



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za *elektrotehniko*

## Stereo

Stanislav Kovačič



<http://vision.fe.uni-lj.si/>



## 3-D iz 2-D

- S projekcijo 3-D sveta v 2-D slikovno ravnino se informacija o "tretji" dimenziji (t.j. "globini", oz. razdalji od kamere) izgubi.
- Osnovno vprašanje:
  - kako iz ene ali več 2-D slik pridobiti 3-D podobo sveta
- S tem problemom se ukvarja področje 3-D vida in posebej stereo vida.



## Iz vsebine

- Stereo (prostorski) vid
- Lateralni model stereo vida
- Stereo primerjanje
- Epipolarna geometrija
- 3-D rekonstrukcija



## 3-D : 2-D vid

- Kadar je "tretja" dimenzija nepotrebna, govorimo o "2-D" vidu. Takih primerov je v industriji največ.
- V nasprotnem primeru govorimo o (3-D) vidu.



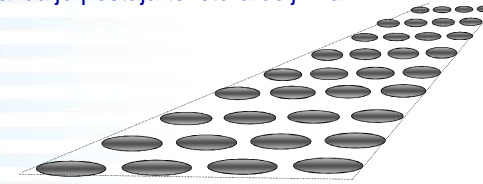
## 3-D iz 2-D

- 3-D iz ene slike:
  - Fokusranje (angl. Depth from Focusing),
  - Zumiranje (angl. Depth from Zooming),
  - Tekstura, perspektiva,
  - Senčenje, zakrivljanje (angl. "Shape from X").
- Ena slika + kontroliran svetlobni vir:
  - Fotometrični stereo (angl. Photometric Stereo),
  - Globinski "skener" (angl. "Range Finder").
- Dve ali več slik:
  - *Stereovid* (angl. *Stereopsis*, *Stereo vision*, *Stereo*),
  - Zaporedje slik (angl. Depth from Motion)
  - Struktura iz gibanja (angl. Structure from Motion).



## 3-D iz ene slike

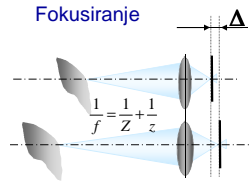
Tekstura, teksturni gradient  
Z razdaljo postaja tekstura bolj fina.



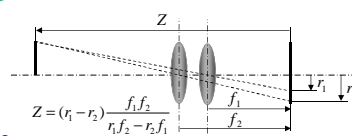
## 3-D iz ene slike

- Fokusranje, potrebujemo:
  - **Vrednotenje ostrosti slike**  
(Npr.: gradient svetlosti, statistika-varianca, entropija, frekvenčna analiza)
  - Umerjen (motoriziran) objektiv
- Zumiranje, potrebujemo:
  - **Vrednotenje premika točke v sliki** (optični tok, ...)
  - Umerjen (motoriziran) zum objektiv.
- Oba načina sta bolj *kvalitativne* narave (blizu, daleč,...).

Fokusranje

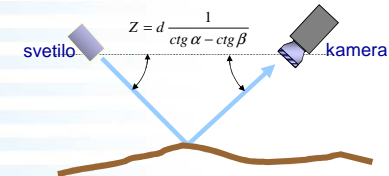


Zumiranje



## 3-D in kontrolirana osvetlitev

- Kontrolirana - strukturirana svetloba (angl. **Structured Lighting**), LIDAR
  - V načelu gre za zelo podobno zamisel (pojav) kot pri stereo vidu – triangulacijo.



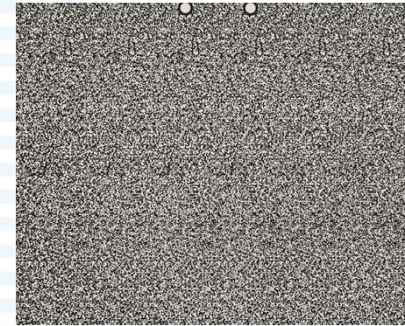
- S temi pristopi se v načelu dosega zelo velike merilne točnosti, ~10 μm



## 3-D in kontrolirana osvetlitev



## Stereo vid



Avtostereogram



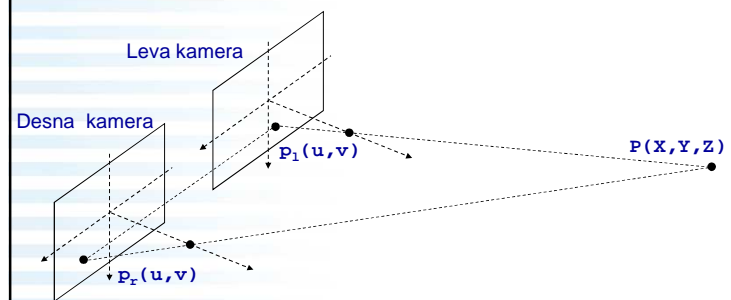
## Stereo vid

### Stereo vid temelji na

- sposobnosti 3-D zaznavanja na podlagi dveh slik istega prizora, zajetih z dvema med seboj premaknjenima kamerama (stereo paralaksa).
- Računalniški stereo vid je biološko motiviran.
- Stereo efekt je pri ljudeh "izredno močan" in samozadosten.
- Seveda lahko v strojnem vidu uporabimo tudi več kamer.



## Stereo - osnovni model

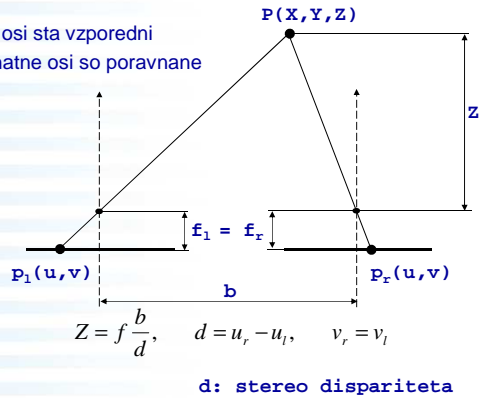


Dispariteta (neskladje),  $p_1(u, v) \neq p_2(u, v)$  je osnova za izračun razdalje do točke v prostoru.



## Stereo - lateralni model

- Optični osi sta vzporedni
- Koordinatne osi so poravnane



## Stereo glava

TRC ~'95



FE ~'97



Point Grey  
Bumble Bee ~'08



Nao ~'11



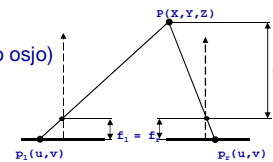
## Stereo - osnovni model

Osnovni parametri:

- Obe goriščnici (najbolje enaki)
- Obe izhodišči slik (sečišče slikovne ravnine z optično osjo)
- Razdalja med kamerama (razdalja med optičnima osema)

Pomen parametrov:

- Notranji parametri: preslikava iz k.s. kamer v sliki
- Zunanji: preslikava med k.s. kamer (relativna pozicija in orientacija kamer)



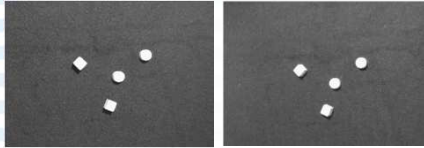
## Stereo problem

• Osnovna problema stereo vida:

- Ugotoviti korepondenco, dispariteto (neskladnost) – kateri (dve) točki v stereo paru slik sta upodobitvi iste točke v prizoru.
  - *Stereo primerjanje*
- Kako na podlagi korespondence pridobiti 3-D podobo prizora - 3-D rekonstrukcija
  - *Kalibracija*, določanje neznanih parametrov sistema.



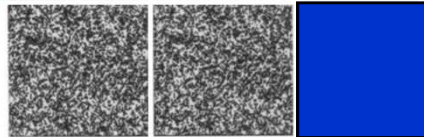
## Stereo primerjanje



Leva slika

Desna slika

V takem stereo paru ni težko rešiti problema korespondence



Leva slika

Desna slika

Globinska slika

Rezultat stereo primerjanja

Marr 82: Vision



## Stereo primerjanje

Tehnike primerjanja:

- Korelacijske metode (primerjanje področij)
  - direktno primerjamo (področja) svetlosti v eni in drugi sliki.
- Metode na osnovi značilnosti (značilnih točk)
  - najprej poiščemo značilne točke (robove, oglišča), nato primerjamo značilnosti točk.
- V obeh primerih je rezultat primerjanja "polje premikov" - neskladij ali disparitet, (angl. Displacement - Disparity Field).



## Stereo primerjanje

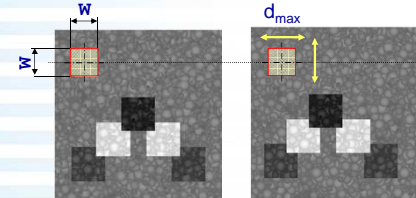
- Poišči k dani točki v eni (npr. levi) sliki pripadajočo točko v drugi (desni) sliki.
  - Izračunaj neskladje.
- Vprašanje: *kaj* oziroma katere točke bomo sploh primerjali in *kako*?
- Potrebujemo:
  - Mero podobnosti
  - Tehniko primerjanja



## Stereo primerjanje

Korelacijske metode

- Izberemo velikost ( $W = 2w+1$ ) področij - "okno", ki jih primerjamo.
- Izberemo velikost okolice pregledovanja ( $d_{max}$ ), t.j. določimo, kako daleč iščemo ujemanje.



Umetni stereo par (zelo primeren za preizkušanje algoritmov)



## Stereo primerjanje

### Korelacijske metode

- Izberemo funkcijo podobnosti,  $S(d)$ ,  $d = (u, v)$ :
  - Vsota absolutnih razlik (v oknu), SAD,
  - Vsota kvadratov razlik, SSD,
  - Korelacija, korelacijski koeficient, CC, ....
- Izračunamo funkcijo podobnosti  $S(d)$ ,
- Poiščemo maksimum funkcije podobnosti

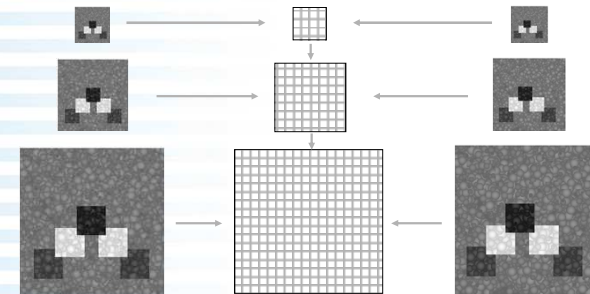
$$S(d(i, j)) = \sum_{k=-w}^{k=+w} \sum_{l=-w}^{l=+w} \mathcal{F}(I_l(i+k, j+l), I_r(i+k+u, j+l+v))$$

$$d(i, j) = \arg \max_d \{S(d)\}$$



## Stereo primerjanje

### Večločljivostni prostor - piramida



Leva slika

Polje premikov

Desna slika



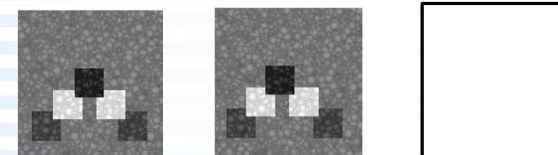
## Stereo primerjanje

### Korelacijske metode

- Dajo "gosto" polje premikov.
- Zahtevajo površine bogate s teksturo.
- Pogosto dajejo več "lažnih" ujemanj kot primerjanje značilnih točk.
- Vprašanje:
  - Kako naj bo veliko okno (3x3, 5x5, 7x7, ... ) ?
  - Kako naj bo veliko območje iskanja ?
    - Običajno določeno iskustveno.
    - Večločljivostni pristopi
      - začnemo z velikim oknom, nato pa vse manjšim.
      - piramidni pristopi - najprej majhna ločljivost, potem postopoma večja, okno pa vedno enako.



## Stereo primerjanje



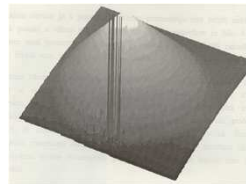
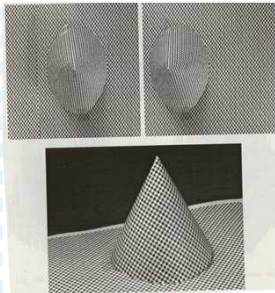
Leva slika

Desna slika

Globinska slika



## Stereo primerjanje



## Stereo primerjanje

Metode na osnovi primerjanja značilnosti:

- Najprej (v slikah, neodvisno ene od druge) poiščemo značilne točke, nato pa jih primerjamo:
  - primerjanje robnih točk, primerjanje ravnih črt, ...
  - primerjanje oglišč, krogov, ...
  - primerjanje „ključnih“ točk, ....
  - primerjanje tekstur, barv, ....
- Dajo redko polje korespondenčnih točk, za rekonstrukcijo površin je potrebna (naknadna) interpolacija.
- So manj dvoumne (manj lažnih ujemanj) kot korelacijske (potencialnih kandidatov za ujemanje je manj).
- Manj občutljive na fotometrično variabilnost.
- Na splošno je možna višja točnost.



## Stereo primerjanje



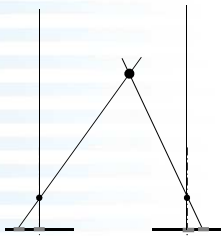
## Stereo vid

- Nekatera zapažanja:
  - Dispariteta ( $d$ ) pada z razdaljo – za sistem vzporednih kamer.
  - Napaka raste s kvadratom razdalje ( $Z$ ) – stereo deluje za relativno majhne razdalje.
  - Napaka pada z osnovnico ( $b$ ) – torej, čimbolj sta kameri razmaknjeni, boljše je. Po drugi strani pa je sliki vse težje primerjati – bolj sta si sliki različni. Nekatere rešitve so zato šle v smeri večkratnih osnovnic, to pa je že aktivni (stereo)vid.



## Stereo vid

- Nekatera opažanja:
  - Dispariteta ( $d$ ) pada z razdaljo – za sistem vzporednih kamer.



Dispariteta  $d = 0$  v neskončnosti, sicer pa pozitivna.

Op.:

Za vergentni kameri to ne drži, disparitete so tako pozitivne kot negativne.

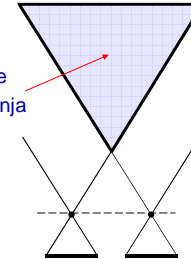


## Stereo vid

- Nekatera opažanja:
  - Napaka pada z osnovnico ( $b$ ) – torej, čim bolj sta kameri razmaknjeni, boljše je. Po drugi strani pa je sliki vse težje primerjati – bolj sta si sliki različni. Nekateri raziskave so šle v smeri večkratnih osnovnic, to pa je že aktivni (stereo)vid.

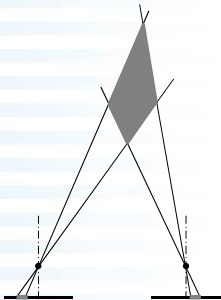
$$Z = f \frac{b}{d}$$

Področje prekrivanja



## Stereo vid

- Nekatera opažanja:
  - Napaka raste s kvadratom razdalje ( $Z$ ) – stereo deluje za relativno majhne razdalje.



## Stereo primerjanje

- Bistven problem stereo primerjanja:
  - popolno ujemanje stereo para slik ne obstaja.
  - Pomagajo omejitve, ki jih postavimo na osnovi poznavanja problema:
    - epipolarna geometrija – problem 2-D iskanja ujemanja prevedemo na 1-D problem (o tem bomo še govorili).
    - Enoznačnost ujemanja. Dani točki v eni sliki ne moreta pripadati dve točki v drugi sliki (razen redkih izjem).







## Stereo primerjanje

- Omejitve (naprej):
  - Fotometrična kompatibilnost - svetlosti iste točke v prizoru se v stereo paru slik malo razlikujeta.
  - Geometrična kompatibilnost – geometrične karakteristike se v obeh slikah malo razlikujejo (npr. koti, dolžine daljic,...).
  - Gladkost polja neskladij (disparitet) – neskladja se počasi spreminjajo skoraj povsod.
  - Območje disparitet je (spričo geometrije sistema) omejeno ( $d_{min}$ ,  $d_{max}$ , so npr. pozitivne, ipd.)

Kar zadeva stereo primerjanje je zelo pomembno, da ne sprejmemo lažnih (napačnih) ujemanj za pravilne. Bolje je, da jih zavržemo raje preveč (tudi pravilne) kot premalo.



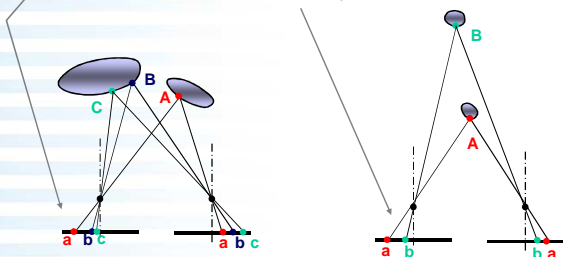
## Stereo primerjanje

- Omejitve (naprej):
  - Medsebojno (ne)ujemanje – če dana točka v eni sliki nima korespondenčne točke v drugi sliki (na primer zaradi (samo)zakrivanja, odbleska ali na splošno šuma, potem tudi druga točka nima korespondenčne točke.
  - Sledi:
    - Primerjanje leve slike z desno in nato še desne z levo potencialno lahko izloči lažna ujemanja.



## Stereo primerjanje

- Omejitve (naprej):
  - Urejenost korespondenčnih (homolognih) točk – korespondenčne točke si v obeh slikah sledijo v enakem vrstnem redu – razen redkih izjem.



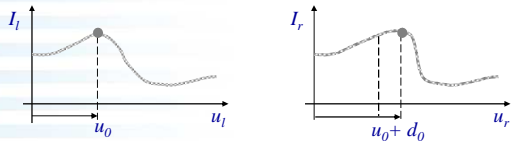
## Stereo primerjanje

- “Standardni” pristop:
  - dinamično programiranje (DP)
  - + dodatne omejitve (npr. epipolarnost,...)
  - + večločljivostni pristop (ločljivostna piramida).



## Stereo primerjanje z DP

- Stereo primerjanje z dinamičnim programiranjem:
  - Imamo "idealni" stereo par, ki nam ga da lateralen stereo sistem ali pa smo sliki pred tem preračunali (korigirali – "rektificirali").
  - Korespondenčne točke zato ležijo vzdolž horizontalnih črt.
  - Primerjamo oba svetlostna profila. Profila zaradi stereo paralakse nista povsem enaka.
  - Zato enega od profilov „deformiramo“ v drugega. Iščejo funkcijo neskladnosti  $d$ ,  $u_r = u_l + d$ , tako, da si bosta čimbolj podobna.
  - To naredimo z dinamičnim programiranjem.



## Stereo primerjanje

$$T(u_l, u_r) = |I_l(u_l) - I_r(u_r)| = |I_l(u_r + d(u_r)) - I_r(u_r)|,$$

$$C_1(u_l, u_r) = C(u_l - 1, u_r) + w_1 T(u_l, u_r),$$

$$C_2(u_l, u_r) = C(u_l, u_r - 1) + w_2 T(u_l, u_r),$$

$$C_3(u_l, u_r) = C(u_l - 1, u_r - 1) + w_3 T(u_l, u_r),$$

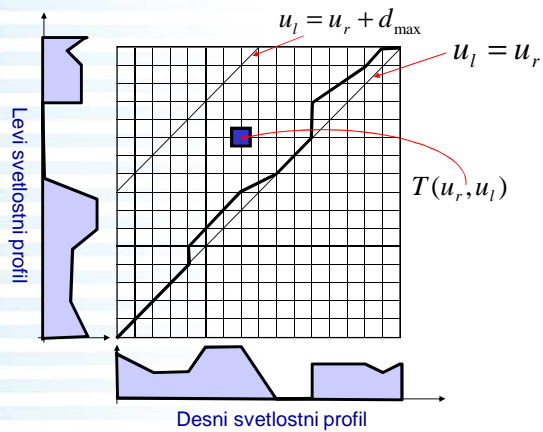
$$C(u_l, u_r) = \min \{C_1(u_l, u_r), C_2(u_l, u_r), C_3(u_l, u_r)\}$$

$$R(d(u_r)) = \sum_{u_l} T(u_l, u_r) = \sum_{u_l} |I_l(u_r + d(u_r)) - I_r(u_r)|.$$

Iščemo (optimalni)  $d$ , ki minimizira  $R$



## Stereo primerjanje

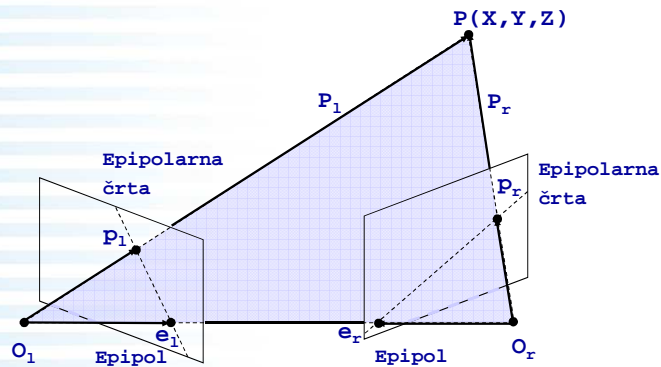


## Epipolarna geometrija

- Epipolarnost, epipolarne črte
- Bistvena – izhodiščna matrika
- Fundamentalna – temeljna matrika



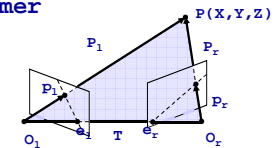
## Epipolarna geometrija



## Epipolarna geometrija

Preslikava med k.s. kamer

$$P_r = R(P_l - T)$$



Preslikava v slikovno ravnino

$$p_r = \gamma_r P_r = \frac{f_r}{Z_r} P_r$$

$$p_l = \gamma_l P_l = \frac{f_l}{Z_l} P_l$$



## Epipolarna geometrija

Pomen epipolarne geometrije:

- omeji prostor iskanja (2D -> 1D):  
dani točki v eni sliki pripada (korespondenčna) točka, ki leži na epipolarni črti.
- zmanjša število "lažnih" ujemanj, ker je potencialnih kandidatov manj!



## Epipolarna geometrija

Enačba epipolarne ravnine

$$(P_l - T)^T (T \times P_l) = 0$$

$$(R^T P_r)^T (T \times P_l) = 0$$

$$P_r^T R (T \times P_l) = 0 \quad \text{Op.: } T \times P_l = S P_l = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix} P_l$$

$$P_r^T R S P_l = 0$$

$$P_r^T E P_l = 0$$

Matriko E določajo zunanji parametri sistema



## Epipolarna geometrija

$\mathbf{p}_r^T \mathbf{E} \mathbf{p}_l = 0$   $\mathbf{p}_r$  in  $\mathbf{p}_l$  sta v k.s. kamer  
Sledi projekcija v diskretno slikovno ravnino

$\mathbf{p}_r^T \mathbf{M}_r^{-T} \mathbf{E} \mathbf{M}_l^{-1} \mathbf{p}_l = 0$  Projekcijski matriki  $\mathbf{M}$  (notranji parametri)  
 $\mathbf{p}_r, \mathbf{p}_l$  sta homogena vektorja

$\mathbf{p}_r^T \mathbf{F} \mathbf{p}_l = 0$  Rang matrike  $\mathbf{F}$  je 2!  
Točki  $\mathbf{p}_l$  pripada premica skozi  $\mathbf{p}_r$

Matriko  $\mathbf{F}$  določajo zunanji in notranji parametri sistema.  
Če poznamo  $\mathbf{F}$ , lahko za dano točko ene slike določimo (epipolarno) premico v drugi sliki.



## 3-D rekonstrukcija

- Poznamo zunanje in notranje parametre:  
3-D rekonstrukcija je možna (triangulacija)
- Poznamo notranje parametre:  
3-D rekonstrukcija in določitev zunanjih parametrov je možna do konstante (faktorja skaliranja) natančno.
- Poznamo samo korespondenčne točke:  
rekonstrukcija je možna samo do projektivne transformacije natančno.



## Stereo kalibracija

Določanje fundamentalne matrike je razmeroma zahteven numeričen problem

$$\mathbf{p}_r^T \mathbf{F} \mathbf{p}_l = 0$$

Potrebujemo vsaj 8 točk – „algoritem 8-ih točk“, še bolje pa več

Vsaka točka prispeva eno (homogeno) enačbo

Spet imamo optimizacijski problem:

- Metoda najmanjših kvadratov
- SVD
- RANSAC



## Literatura

- E. Trucco, A. Verri,  
Introductory Techniques for 3D Computer  
Vision, Prentice Hall, 1998.
- B. Horn,  
Machine Vision, MIT Press, 1985.