

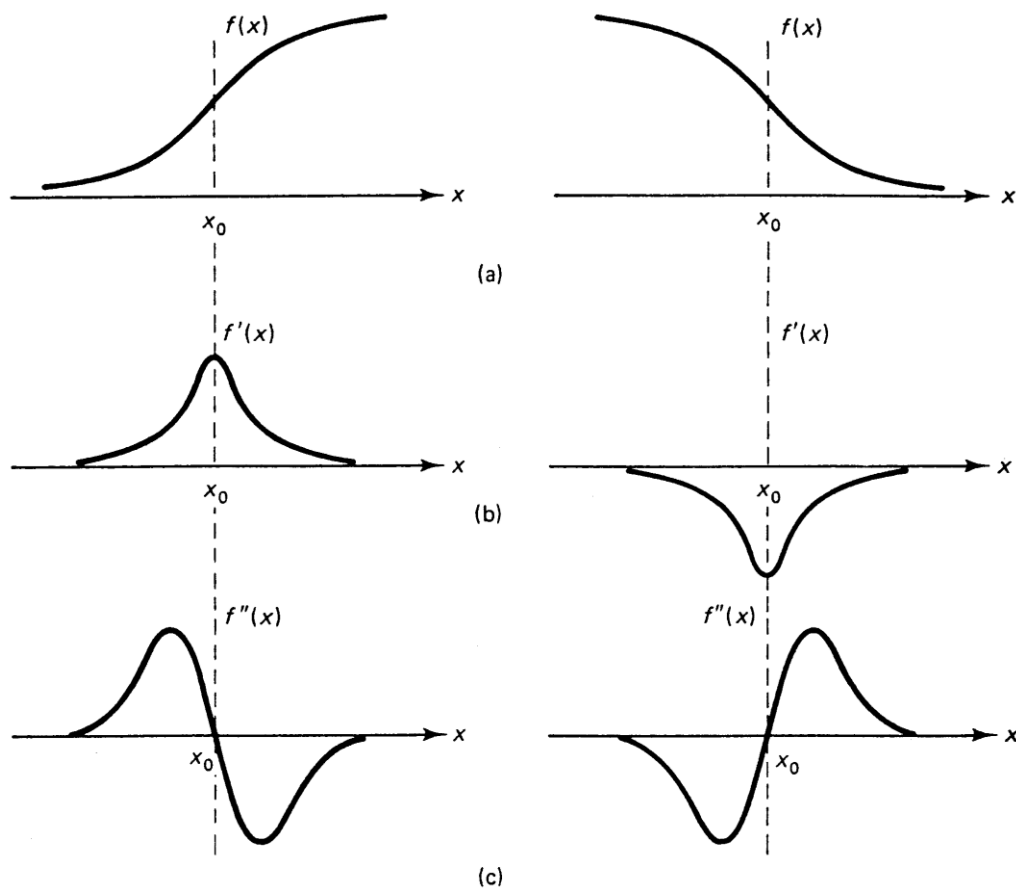
6.5 Metódy detekcie hrán

Metódy patriace do tejto skupiny sú založené na vyhodnocovaní rozdielu v hodnotách úrovne jasu, ktoré možno pozorovať na obraze pri prechode z pozadia na objekt alebo medzi dvoma rôznymi typmi objektov [Lim90, GoW92, Gau99]. To znamená, že skúmaním množiny susedných bodov obrazu môžeme nájsť hrany a ich spojením získame hranice oblastí. Hrany medzi oblasťami predstavujú určitú nespojitosť, najčastejšie v hodnote jasu, farby alebo textúry.



Obr. 6.10 Hrany na obraze – ilustračný obrázok

Budeme sa zaoberať zmenami jasu. Ak si signál v riadku obrazu predstavíme ako funkciu $f(x)$, môžeme pomocou derivácie nájsť také body v riadku, v ktorých sa signál náhle mení. Prvá derivácia funkcie nadobúda nenulové hodnoty na miestach, kde signál mení svoju hodnotu. Na miestach, kde funkcia nemení svoju hodnotu, je prvá derivácia nulová. V bode x_0 dochádza k výraznej zmene hodnoty jasu. V tomto bode nadobúda prvá derivácia $f'(x)$ maximum. Druhá derivácia $f''(x)$ nadobúda nenulovú hodnotu tam, kde sa mení prvá derivácia. Prvú deriváciu môžeme teda použiť na detekciu hrany v obraze a druhá derivácia je vhodná na určenie typu prechodu (t.j. či sa jedná o prechod z tmavšej oblasti do svetlejšej alebo naopak). Oba typy sú znázornené na obr. 6.11.



Obr.6.11 Priebehy a) $f(x)$, b) $f'(x)$, c) $f''(x)$ pre typickú jednorozmernú hranu

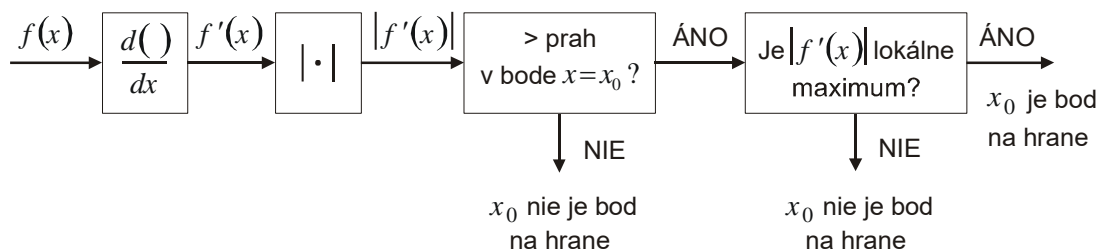
Postup určenia hranových bodov je znázornený na obr. 6.12. Najprv vypočítame $|f'(x)|$ z funkcie $f(x)$. Následne tento výsledok porovnáme so zvolenou prahovou hodnotou. Len ak je hodnota $|f'(x)|$ väčšia než zvolená prahová hodnota, obrazový bod považujeme za súčasť hrany. Je obtiažne zvoliť optimálnu prahovú hodnotu. Zvyčajne nájdeme viacero bodov, ktoré spĺňajú stanovenú podmienku. Zvyšovaním prahovej hodnoty sa kandidátmi na hranu stávajú iba tie body, v ktorých sa $f(x)$ mení veľmi rýchlo. Ak bude prahová hodnota vysoká, dôjde k strate menej výrazných hrán. Jednou z možností je zvoliť prahovú hodnotu na základe metódy pokus-omyl, prípadne voliť prah adaptívne.

Analogicky možno *gradientom* vyšetriť priebeh dvojrozmernej funkcie $f(x, y)$. **Gradient** $\nabla f(x, y)$ funkcie $f(x, y)$ v bode (x, y) je vektor so zložkami $\partial f(x, y)/\partial x$ v smere osi x a $\partial f(x, y)/\partial y$ v smere osi y :

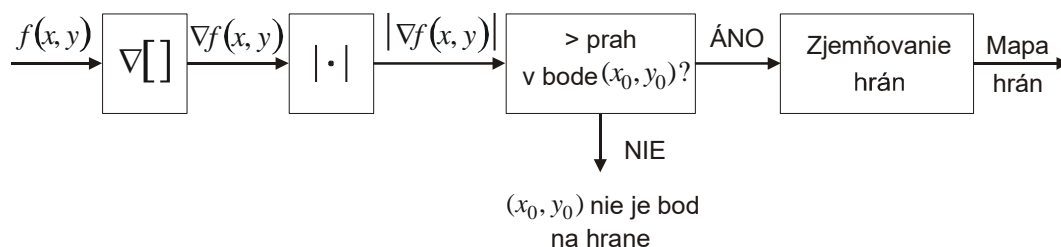
$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \cdot i_x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \cdot i_y \quad (6.26)$$

kde x a y sú súradnice bodu, pre ktorý sa gradient vyšetruje, a i_x a i_y sú jednotkové vektory v smere osí x a y . Predpokladajme, že $f(x, y)$ je funkcia úrovne jasu

monochromatického obrazu. Postup detekcie hrán v dvojrozmernom signáli založený na predchádzajúcich úvahách je zobrazený na obr. 6.13.



Obr. 6.12. Systém jednorozmernej detekcie hrán



Obr. 6.13. Dvojrozmerný systém pre detekciu hrán

Aplikovaním uvedených postupov často vzniknú hrubé pásy namiesto tenkých hraníc oblastí. Dodatočne môžeme sprísniť kritériá na výber hraničných bodov z nájdených kandidátov. Tento postup sa nazýva **zjemňovanie hrán** ("edge thinning"). Z kandidátov na hraničné body vyberieme napríklad iba tie, ktoré dosahujú lokálne maximum gradientu aspoň v jednom smere. Vo väčšine prípadov stačí kontrolovať maximum v horizontálnom

a vo vertikálnom smere. Nevýhodou takéhoto jednoduchého algoritmu na výber hrán je vznik falošných (slabších) hrán v blízkosti pravých (silných) hrán.

Jednou z možností, ako zabrániť vzniku falošných hrán, je použitie nasledujúcich kritérií:

- Ak má $|\nabla f(x, y)|$ lokálne maximum v bode (x_0, y_0) v horizontálnom, ale nie vo vertikálnom smere, potom je bod (x_0, y_0) hraničným bodom, ak

$$\left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right|_{x=x_0, y=y_0} > k \cdot \left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad (6.27)$$

kde k je štandardne volené okolo 2.

- Ak má $|\nabla f(x, y)|$ lokálne maximum v bode (x_0, y_0) vo vertikálnom, ale nie v horizontálnom smere, potom je bod (x_0, y_0) hraničným bodom, ak

$$\left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right|_{x=x_0, y=y_0} > k \cdot \left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad (6.28)$$

kde k volíme okolo 2.

Tieto vzťahy odrážajú skutočnosť, že zmena intenzity v jednom smere (horizontálnom alebo vertikálnom) musí byť omnoho väčšia než zmena v druhom smere.

Systémy na detekciu hrán založené len na veľkosti gradientu $|\nabla f(x, y)|$ sa nazývajú **nesmerové detektory hrán**, pretože nie sú citlivejšie na jeden smer viac než na druhý. Ak je systém založený na funkciách, ktoré sú citlivé na jeden smer viac než na druhý, hovoríme o **smerovom detektore hrán**. Ak by sme v systéme na obr. 6.13. nahradili funkciu $|\nabla f(x, y)|$ funkciou $|\partial f(x, y) / \partial x|$, dostali by sme smerový systém, ktorý by detegoval hrany vo vertikálnom smere, ale nie v horizontálnom smere.

Pre spracovanie digitálneho signálu $f(n_1, n_2)$ použijeme pri výpočte gradientu namiesto derivácií diferencie. Je niekoľko možností výpočtu gradientu diskkrétnej funkcie.

Deriváciu $\partial f(x, y) / \partial x$ môžeme napríklad nahradiť:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \leftrightarrow G_{n1} = \frac{f(n_1, n_2) - f(n_1 - 1, n_2)}{T} \quad (6.29a)$$

$$G_{n1} = \frac{f(n_1 + 1, n_2) - f(n_1, n_2)}{T} \quad (6.29b)$$

$$G_{n1} = \frac{f(n_1 + 1, n_2) - f(n_1 - 1, n_2)}{2 \cdot T} \quad (6.29c)$$

Výpočet gradientu z viacerých hodnôt dvojzmernej funkcie je menej citlivý na prípadný šum. Príklad zlepšeného odhadu $\partial f(x, y) / \partial x$ môže vyzeráť nasledovne:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \leftrightarrow [f(n_1 + 1, n_2 + 1) - f(n_1 - 1, n_2 + 1)] + [f(n_1 + 1, n_2) - f(n_1 - 1, n_2)] + [f(n_1 + 1, n_2 - 1) - f(n_1 - 1, n_2 - 1)] \quad (6.29d)$$

alebo
$$[f(n_1 + 1, n_2 + 1) - f(n_1 - 1, n_2 + 1)] + 2 \cdot [f(n_1 + 1, n_2) - f(n_1 - 1, n_2)] + [f(n_1 + 1, n_2 - 1) - f(n_1 - 1, n_2 - 1)] \quad (6.29e)$$

Na operácie vo vzťahoch (6.29a-e) sa môžeme pozeráť ako na konvolúciu funkcie $f(n_1, n_2)$ a impulzovej odpovede filtra $h(n_1, n_2)$. Nesmerový detektor hrán môžeme

vytvoriť diskretnou aproximáciou absolútnej hodnoty gradientu $|\nabla f(x, y)|$ zo systému na obr. 6.13. Podľa (6.26)

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (6.30)$$

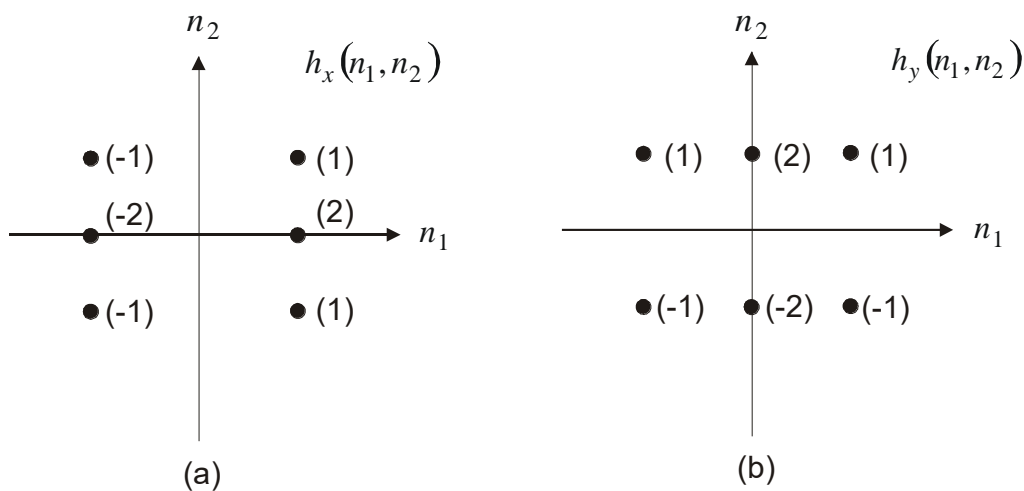
Príklad diskretnéj aproximácie vzťahu (3.13), ktorá môže byť použitá pre nesmerové detektory hrán, je

$$|\nabla f(x, y)| \rightarrow \sqrt{(f_x(n_1, n_2))^2 + (f_y(n_1, n_2))^2} \quad (6.31)$$

kde $f_x(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) * h_x(n_1, n_2)$,

$f_y(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) * h_y(n_1, n_2)$,

pričom $h_x(n_1, n_2)$ a $h_y(n_1, n_2)$ sú na obr. 6.14.



Obr. 6.14. Aproximácia a) $\partial f(x, y)/\partial x$ pomocou $f(n_1, n_2) * h_x(n_1, n_2)$, b) $\partial f(x, y)/\partial y$ pomocou $f(n_1, n_2) * h_y(n_1, n_2)$. **Sobelova metóda** detekcie hrán je založená na porovnávaní gradientu so zvolenou prahovou hodnotou

Zložky gradientu počítame najčastejšie v oblasti 3x3 obrazové body. Nech body obrazu v tejto oblasti nadobúdajú úroveň jasů u_i , $i = (1, 2, \dots, 9)$:

$$\begin{pmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ u_4 & u_5 & u_6 \\ u_7 & u_8 & u_9 \end{pmatrix} \quad (6.32)$$

Gradient vypočítame aplikáciou masky. Môžeme použiť napríklad tzv. **Sobelove masky** [GoW87]:

$$\text{v smere osi } x: \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{v smere osi } y: \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.33)$$

Potom pre zložky gradientu G_x a G_y v bode u_5 platí

$$\begin{aligned} G_x &= (u_3 + 2 \cdot u_6 + u_9) - (u_1 + 2 \cdot u_4 + u_7) \\ G_y &= (u_7 + 2 \cdot u_8 + u_9) - (u_1 + 2 \cdot u_2 + u_3) \end{aligned} \quad (6.34)$$

Spojením hranových bodov by sme mali dostať súvislú líniu zodpovedajúcu obrysom objektu. To je však ideálny prípad, ktorý sa v praxi nevyskytuje často. Príčinou môže byť šum, nerovnomerné osvetlenie, citlivosť masky na rôznu orientáciu hrán a pod.

Z uvedeného vyplýva, že výsledok metód detekcie hrán výrazne závisí od presnosti, s akou nájdeme hranové body. Presnosť je tým väčšia, čím je obraz kvalitnejší, to znamená menej zašumený, obsahuje minimum tieňov a falošných jasových hrán.



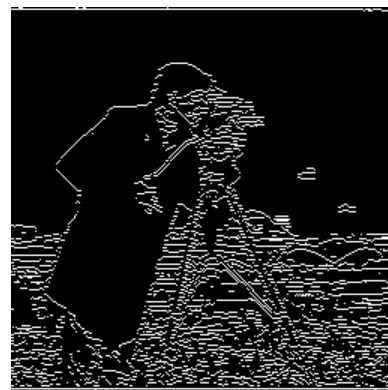
(a)



(b)



(c)



(d)

Obr. 6.15 Mapy hrán získané pomocou smerových a nesmerových detektorov: a) originál 256x256 bodov, b) výsledok po aplikovaní **Sobelovho detektora hrán**, c) výsledok po aplikovaní detektora vertikálnych hrán, d) výsledok po aplikovaní detektora horizontálnych hrán

Obr. 6.15a zobrazuje originál obrazu veľkosti 256x256 bodov. Obr. 6.15b zobrazuje použitie Sobelovho detektora hrán (impulzové charakteristiky podľa obr. 6.14). Obr. 6.15c,d zobrazujú samostatné použitie vertikálneho a horizontálneho detektora hrán.



(a)originál



(b) gradientný obraz



(c) T=20



(d) T=60



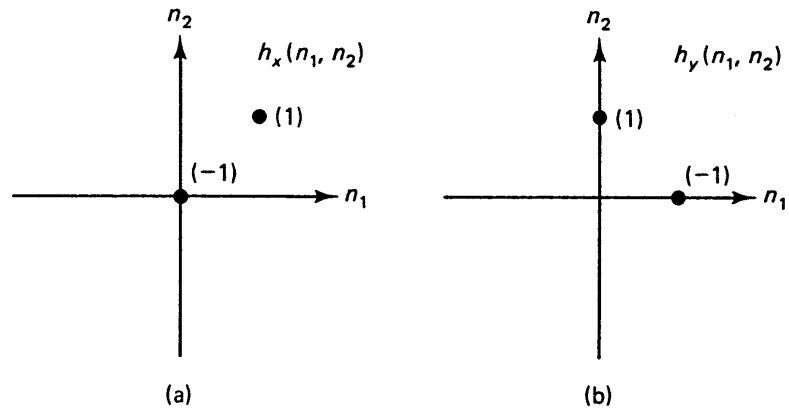
(e) T=150

Obr. 6.16 Vplyv prahovej hodnoty na výsledok detekcie hrán: (a)originál, (b) gradientný obraz, (c) podprahovaný obraz – príliš veľa šumu, (d)ucelený obrys hlavy, (e) črty tváre

Iné gradientné operátory

- Impulzové odpovede gradientných filtrov

Robertsov operátor na detekciu hrán



$f(n_1, n_2)$	$f(n_1, n_2+1)$
$f(n_1+1, n_2)$	$f(n_1+1, n_2+1)$

(c)



(d)

Obr. 6.17 Robertsov operátor na detekciu hrán: (a,b) Impulzové odpovede, (c) maska, (d) obraz po aplikácii masky (konvolúcia)

Prewittov operátor

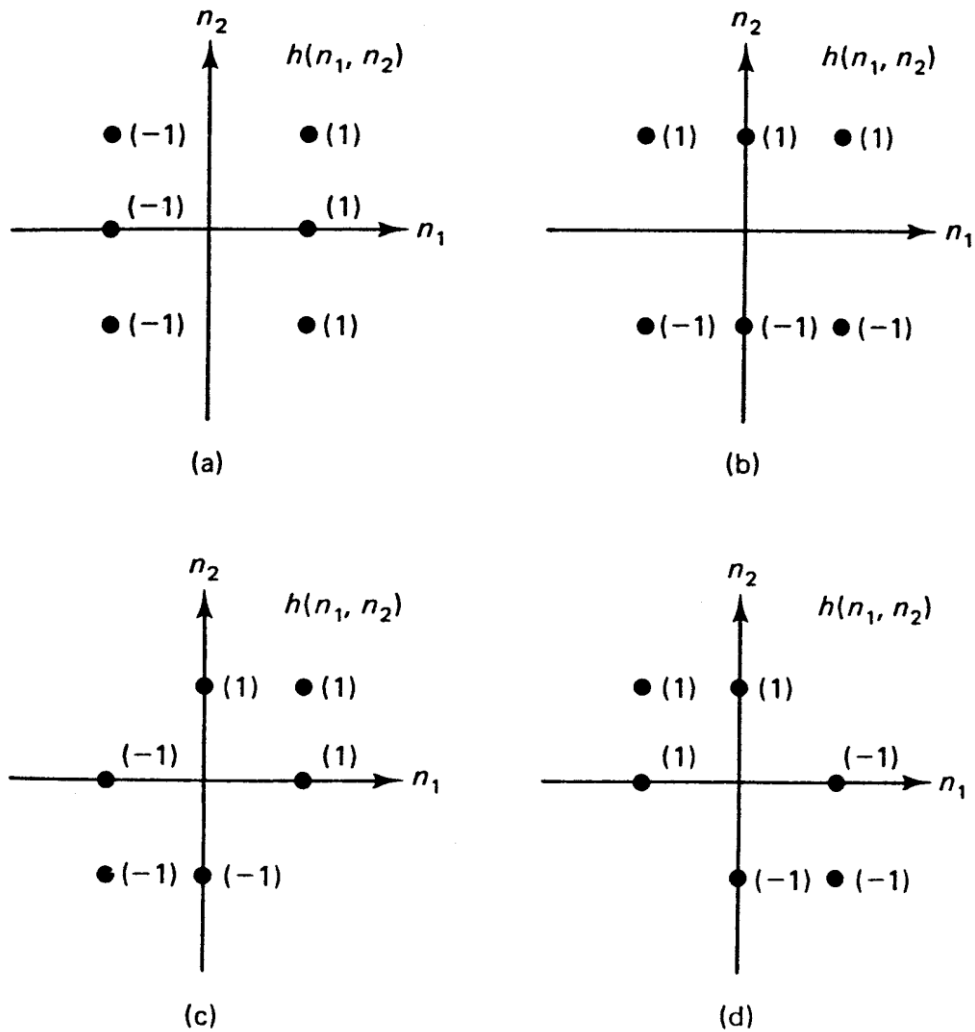
Impulzové charakteristiky filtrov na detekciu hrán:

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

(a)

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

(b)



Obr. 6.18 Prewittov a) detektor pre vertikálne hrany, detektor pre horizontálne hrany, c, d) detektory pre diagonálne hrany

Rovnako ako u Prewittovho operatora, aj zo [Sobelových operátorov na detekciu hrán](#) (Obr. 6.14.) - ich otáčaním o 45 stupňov dostaneme 8 variácií – detektor hrán v 8 smeroch - [Robinsonov operátor](#).

Kirschov operátor

Je to nelineárny detektor hrán – hľadá najsilnejšie hrany vo vybraných smeroch.

- jednoduchý detektor sa otáča s krokom 45 stupňov – dostaneme 8 natočení – 8 smerov hrán

$$\mathbf{g}^{(1)} = \begin{bmatrix} +5 & +5 & +5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}, \mathbf{g}^{(2)} = \begin{bmatrix} +5 & +5 & -3 \\ +5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}, \mathbf{g}^{(3)} = \begin{bmatrix} +5 & -3 & -3 \\ +5 & 0 & -3 \\ +5 & -3 & -3 \end{bmatrix}, \mathbf{g}^{(4)} = \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ +5 & 0 & -3 \\ +5 & +5 & -3 \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

- výsledkom je maximum z 8 smerov:

$$hh(n, m) = \max_{z=1,2,\dots,8} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 g^z(i, j) \cdot f(n + i, m + j) \quad (6.36)$$

Gradientné operátory sú veľmi citlivé na šum. Je vhodné aplikovať algoritmy na vyhladenie, resp. redukciu šumu pred samotným aplikovaním gradientných metód.



Lena+šum

Lena po mediánovej filtrácii

gradientný obraz

Obr. 6.19 Vplyv šumu na detekciu hrán

Výsledok metód detekcie hrán je výrazne závislý od presnosti, s akou nájdeme hranové body. Presnosť je tým väčšia, čím je obraz kvalitnejší:

- menej zašumený
obsahuje minimum falošných jasových hrán a tieňov

Zjemňovanie hrán (*edge thinning*)

Aplikovaním gradientu dochádza ku **vzniku hrubých čiar**. Existuje viac bodov, ktoré majú gradient **väčší ako zvolená prahová hodnota**. Dodatočne musíme sprísiť kritériá na výber hraničných bodov z dostupných kandidátov.

Napr.: za hraničné body sa z kandidátov vyberú iba tie, ktoré

dosahujú lokálne maximum gradientu aspoň v jednom smere.

Nevýhoda jednoduchého algoritmu je v tom, že vytvorí falošné (slabšie) hrany v blízkosti pravých (silných) hrán.

V nasledujúcom kroku použijeme obmedzenie:

- Ak má $|\nabla f(x, y)|$ lokálne maximum v bode (x_0, y_0) v horizontálnom, ale nie vertikálnom smere, potom je bod (x_0, y_0) hraničným bodom, ak:

$$\left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right|_{x=x_0, y=y_0} > k \cdot \left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad (6.37)$$

kde k je štandardne volené okolo 2.

- Ak $|\nabla f(x, y)|$ má lokálne maximum v bode (x_0, y_0) vo vertikálnom, ale nie horizontálnom smere, potom je bod (x_0, y_0) hraničným bodom, ak:

$$\left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right|_{x=x_0, y=y_0} > k \cdot \left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad (6.38)$$

kde k je opäť volené okolo 2.

Zmena intenzity v jednom smere (horizontálnom alebo vertikálnom) musí byť omnoho väčšia ako zmena v druhom smere!

Rozlišujeme:

nesmerové detektory hrán, ktoré nie sú citlivejšie na jeden smer viac ako na druhý ($|\nabla f(x, y)|$)

smerové detektory hrán, ktoré sú citlivé na jeden smer viac ako na druhý.

Funkcia $|\partial f(x, y)/\partial x|$ predstavuje smerový detektor, pretože deteguje hrany **vo vertikálnom smere**, ale nie v horizontálnom smere.

Metódy zhlukovej analýzy a metódy detekcie hrán riešia duálny problém. Každá oblasť je reprezentovaná vlastnou uzavretou hranicou a každá uzavretá hranica popisuje oblasť. Rozdielna podstata oboch skupín však spôsobuje, že môžu poskytovať navzájom rozdielne výsledky. Výsledky oboch postupov je možné kombinovať, a tak získať všestrannejšiu informáciu. Jednoduchým príkladom je graf závislostí [Sobo87], kde sú oblasti reprezentované uzlami a vetvy grafu predstavujú susedné závislosti získané detekciou hraníc týchto oblastí.