Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu

ELEC-A4130 Sähkö ja magnetismi (5 op)

Henrik Wallén

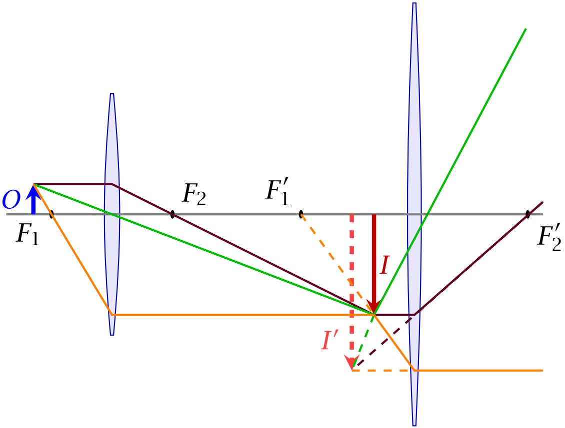
Kevät 2019

Tämä luentomateriaali on suurelta osin Sami Kujalan ja Jari J. Hännisen tuottamaa

Luentoviikko 10

Geometrinen optiikka (YF 34)

- Heijastuminen ja taittuminen tasopinnassa
- Heijastus pallopinnasta
- Taittuminen pallopinnalla
- Ohuet linssit
- Kamerat
- Silmä
- Suurennuslasi
- Optisia kojeita
- Yhteenveto



Tavoitteena on oppia

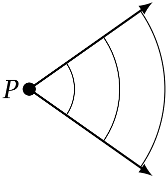
- miten peilit muodostavat kuvan
- miten linssit muodostavat kuvan
- miten kameran linssin kuvakulma määräytyy
- mikä aiheuttaa ihmisen näkökyvyn puutteita ja miten puutteita voi korjata
- miten yksinkertaiset optiset kojeet toimivat

Geometrinen optiikka

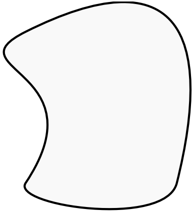
- Valon kulkua havainnollistetaan valonsäteiden avulla
  - Ovat aaltorintamien normaaleja
  - Osoittavat valon etenemissuuntaan
- Geometrinen optiikka
  - Pistemäiset valonlähteet
  - Valonsäteet ovat homogeenisessa aineessa suoria viivoja
  - Valon aaltoluonne jätetään huomiotta
  - Valaistun tai säteilevän kappaleen jokainen piste on valon lähde (vrt. Huygens)
  - Optiikalla kuvataan **pistemäinen** tai laajempi **mitallinen kohde** (= äärellisen kokoinen joukko pisteitä) **kuvapisteeksi** tai **mitalliseksi kuvaksi** (= joukoksi pisteitä)
  - Useimpien optisten laitteiden (kamerat, mikroskoopit, teleskoopit) suunnittelun pohja
- Ihminen ajattelee (”näkee”) kohteen tai kuvan olevan siinä suunnassa, josta valonsäteet saapuvat silmään

Geometrinen optiikka – käsitteet

Kohdeavaruus

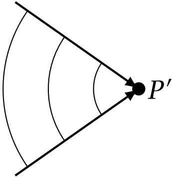


Sädekimppu hajaantuu pistelähteestä



Kuvantava optinen järjestelmä kerää sädekimpun kohdepisteestä P ja suuntaa sen kuvapisteeseen P'

Kuva-avaruus



Sädekimppu keskittyy kohti kuvapistettä

Todellinen kuva Kuvapisteeseen voidaan asettaa varjostin ja kuva näkyy

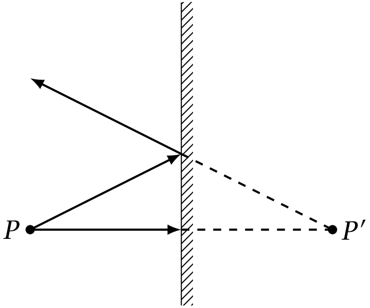
Virtuaalinen kuva Kuvapiste on näennäinen: varjostimelle ei synny kuvaa

Geometrisen optiikan merkinnät

- Samat merkinnät kuin kirjassa (YF 34) – muilla lähteillä voi olla erilaiset merkinnät ja merkkisäännöt
- Kohde (object, O) ja kuva (image, I)
- Etäisyydet: s on kohteen etäisyys optisesta järjestelmästä, s' on kuvan etäisyys
- Korkeudet: y on (mitallisen) kohteen korkeus, y' on kuvan korkeus
- Kohdepiste on P, kuvapiste on P'

Tasopeili

- Kohteena on piste P
- Kohteesta lähteneet valonsäteet heijastuvat Snellin lain mukaisesti
- Heijastuneiden säteiden suunta on sama kuin olisivat lähteneet pisteestä P'
  - = heijastuneiden säteiden jatkeiden leikkauskohta
- Pisteet P ja P' ovat yhtä kaukana peilipinnasta eli $|s| = |s'|$
- Onko kyseessä todellinen vai virtuaalinen kuva?



Merkkisäännöt heijastaville ja taittaville pinnoille

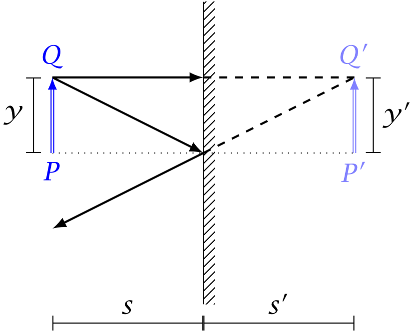
Säännöt ovat samat kuin kirjassa (huom. tässä ”valo” tarkoittaa valoa ihan oikeasti, ei esim. säteiden jatkeita!)

- Kohteen etäisyys s on positiivinen, kun kohde on samalla puolella heijastavaa tai taittavaa pintaa kuin **tuleva** valo (muuten $s < 0$)
- Kuvan etäisyys s' on positiivinen, kun kuva on samalla puolella heijastavaa tai taittavaa pintaa kuin **lähtevä** valo (muuten $s' < 0$)
- Heijastavan tai taittavan pinnan kaarevuussäde (esim. R) on positiivinen, kun pinnan kaarevuuskeskipiste (C) on samalla puolella pintaa kuin **lähtevä** valo (muuten negatiivinen)
- Kohteen ja kuvan korkeudet y, y' ovat positiiviset akselin **samalla puolella** (ks. seuraava kalvo)
- Järjestelmän **lateraalinen** (”sivuttainen”) **suurennos**

$$\boxed{m = \frac{y'}{y}}$$

Mitallisen kohteen kuva: tasopeili

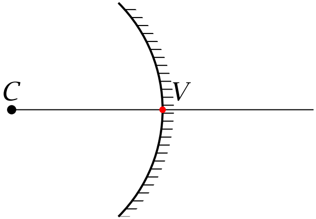
- Piirretään mitallista kohdetta kuvaamaan pystynuoli kuten kuvassa; kohteen korkeus (nuolen pituus) on $y > 0$
- Nuolen kannan kuvapiste on kannasta kohtisuorasti tasopeiliin osuvan säteen jatkeella; nuolen kärjen kuvapiste on nuolen kärjestä kohtisuorasti peiliin osuvan säteen jatkeella; muiden kohdepisteiden kuvat muodostuvat samoin

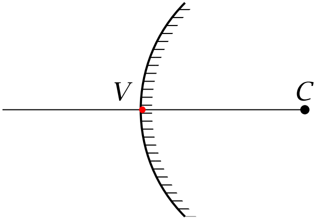


- Kuvapisteiden etäisyys tasopeilistä on sama kuin kohdepisteiden etäisyys peilistä, minkä näkee tutkimalla kahta kohdepisteestä piirrettyä valonsädettä (niiden jatkeet leikkaavat kuvapisteessä)
- Kohteen etäisyys $s > 0$ (miksi?), kuvan etäisyys $s' = -s < 0$ (miksi?)
- Kuvan korkeus $y' > 0$ ("akseli" on kuvan pisteviiva), joten $m = y'/y = +1$
- Kuva on **pysty** (erect, = samaan suuntaan kuin kohde) ja **käänteinen** (reversed, = etu–taka-suunta on kääntynyt) [jos kuva(nuoli) olisi vastakkaiseen suuntaan kuin kohde, se olisi **ylösalainen** (inverted)]

Pallopintojen nimitykset

Jos valo tulee vasemmalta,



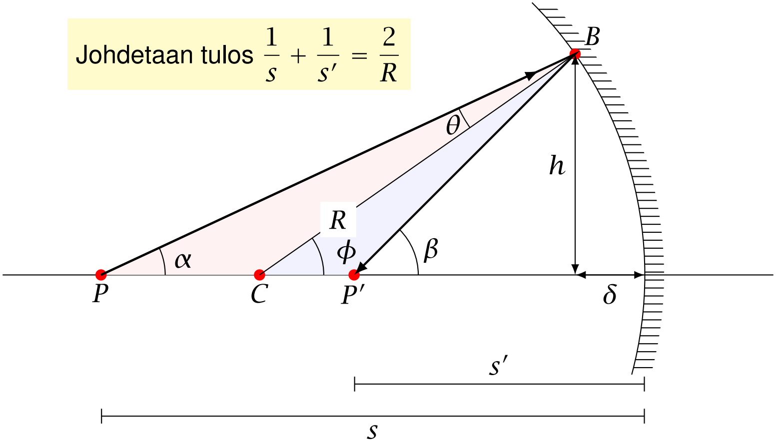


tämä on kovera peili ja $R > 0$ tämä on kupera peili ja $R < 0$

Peilin kaarevuuskeskipiste on C (siis sen pallon keskipiste, josta peili on osa); peilin keskipiste on huippupisteessä (verteksissä) V; suora CV on peilin **optinen akseli**

Geometria

Johdetaan tulos $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$



Heijastus pallopinnasta

Paraksiaalinen approksimaatio

- Kolmiot PBC ja $P'BC$:

$$\phi = \alpha + \theta \quad \text{ja} \quad \beta = \phi + \theta \qquad \Longrightarrow \qquad \alpha + \beta = 2\phi$$

- $s, s', R > 0$ (merkkisäännöt!), joten

$$\tan\alpha = \frac{h}{s-\delta}, \quad \tan\beta = \frac{h}{s'-\delta}, \quad \tan\phi = \frac{h}{R-\delta}$$

- Tällä ei ole algebrallista ratkaisua, mutta jos kulma α on pieni, muutkin kulmat ovat pieniä (kaikki radiaaneissa) ja voidaan approksimoida

$$\alpha \approx \frac{h}{s}, \quad \beta \approx \frac{h}{s'}, \quad \phi \approx \frac{h}{R}$$

- Yhdistetään tulokset:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

- Yhtälössä ei ole α-riippuvuutta $\Longrightarrow$ kaikki P:stä lähteneet säteet leikkaavat P':ssa (lähes akselin suuntaiset säteet lähellä akselia ovat **paraksiaalisia säteitä** ja yllä tehtiin **paraksiaalinen approksimaatio)**

Heijastus pallopinnasta

Polttoväli ja suurennos

- Todellisuudessa pallopeili ei heijasta kaikkia säteitä yhden pisteen kautta $\implies$ kuvausvirhe = **pallopoikkeama** (eli palloaberraatio)
- Kun piste P hyvin kaukana,
$$s' = \frac{R}{2} \stackrel{\text{def}}{=} f$$
- Yhdensuuntaiset säteet heijastuvat kulkemaan pisteen F **(polttopiste)** kautta ja polttopisteen kautta peilille kulkevat säteet heijastuvat peilin akselin suuntaisiksi (tämä pätee tarkasti parabolisille peileille)
- Polttopiste on etäisyydellä f (= **polttoväli)** peilipinnasta

$$\implies \quad \boxed{\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}}$$

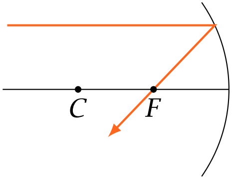
- Mitallisen kohteen kuvan suurennus (s ja s' sijoitetaan etumerkkeineen)

$$m = y'/y = -s'/s$$

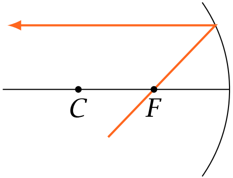
- Kuperan peilin $f = R/2 < 0$, mutta muuten sama analyysi pätee (merkit!)

Graafinen menetelmä peileille

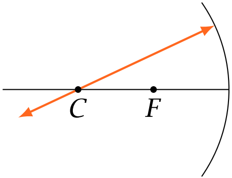
Pääakselin suuntainen säde heijastuu polttopisteen kautta



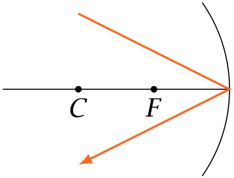
Polttopisteen kautta tuleva säde heijastuu pääakselin suuntaiseksi



Kaarevuuskeskipisteen kautta kulkeva säde palaa samaa reittiä takaisin



Huippupisteen kautta säde heijastuu optisen akselin suhteen symmetrisesti

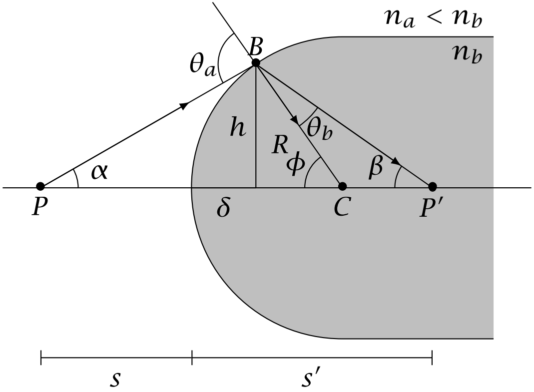


(Kaikkia 4 sädettä ei välttämättä voi/tarvitse piirtää.)

Taittuminen pallopinnalla

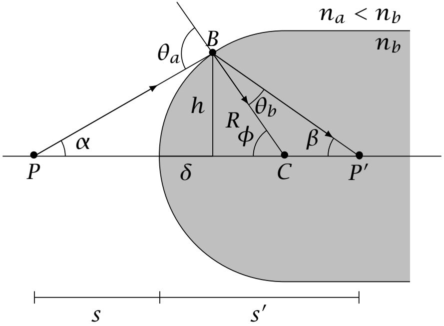
Geometria

- Kahden aineen rajapinta
  - Taitekertoimet n_a ja n_b, kaarevuussäde $R > 0$
- Väite: kaikki kohdepisteestä P pieniin α-kulmiin lähtevät säteet kulkevat saman pisteen P' kautta



Taittuminen pallopinnalla

Paraksiaalinen approksimaatio



- Geometriasta:

$$\theta_a = \alpha + \phi, \quad \phi = \beta + \theta_b$$

- Snellin laki: $n_a \sin\theta_a = n_b \sin\theta_b$
- Edelleen geometriasta:

$$\tan\alpha = \frac{h}{s+\delta}, \quad \tan\beta = \frac{h}{s'-\delta}, \quad \tan\phi = \frac{h}{R-\delta}$$

- Kulmat pieniä: $\tan\alpha \approx \sin\alpha \approx \alpha$, joten $n_a\theta_a \approx n_b\theta_b$, $\delta \approx 0$ ja

$$\alpha \approx \frac{h}{s}, \quad \beta \approx \frac{h}{s'}, \quad \phi \approx \frac{h}{R}$$

- Snellin lain approksimaatiosta ja geometriayhtälöistä saadaan

$$\theta_b = \frac{n_a}{n_b}\theta_a = \frac{n_a}{n_b}(\alpha+\phi) = \phi - \beta \quad \Longleftrightarrow \quad n_a\alpha + n_b\beta = (n_b - n_a)\phi$$

$$\Longrightarrow \quad \frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- Ei h- eikä α-riippuvuutta!

Kaksi taittavaa pintaa

- Linsseissä on kaksi taittavaa pintaa
- Linssi on ohut, kun pintojen välimatka t on merkityksettömän pieni
- Analyysiin sovelletaan kahdesti yhtälöä

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R}$$

- Etupinnan kuva on takapinnan kohde
- Linssin etupinnan etupuolella on ainetta n_a, linssin sisällä on ainetta n_b ja takapinnan takapuolella ainetta n_c:

$$\frac{n_a}{s_1} + \frac{n_b}{s_1'} = \frac{n_b - n_a}{R_1} \quad \text{ja} \quad \frac{n_b}{s_2} + \frac{n_c}{s_2'} = \frac{n_c - n_b}{R_2}$$

- Ilma–lasi–ilma-yhdistelmälle ($n_a = n_c = 1.00$ ja $n_b = n$; lisäksi $s_2 = -s_1'$ [takapinnan kohde on eri puolella pintaa kuin pintaan tuleva **valo]):**

$$\frac{1}{s_1} + \frac{n}{s_1'} = \frac{n-1}{R_1} \quad \text{ja} \quad -\frac{n}{s_1'} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1-n}{R_2}$$

Linssintekijän yhtälö

- Summataan edelliset:

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2'} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

- Vaihdetaan $s_1 = s$ ja $s_2' = s'$ ja käytetään peileistä tuttua tulosta $1/s + 1/s' = 1/f$ (jonka johtoa linsseille ei näytetty), jolloin saadaan **linssintekijän yhtälö**

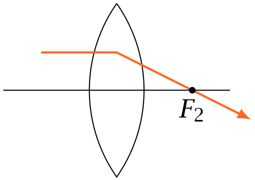
$$\boxed{\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \qquad \text{(ohut linssi)}$$

- Lateraalisuurennos on (merkit!)

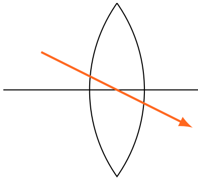
$$\boxed{m = -\frac{s'}{s}}$$

Graafinen menetelmä linsseille

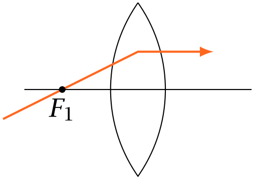
Kohdeavaruudesta tuleva pääakselin suuntainen säde taittuu polttopisteen F_2 kautta



Optisen keskipisteen kautta kulkeva säde ei taitu



Polttopisteestä F_1 tuleva säde taittuu pääakselin suuntaiseksi kuva-avaruuteen



Yhteenveto

Sekä pallopeilin että ohuen linssin tapauksessa käytetään samaa **kuvausyhtälöä**

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

ja **(lateraali)suurennosta**

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}.$$

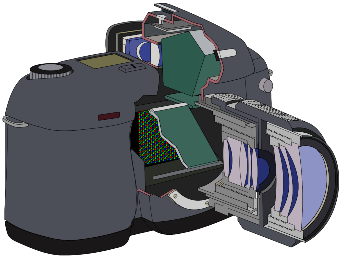
Pallopeilin polttoväli $f = R/2$. Ohuen linssin tapauksessa polttoväli saadaan linssintekijän yhtälöstä

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right).$$

Kaikissa tapauksissa pitää olla tarkkana etumerkkien kanssa. Oppikirjassa on paljon hyviä esimerkkikuvia.

Kamera

- Kameran osat ovat
  - valotiivis laatikko (lat. *camera,* kammio)
  - kokoava linssi(stö)
  - himmentimellä säädettävä (valo)aukko
  - suljin, jolla objektiivista päästetään valoa määrätyn ajan
  - valoherkkä tallennusmedia (ilmaisin; filmi tai CCD-kenno)



http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_camera

- Kun kamera on tarkennettu, linssistön ja himmentimen (yhdessä **objektiivin)** muodostama todellinen kuva ja ilmaisin osuvat samaan paikkaan $\Longrightarrow$ kuva on terävä
- Positiivisen (kokoavan) linssin tuottama kuva etääntyy linssistä, kun kohde lähestyy linssiä $\Longrightarrow$ linssin paikkaa on muutettava erietäisyyksisille kohteille (kamera on tarkennettava uudestaan)

Kameran linssin polttoväli

- Polttovälin f valinta riippuu ilmaisimen koosta ja halutusta kuvakulmasta
- Ilmaisimen koko ei ole muutettavissa (esim. ”micro four thirds” -CCD-ilmaisimen koko on $17.3\,\mathrm{mm} \times 13\,\mathrm{mm}$ ja ”kinofilmin” koko on $36\,\mathrm{mm} \times 24\,\mathrm{mm}$)
- Pitkän polttovälin linssillä (teleobjektiivi) kuvakulma on pieni, mutta linssi muodostaa suurikokoisen kuvan kaukaisesta kohteesta
- Lyhyen polttovälin linssillä (laajakulmaobjektiivi) on suuri kuvakulma, mutta kaukaisen kohteen kuva on pieni

Esim: Perinteinen kinofilmi ja $50\,\mathrm{mm}$:n ns. normaaliobjektiivi antaa vaaka- ja pystytasossa kuvakulmat 40° ja 27°.

(Oleta, että aukko on pieni, kohde äärettömän kaukana ja ilmaisin/filmi objektiivin polttopisteessä. Esitä kuvakulma sopivan arkustangentin avulla.)

Aukkoluku

- Jotta kuva tallentuisi ilmaisimelle oikein, ilmaisimelle pitää päästä sopiva määrä valoenergiaa pinta-alayksikköä kohden (= valotus)
- Valotusta säädellään sulkimella ja objektiivin himmentimellä (jonka aukon halkaisija olkoon D)
- Suljin määrää, kuinka kauan ilmaisimelle päästetään valoa
- Ilmaisimelle tuleva valointensiteetti on verrannollinen linssin kuvakulmaan ($\propto 1/f^2$) ja aukon teholliseen pinta-alaan ($\propto D^2$)
- Tietyn linssin jälkeiselle ilmaisimelle saapuu intensiteetti $\propto D^2/f^2$ (= linssin "nopeus" tai valovoima)
  - Objektiivin valovoimaa ilmaisee **f-luku** eli **aukkoluku** $\boxed{f^{\#} = f/D}$
  - f-lukua vastaavaa aukkoa merkitään "f / f-luku"
  - Aukot muodostavat (vakiintuneen) jonon $f/1.4$, $f/2$, $f/2.8$, $f/4$, $f/5.6$, $f/8$, $\ldots$
  - Jokainen askel oikealle jonossa = kerroin $1/2$ kuvakennolle tulevan valon intensiteetissä $\Longrightarrow$ sama valotus (energia) vaatii kaksinkertaisen valotusajan, esim. parit ($f/4$, $\frac{1}{500}$ s), ($f/5.6$, $\frac{1}{250}$ s) ja ($f/8$, $\frac{1}{125}$ s) vastaavat toisiaan valotuksessa (entä muuten?)

Silmä

Silmän keskeisimmät osat (vrt. kamera) ja niiden tehtävät ovat

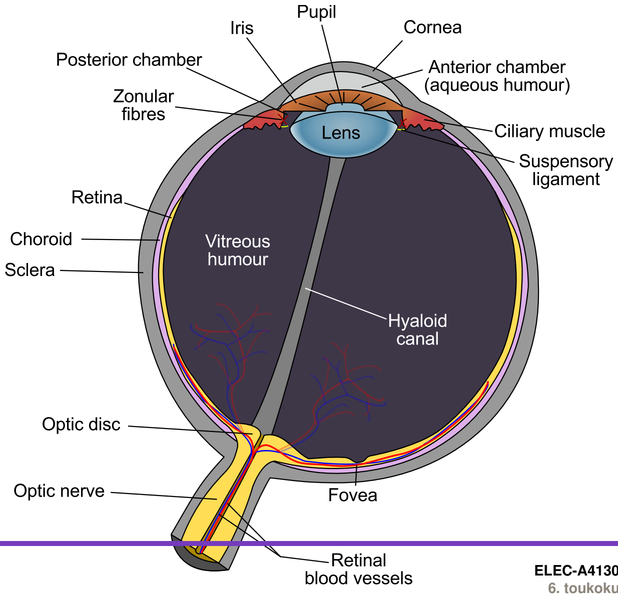
sarveiskalvo suurin osa taittovoimakkuudesta

värikalvo (iiris) valon määrän säätäminen (himmennin)

mykiö tarkentaminen (linssi)

sädelihas mykiön polttovälin muuttaminen (”mukauttajalihas”)

verkkokalvo kuva-ilmaisin (CCD-kenno)



http://en.wikipedia.org/wiki/Eye

Näkeminen

Akkommodaatio = silmän mukautuminen (tarkentuminen)

- Sädelihas kiinnittyy mykiöön ripustinsäikeillä
- Lähelle katsottaessa sädelihas supistuu ja ripustinsäikeet löystyvät, jolloin mykiö vetäytyy kokoon ja taittaa valoa voimakkaammin
- Kauas katsottaessa mukauttajalihas rentoutuu $\implies$ säikeet kiristyvät ja pakottavat mykiön litteäksi $\implies$ taittovoimakkuus vähenee

Lähipiste

- Lyhin etäisyys, jolle silmä voi tarkentaa – ”standardi-ihmisellä” $25\,\mathrm{cm}$ (lukuetäisyys)
- Etääntyy iän mukana (”ikänäkö”) $\implies$ lukulasit

Kaukopiste

- Etäisyys, jonka rentoutunut silmä tarkentaa verkkokalvolle – normaalisti ääretön
- Pitkäaikainen katselu on mukavinta, kun kohde on kaukopisteessä
- Likinäköisen kaukopiste $< \infty$

Silmän taittovirheet

Likinäköisyys Kaukana oleva kohde kuvautuu verkkokalvon eteen
- Korjataan negatiivisilla (hajottavilla) linsseillä
- Linssit muodostavat kaukaisesta kohteesta virtuaalisen kuvan likinäköisen silmän kaukopisteeseen
- Lähellä olevat kohteet nähdään silmän mukautuessa

Kaukonäköisyys Lähellä oleva kohde kuvautuu verkkokalvon taakse
- Korjataan positiivisilla (kokoavilla) linsseillä
- Linssit siirtävät lähellä olevan kohteen virtuaalisen kuvan ko. silmän lähipisteeseen, johon silmä mukautuu katsomaan
- Kaukana oleva kohde näkyy, kun mukautumista vähennetään

Hajataitteisuus Sarveiskalvon pinta ei ole pallomainen = kaarevuussäteet ovat erilaiset eri suunnissa
- Silmä esim. kuvaa vaakasuorat kohteet oikein verkkokalvolle mutta pystysuorat sen eteen
- Korjataan sylinterimäisillä linsseillä

Näkökyvyn korjaaminen

- Näkökyvyn korjaamiseen käytettävät linssit ilmaistaan yleensä niiden taittovoimakkuuden avulla
- Taittovoimakkuuden yksikkö on **diopteri** $D = 1/f$, missä polttoväli f ilmoitetaan metreissä
- Tällöin esim. 2.0 diopterin linssin polttoväli on $0.50\,\mathrm{m}$ ja -4.0 diopterin linssin $f = -0.25\,\mathrm{m}$
- Pysyvämpi näkökyvyn korjaus on sarveiskalvon leikkaaminen
- Esim. LASIK = laser-assisted in situ keratomileusis: toimenpide, jossa UV-laserilla poltetaan sarveiskalvon pinnasta pieniä alueita ja hiotaan sen kaarevuus sellaiseksi, ettei potilas tarvitse enää silmälaseja

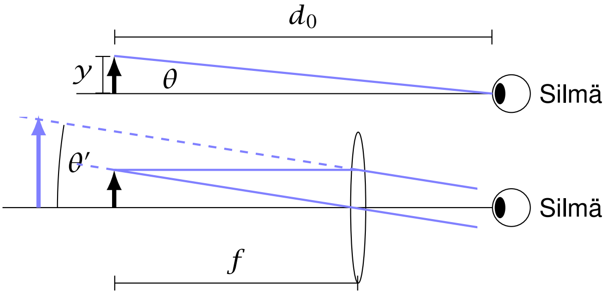
Suurennuslasi

- Kuvan näennäisen koon määrää kuvan koko verkkokalvolla
- Ilman korjausta koko riippuu kohteen ääripäiden muodostamasta kulmasta θ
  = **kulmakoko**
- Jotta kohde näyttäisi suuremmalta, se tuodaan lähemmäksi silmää kulmakoon kasvattamiseksi arvoon θ'
- Silmä ei kykene mukautumaan, jos kohde on lähempänä kuin lähipiste $\implies$ yläraja kulmakoolle
- Suurennuslasi muodostaa lähipistettä lähempänä olevasta kohteesta kuvan äärettömyyteen $\implies$ silmälle miellyttävintä
  $\implies$ Kohde asetettava suurennuslasin polttopisteeseen
- Kun kohde on kaukaisuudessa, lateraalisuurennus m on ääretön
  $\implies$ Mielekkäämpää on puhua **kulmasuurennuksesta**

$$\boxed{M = \frac{\theta'}{\theta}}$$

Suurennuslasi

Jatkoa



- Silmän lähipisteeseen $d_0 \approx 25\,\mathrm{cm}$ asetettu kohde näkyy kulmassa θ
- Suurennuslasin polttopisteeseen asetetun kohteen kuva on äärettömyydessä ja näkyy kulmassa θ'; pienillä kulmilla saadaan

$$\theta \approx \frac{y}{d_0}, \quad \theta' \approx \frac{y}{f} \qquad \Longrightarrow \qquad M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{d_0}{f} = d_0 D$$

- Kuvausvirheiden takia yhdellä linssillä maksimikulmasuurennus $\sim 4\times$

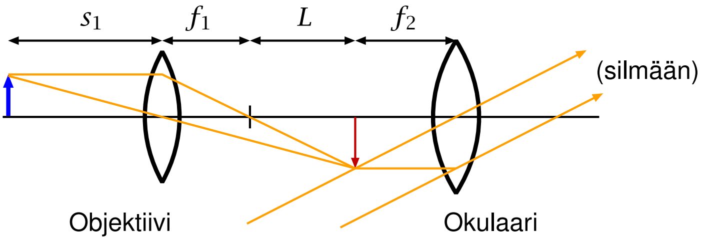
Okulaari

- Okulaari on useasta linssistä koostuva suurennuslasi
- Suurennus $10\times\ldots 20\times$
- Rakenteen takia kuvanlaatu on parempi kuin yhden linssin suurennuslasilla;

$$M = d_0 D = \frac{25\,\mathrm{cm}}{f}$$

- Okulaari on osa linssijärjestelmää: viimeinen osa ennen silmää
- Katsoo edeltävän linssijärjestelmän muodostamaa kuvaa

Mikroskooppi



- Mikroskoopilla tarkastellaan pieniä lähikohteita
- Objektiivi muodostaa kohteesta kuvan, jota tarkastellaan okulaarilla
- Kuvan mittasuhteet eivät ole kovin hyviä: Kohde on lähellä objektiivin polttopistettä, $s_1 \approx f_1$. Lisäksi $L \gg f_1$ joten $s_1' = f_1 + L \approx L$.

Mikroskoopin suurennus

- Objektiivin lateraalisuurennus

$$m_1 = -\frac{s_1'}{s_1} \approx -\frac{L}{f_1} \quad \sim 50\times,$$

missä L on ns. putken pituus. (Useilla valmistajilla $L = 160\,\mathrm{mm}$.)

- Okulaarin kulmasuurennus

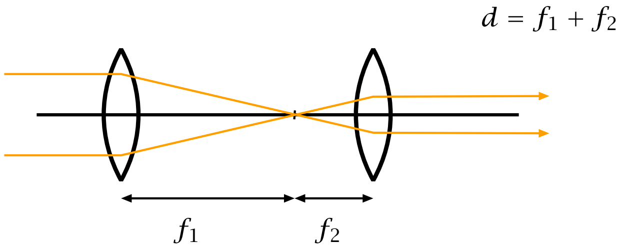
$$M_2 = \frac{250\,\mathrm{mm}}{f_2} \quad \sim 10\times$$

- Mikroskoopin kokonais(kulma)suurennus

$$M = m_1 M_2 \approx \frac{(250\,\mathrm{mm})L}{f_1 f_2} \quad \sim 500\times,$$

missä kaikki mitat annetaan millimetreinä. (Kuva on ylösalainen, mutta miinusmerkki on tapana unohtaa mikroskoopin suurennuksen yhteydessä.)

Teleskoopin toimintaperiaate



- Teleskoopilla katsellaan kaukaisia kohteita
- Objektiivi muodostaa pienennetyn kuvan, jota tarkastellaan okulaarilla
- Kuva muodostuu objektiivin polttopisteeseen
- Teleskoopissa objektiivin ja okulaarin polttopisteet ovat samassa pisteessä ja pituus $d = f_1 + f_2$
- Kulmasuurennus $M = -\dfrac{f_1}{f_2}$
- Teleskoopissa polttoväli f_1 on pitkä, joten objektiivin halkaisija D pitää olla iso, jotta saadaan kohtuullisen hyvä aukkoluku $f^{\#} = f_1/D$.

Yhteenveto luvusta 34

Keskeisiä käsitteitä

- mitallinen/pistemäinen kohde ja kuva
- todellinen ja virtuaalinen kuva
- (lateraalinen) suurennos m
- kovera ($R > 0$) ja kupera ($R < 0$) peili
- optinen akseli ja paraksiaalinen approksimaatio
- pallopoikkeama
- polttopiste F ja polttoväli f
- kokoava ($f > 0$) ja hajottava ($f < 0$) ohut linssi
- objektiivi, kuvakulma, aukkoluku $f^{\#}$
- liki- ja kaukonäköisyys, hajataitteisuus
- diopteri $D = 1/f$
- kulmakoko ja kulmasuurennus

Tärkeitä kaavoja

Kuvausyhtälö

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

Pallopeilin $f = R/2$
Linssintekijän yhtälö

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

(Lateraalinen) suurennos ja kulmasuurennus

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}, \qquad M = \frac{\theta'}{\theta}$$

Ole tarkkana merkkisääntöjen kanssa!