

System digitálneho spracovania obrazu

a) vstupné médiá

- a1) digitálna kamera
- a2) digitálny fotoaparát
- a3) scanner (aj 3D scanner)
- a4) frame grabber plus analógové zariadenie ako analógová (napr. vidikónová) kamera alebo televízor alebo VHS video

b) obrazový procesor

špecializovaný (paralelný) modul na niektoré operácie nižšej úrovne spracovania

c) digitálny počítač

na ostatné výpočty

d) pamäťové médium

obraz $512 \times 512 \times 8$ bitov, to je 0,25 MB

e) výstup - zobrazovacie a záznamové médium

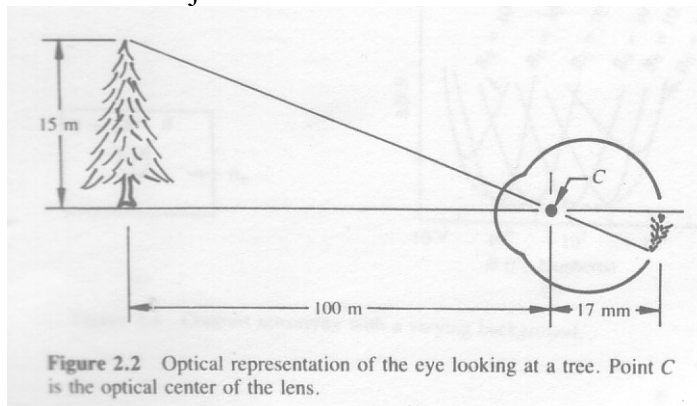
monitory – CRT alebo DVI – vidíme pseudofarby
tlačiarne

Základné vlastnosti digitálneho obrazu

Základy vizuálneho vnímania

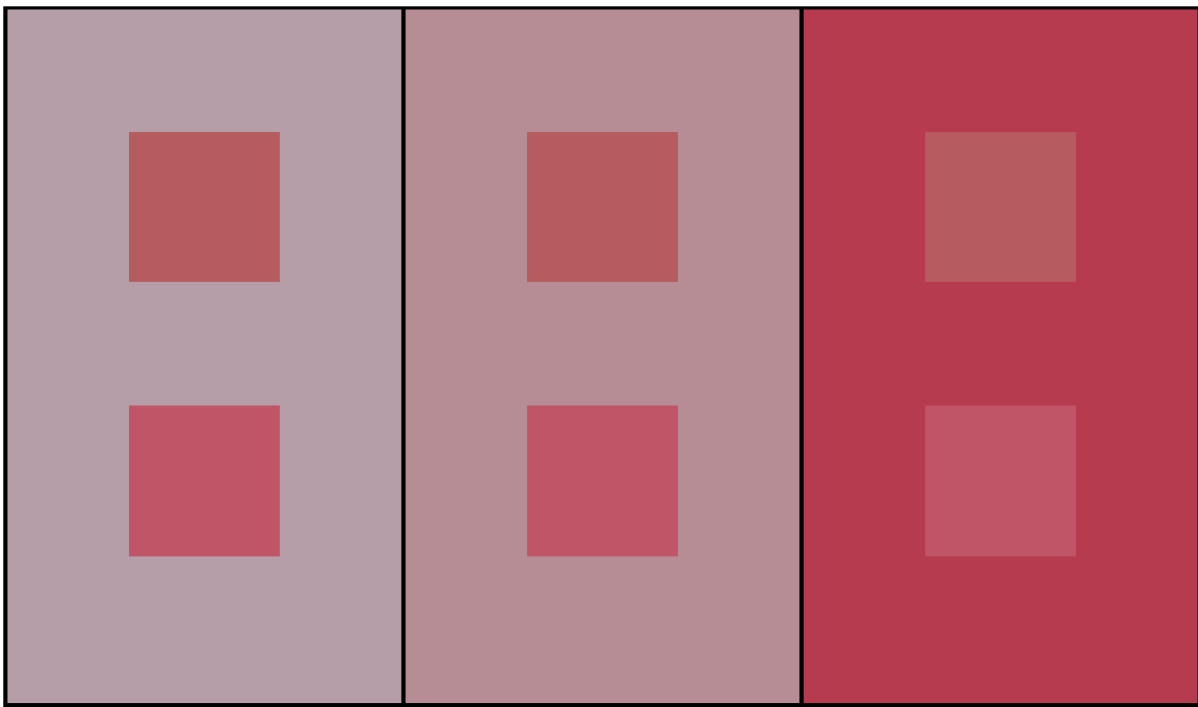
Štruktúra ľudského oka

- svetlé videnie – 6-7 miliónov kónusov
- tmavé videnie – 75-150 miliónov čapíkov
- šošovka – je flexibilná



- Ľudské vizuálne vnímanie je citlivé na kontrast, ostrosť, vnímanie hranice a farbu. Každé z nich môže vytvárať vizuálne paradoxy.

- o kontrast – pomer medzi priemerným jasom objektu a priemerným jasom pozadia – ľudský zrak reaguje logaritmicky na jas. Podmienенý kontrast.



COLOR FIGURE 2.11

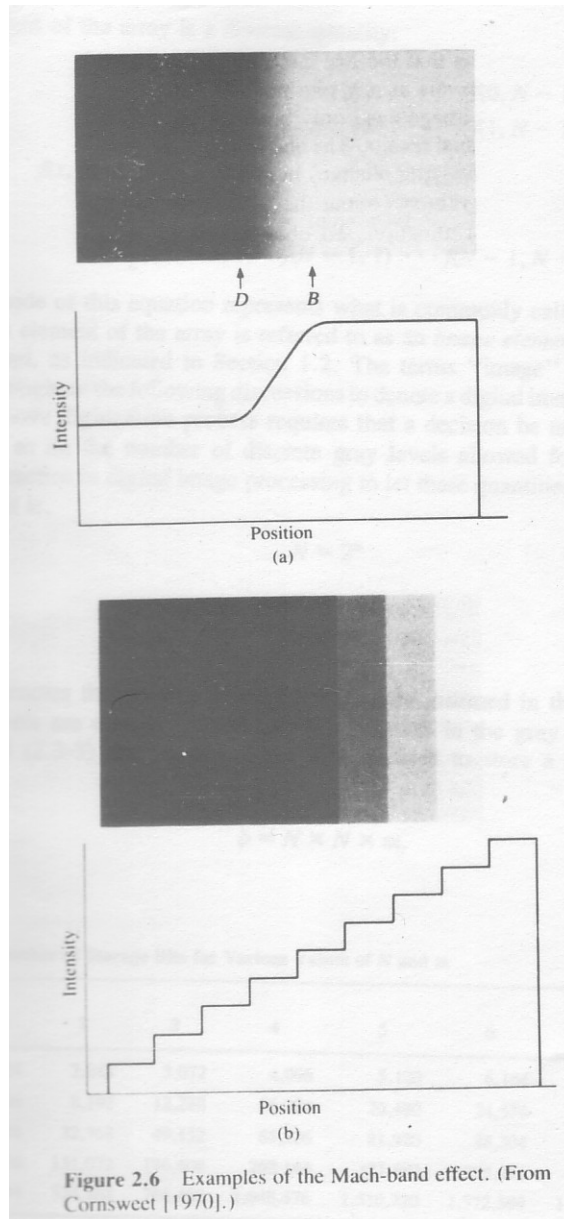
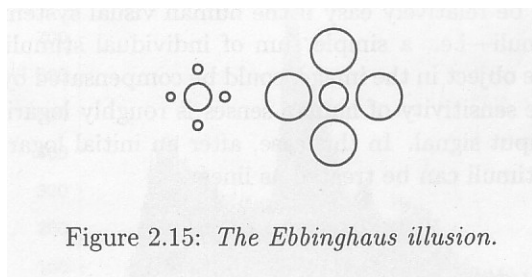


Figure 2.6 Examples of the Mach-band effect. (From Cornsweet [1970].)

Machove pásma – súvisia s vnímaním oblastí, ktorých hranice ľudské oko vníma ostrejšie, hoci ich prechod môže byť hladký.

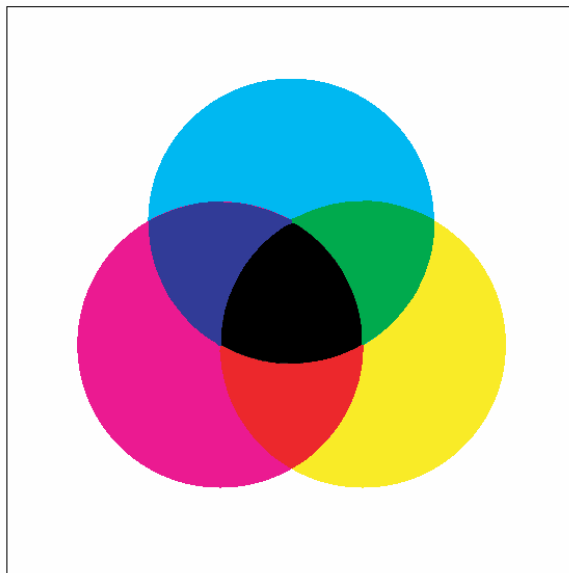
- o prenikavosť (ostroť) – je schopnosť nájsť detaily v obraze – ľudské oko je senzitívnejšie na náhle zmeny jasu – rozlíšenie má byť najviac také ako rozlíšenie pozorovateľa. Ľudské vnímanie má najlepšie rozlíšenie pre objekty vo vzdialenosti 250 mm od oka s osvetlením asi 500 luxov, to urobí asi 60W žiarovka zo vzdialenosti 400 mm, pri týchto podmienkach minimálna vzdialenosť dvoch rozlíšiteľných bodov je asi 0,16 mm.
- o hranice objektu – nesú najviac informácie – Ebbinghausova ilúzia – kruh medzi malými a veľkými kruhmi vyzerá odlišne veľký



o farba – pri normálnom osvetlení je ľudské oko citlivejšie na farbu ako na jas.



COLOR FIGURE 1.22



COLOR FIGURE 1.23

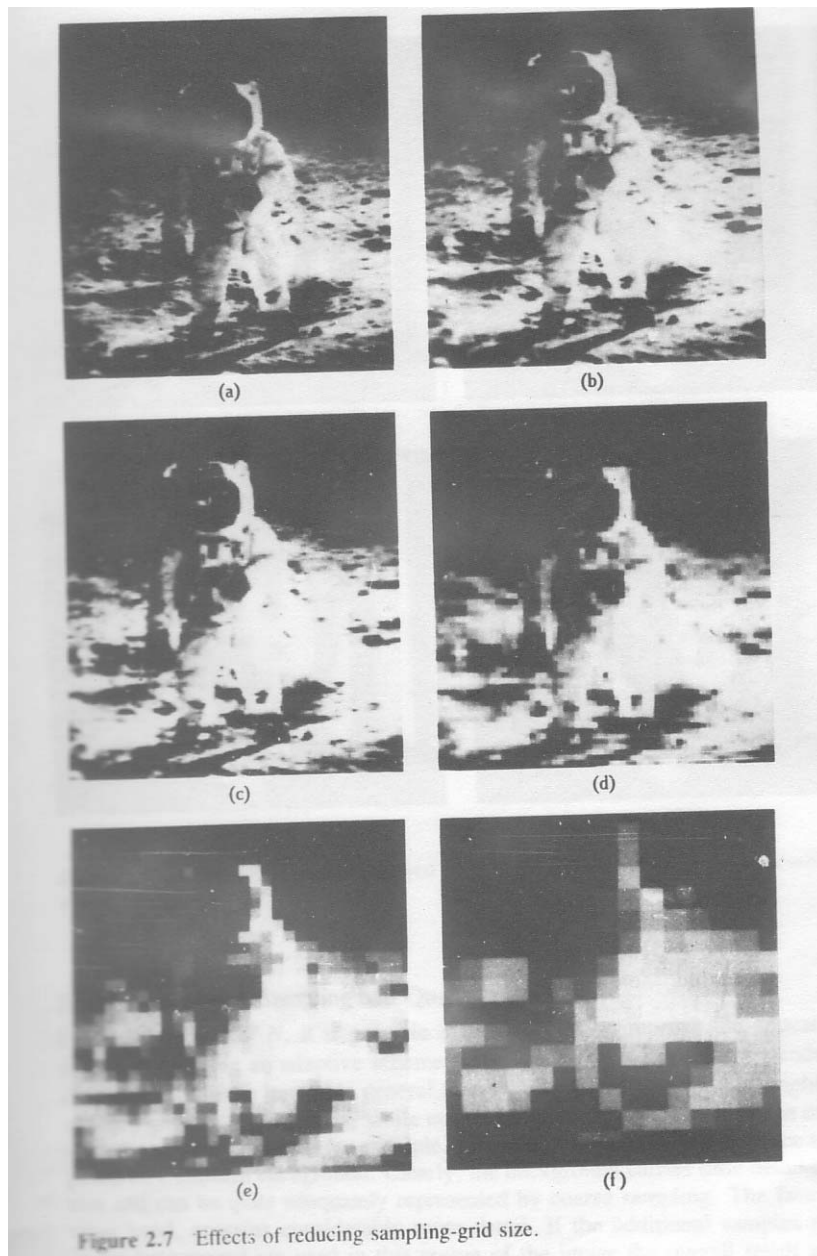
Model obrazu

- pre nás to bude funkcia $f(x, y)$, kde pre súradnice x, y je funkčná hodnota hodnotou jasu v danom bode. Ak je to analógový obraz, ide o spojitú funkciu, v prípade digitálneho obrazu j to funkcia diskrétna.
- predstava o $f(x, y)$ ako o kombinácii dvoch faktorov osvetlenia a odrazivosti

$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y)$$
- osvetlenie – 9.000 kandelov na povrchu zeme, 1.000 kandelov pri oblačnom dni, mesiac 0,1 kandelu, osvetlenie v kancelárii 100 kandelov.
- odrazivosť – 0,01 pre tmavý hodváb, 0,65 pre nehrdzavejúcu oceľ, 0,80 pre bielu stenu, 0,90 pre strieborný kov, 0,93 pre sneh.
- preto je hodnota jasu (šedá úroveň) v danom bode ohraničená minimálnou a maximálnou hodnotou, obvykle sa to zapisuje ako interval $[0, L]$.

Vzorkovanie a kvantizácia

- Digitalizácia obrazu je vzorkovanie spojitej funkcie $f(x,y)$ do matice s M riadkami a N stĺpcami
- Kvantizácia obrazu priradzuje každej spojitej vzorke celočíselnú hodnotu, čiže spojitý obor hodnôt funkcie $f(x,y)$ sa rozdelí na K intervalov
- Treba zodpovedať dve otázky – hustotu vzorkovacích bodov a geometrické usporiadanie vzorkovacích bodov (vzorkovaciu mriežku)



- Shannonova vzorkovacia veta.

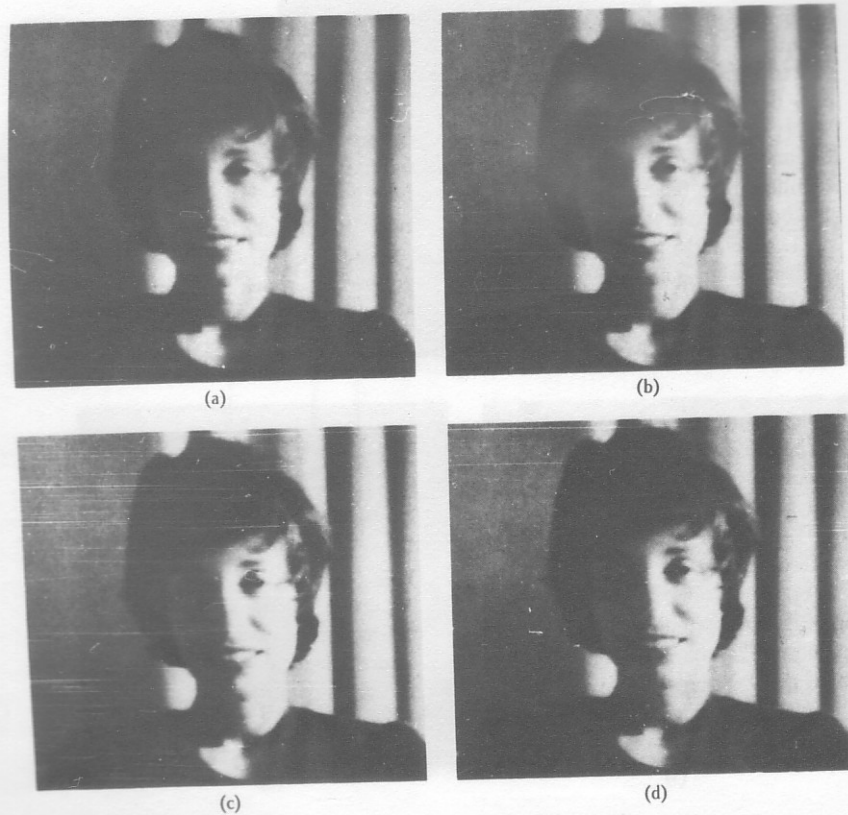


Figure 2.8 A 512×512 image displayed in 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, and 2 levels, respectively.

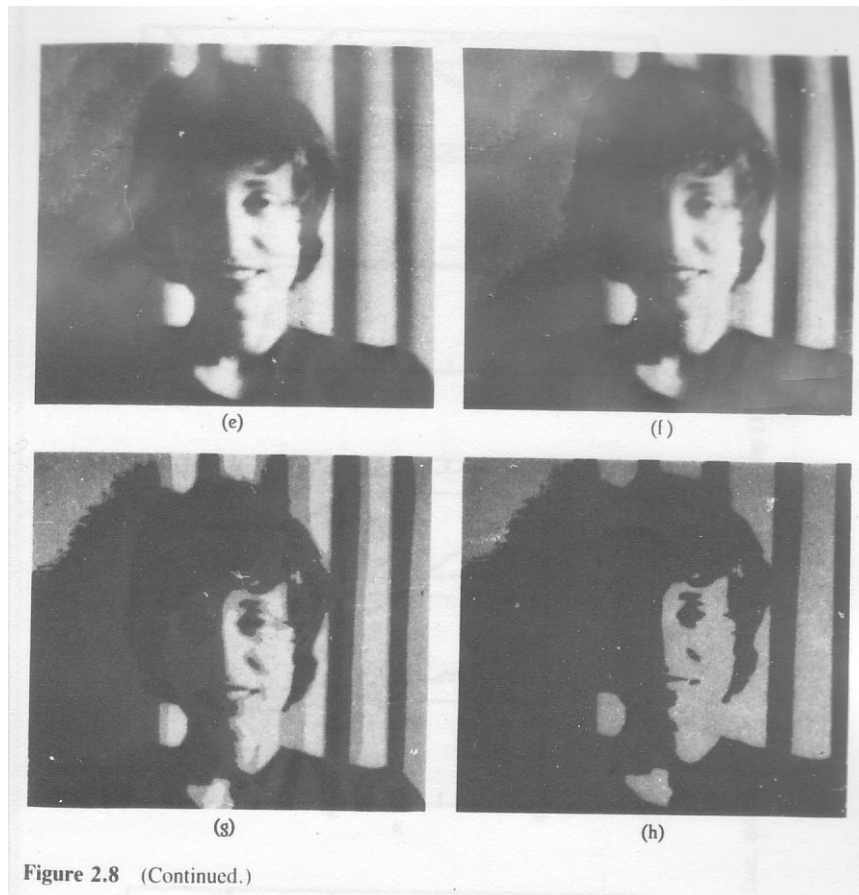


Figure 2.8 (Continued.)

- Pixel (obrazový bod) reprezentuje elementárnu (ďalej nedeliteľnú) časť obrazu.
- Šedoúrovňová kvantizácia môže spôsobiť objavovanie tieňov aj falošných hrán (kontúr).
Odporúča sa najmenej 100 jasových úrovní.

Základné vzťahy medzi pixlami

- Obrazy majú metrické a topologické vlastnosti.
- Pre meranie vzdialenosti máme k dispozícii viaceré metriky. Euklidovská metrika je obvyklá, ale nákladná.
 - o metriky – manhattanská d_4 a šachovnicová d_8 .
 - o $d_4[(i, j), (h, k)] = |i - h| + |j - k|$
 - o $d_8[(i, j), (h, k)] = \max \{|i - h|, |j - k|\}$
- Pojem okolia a vzťahy na ňom založené v ortogonálnych mriežkach sú definované ako 4-okolie alebo 8-okolie. Pri obidvoch týchto pojmoch vznikajú paradoxy. Dokáže ich prekonať hexagonálna mriežka, ale v tej sú zase iné problémy s reprezentáciou.

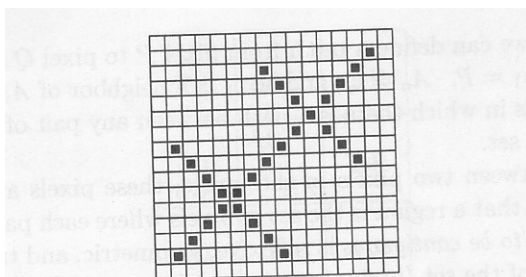


Figure 2.9: *Digital line.*

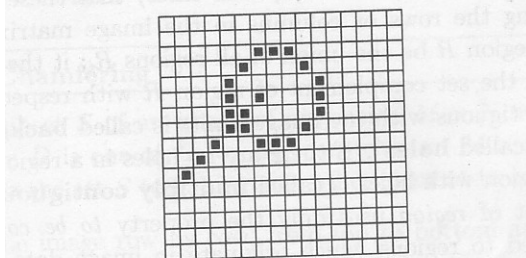
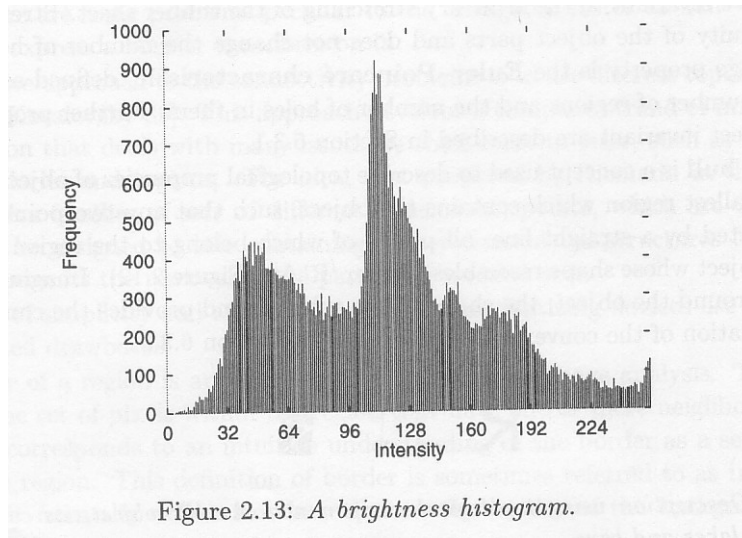


Figure 2.10: *Closed curve paradox.*

- 4-susednosť, 8-susednosť, pojem cesty, súvislý objekt, pojem diery, jednoducho súvislý a viacnásobne súvislý objekt, paradoxy v ortogonálnej mriežke a ich riešenie, úvahy o hexagonálnej mriežke – nepoužíva sa prakticky, nejde v nej efektívne urobiť Fourierova transformácia
- Množina pixlov môže definovať oblasť, ktorá má hranicu.
- Hranice majú vnútorné a vonkajšie vlastnosti, podľa toho, či sa uvažuje vnútro alebo vonkajšok oblasti.
 - hranica, hraničné body, vnútorné hraničné body, vonkajšie hraničné body (to je hranica pozadia), rozdiel medzi hranicou a hranou
- Obrazy majú topologické vlastnosti, ktoré sú invariantné k afínnym transformáciám.
 - Eulerovo číslo = $S - H$, kde S je počet súvislých oblastí a H je počet dier
- Konvexný obal oblasti je minimálna konvexná množina, ktorá túto oblasť obsahuje.
- Jasový histogram je zobrazenie početnosti jasových hodnôt v obraze a predstavuje globálnu informáciu o intenzite obrazu.



Kvalita obrazu

- Kvalita obrazu sa dá kvantitatívne odmerať – rozdielom medzi ideálnym obrazom g a obrazom f , napr. druhá mocnina rozdielu.
- Skutočné obrazy sú vždy určitým spôsobom zašumené.
- Pomer signálu a šumu $SNR = F/E$, kde $F = \sum f^2(x,y)$ a $E = \sum v^2(x,y)$
- Biely šum, Gaussovský šum, impulzný šum a bieločierny šum (salt-and-pepper noise) sú najbežnejšie modely. Pomer medzi signálom a šumom je meradlom kvality obrazu.
 - o biely šum $v = c$
 - o Gaussovský šum – šum je náhodná premenná s normálnym rozdelením so strednou hodnotou a štandardnou odchýlkou
 - o aditívny šum – $f(x, y) = g(x, y) + v(x, y)$
 - o multiplikatívny šum – $f(x, y) = g(x, y) + v g(x, y) = g(x, y) (1 + v)$
 - o kvantizačný šum – keď bolo použitých málo úrovní kvantovania, vznikajú falošné kontúry
 - o impulzný šum – keď sa jednotlivý pixel líši výrazne od tých ostatných
 - o salt-and-pepper – bieločierny impulzný šum

Obrazová geometria

Základné transformácie

- ***translácia***

$$X^* = X + X_0$$

$$Y^* = Y + Y_0$$

$$Z^* = Z + Z_0$$

v maticovej forme

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

s použitím štvorcovej matice

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

to možno napísať ako

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{A} \mathbf{v}$$

kde $\mathbf{A}$ je transformačná matica rozmeru 4 x 4. Matica $\mathbf{A}$ je vlastne matica translácie.

- **škálovanie**

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **rotácia**

najjednoduchšie je otáčanie okolo súradnicových osí. Otáčať ľubovoľný bod znamená posunúť ho do počiatku, otočiť ho a vrátiť ho späť. Otáčanie okolo osi Z o uhol θ .

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Otáčanie okolo osi X o uhol α

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Otáčanie okolo osi Y o uhol β

$$\mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

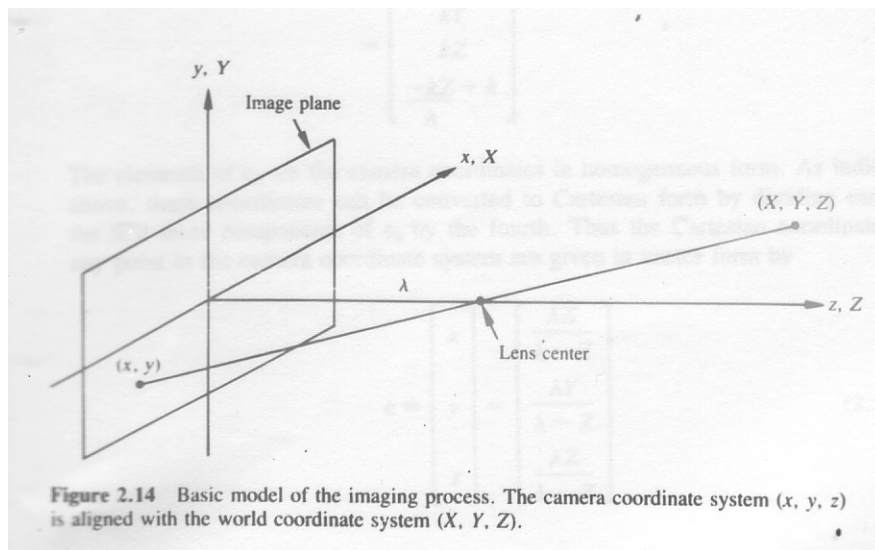
Aplikácia viacerých transformácií sa dá reprezentovať jedinou transformačnou maticou rozmeru 4 x 4.

Ak sme hovorili o transformácii jedného bodu, rovnako môžeme transformovať aj množinu m bodov s použitím jednej transformácie. Ak máme súradnice $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m$, potom môžeme vytvoriť jednu maticu $\mathbf{V}$ rozmeru 4 x m , ktorej stĺpce sú tieto stĺpcové vektory a napísať transformáciu $\mathbf{V}^* = \mathbf{A} \mathbf{V}$.

Viacere transformácie majú inverzné transformácie, niekedy jednoduché, niekedy je potrebné ich získať numerickou cestou. Inverzná translačná matica

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Perspektívna transformácia



V tomto modeli sa predpokladá, že kamerový súradnicový systém (x, y, z) je koincidentný s rovinou xy a optická os s osou z . Stred obrazovej roviny je v počiatku a šošovka v súradnici $(0,0, \lambda)$, kde λ je ohnisková vzdialenosť. Predpokladáme, že kamerový súradnicový systém je prepojený so svetovým súradnicovým systémom (X, Y, Z) . Perspektívne zobrazenie zobrazuje 3D body do roviny a transformácia je pritom nelineárna. Ľahko nahliadneme z podobných trojuholníkov, že

$$\frac{x}{\lambda} = -\frac{X}{Z-\lambda} = \frac{X}{\lambda-Z}, \text{ čo podobne platí pre súradnicu } y.$$

Potom

$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z}.$$

Vyjadríme si tieto vzťahy v maticovej podobe, pričom budeme používať homogénne súradnice, definované ako (kX, kY, kZ, k) , kde k je ľubovoľná nenulová konštanta. Karteziánske súradnice môžeme z homogénnych získať vydelením prvých troch súradníc štvrtou.

Ak označíme maticu perspektívneho zobrazenia

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix}$$

a bod $\mathbf{w}_k$ v homogénnych súradniciach ako

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix}$$

tak súčinom $\mathbf{P}\mathbf{w}_k$ bude vektor $\mathbf{c}_k$, ktorý je v homogénnych súradniciach vyjadrený ako

$$\mathbf{c}_k = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ \frac{-kZ}{\lambda} + k \end{bmatrix}$$

Ak chceme získať bod v karteziánskom kamerovom súradnicovom systéme, vydělíme prvé tri súradnice štvrtou a dostaneme

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda X}{\lambda - Z} \\ \frac{\lambda Y}{\lambda - Z} \\ \frac{\lambda Z}{\lambda - Z} \end{bmatrix}$$

pričom prvé dve súradnice sú totožné s tým, čo sme zistili z podobných trojuholníkov. Vytvorením inverzného perspektívneho zobrazenia zobrazujeme bod obrazovej roviny kamery späť do 3D. Zistíme, že z súradnicu nevieme jednoznačne rekonštruovať, pretože zobrazenie 3D bodu na bod obrazovej roviny je viacnásobným zobrazením na jeden bod,

potom bod (x_0, y_0) zodpovedá množine kolineárnych bodov, ktoré prechádzajú cez $(x_0, y_0, 0)$ a $(0, 0, \lambda)$. Z podobných trojuholníkov máme

$$X = \frac{x_0}{\lambda}(\lambda - Z)$$

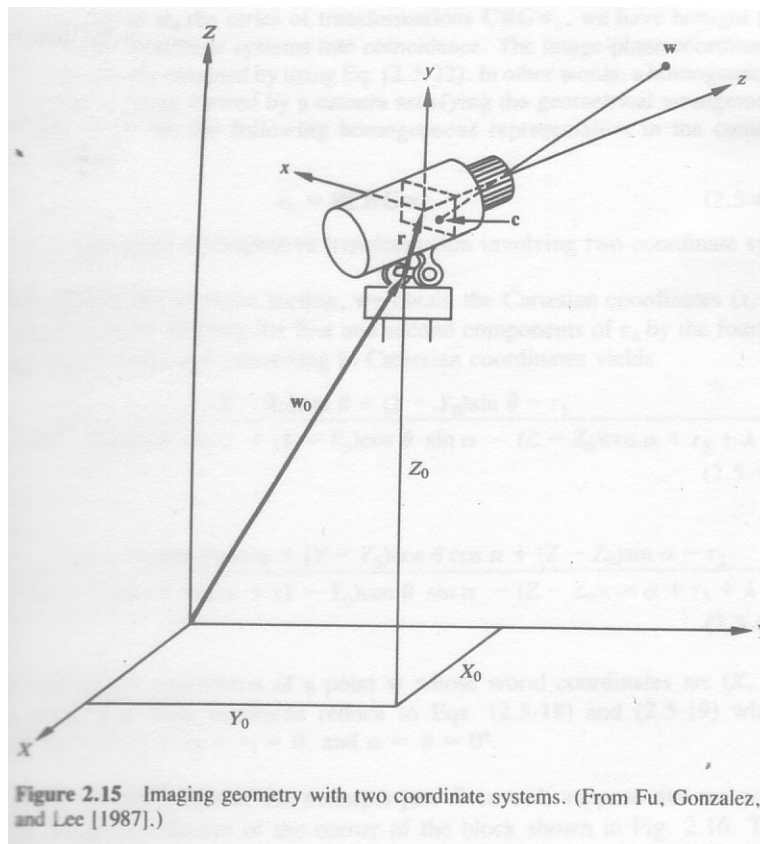
a tiež

$$Y = \frac{y_0}{\lambda}(\lambda - Z).$$

Z toho vyplýva, že kým nevieme niečo o 3D bode, ktorý generoval tento obrazový bod (napr. jeho Z súradnicu), nevieme ho jednoznačne 3D rekonštruovať.

Model kamery

Doteraz sme vychádzali z toho, že kamerový a svetový súradnicový systém sú koincidentné. Teraz budeme predpokladať, že sú oddelené. Svetový súradnicový systém (X, Y, Z) budeme používať na lokalizáciu kamery a bodov 3D priestoru, ktoré označujeme ako $\mathbf{w}$, kamerový súradnicový systém označujeme ako (x, y, z) a obrazové body ako $\mathbf{c}$. Pripúšťame ešte sklon kamery, určený dvoma uhlami, a to uhlom θ medzi x a X a uhlom α medzi z a Z . Posunutie stredu otočného uloženia kamery od počiatku svetovej súradnicovej sústavy je $\mathbf{w}_0$ a posunutie stredu obrazovej roviny oproti stredu otočného uloženia kamery je $\mathbf{r}$.



Na základe doterajšieho postupu dostaneme oba súradnicové systémy do súvislosti sériou transformácií, potom uplatníme rovnice perspektívneho zobrazenia, aby sme získali súradnice obrazového bodu pre daný bod v svetových súradniciach. Predpokladajme, že kamera je v normálnej polohe, t.j. stred otočného uloženia kamery a stred obrazovej roviny sú v počiatku svetovej súradnicovej sústavy. Aby sa kamera dostala do polohy, ako na obr. 2.15., museli sa uplatniť nasledovné transformácie: 1) posunutie stredu uloženia z počiatku 2) naklonenie v smere osi x 3) naklonenie v smere osi z 4) posunutie obrazovej roviny vzhľadom na stred uloženia. Ak chceme vidieť body v svetovej súradnicovej sústave pomocou perspektívneho zobrazenia, musíme na ne uplatniť rovnakú postupnosť transformácií.

Použijeme transláciu

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

čím sa homogénny bod $\mathbf{w}_h$, ktorý mal svetové súradnice (X_0, Y_0, Z_0) sa dostane do počiatku nového súradnicového systému po uplatnení transformácie $\mathbf{G} \mathbf{w}_h$. Sklon o uhol θ môžeme vyjadriť maticou otočenia okolo osi x , a podobne sklon o uhol α ako otočenie okolo osi z . Matice týchto otočení môžeme spojiť do jednej matice $\mathbf{R}$ a dostaneme

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta \cos \alpha & \cos \theta \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \theta \sin \alpha & -\cos \theta \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

a nakoniec posunutie o vektor $\mathbf{r}$ dosiahneme transformačnou maticou

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_1 \\ 0 & 1 & 0 & -r_2 \\ 0 & 0 & 1 & -r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Po tomto zosúladiení súradnicových systémov použijeme perspektívnu transformáciu a dostaneme

$$\mathbf{c}_h = \mathbf{PCR} \mathbf{G} \mathbf{w}_h$$

Ak prevedieme tento výsledok do karteziánskych súradníc, dostaneme:

$$x = \lambda \frac{(X - X_0) \cos \theta + (Y - Y_0) \sin \theta - r_1}{-(X - X_0) \sin \theta \sin \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \sin \alpha - (Z - Z_0) \cos \alpha + r_3 + \lambda}$$

$$y = \lambda \frac{-(X - X_0) \sin \theta \cos \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \cos \alpha + (Z - Z_0) \sin \alpha - r_2}{-(X - X_0) \sin \theta \sin \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \sin \alpha - (Z - Z_0) \cos \alpha + r_3 + \lambda}$$

Kalibrácia kamery

Z týchto vzťahov vidíme, že vieme vypočítať súradnice bodu $\mathbf{w}$ v obrazovej súradnicovej sústave, ale potrebujeme na to ohniskovú vzdialenosť, uhly sklonu kamery, posunutia, čo nebýva vždy pohodlné merať, najmä keď sa hýbe kamerou. Jednoduchšie je zobrať niekoľko bodov so známou polohou svetových súradniciach a vypočítať parametre kamery, tento proces sa nazýva **kalibrácia kamery**. Ak označíme $\mathbf{A} = \mathbf{PCRG}$, potom $\mathbf{A}$ obsahuje všetky parametre kamery. Potom môžeme napísať

$$\begin{bmatrix} c_{h1} \\ c_{h2} \\ c_{h3} \\ c_{h4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Vieme, že karteziánske súradnice kamery sú dané ako

$$x = c_{h1} / c_{h4}$$

a

$$y = c_{h2} / c_{h4}.$$

Dosadením týchto vzťahov do ľavej strany rovnice a rozvinutím matice na pravej strane dostaneme

$$x c_{h4} = a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}Z + a_{14}$$

$$y c_{h4} = a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}Z + a_{24}$$

$$c_{h4} = a_{41}X + a_{42}Y + a_{43}Z + a_{44}$$

Dosadením tretej rovnice do prvých dvoch dostaneme dve rovnice s 12 neznámymi koeficientmi:

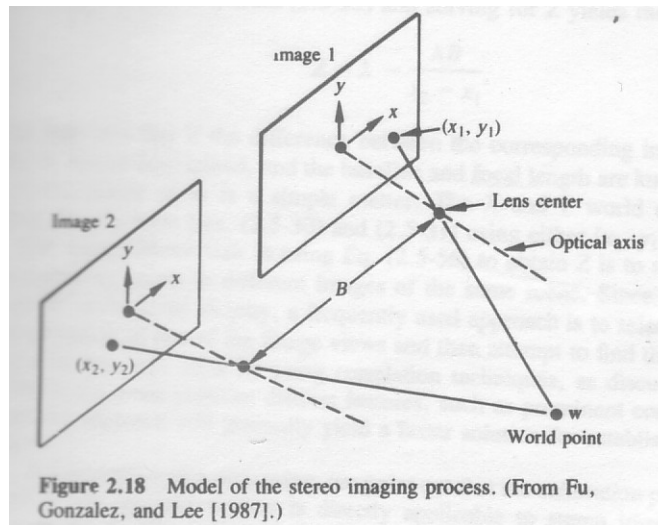
$$a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}Z - a_{41}xX - a_{42}xY - a_{43}xZ - a_{44}x + a_{14} = 0$$

$$a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}Z - a_{41}yX - a_{42}yY - a_{43}yZ - a_{44}y + a_{24} = 0.$$

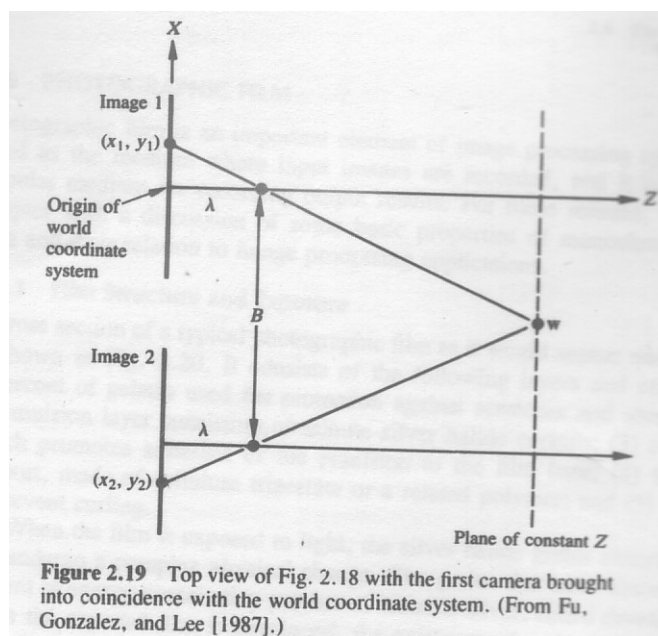
Kalibrácia potom pozostáva z toho, aby sme našli $m \geq 6$ bodov so známymi svetovými súradnicami, zobrazili ich, aby sme našli zodpovedajúce obrazové body (x_i, y_i) a použili ich na vyriešenie uvedených rovníc.

Stereo zobrazovanie

Na získanie chýbajúcej z-tovej súradnice môžeme použiť stereoskopické zobrazovacie techniky.



Vzdialenosť dvoch ohnísk sa nazýva základná čiara (base line) a úlohou je nájsť svetové súradnice (X, Y, Z) bodu w , za predpokladu, že poznáme obrazové body (x_1, y_1) a (x_2, y_2) . Predpokladajme, že prvú kameru sme dostali do súladu so svetovou súradnicovou sústavou, ako je to na ďalšom obrázku.



Ak je prvá kamera zosúladená, potom

$$X_1 = \frac{x_1}{\lambda}(\lambda - Z_1).$$

Ak posunieme do počiatku druhú kameru, dostaneme

$$X_2 = \frac{x_2}{\lambda} (\lambda - Z_2) .$$

Ale vzhľadom na rozdelenie kamier, a fakt, že Z súradnica je rovnaká, dostaneme

$$X_2 = X_1 + B ,$$

kde B je vzdialenosť (dĺžka) základnej čiary. Dosadením do druhej rovnice dostaneme z prvej výsledok

$$Z = \lambda - \frac{\lambda B}{x_2 - x_1} ,$$

ktorá hovorí, že ak môžeme určiť rozdiel medzi obrazom toho istého bodu v ľavej a pravej kamere, poznáme ohniskovú vzdialenosť a dĺžku základnej čiary, potom určiť vzdialenosť bodu $\mathbf{w}$, teda jeho z -tovú súradnicu nie je problém. Svetové súradnice X a Y vyplývajú zo skôr uvedených rovníc. Najťažšie je nájsť tie dva korešpondujúce body zodpovedajúce tomu istému bodu v skutočnosti.