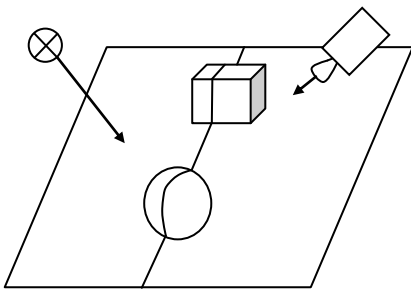
- ♦ intenzitní obraz(y)
- ♦ *stereovidění* – 2 intenzitní obrazy
- ♦ (problém korespondence – nalezení bodů v levém a pravém obraze, které si odpovídají)
- ♦ hloubková mapa

Ize ji získat např. pomocí *hloubkoměrů* –

různé principy:

podobný princip jako *radary a sonary* – měří fázový posun mezi vyslaným a přijatým signálem

princip proužkového osvětlení – scéna osvětlena úzkým proužkem světla, snímána z jiného úhlu (problém stínů)



princip Moiré proužků – scéna je osvětlena přes pravidelnou mřížku z rovnoběžných proužků. Podle jejich šířky lze určovat sklon povrch.

Princip proměnného zaostření objektivu – po detekci maximální ostrosti je vzdálenost odečtena z nastavení zaostření objektivu

Teorie 3D vidění

(Marrova teorie)

4 úrovně reprezentace 3D scény:

intenzitní obraz

prvotní náčrtek

2½ dimenzionální náčrtek

plná 3D reprezentace

- ♦ **Prvotní náčrtek** obsahuje informace o velikostech a směrech významných jasových změn v obraze a o jejich vzájemném geometrickém uspořádání. Předpokládáme, že takto získané čáry a skvrny zachovávají informaci potřebnou pro pozdější 3D reprezentaci.
- ♦ **2½ rozměrný náčrtek** – pro jeho získání se používá informace obsažená v prvotním náčrtku. Používají se různé techniky, souhrnně nazývané „*tvar z X*“ – dále je třeba mít mechanismus pro sdružování výsledků jednotlivých modulů

Tvar ze stereovidění

- ♦ tvar získáváme na základě dvou obrazů téže scény z různých úhlů pohledu
- ♦ problém korespondence

Tvar z pohybu

- ♦ tvar získáváme z posloupnosti obrazů
- ♦ pohybovat se může kamera nebo objekty nebo obojí
- ♦ předpokládáme pomalý pohyb – relativně malá změna mezi obrazy – usnadňuje úlohu korespondence
- ♦ založeno na výpočtu optického toku

Tvar z jasu

- ♦ vycházíme ze závislosti jasu na odrazivosti povrchu, jeho 3D orientaci, poloze světelných zdrojů a poloze pozorovatele

Tvar z textury

- ♦ Texturu si lze představit jako vzor na povrchu objektu, který vykazuje jistou pravidelnost. Změny v textuře po perspektivním zobrazení jsou způsobeny tvarem objektu, resp. změnou sklonu jeho povrchu vzhledem k úhlu pohledu. Toho lze využít pro zjištění tvaru.

- ♦ **Plná 3D reprezentace objektu**

má se opírat o geometrické vlastnosti, které lze v obraze nalézt a které jsou vyjádřené vzhledem k souřadnému systému, vycházejícímu z tvaru objektu

Základní geometrické vlastnosti:

střed (nejčastěji těžiště)

celková velikost

zobecněná osa symetrie, existuje-li

Zatím nevyřešeným krokem Marrovy teorie je přechod od 2½ D náčrtku k plné 3D reprezentaci.

Naopak postupy „tvar z X“ dosáhly značné technické dokonalosti a používají se v praktických aplikacích.

Modely 3D objektů

Lze rozdělit na:

deskriptivní – plně popisují tvar objektu, definována odrazivost a osvětlení, z takového modelu lze vytvořit syntetický intenzitní obraz i syntetickou hloubkovou mapu pro libovolné místo pozorování

diskriminační – slouží k odlišení objektů několika tříd

Používané typy reprezentace:

- ♦ **drátový model**

graf, jehož vrcholy odpovídají 3D bodům (často vrcholům objektu), hrany odpovídají hranicím (nespojitém normál k povrchu). Nehodí se pro popis objektů s křivočarými povrchy.

- ♦ **CSG (constructive solid geometry) model**

používá jako základ množinu jednoduchých 3D objektů, jako hranoly, kužely, válce, koule, krychle, kvádry ap. a kombinuje je v určité pozici, zvětšení a orientaci pomocí jednoduchých množinových operací, jako průnik, sjednocení, rozdíl, ap. Model je reprezentován stromem; listy odpovídají jednotlivým elementárním tělesům, vyšší uzly představují množinové operace. Toto vyjádření je výpočetně velmi náročné.

- ♦ **Povrchový model**

reprezentuje povrch objektu pomocí

množiny povrchů tělesa

množiny křivek v 3D prostoru, které jsou průsečíky povrchů tělesa

grafu, který vyjadřuje sousednost jednotlivých ploch na povrchu objektu

povrchy lze vyjádřit v různém tvaru:

- ♦ implicitní

- ♦ $S = \{(x, y, z) : f(x, y, z) = 0\}$

- ♦ parametrický

- ♦ $S = \{(x, y, z) : x = f_1(u, v), y = f_2(u, v), z = f_3(u, v), (u, v) \in D \subset R^2\}$

- ♦ povrch jako graf funkce

$$\diamond S = \{(x, y, z) : z = f(x, y), (x, y) \in D \subset R^2\}$$

♦ **Mnohostěnný model**

Pro aproximaci křivočarých povrchů se používá náhrada mnohostěnem, jehož stěny jsou trojúhelníky.

Tam, kde mnohostěnný model nestačí, používá se model složený z kvadratických ploch (části paraboloidu, elipsoidu, hyperboloidu, ap.) nebo *spline*.

♦ **Objemový model**

dělí objekty na malé elementy objemu (*voxel - volume element* podobně jako *pixel*)

♦ **Zobecněné válce**

reprezentace, které se používá pro popis objektů s výraznými symetriemi.

Zobecněný válec je definován pomocí:

křivky v 3D prostoru, zvané *páteř*

plochy průřezu objektu v každém bodě páteře.

Páteř nemusí být obsažena v průřezu. Průřez lze reprezentovat parametricky, kde parametr je posun podél páteře.

Obvykle se předpokládá, že každý průřez je kolmý na páteř.

♦ **GEON (z angl. geometrical ions)**

Zdůrazňuje kvalitativní charakter reprezentace objektů. 3D objekty jsou složeny z několika sousedících GEONů. Navrženo 36 základních GEONů, kde každý je charakterizován čtveřicí kvalitativních vlastností:

hranice – rovná / křivá

symetrie – středová / osová / žádná

změna velikosti – stálá / zvětšující se / zvětšující i zmenšující se

osa – přímá / křivá

Pokud je třeba rozeznat kvalitativně podobné objekty, lišící se např. jen velikostí, je třeba přidat i kvantitativní příznaky.

7 APLIKACE

Vývojové systémy:

- ♦ slouží pro přípravu a ověření nových algoritmů v laboratorních podmínkách.
- ♦ pracují většinou *off-line*, vstupem může být záznam na filmu nebo videokazetě
- ♦ programové vybavení bývá modulární; jednotlivé moduly realizují základní operace zpracování obrazu, lze je vyvolávat buď interaktivně nebo programem

Jednoúčelové přístroje:

- ♦ používají se v konkrétních aplikacích, jimž jsou "*šité na míru*", jejich zaměření na oblast je zlevňuje. Často bývají kladeny požadavky na vysokou rychlost zpracování – pak se používá speciálních architektur s využitím paralelního zpracování

Přehled aplikací

Dálkový průzkum Země

data se snímají ve velkém počtu spektrálních pásem (ve viditelném i neviditelném spektru)

uplatnění např. v následujících oblastech:

- ♦ *lesnictví* – mapování, určení druhů, typu, stáří, hustoty lesů, působení škodlivých vlivů (exhalace, škůdci, ap.), všestranný výzkum vegetace
- ♦ *zemědělství* – mapování, určení hustoty rostlinného krytu, předpovědi velikosti úrody, sledování průběhu žní, včasné zjištění napadení porostů, určení potřeby závlah
- ♦ *hydrologie* – dynamika sněhové pokrývky, dynamika zásob vody na velkých plochách, sledování záplav, zjišťování a kontrola znečištění vodních nádrží, výzkum moří a oceánů
- ♦ *ochrana životního prostředí* – sledování vlivu velkých technických děl na přírodu, sledování území porušených těžbou, zjišťování znečištění ovzduší exhalacemi
- ♦ *geologie* – určení vztahů mezi spektrální odrazivostí a geochemií půdy, vyhledávání oblasti výskytu a těžby nerostů, studium dynamických změn ve vodní síti, mapování
- ♦ *meteorologie* – předpověď počasí, sledování oblačných podmínek, sledování vývoje nebezpečných meteorologických jevů (bouřka, hurikány ap.), sledování teploty zemského povrchu, studium sněhové pokrývky
- ♦ *geodézie a kartografie* – tvorba tématických map malého měřítka, údržba a aktualizace map, automatizace tvorby map
- ♦ územní plánování a urbanismus
- ♦ archeologie
- ♦ vojenství
- ♦ typické extrémně velké objemy dat

Lékařské aplikace

- ♦ *rozpoznávání rakovinných buněk*- automatizace procesu pro zpracování velkého objemu dat (např. celé populace)
- ♦ *texturní analýza myokardu v echokardiografii* – využívá se pro diagnostiku srdečních onemocnění
- ♦ automatické vyhodnocování angiografického vyšetření levé komory srdeční – potřeba, aby výsledky byly k dispozici okamžitě na operačním sále
- ♦ *pedobarografie* – analýza stavu nožní klenby – určení rozdělení tlaku na styku nohy s podložkou, velikost plochy styku apod. – využíváno v ortopedii, antropologii, biomechanice ap.

Technická diagnostika

- ♦ defektoskopie a defektometrie prozařování, vizualizace defektů

Výroba

Výrobní aplikace pracují většinou s velmi dobrým nasvícením, což způsobuje, že vstupem jsou binární obrazy

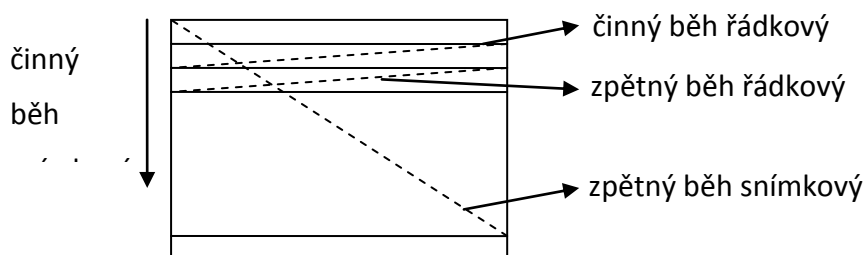
- ♦ *počítání předmětů* – např. lahví, výrobků na běžícím páse
- ♦ kontrola kvality výrobků
- ♦ *robotické úlohy* – řeší úlohu identifikace součástí, které se nacházejí ve scéně, určování jejich polohy a orientace za účelem uchopení, složitější úlohou je montážní úloha, tedy rozpoznání správné součástky ve scéně a její montáž – vytváření větších celků
- ♦ obsluha textilních strojů
- ♦ zasouvání sondy do otvorů v generátoru páry primárního okruhu jaderného reaktoru
- ♦ robotické nasazování kol při výrobě automobilu

8 HARDWARE PRO SNÍMÁNÍ OBRAZU

Fotografický film

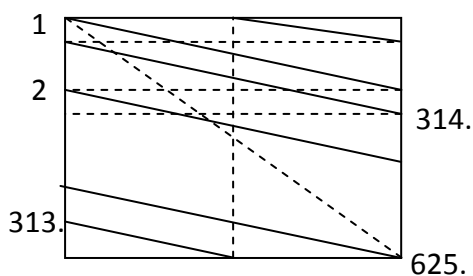
V současné době je nejpoužívanější tzv. kinofilm (35 mm film). Šířka filmu je tedy 35 mm, velikost políčka je 24x36 mm. Rozlišení odpovídá hrubosti zrna filmového materiálu. Se zvyšující se citlivostí filmu (DIN, ASA) se zvyšuje zrnitost. Běžně používané filmy mají citlivost 100-200 ASA. Za velmi citlivé filmy pro běžnou fotografii se považují filmy s ASA 800, příp. 1600. Citlivost 100 ASA přibližně odpovídá 21° DIN. Každé zdvojnásobení hodnoty ASA odpovídá nárůstu DIN o 3°.

TV signál



625 řádků

prokládané řádkování



TV

25 snímků / sec

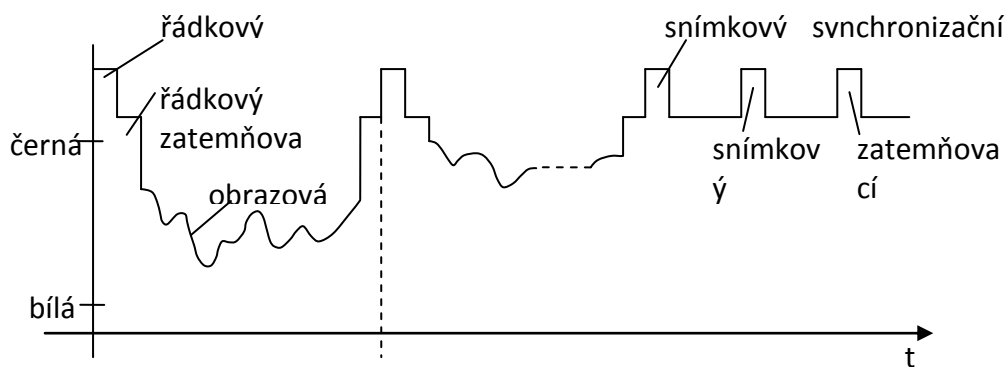
50 půlsnímků / sec

15625 řádků / sec

šířka pásma 6MHz

systemy přenosu barevné informace:

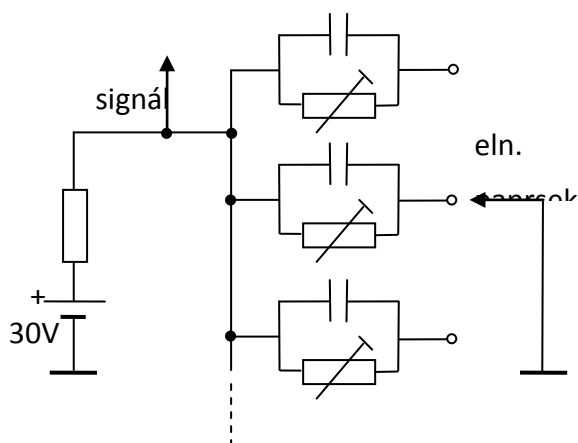
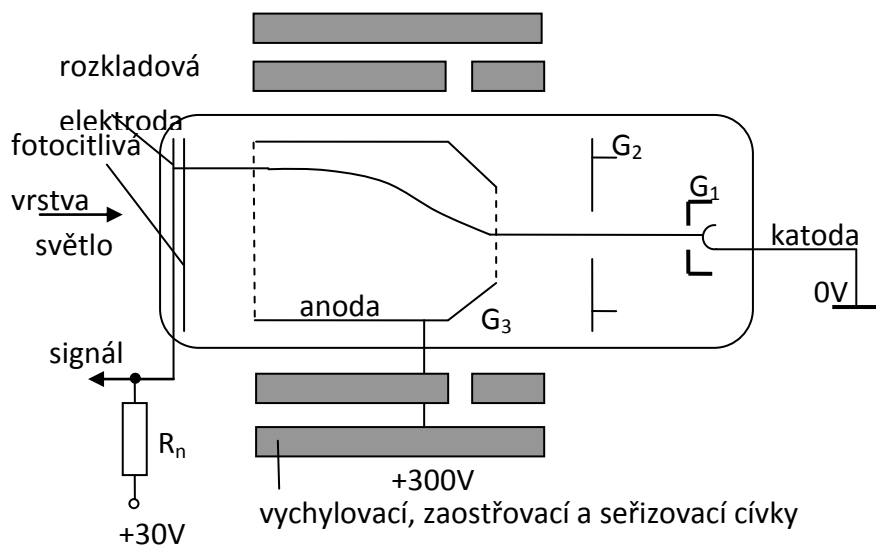
NTSC, PAL, SECAM



Kamery

snímací elektronky

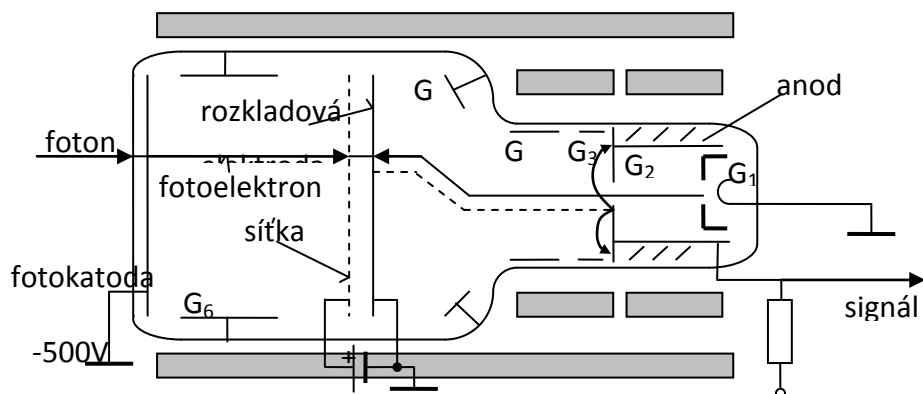
Vidikon (Plumbikon)



Činnost vidikonu je založena na změně elektrické vodivosti vrstvy nanesené na vodivé a průhledné elektrodě. Světlo proniká průhlednou rozkladovou elektrodou a mění vodivost fotoelektrické vrstvy. Tu si lze představit jako množinu paralelně zapojených kondenzátorů na jedné straně od sebe oddělených, které se vybíjejí přes proměnný odpor závislý na osvětlení vrstvy. Na fotoelektrickou vrstvu dopadá elektronový paprsek z katody, který postupně uzemňuje jednotlivé kondenzátory, takže se v okamžiku dopadu paprsku

nabíjejí přes R_n ze zdroje napětí 30V. Nabíjecí proud se mění v závislosti na osvětlení, které dopadlo na daný obrazový bod.

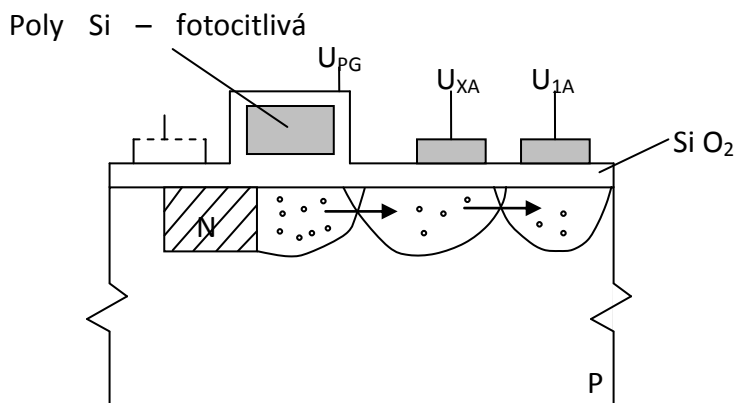
Superortikon



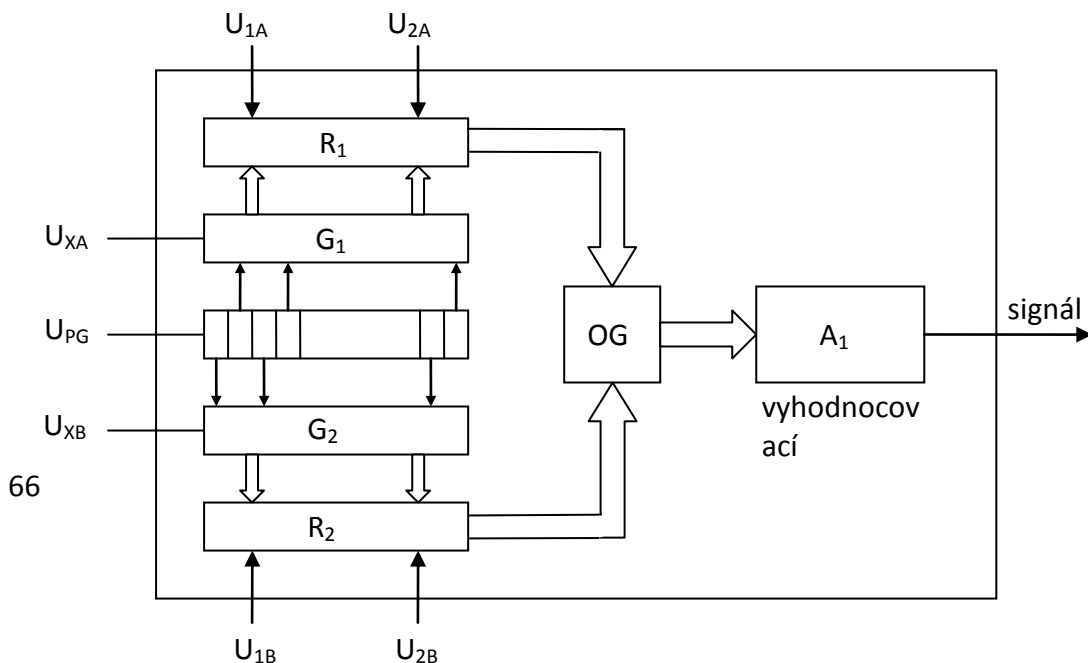
Dopadající fotony (světlo) způsobí emisi fotoelektronů na fotokatodě. Ty dopadají na rozkladovou elektrodu, kde způsobují sekundární emisi elektronů. Sekundární elektrony jsou přitaženy k síťce a tím vznikne mezi rozkladovou elektrodou a sítkou náboj, vybíjený elektronovým paprskem. Všechny elektrony se nespotřebují na vybití náboje a vlivem pole G_5 se vrací zpět. V tomto zpětném paprsku je již zachycena změna obrazového signálu.

CCD

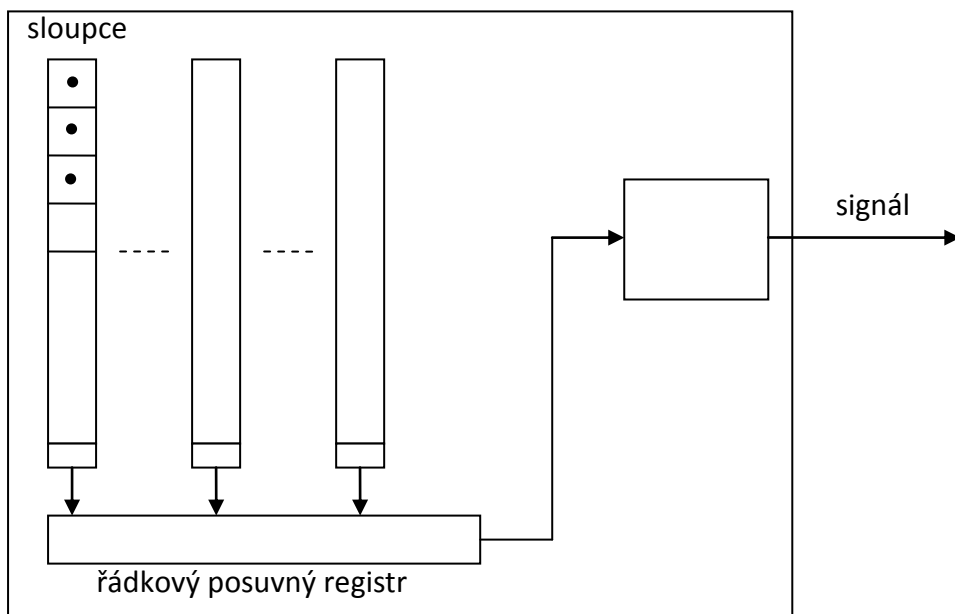
nábojově vázané prvky



blokové schéma řádkového snímače



blokové schéma maticového snímače



Velikost CCD čipu 4,2 x 1,5 mm (příklad řádkového snímače TS 100)

Scannery

(řádkové snímače)

Slouží pro snímání plochých neměnných předloh (papír). Jako čidlo slouží řádkový CCD obvod, který se posouvá podél snímané plochy.

Typy scannerů: - mechanické (ruční, deskové, bubnové, satelity)
 - letící bod (světelný, laserový)

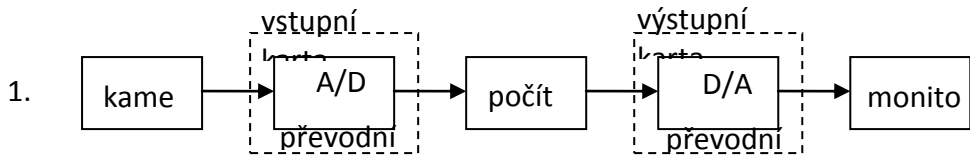
Družicové scannery lze rozdělit na mechanooptické a elektrooptické, obecně se jedná o bubnové scannery, kde Země je otáčející se buben.

Hardwarové rozlišení běžného komerčně dostupného scanneru:

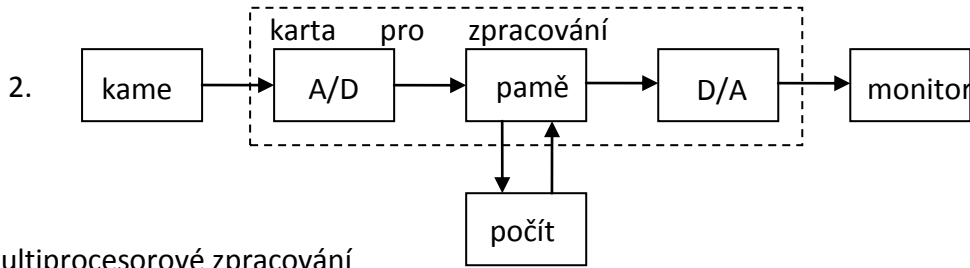
600 dpi (dots per ind – bodů na palec)

30 bitů / bod

Způsob zpracování



Počítač je plně vytížen.



Multiprocesorové zpracování

