



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *elektrotehniko*

Nastanek slike

Stanislav Kovačič



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



Nastanek slike (1/3)

- Proces nastajanja slike (upodabljanja) je dokaj zapleten.
- Rezultat upodabljanja pa je slika.
 - Slika je upodobitev - preslikava - (3D) realnega sveta v (2D) slikovni ravnini.
 - Digitalna slika (vzorčenje, kvantizacija) je polje slikovnih elementov.
 - Na koncu je slika (samo še) 2D polje števil (matrika).
- Naloga RV je, da na podlagi slikovne matrike pridobi opis (kvantitativno, kvalitativno) 3D prizora.

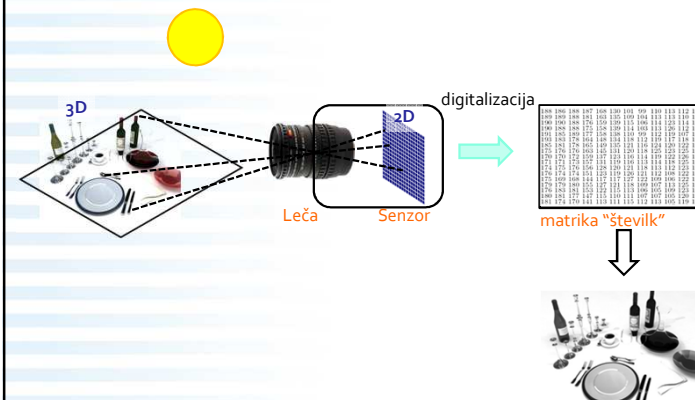


Iz vsebine

- Osnovno o merjenju svetlobnih učinkov
- Oko
- Fotometrična enačba leče
- Nekaj o lečah in kamerah
- **Nekatere tehnike osvetlitve**
- **Barve, zaznavanje barv in barvni prostori**



Nastanek slike (2/3)





Nastanek slike (3/3)

• Na nastanek slike vpliva veliko dejavnikov :

- prostorske/geometrične lastnosti
- radiometrične/fotometrične lastnosti svetila, predmeta in senzorja.

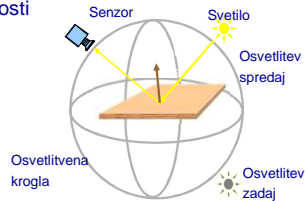
• Geometrične lastnosti:

- Namestitev svetila in senzorja glede na objekt zanimanja

• Fotometrične lastnosti:

- Sevanje, širjenje energije in njeni učinki

• Brez svetlobe / energije ni slike



Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

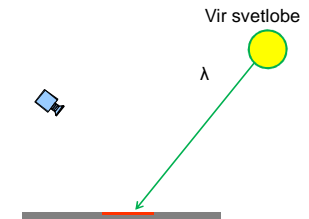
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



Razmisli:

kakšna je slika rdečega madeža na črni podlagi, če ga osvetlimo z zeleno svetlobo?



Svetloba na površini (1/9)

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

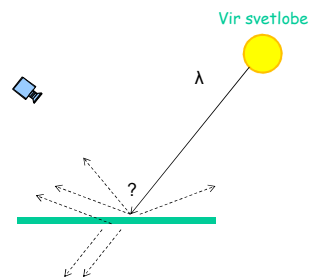
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

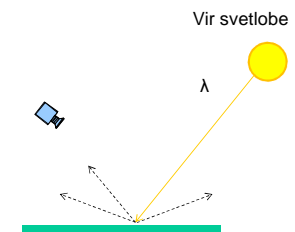
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



Idealni difuzni odboj (Lambertov odboj):

Vpadna svetloba se odbije (razprši) enako v vse smeri.

Lambertova površina je videti enako svetla iz vseh smeri.



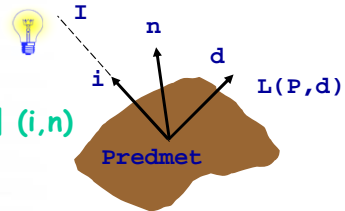
Svetloba na površini

Lambertova površina

Odbojnost enaka za vse točke na površini

ρ = albedo > 0

Svetlost ploskve (L) neodvisna od kje gledamo



Svetlost ploskve (L) odvisna od (cosinusa) vpadnega kota



Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

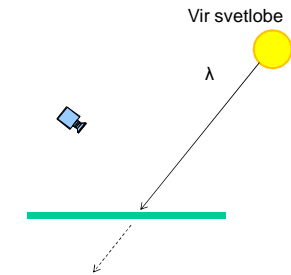
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

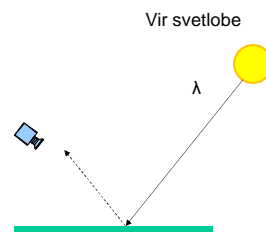
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



Idealni zrcalni odboj je nasprotje Lambertovega odboja.

Vpadni žarek se odbije pod enakim kotom (glede na normalo na ploskev)



Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

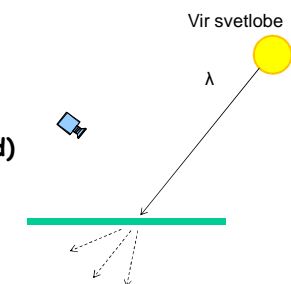
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost (difuzni prehod)

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca





Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

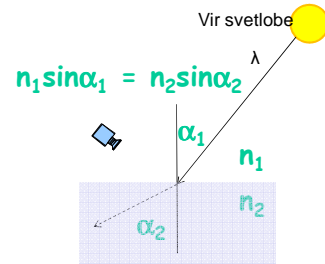
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



Do loma pride na meji med snovmi z različno "optično gostoto".
 Lom svetlobe opisuje Snell-ov "sinusni" zakon (Osnove fizike!)
 Razmisli: kakšna je optična gostota narisane ploskve
 glede na okolico: [večja/manjša]?



Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

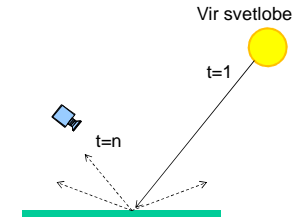
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



Svetloba na površini

Absorbcija

Odboj:

Difuzni odboj

Zrcalni odboj

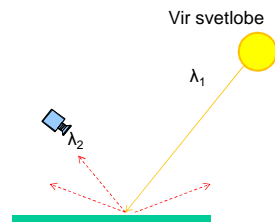
Prehajanje skozi snov:

Prosojnost

Lom

Fluorescenca

Fosforescenca



$\lambda_2 > \lambda_1$



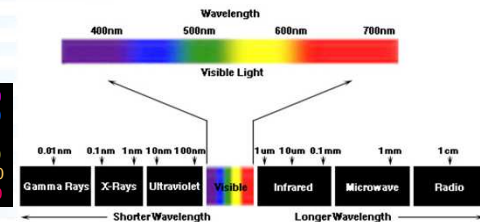
Svetloba

Svetloba je elektromagnetno valovanje.

Pojmovanje barve svetlobe je posledica človeškega zaznavanja.

Vidna svetloba

Vijolična	380-420
Modra	440-490
Zelena	490-560
Rumena	560-590
Oranžna	590-630
Rdeča	630-760

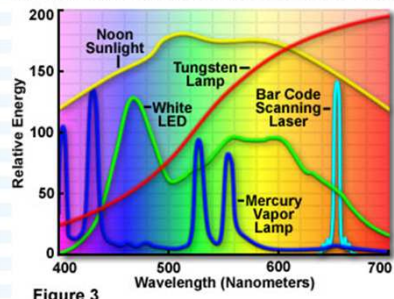




Svetloba

Vidna svetloba (400-700nm)

Spectra From Common Sources of Visible Light



Olympus



Svetloba

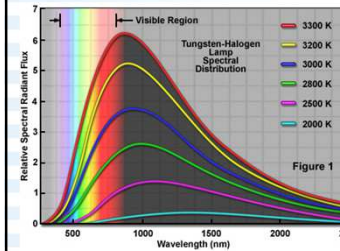
Planckov zakon:

$$E(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/k\lambda T} - 1)} \text{ [W / m}^{-2} \text{ m}^{-1}]$$

h = Planckova konstanta = 6,626 · 10⁻³⁴ [Js]

c = hitrost svetlobe = 2,998 · 10⁸ [m/s]

k = Boltzmannova konstanta = 1,381 · 10⁻²³ [J/K]



Wienov zakon:

$$\lambda_{max} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3}}{T} \text{ [m]}$$

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>



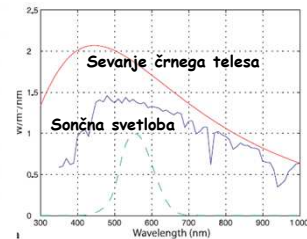
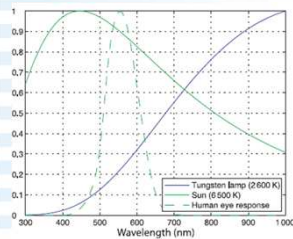
Svetloba

Stefan-Boltzmannov zakon $E = P/S = e \sigma T^4$

E = gostota energijskega (svetlobnega) toka [W/m²]

P = energijski (svetlobni) tok [W]

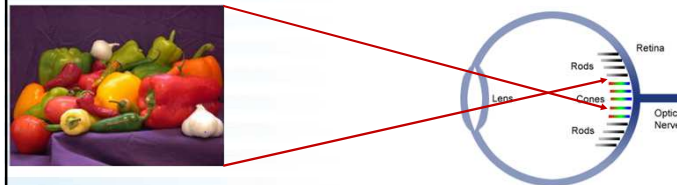
σ = Stefan-Boltzmannova konstanta = 5,67 · 10⁻⁸ [W/m²K⁴]



Peter Corke: Robotics, Vision and Control, Springer 2013, str 224.



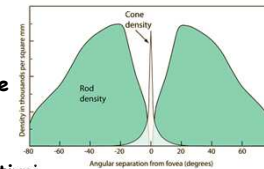
Zakaj zaznavamo "vidni" spekter?



Ker sonce seva v tem spektru

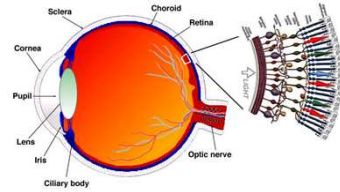
Oko zaznava svetlobo, ki pade na retino

- Čepki (angl., cones)
 - Občutljivi na barvo in večje intenzitete (oko ima več kot 6M čepkov)
- Paličice (angl., rods)
 - Bolj občutljivi, a niso spektralno selektivni (oko ima več kot 120M paličic)





Oko



Tri vrste čepkov

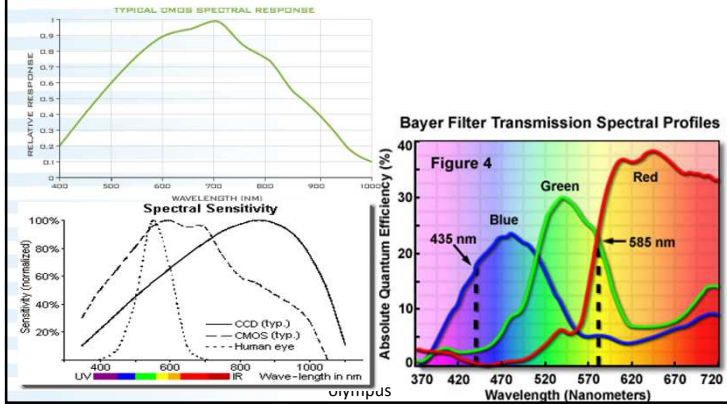
Občutljivi na različne valovne dolžine (R, G, B)

Od tu naprej ni popolnoma jasno kako možgani kombinirajo barvno informacijo...

- Zelo verjetno obstajajo nevroni, ki prožijo na razlike R-G, G-B, B-R.
- Prav tako se kombinira vse tri kanale v akromatični kanal.



Kaj pa občutljivost slikovnega senzorja?



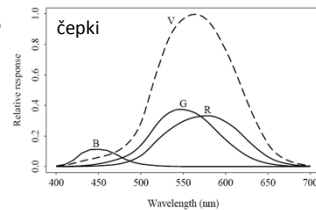
Spektralna občutljivost očesa

Oko je najboljčutljivejše na svetlobo sredi vidnega spektra.

Modra komponenta je bistveno manjša od R in G (ni risana v pravem merilu).

Razmerje čepkov:

$$R:G:B == 40:20:1$$



Čepki opravijo "filtriranje" svetlobe na spektralne pasove

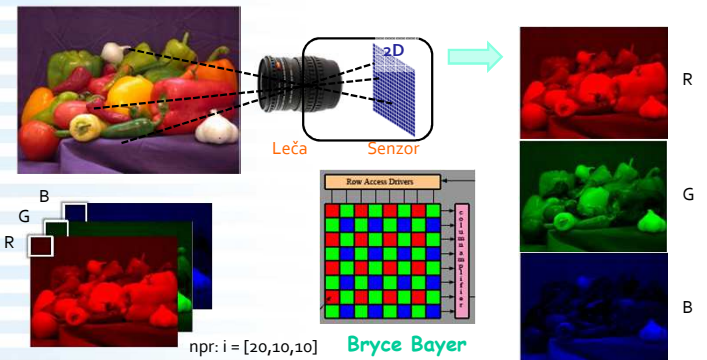
Živčni dražljaji pa vzbujajo zaznavanje barv.

Paličice so bolj občutljive na valovne dolžine bližje rdečega dela spektra.

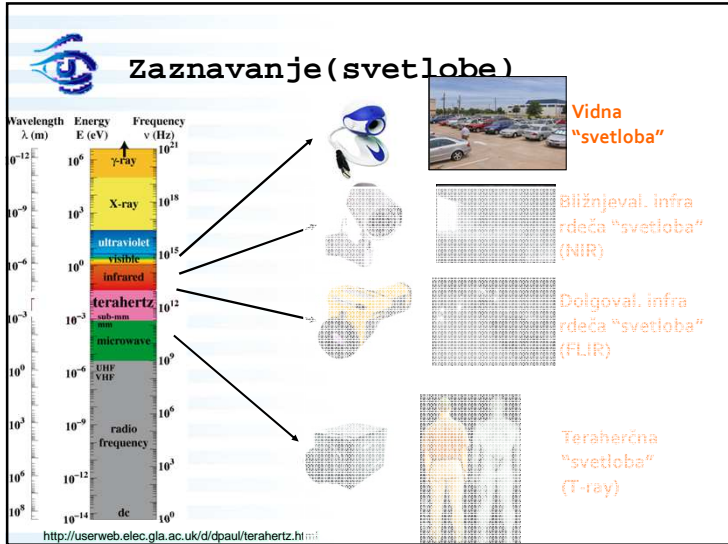


Slika v barvni kameri

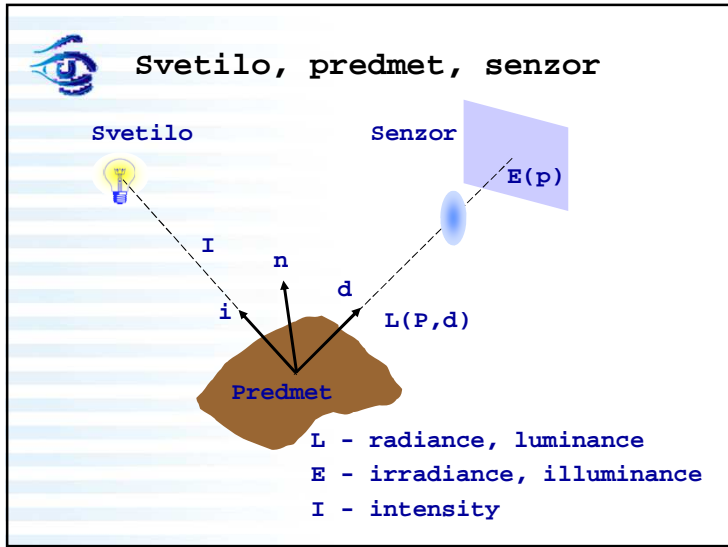
Vsak barvni kanal je ena „sivinska slika“ → RGB



<http://sensorcleaning.com>



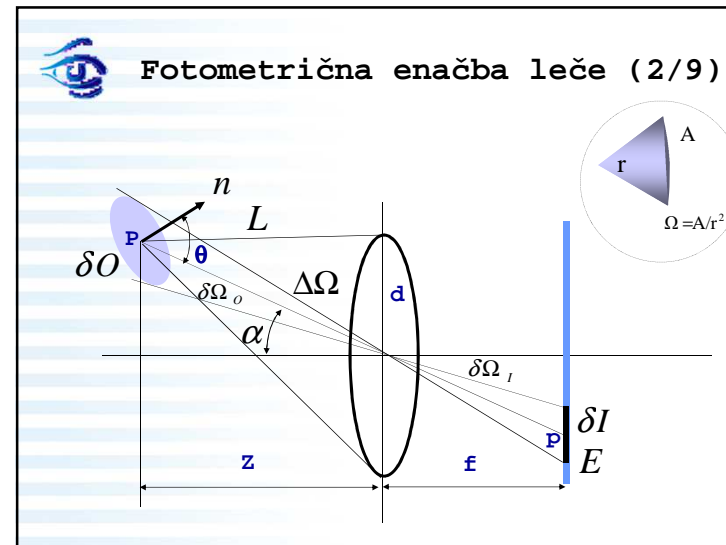
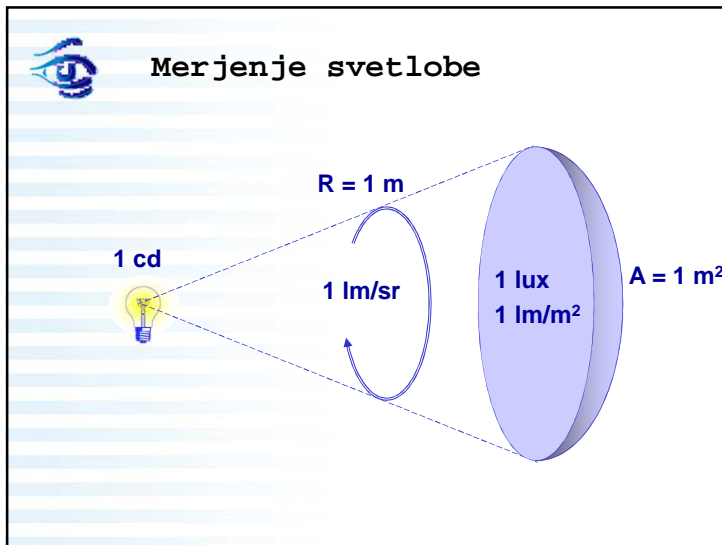
- ### Merjenje svetlobe
- Φ , moč svetlobe, svetlobni tok:
 - Radiometrična enota [W],
 - Fotometrična enota [lm]. $1 \text{ W} = 683 \text{ lumnov pri } \lambda = 555 \text{ nm}$
 - Gostota svetlobnega toka
 - $[\text{W} / \text{m}^2]$, $[\text{lx} = \text{lm} / \text{m}^2]$ (lux)
 - E , osvetljenost $[\text{W} / \text{m}^2]$, $[\text{lx} = \text{lm} / \text{m}^2]$
 - I , svetilnost $[\text{W} / \text{sr}]$, $[\text{cd} = \text{lm} / \text{sr}]$
 - L , svetlost $[\text{W} / \text{sr} / \text{m}^2]$, $[\text{cd} / \text{m}^2]$



Merjenje svetlobe

Radiometry	Radiometric unit	Photometry	Photometric unit
Radiant flux	W	Luminous flux	lm
Irradiance	W/m^2	Illuminance	lx (lm/m^2)
Radiant intensity	W/sr	Luminous intensity	cd (lm/sr)
Radiance	$\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$	Luminance	$\text{lm}/\text{m}^2\text{sr}$

- Gostota svetlobnega toka E (angl. Irradiance, Illuminance) podaja moč svetlobe na ploskovno enoto (gostoto moči).
- Osvetljenost (angl. Illuminance) podaja moč svetlobe na ploskovno enoto v vidnem delu spektra.
- Svetilnost I (intenziteta) podaja moč sevanja na enoto prostorskega kota.
- Svetlost L (angl. Radiance, Luminance) podaja svetilnost na ploskovno enoto.



Fotometrična enačba leče (1/9)

- Slika nastane na podlagi osvetljenosti slikovnega sensorja (E), ki je posledica izsevanje (ali odbite) svetlobe telesa (L).
- Zanima nas učinek odbite svetlobe od površine telesa na svetlobni senzor (CCD),
- Samo del te svetlobe se odbije tako, da jo prestreže senzor.

$L \rightarrow E$

Fotometrična enačba leče (3/9)

δO

n

Θ

L

$\Delta\Omega$

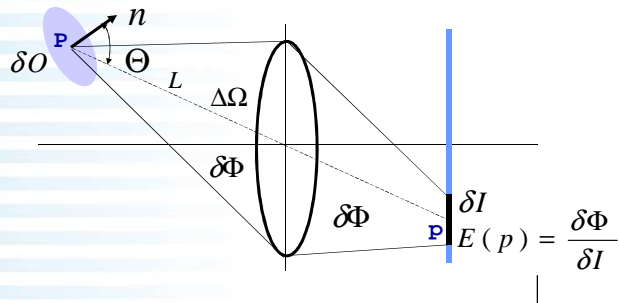
$\delta\Phi$

Moč sevane svetlobe v lečo

$$\delta\Phi = L(P) \times \Delta\Omega \times (\delta O \times \cos \Theta)$$



Fotometrična enačba leče (4/9)



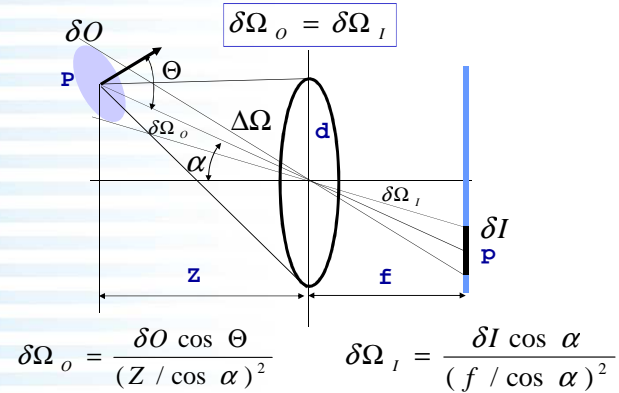
$$E(p) = \frac{\delta\Phi}{\delta I}$$

$$E(p) = L(P) \times \Delta\Omega \times \cos \Theta \times \frac{\delta O}{\delta I}$$

Osvetljenost (E) elementa slike (p), (gostota moči)



Fotometrična enačba leče (6/9)

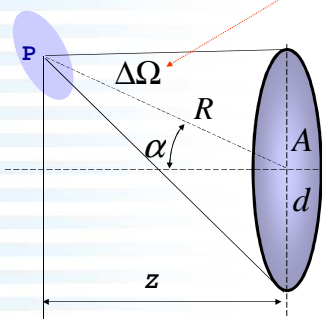


$$\delta\Omega_o = \frac{\delta O \cos \Theta}{(Z / \cos \alpha)^2}$$

$$\delta\Omega_l = \frac{\delta I \cos \alpha}{(f / \cos \alpha)^2}$$



Fotometrična enačba leče (5/9)



Prostorski kot leče

$$\Delta\Omega = \frac{A}{R^2} \cos \alpha$$

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$R = Z / \cos \alpha$$

$$\Delta\Omega = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\cos^3 \alpha}{Z^2}$$



Fotometrična enačba leče (7/9)

$$\delta\Omega_o = \delta\Omega_l$$

$$\frac{\delta O \cos \Theta}{(Z / \cos \alpha)^2} = \frac{\delta I \cos \alpha}{(f / \cos \alpha)^2}$$

$$\frac{\delta O}{\delta I} = \frac{\cos \alpha}{\cos \Theta} \left(\frac{Z}{f} \right)^2$$



Fotometrična enačba leče (8/9)

$$E(p) = L(P) \times \Delta\Omega \times \cos \Theta \times \frac{\delta O}{\delta I}$$

$$\Delta\Omega = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\cos^3 \alpha}{Z^2} \quad \frac{\delta O}{\delta I} = \frac{\cos \alpha}{\cos \Theta} \left(\frac{Z}{f} \right)^2$$

$$E(p) = L(P) \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha$$



F#

$$F\# = \frac{f}{d}$$

- f-(efektivna) goriščna razdalja leče
- d – premer odprtine (zaslonke)
- V rabi so najrazličnejše oznake:
F/1.4, F-1.4, 1:1.4,...
- Razdelki na obročku zaslonke:
1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22,...

$$E(p) = L(P) \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{F\#} \right)^2 \cos^4 \alpha$$

- Z vsakim razdelkom se (moč) energija na senzorju razpolovi
- Za enak svetlobi učinek se čas zaslonke (ekspozicije) podvoji.



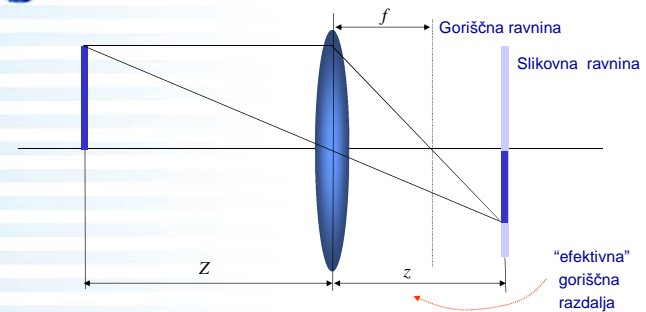
Fotometrična enačba leče (9/9)

$$E(p) = L(P) \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha$$

- Osvetljenost (angl. "illuminance") slike je sorazmerna svetlosti predmeta (angl. "brightness").
- Osvetljenost pada s četrto potenco cosinusa vpadnega kota
($\cos^4 11^\circ = 0.93$, $\cos^4 22^\circ = 0.74$, $\cos^4 45^\circ = 0.25$)
- Osvetljenost je odvisna od optične moči leče, "števila F#"



Enačba tanke leče



$$\frac{1}{Z} + \frac{1}{z} = \frac{1}{f}$$

$$Z \gg f \Rightarrow z \approx f$$

Slika/senzor je praktično kar v goriščni ravnini

Povečava leče

$$m = \frac{x}{X} = \frac{z-f}{f}$$

$$m = \frac{x}{X} = \frac{z}{Z} \approx \frac{f}{Z}$$

Odbojnost predmeta

- Odboj na površini telesa je dokaj zapleten pojav.
- Zvezo med osvetljenostjo in zaznano svetlostjo opisuje dvosmerna funkcija porazdelitve odbojnosti.
- BRDF (Bidirectional reflectance distribution function).

$$f_r(r,i,d) = \frac{\delta L(r,i,d)}{\delta E(r,i)}$$

Še o fotometrični enačbi

$\alpha = 0, m \ll 1 \quad E(p) = \frac{\pi}{4} \frac{1}{F \#^2} L(P)$

$\alpha = 0, m = \frac{z-f}{f}, \rightarrow \frac{z}{f} = m + 1$

$F \# = \frac{z}{d} = \frac{z}{df} = F \# \frac{z}{f} = F \# (m + 1)$

$$E(p) = \frac{\pi}{4} \frac{1}{[F \# (m + 1)]^2} L(P)$$

Odbojnost predmeta

- Posebni vrsti odboja sta:
 - Zrcalni odboj
 - Difuzni odboj
- Lambertova površina (difuzna)
 - Svetlost homogene površine je neodvisna od smeri opazovanja.

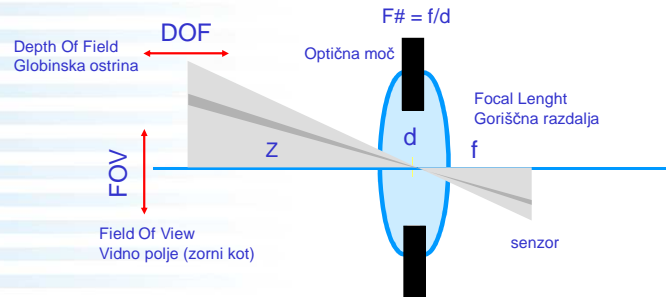
$$L = \rho \cdot E \cdot i^T \cdot n = \rho \cdot E \cdot \cos \vartheta$$

- ρ - albedo (koeficient odbojnosti)



Parametri leče

- **Klasična leča:**
velikost slike predmeta je odvisna od razdalje do predmeta.



Parametri leče

Ločljivost leče

je praktično vedno boljša od ločljivosti sensorja (t.j., premer madeža je manjši od velikosti slikovnega elementa)

$$D = 2.44 \times \lambda \times F\#$$

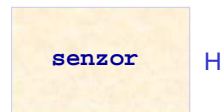
Npr.: $\lambda = 560 \text{ nm}$, $F\# = 5.6$, $D = 7.6 \mu\text{m}$
(Ločljivost je kar $\approx F\#$)



Parametri leče

- Vidno polje (zorni kot)

$$FOV = 2 \times \arctan \frac{H}{2f}$$



- Širokokotna leča – majhen f .
- H določa manjša dimenzija sensorja.
- Zorni kot leče običajno poda proizvajalec.
- Je pa v praksi potrebno upoštevati še velikost sensorja.



Parametri leče

DOF: globinska ostrina - interval med največjo in najmanjšo razdaljo, na katerem je slika ostra

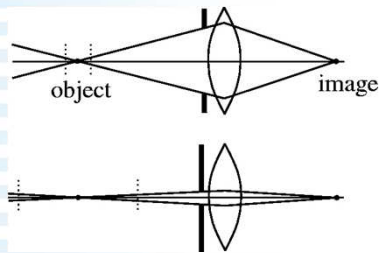
$$DOF = \frac{1}{m^2} \times F\# \times p$$

p – velikost piksla

Npr.: $m = 0.2$, $F\# = 16$, $p = 11 \mu\text{m}$, $DOF \approx 5 \text{ mm}$
(DOF najbolje ugotoviti s poskušanjem)



Globinska ostrina



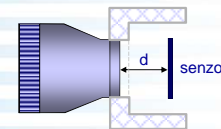
Globinska ostrina je odvisna od zaslonke.



Nastavek

C – nastavek in CS – nastavek (angl. C/CS mount)

Razlika je v potrebni razdalji med lečo, to je nastavkom kamere za pritrditev leče, in senzorjem.



d = 12.5 mm za CS - nastavek
d = 17.5 mm za C - nastavek

Pri izbiri kamere in leče je to potrebno upoštevati.



Vrste leč

Ozkokotne (10°)
Normalnokotne (30°)
Širokokotne (60° ->)

Fiksne
Nastavljive

Ročne
Avtomatske
Motorizirane

Standardne
Makro ($m \approx 1$)
Telecentrične

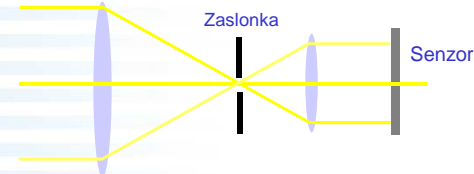
C - nastavek
CS – nastavek
F – nastavek
Vmesni obročki

Specialne
Integrirane



Telecentrične leče

- Velikost slike ni odvisna od razdalje do predmeta
- Ostrina slike ni odvisna od razdalje do predmeta (vendar le v danem delovnem področju)

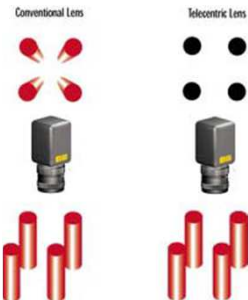


- Zunanja telecentričnost (na strani predmeta)
- Notranja telecentričnost (na strani senzorja)



Telecentrične leče

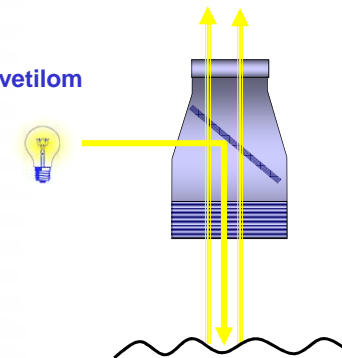
- Idealno:
 - Ni napake paralakse
 - Ni spremembe velikosti
- Dejansko:
 - Napaka telecentričnosti
- Pomembna podatka leče:
 - Delovna razdalja (npr. 100 mm)
 - Premer (npr. 70 mm)
 - Področje telecentričnosti (sprememba razdalje, ki povzroči spremembo velikosti slike za μm)



Specialne leče

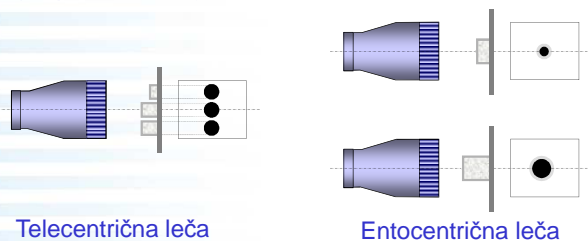
Leča z koaksialnim svetilom

- Ne meče senc



Entocentrične leče

- Leča, ki poudarja učinek perspektive.
- Velikost slike je še bolj odvisna od razdalje do predmeta.
- Pride prav na primer za kontrolo kakovosti (na primer višine) izdelkov.



Telecentrična leča

Entocentrična leča



Kamere

Linijske
Matrične

Pravokoten
Kvadraten piksel

Standardne
Industrijske

S prepletanjem
Progressivne

Črno bele
Barvne

Z visoko ločljivostjo
Z visoko hitrostjo

Analogne
Digitalne

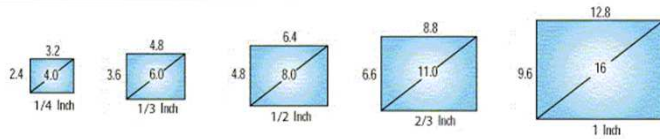
Nastavek, C (17.5mm),
CS (12.5mm), F

Inteligentne



Matrične kamere

Standardne velikosti (CCD) senzorja

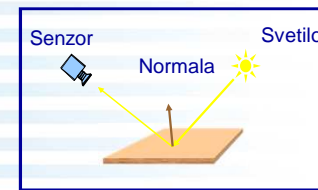


- Pri izbiri leče je potrebno format senzorja upoštevati.
- Leča je lahko tudi za večji format, ne pa za manjši.

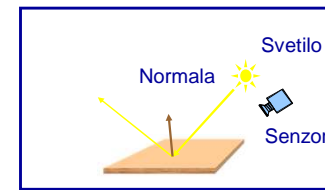


"Temno - svetlo" polje

Svetlo polje



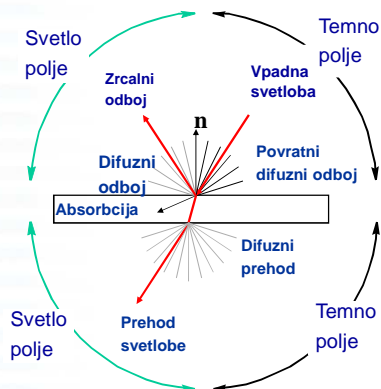
Temno polje



Svetloba na površini

Slika je rezultat

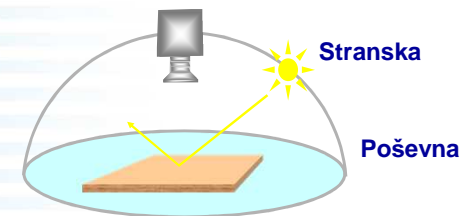
- svetila
- prizora
- senzorja



©Copyright 2000
Illumination Technologies, Inc.



Osvetlitev spredaj

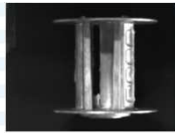


- **Stranska osvetlitev**, usmerjena, temno polje, povzroča sence, odbleske izboklin, vboklin
- **Poševna osvetlitev**, dobra za kotrolo ravnosti površini



Stranska osvetlitev-primer

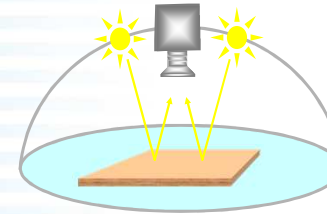
Primer: usmerjena osvetlitev s strani
Namen: merjenje razdalje med kolutoma



Pomni: kamera vidi drugače kot človeško oko



Osvetlitev zvrha

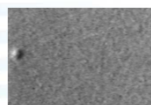
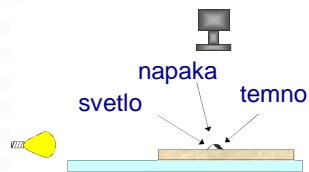


- **Osvetlitev zvrha**, usmerjena ali difuzna, v svetlem polju, **ne povzroča senc**
- **Koaksialna osvetlitev** (poseben primer) primerna za ravne, odbojne/vpojne površine (PCB)
- Dober kontrast

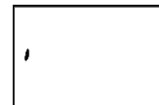


Poševna osvetlitev-primer

Namen:
odkrivanje
površinskih
napak



ploščica

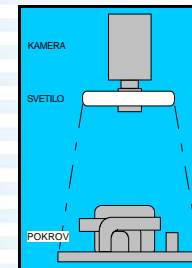


napaka



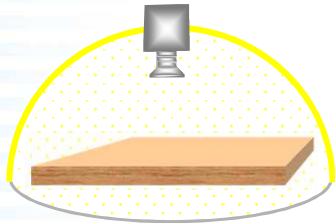
Osvetlitev zvrha - primer

- Obročasto svetilo pritrjeno na objektiv
- Namen: preprečitev senc





Homogena osvetlitev



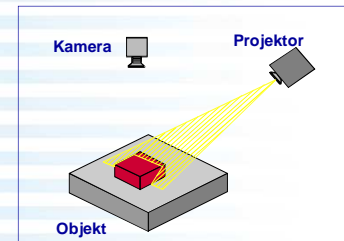
Difuzna - homogena osvetlitev

- ne povzroča senc
- primerna za odbojne nepravilne površine

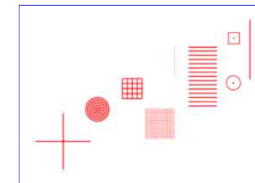


Strukturirana osvetlitev

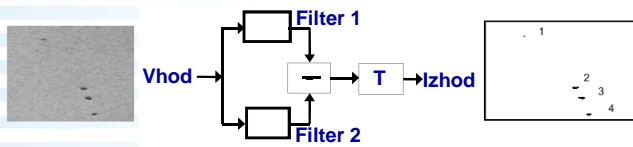
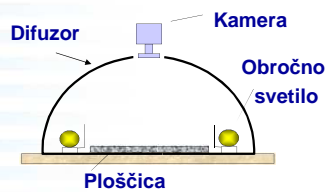
Zajemanje 3D oblike (globine) na osnovi 2D slik



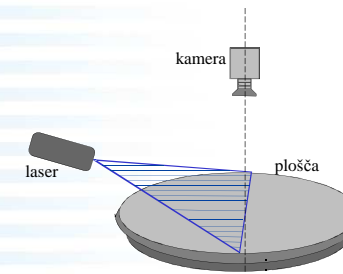
Svetlobni vzorci



Homogena osvetlitev-primer



Merjenje konkavnosti plošč

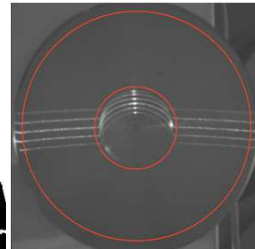
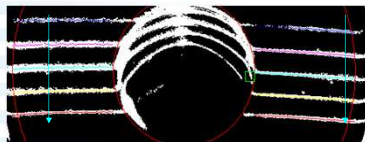


Majhen projekcijski kot -> velika občutljivost na spremembo višine plošče



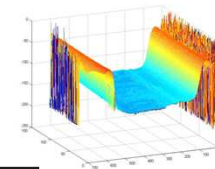
Merjenje konkavnosti plošč

- določimo področje zanimanja
- sliko binariziramo
- izločimo ravne črte



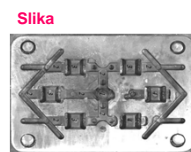
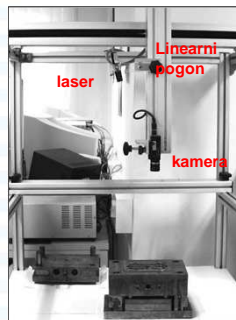
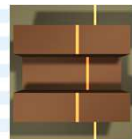
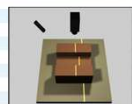
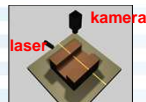
Strukturirana osvetlitev-primer

Namen: merjenje dimenzij - profila



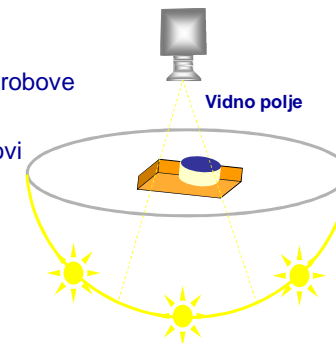
Strukturirana osvetlitev-primer

Namen: kontrola izpraznjenosti orodja



Osvetlitev zadaj

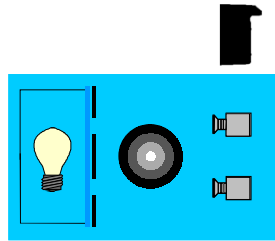
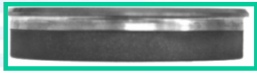
- difuzna, usmerjena, kolimirana
- neprosojni predmeti
 - obris - silhueta
 - daje ostre in stabilne robove
- prosojne snovi
 - kontrola strukture snovi





Osvetlitev zadaj

- Namen: merjenje dimenzij

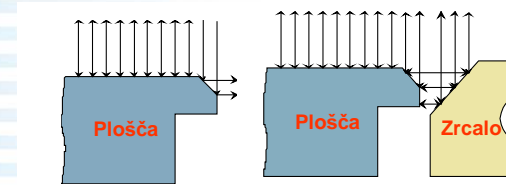


- Usmerjena osvetlitev
- Kolimirana osvetlitev
- Telecentrična osvetlitev
- Želimo dobiti snop paralelnih žarkov, rešiti problem paralakse.



Zrcala,

- Velike predmeti, na katerih nas zanima relativno malo stvari
- Težko dostopni deli predmetov



Osvetlitev zadaj

