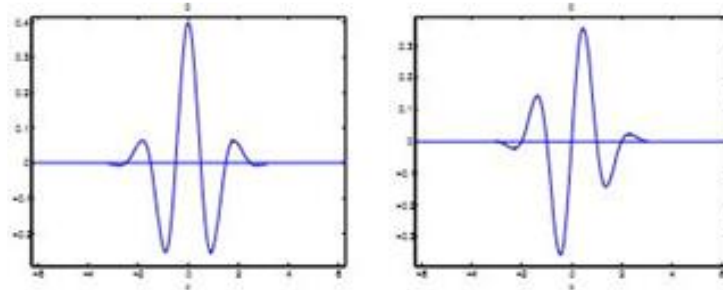


## 9.1 Gáborove filtre

Prvá zmienka o použití Gáborových filtrov sa nachádza v práci [GAB46], ktorej autorom je maďarsko-britský fyzik D. Gábor. Jednorozmernú Gáborovu funkciu tvorí goniometrická funkcia modulovaná Gaussovou krivkou (**Obr. 9.1**).



**Obr. 9.1:** Kosínusová (párna) a sínusová (nepárna) zložka Gáborovho filtra

Túto jednorozmernú funkciu následne J. Daugman vo svojej práci [DAU85] rozšíril na dvojrozmernú funkciu, ktorú je možné zapísať v komplexnom tvare pomocou vzťahu (9.1)

$$G(\lambda, \theta, \gamma, \varphi, \sigma, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x')^2 + \gamma^2(y')^2}{2\sigma^2}\right) \exp(i(\omega_0 x' + \varphi)) \quad (9.1)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

kde  $\lambda$  je vlnová dĺžka,  $f_0$  je priestorová frekvencia funkcie,  $\theta$  je natočenie,  $\gamma$  je pomer strán (angl. aspect ratio),  $\phi$  je fázový posun,  $\sigma$  je smerodajná odchýlka  $x$  a  $y$  sú súradnice. Premenné  $x', y'$  zodpovedajú nasledujúcim rovnicam:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \\ y' &= -x \sin(\theta) + y \cos(\theta) \end{aligned} \quad (9.2)$$

Z predošlého vzťahu (9.1) potom vieme vyjadriť reálnu zložku, párnou funkciou (angl. even):

$$G(\lambda, \theta, \gamma, \varphi, \sigma, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x')^2 + \gamma^2(y')^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x' + \varphi\right) \quad (9.3)$$

a imaginárnu zložku, nepárnou funkciou (angl. odd):

$$G(\lambda, \theta, \gamma, \varphi, \sigma, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x')^2 + \gamma^2(y')^2}{2\sigma^2}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x' + \varphi\right) \quad (9.4)$$

Podľa [KRU99, str. 1396] medzi parametrom  $\lambda$  a  $\sigma$  existuje vzťah, ktorý popisuje rovnica (3.6):

$$\frac{\sigma}{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\ln(2)}{2} \frac{2^{bw} + 1}{2^{bw} - 1}} \quad (9.5)$$

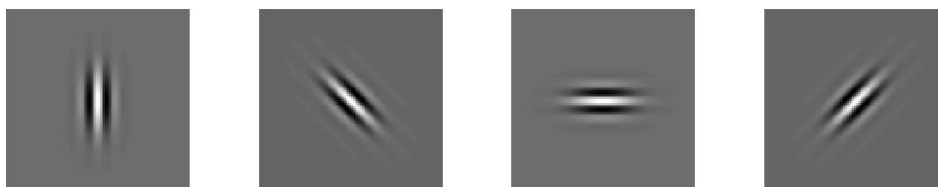
kde  $bw$  je šírka pásma definovaná v oktávach. Ak sa šírka pásma  $bw = 1$ , potom je možné použiť niektorý z nasledujúcich vzťahov, ktoré sú bežne uvádzané v literatúre:

$$\begin{aligned} \sigma &= 0,562\lambda \\ \sigma &\approx \pi/\omega_0 \end{aligned} \quad (9.6)$$

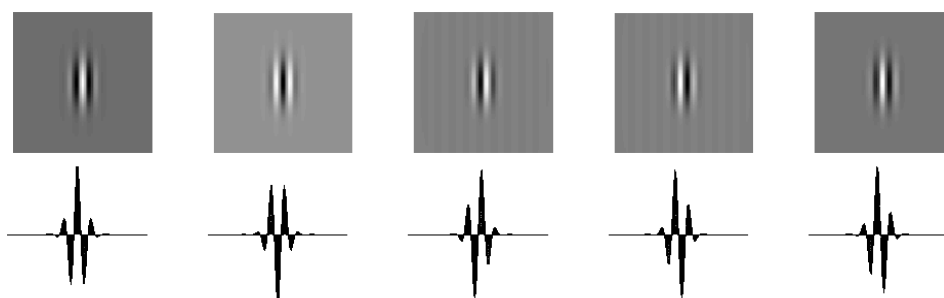
Nasledujúce obrázky (Obr.9.2 – 9.7) obsahujú príklady rôznych nastavení základných parametrov reálnej zložky dvojrozmernej Gáborovej funkcie.



**Obr. 9.2:** Vplyv vlnovej dĺžky  $\lambda \in \{5, 10, 20, 40\}$  pixelov



**Obr. 9.3:** Vplyv natočenia  $\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$



**Obr. 9.4:** Vplyv fázového posunu  $\phi \in \{0^\circ, 180^\circ, -90^\circ, 90^\circ, 45^\circ\}$

V druhom riadku na Obr. 9.3 môžeme rozoznať tri prípady. Ak hodnota  $\phi = 0^\circ$  alebo  $180^\circ$  tak je funkcia symetrická. Ak hodnota  $\phi = -90^\circ$  alebo  $90^\circ$  tak je funkcia antisymetrická. Pre iné hodnoty (napr.  $\phi = 45^\circ$ ) je funkcia asymetrická.



**Obr. 9.5:** Vplyv pomeru strán  $\gamma \in \{0.25, 0.5, 0.75, 1\}$

Na Obr. 9.5 je znázornený vplyv šírky pásma  $bw$  pomocou vzťahu (9.5), ktorý špecifikuje frekvenčný rozsah pásmovej priepustnosti Gáborovho filtra.



**Obr. 9.6:** Vplyv šírky pásma  $bw \in \{0.5, 1, 1.5, 2\}$  oktávy



**Obr. 9.7:** Vplyv smerodajnej odchýlky  $\sigma \in \{2, 5, 10, 20\}$

Tieto filtre sú najčastejšie využívané pri analýze textúr, detekcii hrán, identifikácii subjektu na základe analýzy dúhovky, pri rozpoznávaní tvárí, analýze pohybu a používajú sa ako nástroj na vysvetlenie vizuálnych vnemov.

## Vizuálny systém

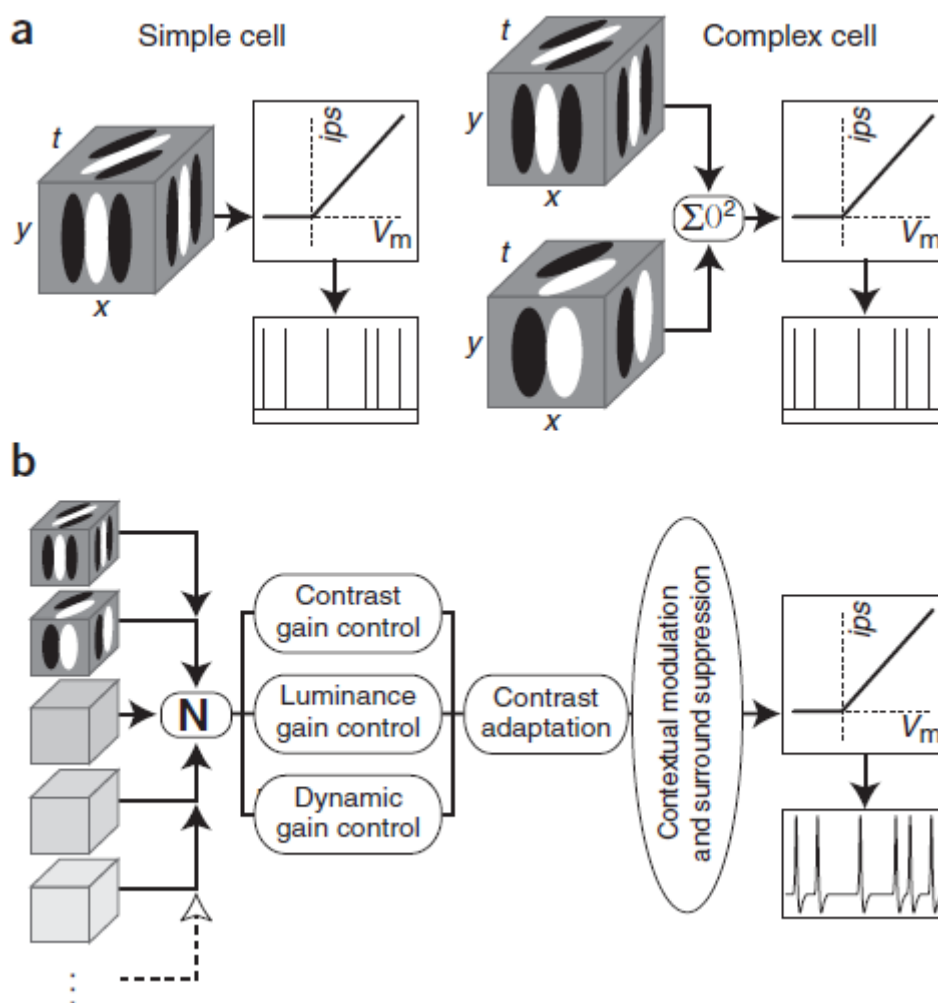
Činnosť vizuálneho systému zahŕňa najmä spracovanie obrazov. Pokusmi sa snažíme pochopiť procesy, ktoré sú použité pri ich spracovaní štúdiom primárnej zrakovkej kôry mozgu (angl. primary visual cortex). Cieľom výskumov je navrhnúť taký model, ktorý by vedel predikovať odpovede na ľubovoľný vstupný stimul [CAR06].

Neuróny v primárnej zrakovkej kôre (V1) reagujú na vstupné stimuly vzhľadom na rôzne parametre ako poloha, veľkosť, tvar a farba objektu. Vzniknuté modely sú založené na pozorovaniach odpovedí neurónov na vstupné stimuly ako pás svetla (angl. bar),

bodové svetlo, sínusová mriežka (angl. gratings). Známe sú nasledujúce dva modely [RUS05, str. 1647].

Staré modely (okolo roku 1985) sú založené na prechode obrazu cez jeden alebo viacero lineárnych časopriestorových filtrov. Odpoveď vzrastá v prípade, že vstup zodpovedá tvaru filtra. V prípade odlišnosti produkuje zanedbateľnú odpoveď. Tieto modely sú založené na Gáborových filtroch.

Neuróny, ktoré sú citlivé na polohu stimulu v receptívnom poli (angl. receptive field) sa nazývajú jednoduché bunky (angl. simple cells). Sú modelované pomocou jedného lineárneho filtra a ich výstup je upravený nelineárnym prahom (angl. spiking threshold nonlinearity), ktorý dodržiava Poissonovo rozdelenie, ktoré konvertuje napätie  $V_m$  na impulzy (angl. spikes) s frekvenciou *ips*. Jednoduché bunky sú schopné odpovedať na ľubovoľný tvar stimulu, statického či pohybujúceho sa. Príkladom sú X bunky na sietnici mačky resp. P bunky primátov.



**Obr. 9.8:** Starý (a) a nový (b) model buniek zrakovej kôry [RUS05, str. 1648]

Neuróny necitlivé na polohu, nazývané zložené bunky (angl. complex cells) sú modelované pomocou dvojice fázovo posunutých filtrov, ktorých výstup je umocnený a sčítaný tzv. energetický model (angl. energy model) a až potom prejde cez nelineárny prah. Zložené bunky naopak reagujú na vhodné natočenie bez ohľadu na pozíciu v receptívnom poli. Príkladom sú Y bunky na sietnici mačky resp. M bunky primátov.

Odpovede oboch typov buniek sú však nepravidelné. Tento starý model nielenže predikuje výber odpovedí neurónov na podnety ako pás, hrany a mriežky, ale tiež poskytuje presvedčivé odpovede na zložité podnety ako šachovnica, náhodný bod a fotografie. Výskumy však ukazujú, že existujú prípady, kedy tento starý model zlyháva (napr. existencia hyperkomplexných buniek), čo podporuje vznik nového modelu.

Nový model (okolo roku 2005) rieši nedostatky starého modelu. Tento model obsahuje väčší počet filtrov, ktoré sú kombinované pomocou ľubovoľnej nelineárnej funkcie.

Tiež obsahuje niekoľko ďalších mechanizmov, ktoré menia odpovede vzhľadom na kombináciu prezentovaných stimulov. Sú to tieto mechanizmy:

- Kontrola nad prírastkom jasú (angl. luminance gain control)

Reguluje zmenu priemerného jasú receptívneho poľa.

- Kontrola nad prírastkom kontrastu (angl. contrast gain control)

Reguluje zmenu miestneho priemerného kontrastu.

- Kontrola nad prírastkom dynamiky (angl. dynamic gain control)

Reguluje dočasnú dynamiku odpovedí závislých na charaktere súbežných stimulov.

- Adaptácia kontrastu (angl. contrast adaptation)

Dlhšie známy fenomén, že odpovede závisia na histórii stimulácie. Ide o časovo závislú nelinearitu, ktorá závisí čiastočne na aktivite neurónu v minulosti a čiastočne od zmien na synaptických vstupoch.

- Potlačenie okolia (angl. surround suppression)

Neschopnosť starého modelu vysporiadať sa s existenciou hyperkomplexných buniek (angl. hypercomplex cells), ktoré súvisia s potlačením odpovede na podnet, ktorý je mimo receptívneho poľa.

- Kontextový efekt (angl. contextual effect)

Vplyv reakcií neurónov z iných zrakových oblastí.

• Výstup prechádza cez nelineárnu funkciu (Hodgkin-Huxley), ktorá má realistickejší priebeh.

Experimentálne boli zistené hodnoty dvoch parametrov Gáborových filtrov [KRU99]:

- pomer strán  $\gamma$ : 0,23-0,92
- šírka pásma  $bw$ : mačka 0,5-2,5 oktávy a makak 0,4-2,6 oktávy

Výskumy majú za cieľ pochopiť činnosť vizuálneho systému a získané poznatky využiť pri tvorbe systémov určených nielen na detekciu, lokalizáciu a rozpoznávanie, ale aj pre ďalšie oblasti spracovania obrazu.

### Extrakcia príznakov pomocou Gáborových filtrov

Nech  $I(x, y)$  je šedotónový obraz a  $G(\lambda, \theta, \phi, x, y)$  je reprezentácia Gáborovho filtra v priestorovej oblasti s vlnovou dĺžkou  $\lambda$ , natočením  $\theta$  a fázovým posunom  $\phi$ . Extrakcia príznakov v tomto prípade zodpovedá konvolúcii

$$K(\lambda, \theta, \varphi) = I \times G(\lambda, \theta, \varphi) \quad (9.7)$$

V prípade, že obraz a filter sú definované resp. transformované pomocou dvojroz-

mernej Fourierovej transformácie do frekvenčnej oblasti, mení sa konvolúcia na násobenie. Výsledok  $K$  nadobúda komplexné hodnoty, kde  $Re$  zodpovedá reálnej zložke a  $Im$  imaginárnej. Magnitúdu je potom možné vypočítať podľa nasledujúceho vzťahu

$$M(\lambda, \theta, \varphi) = |K(\lambda, \theta, \varphi)| = \sqrt{Re [K(\lambda, \theta, \varphi)]^2 + Im [K(\lambda, \theta, \varphi)]^2} \quad (9.8)$$

Výstup symetrickej a antisymetrickej Gáborovej funkcie môže byť jednoducho skombinovaný do veličiny, ktorá sa volá Gáborova energia (angl. Gabor energy). Táto veličina zodpovedá modelu zloženej bunky v zrakovej kôre, ktorá využíva špecifické natočenie  $\theta$ . Definovaná je vzťahom

$$E(\lambda, \theta) = \sqrt{K_1^2(\lambda, \theta, 0^\circ) + K_2^2(\lambda, \theta, -90^\circ)} \quad (9.9)$$

kde  $K_j$  je odpoveď filtra, z ktorých každý má iný fázový posun  $\phi_1 = 0^\circ$  a  $\phi_2 = -90^\circ$ .

e konfiguráciu *LBP<sup>riu2</sup>* obsahuje len 10 binov.