VRTENJE ZRCAL

NADA RAZPET

Pedagoška fakulteta
Univerza v Ljubljani

Ključne besede: ravno zrcalo, konkavno cilindrično zrcalo, konstrukcije slik, lege slik

Najprej bomo vrteli dve med seboj pravokotni zrcali, ki z vodoravno ravnino oklepata kot 45°, okrog navpične osi, nato pa bomo vrteli konkavno cilindrično zrcalo. Pokazali bomo, da se pri zasuku zrcal za kot α slika v obeh primerih zavrti za kot 2α.

ROTATION OF MIRRORS

We first consider rotation about a vertical axis of two mutually perpendicular mirrors making an angle of 45° with the horizontal plane, then we consider rotation of a concave cylindrical mirror. We show that, in both cases, rotating mirrors by an angle α produces rotation of the image by an angle 2α.

Geometrijska optika je v vseh izobraževalnih programih na koncu študijskega leta. V osnovni šoli pokažemo nekaj poskusov z ravnimi in krogelnimi zrcali ter konstruiramo nekaj slik, ki nastanejo pri preslikavah s temi zrcali. Za konstrukcijo slik uporabljamo le karakteristične žarke. Večinoma preslikujemo pokončne predmete, najraje na optično os pravokotne daljice, pravzaprav le krajišča daljic z dvema žarkoma: z žarkom, ki je vzporeden z optično osjo, in žarkom, ki gre skozi teme zrcal.

V srednji šoli geometrijsko optiko »na hitro« ponovimo. Da pojmi niso razčiščeni, se hitro pokaže pri preverjanjih znanja, pa tudi naše izkušnje s tekmovanj v znanju fizike kažejo, da se tematiki ne posveča posebne pozornosti. Še več, opuščajo se tudi osnovni poskusi, ki pa so lahko še kako zanimivi.

Ravna in krogelna zrcala so lahko dostopna in so na voljo v različnih velikostih. S cilindričnimi se v šoli ne ukvarjamo, brez težav pa jih izdelamo sami iz zrcalne folije, ki jo dobimo tudi pri nas.

Ravno zrcalo

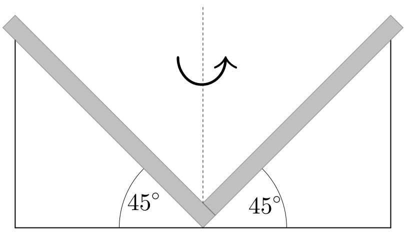
Navadno je ravno zrcalo obešeno na navpični steni. Pri poskusih pa ga postavimo pravokotno na mizo, kjer med poskusom miruje. Kaj pa se zgodi, če ravno zrcalo zasučemo? Ali je vseeno, okoli katere osi sučemo zrcalo? Kako naj bo postavljeno? Če sučemo le eno ravno zrcalo okrog osi, ki je pravokotna na ravnino zrcala, ne opazimo nič posebnega. Drugače pa je, če sučemo dve ravni zrcali, ki se stikata po eni stranici in sta med seboj pravokotni. Lahko bi bili tudi pod drugačnim kotom, recimo 30°, 45° ali 60°. To so koti, ki so delitelji polnega kota. Medsebojni kot vpliva na število slik, ki jih vidimo.

Dve med seboj pravokotni ravni zrcali

Obravnavo poskusov z dvema, med seboj pravokotnima zrcaloma, najdemo v številnih učbenikih fizike, recimo v [1]. Pogosto avtorji predstavijo tudi konstrukcije slik v poševni projekciji ali pa v tlorisu. Pri tem sta zrcali postavljeni pravokotno na podlago in pri poskusih mirujeta. Izjemoma so predstavljeni kalejdoskopi, kjer pa se hkrati z vrtenjem zrcal spreminja tudi lega predmetov.

V članku [3] je opisan poskus z dvema pravokotnima zrcaloma v škatli, ki jo vrtimo okrog vodoravne osi. Naš poskus je enostavnejši, saj ne potrebujemo škatle in lepljenja zrcal.

Dve ravni zrcali postavimo na nosilec tako, da sta med seboj pravokotni in z vodoravno ravnino – mizo – oklepata kot 45°, kot kaže slika 1.



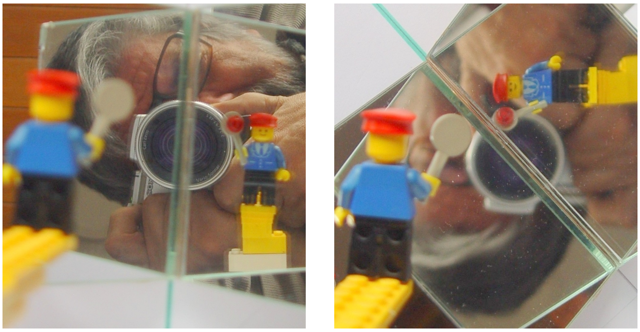
Slika 1. Dve, med seboj pravokotni ravni zrcali postavimo na vodoravno podlago, ki je vrtljiva okoli navpične osi.

Nad zrcali obesimo figuro prometnika. Na začetku poskusa je telo prometnika vzporedno z mizo in stično stranico zrcal. Zrcali vrtimo v vodoravni ravnini (x, y) okrog navpične osi z. Najprej ju zavrtimo za kot $\alpha = 45°$ (slika 2), nato pa za $\alpha = 90°$. Opazujemo sliko, ki nastane po odboju od obeh zrcal.

Kaj smo opazili? Ko zrcali zasučemo za kot α, se slika zavrti za kot 2α.

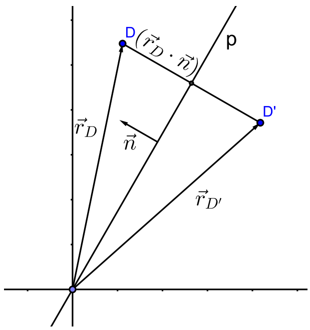
Račun za dve med seboj pravokotni zrcali

Zdaj pa izide poskusov utemeljimo še z računom. Najprej ponovimo, kako točko zrcalimo preko premice. Izberemo premico p, ki gre skozi koordinatno izhodišče. Točko D s krajevnim vektorjem $\overrightarrow{r_D}$ preslikamo preko premice p



Slika 2. Prometnik je obešen nad zrcaloma tako, da leži vodoravno in se med poskusom ne premika. Ko zrcalo zavrtimo za $45°$, se slika zavrti za $90°$. Tudi slika fotografove glave se je zavrtela, čeprav fotografira vedno z istega mesta. Opazujemo le sliko, ki nastane po odboju od obeh zrcal.

v točko D' s krajevnim vektorjem $\overrightarrow{r_{D'}}$. Enotski normalni vektor na premici p je vektor $\overrightarrow{n}$ (slika 3). Veljata zvezi:

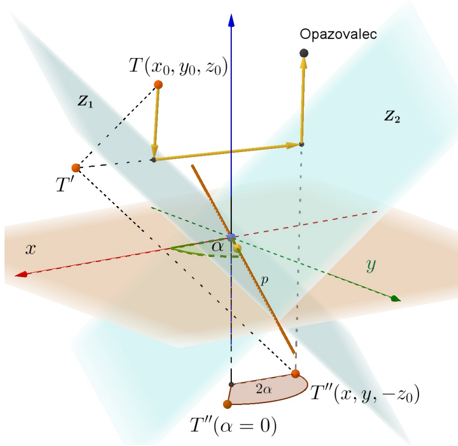


Slika 3. Preslikava točke preko premice.

$$d(DD') = 2\overrightarrow{r_D} \cdot \overrightarrow{n}\,, \qquad \overrightarrow{r_{D'}} = \overrightarrow{r_D} - 2(\overrightarrow{r_D} \cdot \overrightarrow{n})\overrightarrow{n}\,. \tag{1}$$

Pri zrcaljenju točke preko ravnine velja enaka povezava kot za preslikavo preko premice (enačba (1)), kjer je vektor $\overrightarrow{n}$ zdaj enotski normalni vektor na ravnino.

Narišimo še ustrezno skico (slika 4). Namesto celega predmeta bomo prezrcalili le eno točko in pogledali, kako se spreminja lega slike točke po odboju od obeh zrcal v odvisnosti od zasuka zrcal.



Slika 4. Če zrcali zavrtimo za kot α okrog navpične osi, se slika točke, po odboju od obeh zrcal, zavrti za kot 2α.

Normalna vektorja na ravninah Z_1 in Z_2 sta:

$$\overrightarrow{n_1}(\alpha) = \frac{\sqrt{2}}{2}(-\sin\alpha, \cos\alpha, 1), \qquad \overrightarrow{n_2}(\alpha) = \frac{\sqrt{2}}{2}(\sin\alpha, -\cos\alpha, 1),$$
$$\overrightarrow{n_2}(\alpha) = \overrightarrow{n_1}(\pi + \alpha).$$

Najprej točko T prezrcalimo preko ravnine Z_1 :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{r\prime} &= \overrightarrow{r} - 2(\overrightarrow{r} \cdot \overrightarrow{n_1})\overrightarrow{n_1}, \\ \overrightarrow{r\prime} &= (x_0, y_0, z_0) - (-x_0 \sin\alpha + y_0 \cos\alpha + z_0) \cdot (-\sin\alpha, \cos\alpha, 1). \end{aligned}$$

Krajevni vektor točke T' je

$$\overrightarrow{r\prime} = \begin{bmatrix} x_0 \cos^2\alpha + y_0 \sin\alpha\cos\alpha + z_0 \sin\alpha \\ x_0 \sin\alpha\cos\alpha + y_0 \sin^2\alpha - z_0 \cos\alpha \\ x_0 \sin\alpha - y_0 \cos\alpha \end{bmatrix}.$$

Točko T' potem prezrcalimo še preko Z_2, da dobimo točko T''. Krajevni vektor točke T'' je:

$$\overrightarrow{r\prime\prime} = \overrightarrow{r\prime} - 2(\overrightarrow{r\prime} \cdot \overrightarrow{n_2})\overrightarrow{n_2}. \tag{2}$$

Izračunamo vektor, ki kaže iz točke T' do točke T'', pri čemer upoštevamo povezavo

$$-2(\overrightarrow{r\prime} \cdot \overrightarrow{n_2})\overrightarrow{n_2} = -\begin{bmatrix} x_0 \sin^2\alpha - y_0 \sin\alpha\cos\alpha + z_0 \sin\alpha \\ -x_0 \sin\alpha\cos\alpha + y_0 \cos^2\alpha - z_0 \cos\alpha \\ x_0 \sin\alpha - y_0 \cos\alpha + z_0 \end{bmatrix}.$$

Vstavimo v enačbo (2) in upoštevamo, da velja

$$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1, \quad 2\sin\alpha\cos\alpha = \sin(2\alpha), \quad \cos^2\alpha - \sin^2\alpha = \cos(2\alpha). \tag{3}$$

Nazadnje dobimo:

$$\overrightarrow{r_{''}} = \begin{bmatrix} x_0\cos(2\alpha) + y_0\sin(2\alpha) \\ x_0\sin(2\alpha) - y_0\cos(2\alpha) \\ -z_0 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(2\alpha) & -\sin(2\alpha) & 0 \\ \sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}.$$

Kaj smo ugotovili?

V začetni legi zrcal, ko je kot $\alpha = 0$, dobimo sliko T'' točke T tako, da jo prezrcalimo preko osi x. Ko pa zrcali zasukamo za kot α, se prezrcaljena točka še zavrti okrog osi z za kot 2α.

Ker je predmet na začetku poskusa ležal vzporedno z mizo, tudi izbrana slika predmeta – slika po odboju od obeh zrcal – leži v ravnini, ki je vzporedna z mizo in od nje enako oddaljena kot predmet.

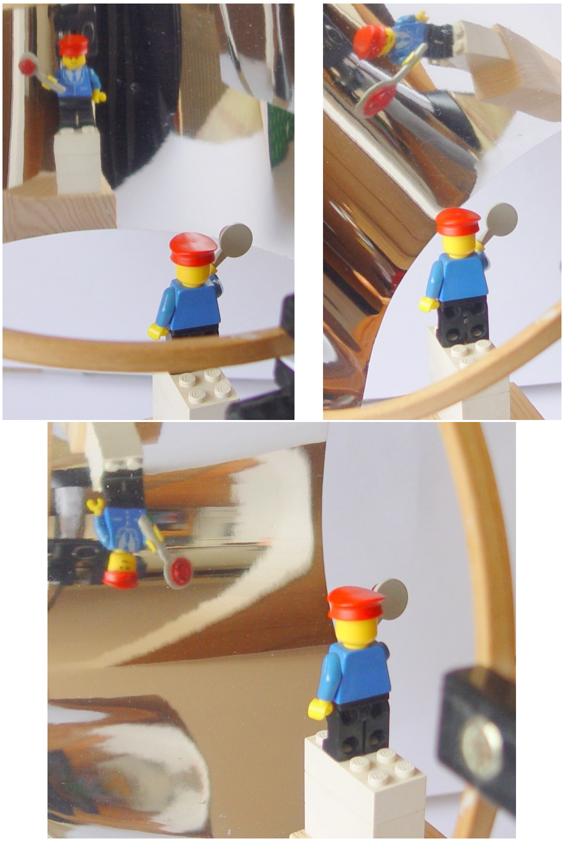
Poudarimo še to, da na sliki leva in desna roka prometnika nista zamenjani – lopar še vedno drži v desni roki, kot je to pri preslikavi z enim ravnim zrcalom.

Konkavno cilindrično zrcalo

Naredimo še poskus s konkavnim cilindričnim zrcalom. O tem lahko beremo v [2].

Konkavno cilindrično zrcalo izdelamo iz pravokotnega kosa zrcalne folije, ki ga pritrdimo na obroč. Mi smo vzeli pravokotnik z osnovnico, ki meri približno polovico obsega obroča. Obroč poteka po polovici višine pravokotnika. Zrcalna folija je torej del plašča valja, katerega os je pravokotna na ravnino obroča. Obroč vrtljivo pritrdimo na nosilec tako, da se vrti okrog vodoravne osi, ki gre skozi središče obroča. Os valja se potem vrti v navpični ravnini. Razdalja d prometnika do zrcala naj bo med r in $2r$, pri čemer je r polmer obroča, na katerem je pritrjena folija. Na začetku je obroč vodoravno, prometnik pa stoji navpično. Ravnino obroča zavrtimo najprej za $45°$, nato pa za $90°$ (slika 5).

Kaj opazimo? Opazimo, da se slika predmeta tudi zavrti. V prvem primeru leži slika prometnika vodoravno, v drugem pa je obrnjen na glavo. Opazimo še, da leva in desna stran nista zamenjani. Na sliki prometnik še vedno drži lopar v desni roki. Da je slika res realna, bomo pokazali kasneje.

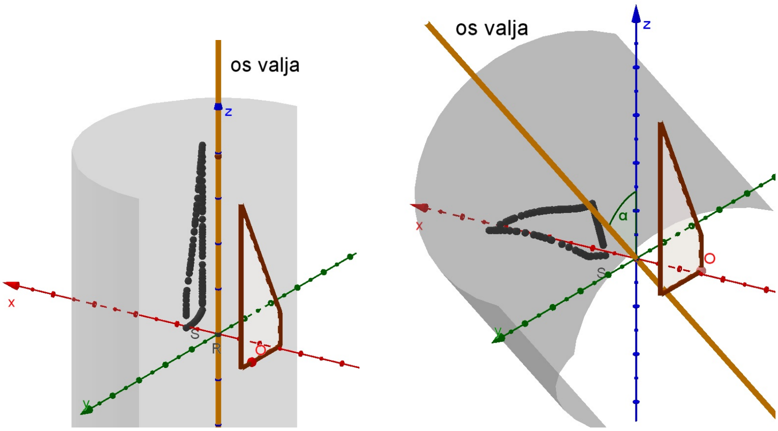


Slika 5. Predmet je pred konkavnim cilindričnim zrcalom in se med poskusom ne premika. Ko zrcalo zavrtimo za kot 45°, se slika zavrti za kot 90°, ko pa zrcalo zasukamo za kot 90°, se slika zasuka za 180°.

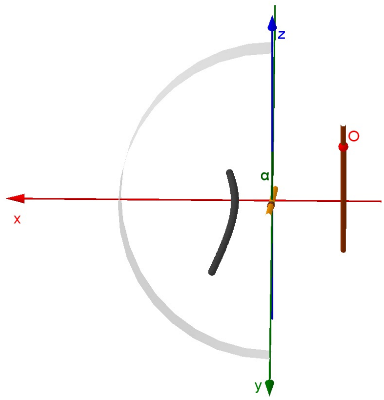
Ponazorimo si to še s skicama (slika 6 in 7), ki smo jih naredili s programom GeoGebra. Predmet je štirikotnik, ki leži v ravnini vzporedni z ravnino (y, z). Slika štirikotnika pa ni ravninski lik. Preslikani štirikotnik je »ukrivljen«, kar kaže slika 7.

Pokažimo še, da je slika realna. Poiščimo sliko točke T, katere oddaljenost od zrcala je med r in $2r$. Opazujemo žarke, ki ležijo v ravnini, ki je pravokotna na os valja. Na sliki 8 sta vpadni pravokotnici označeni črtkano. Slika točke T je točka T'. Sekata se odbita žarka, torej je slika realna. Za ozek trak konkavnega cilindričnega zrcala lahko privzamemo, da je del konkavnega krogelnega zrcala, za katerega velja:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

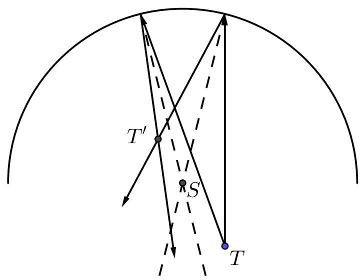


Slika 6. Leva slika kaže začetno lego predmeta – štirikotnika – in njegovo sliko. Desno: Ko zrcalo zavrtimo za kot 45°, se slika štirikotnika zavrti za kot 90°. Slika je realna.



Slika 7. Projekcija štirikotnika – daljica – in njegove slike – ukrivljena črta – na vodoravno ravnino (x, y) pri zasuku osi zrcala za 45°. Stranice slike štirikotnika so zakrivljene in ne ležijo v isti ravnini. Slika je realna.

Goriščna razdalja takega zrcala je $r/2$. Točke, ki so od temena oddaljene za $r \leq a < 2r$, se preslikajo v točke, za katere je oddaljenost od temena $2r/3 \leq b < r$. Pri računanju bomo tudi privzeli, da je oddaljenost y_0 vpadnega žarka od osi valja majhna v primerjavi s polmerom valja. Posledično to pomeni, da so vpadni koti žarkov majhni. Pri večjih vpadnih kotih bi morali upoštevati, da slika točke pri vrtenju zrcala opisuje krivuljo, ki ni ravninska (slika 7).



Slika 8. Sliko točke T dobimo s presečiščem odbitih žarkov. Vpadni pravokotnici sta označeni črtkano.

Račun za konkavno cilindrično zrcalo

Ugotovitve podkrepimo še z računom. Vrtilna os naj bo kar os x, kot vrtenja bomo označili z α, os valja, katerega del je zrcalo, pa naj leži v ravnini (y, z). Zapišimo enačbo zrcala v parametrični obliki, kjer sta u in v parametra, kot α pa kot nagiba osi valja;

$$\overrightarrow{r}(u, v) = (a\cos u, a\sin u\cos\alpha + v\sin\alpha, -a\sin u\sin\alpha + v\cos\alpha). \tag{4}$$

Pri tem je a polmer valja, parametra pa zavzemata naslednje vrednosti: $u \in [-\pi/2, \pi/2]$ in $v \in [-h, h]$. S h smo označili polovično višino valja. Brez škode za splošnost lahko privzamemo, da je polmer valja $a = 1$.

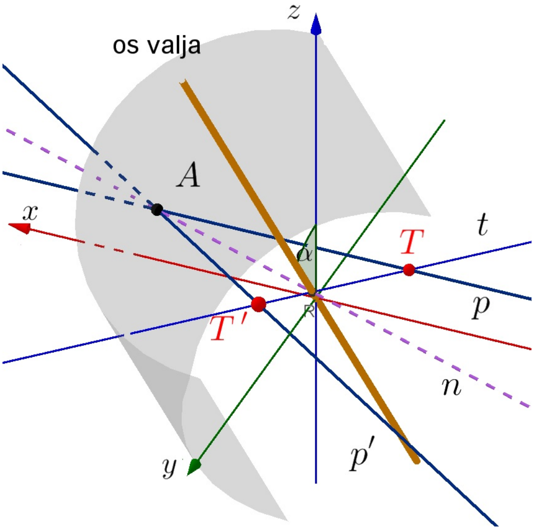
Smerni vektor na osi valja je $\overrightarrow{n} = (0, \sin\alpha, \cos\alpha)$. Preslikujemo točko $T(0, y_0, 0)$. Vpadni žarek naj bo vzporeden z osjo x in naj leži na premici p:

$$\overrightarrow{p} = (0, y_0, 0) + \lambda(1, 0, 0). \tag{5}$$

Pri tem je λ parameter. Točka $A(x_1, y_0, 0)$ je prebodišče vpadnega žarka s plaščem valja, torej leži tako na premici p, ki je vzporedna z osjo x, kot na ploskvi $\overrightarrow{r}(u, v)$, zato mora veljati:

$$\begin{aligned} \lambda &= \cos u_0, \\ y_0 &= \sin u_0\cos\alpha + v_0\sin\alpha, && (6) \\ 0 &= -\sin u_0\sin\alpha + v_0\cos\alpha. && (7) \end{aligned}$$

Vpadni žarek prebada plašč valja v točki A. Lega vpadnega žarka se pri nagibanju osi ne spreminja. Spremeni pa se lega vpadne pravokotnice, to je premice, ki gre skozi prebodišče A in je pravokotna na os valja. Vpadni žarek p, prebodišče A, vpadna pravokotnica n in odbiti žarek p' ležijo v ravnini, ki je pravokotna na os valja. Slika točke T, točka T', leži na odbitem žarku p'.



Slika 9. Uporabljene oznake v računih.

Lega odbitega žarka pa je odvisna od lege vpadne pravokotnice n, ki pa jo lahko hitro zapišemo. Omenimo še, da sliko točke T dobimo s presečiščem odbitih žarkov, v našem primeru premic p' in t, torej je slika realna [6].

Prebodišče A se pri zasuku osi za kot α *premika* po premici p. Iz enačb (6) in (7) izrazimo v_0 in $\sin u_0$. Dobimo:

$$v_0 = y_0 \sin\alpha, \tag{8}$$

$$\sin u_0 = y_0 \cos\alpha. \tag{9}$$

Potrebujemo še ploskovno normalo, ki je vpadna pravokotnica za žarek, ki leži na premici p. Najprej izračunamo iz enačbe (4) parcialna odvoda:

$$\frac{\partial \overrightarrow{r}}{\partial u} = (-\sin u, \cos u \cos\alpha, -\cos u \sin\alpha), \qquad \frac{\partial \overrightarrow{r}}{\partial v} = (0, \sin\alpha, \cos\alpha),$$

nato pa normalni vektor $\overrightarrow{n}$ dobimo z vektorskim produktom parcialnih odvodov:

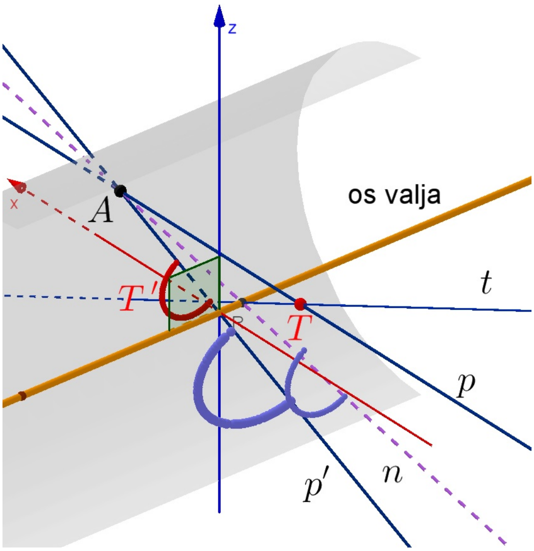
$$\overrightarrow{n} = \frac{\partial \overrightarrow{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \overrightarrow{r}}{\partial v} = (\cos u, \sin u \cos\alpha, -\sin u \sin\alpha).$$

Za normalni vektor tangentne ravnine v točki A torej velja:

$$\overrightarrow{n_1} = (\cos u_0, \sin u_0 \cos\alpha, -\sin u_0 \sin\alpha). \tag{10}$$

Vstavimo za $\sin u_0$ izraz (9) in upoštevamo, da veljajo povezave (3);

$$\overrightarrow{n_1} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - y_0^2 \cos^2 \alpha} \\ y_0 \cos^2 \alpha \\ -y_0 \cos \alpha \sin \alpha \end{bmatrix}. \tag{11}$$



Slika 10. Slika točke T je točka T'. Poljubna točka na premici p' in poljubna točka na normali se zavrtijo za $180°$ (zaporedno od zgoraj navzdol), ko os valja zasukamo za $90°$.

Zdaj pa poglejmo, kam se preslikajo nekatere točke. Ker gledamo žarke v ravninah, ki so pravokotne na os valja, izračunajmo središče krožnice, ki jo ta ravnina odreže od valja. Središče S leži na osi valja, ta pa je v ravnini (y, z). Poiskati moramo torej presečišče med osjo valja in premico, ki gre skozi točko T in je pravokotna na os valja. Teh dveh premic ni težko zapisati, saj obe ležita v isti ravnini.

$$z = y \cot \alpha, \qquad z = -(y - y_0) \tan \alpha$$

$$z = \frac{y_0 \tan \alpha}{1 + \tan^2 \alpha}, \qquad y = \frac{y_0 \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha}.$$

Presečišče teh dveh premic je točka

$$S(0, y_0 \sin^2 \alpha, y_0 \sin \alpha \cos \alpha).$$

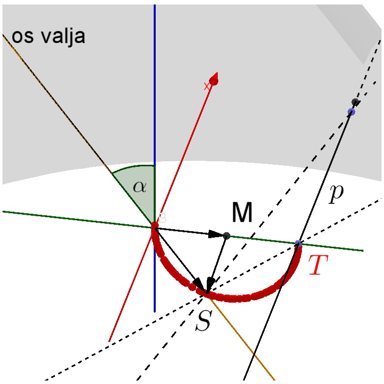
Ko je os valja navpično, je središče kroga v izhodišču ($S = O = (0, 0, 0)$) (slika 11). Ko os zasukamo za kot $90°$, preide točka S v točko $S_1 =$

$(0, y_0, 0) = T$. Vzemimo, da potuje točka S po krožnici. Središče je točka $M = (0, y_0/2, 0)$. Da zares potuje po krožnici, mora biti $\left|\overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OM}\right| = y_0/2$. Pa poglejmo:

$$\overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OM} = \left(0, y_0 \sin^2\alpha - \frac{y_0}{2}, y_0 \sin\alpha\cos\alpha\right) = \left(0, -\frac{\cos 2\alpha}{2} y_0, \frac{\sin 2\alpha}{2} y_0\right),$$

$$\left|\overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OM}\right| = \frac{|y_0|}{2}.$$

Absolutna vrednost razlike teh dveh vektorjev je konstantna, torej se točka S giblje po krožnici. Ko se os valja zavrti za kot 90°, točka S opiše polkrožnico.



Slika 11. Točka S opisuje polkrožnico, ko os valja zavrtimo za 90°.

To lahko zapišemo še drugače:

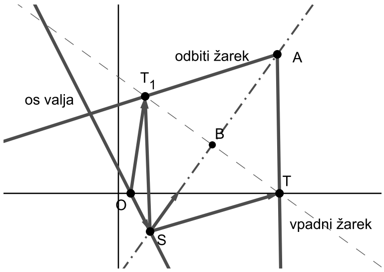
$$\overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ 0 & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{y_0}{2}.$$

Točka S se torej pri zasuku valja – zrcala – za kot α zavrti za kot 2α.

Poiščimo še enačbo premice p', na kateri leži odbiti žarek. V ta namen najprej eno točko prezrcalimo preko vpadne pravokotnice. Vzemimo kar točko $T(0, y_0, 0)$. Pomagamo si s skico 12.

Naj bo točka B pravokotna projekcija točke T na vpadno pravokotnico. Iz skice razberemo, da velja:

$$\overrightarrow{ST} = (0, y_0 \cos^2\alpha, -y_0 \sin\alpha\cos\alpha), \qquad \overrightarrow{SB} = (\overrightarrow{ST} \cdot \overrightarrow{n_1})\overrightarrow{n_1}.$$



Slika 12. Točko T prezrcalimo preko vpadne pravokotnice. Dobimo točko T_1.

Pri tem je vektor $\overrightarrow{n_1}$ enotski vektor na vpadni pravokotnici. Dobimo:

$$\overrightarrow{SB} = y_0^2 \cos^2\alpha \left(\sqrt{1 - y_0^2\cos^2\alpha},\ y_0\cos^2\alpha,\ -y_0\sin\alpha\cos\alpha \right).$$

In končno

$$\overrightarrow{ST_1} = \overrightarrow{ST} + 2\overrightarrow{TB} = 2\overrightarrow{SB} - \overrightarrow{ST}, \qquad \overrightarrow{OT_1} = \overrightarrow{OS} + \overrightarrow{ST_1},$$

$$\overrightarrow{OT_1} = \begin{bmatrix} 2y_0^2\sqrt{1 - y_0^2\cos^2\alpha}\cdot\cos^2\alpha \\ y_0\cos^2\alpha(2y_0^2\cos^2\alpha - 1) + y_0\sin^2\alpha \\ -2y_0\sin\alpha\cos\alpha(y_0^2\cos^2\alpha - 1) \end{bmatrix}.$$

Zapišimo še krajevna vektorja točke T_1 pri kotih $\alpha = 0°$ in $\alpha = 90°$:

$$\overrightarrow{r_1} = (2y_0^2\sqrt{1 - y_0^2},\ y_0(2y_0^2 - 1),\ 0), \qquad \overrightarrow{r_2} = (0, y_0, 0).$$

Točka T_1 leži na premici p', to je na odbitem žarku. Enačbe te premice ne bomo računali, je pa ni težko najti, saj sta na njej točka A, to je prebodišče, in točka T_1. Poglejmo, kakšno krivuljo opiše, ko se os valja zavrti za kot 90°. Privzemimo, da potuje po krožnici, ki ima središče v točki B. Potem mora biti

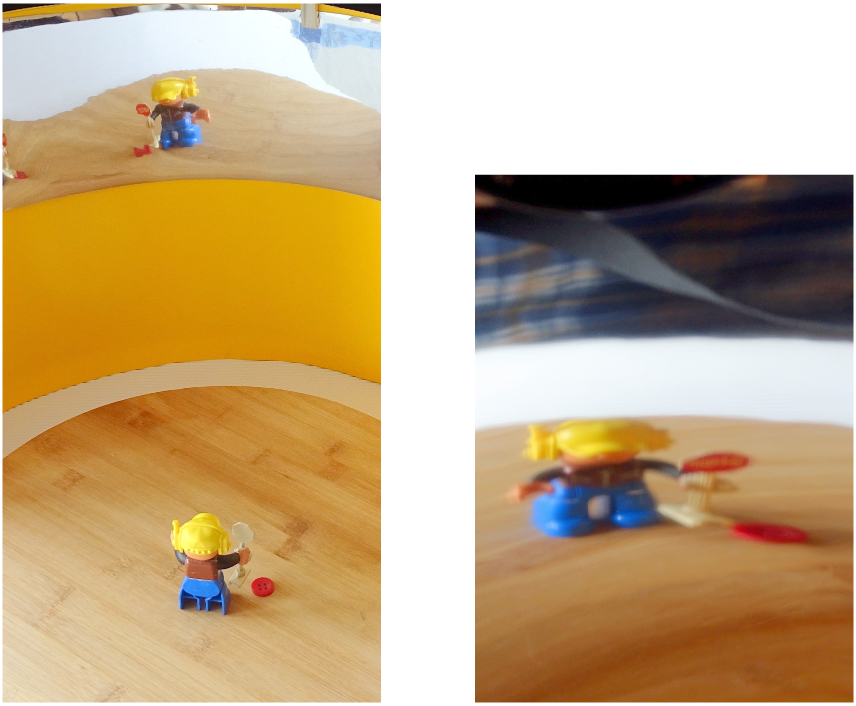
$$\left|\overrightarrow{OT_1} - \overrightarrow{OB}\right| = \left|\overrightarrow{BT}\right|.$$

Po daljšem računu pokažemo, da leva stran ni enaka desni. Lahko pa z uporabo enega od grafičnih programov hitro ugotovimo, da se krivulja pri majhnih vpadnih kotih kar dobro prilega krožnici.

Še ena zanimivost cilindričnega konkavnega zrcala

V članku [6] je napisan komentar na članek [2], kjer je opisano vrtenje opazovalčeve glave pri vrtenju konkavnega cilindričnega zrcala in narisana konstrukcija slike, ko je os valja horizontalna.

V komentarju avtor opozarja, da je treba opazovati ne le žarke, ki ležijo v ravninah, ki so pravokotne na os valja, ampak tudi tiste vpadne žarke, ki ležijo v ravninah, ki so vzporedne z osjo valja. Ti žarki namreč določajo navidezno sliko predmeta.

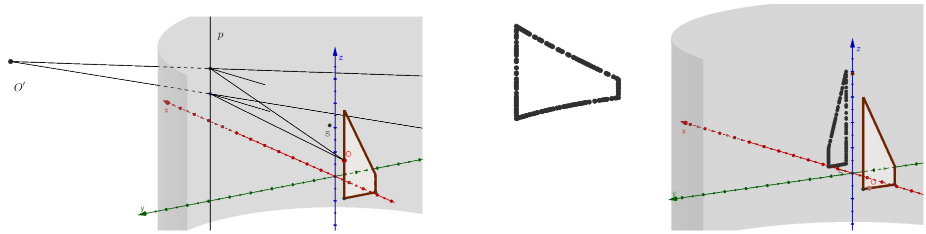


Slika 13. Levo: realna slika figure. Desno: navidezna slika figure. Figura je bila ves čas na istem mestu.

Ali res lahko vidimo obe sliki? Kažeta ju fotografiji na sliki 13. Poskus smo naredili z zrcalom, ki leži na valju s polmerom $r \approx 20$ cm. Figuro smo postavili pred središče osnovne ploskve valja. Leva fotografija kaže realno sliko – prometnik na sliki drži znak v desni roki, desna fotografija pa kaže navidezno sliko figure – prometnik na sliki drži znak v levi roki. Ta slika ni ostra in je nekoliko »raztegnjena«. Da vidimo navidezno sliko, se moramo zelo približati zrcalu. Oči morajo biti na razdalji, ki je manjša $r/2$. Med poskusoma figure nismo premikali.

Naredimo še konstrukcijo te slike. Kaže jo slika 14. Štirikotnik leži v ravnini, ki je pravokotna na os x. Njegova oddaljenost od plašča valja je med r in $2r$. Premica p je presečišče ravnine, ki je pravokotna na os y in ravnino štirikotnika ter gre skozi točko O, s plaščem valja. Na premici izberemo dve točki, narišemo vpadna žarka, poiščemo vpadni pravokotnici in odbita žarka. Presečišče podaljškov odbitih žarkov je točka O'. Ko točka O potuje po štirikotniku, točka O' riše navidezno sliko štirikotnika. Poudarimo še, da vpadni žarek, vpadna pravokotnica in odbiti žarek ležijo v isti ravnini, ki pa ni vzporedna s premico p in z osjo valja.

Pri velikem r bi lahko privzeli, da je del plašča valja raven. Tedaj bi vsi trije žarki ležali v ravnini, vzporedni z osjo valja.



Slika 14. Levo: Konstrukcija navidezne slike. Desno: Lega realne in navidezne slike štirikotnika. Navidezna slika leži za zrcalom, realna pa pred njim in za predmetom.

Poskus s konkavnim cilindričnim zrcalom, ko je slika obrnjena na glavo, kažejo predavatelji na začetku predavanj iz optike [7]. Primer narobe obrnjene glave s konkavnim cilindričnim zrcalom je opisan tudi v knjigi [4] angleškega pisatelja detektivskih zgodb R. Austina Freemana.

Take poskuse kažejo tudi v *hišah eksperimentov*, kjer obiskovalci, ki stojijo pred zrcalom, vidijo svojo obrnjeno glavo. Nismo pa našli zapisov, da bi zrcalo vrteli. Ker sta poskusa primerna za ustvarjanje optičnih iluzij, bo morda naš prispevek vzpodbudil koga, da ju bo postavil v katero od slovenskih hiš eksperimentov ali pa v hišo iluzij.

LITERATURA

[1] P. Chagnon, *Animated displays II: Multiple reflections*, *Phys. Teach.* **30** (1992), 488–492.

[2] S. Derman, *An optical puzzle that will make your head spin*, *Phys. Teach.* **19** (1981), str. 395.

[3] A. J. DeWeerd, S. E. Hill, *Reflections on Handedness*, *Phys. Teach.* **42** (2004), 275–279.

[4] R. A. Freeman, *The Apparition of Burling Court, in The Famous Cases of Dr. Thorndyke*, Hodder & Stoughton, London, 1929, 818–852.

[5] T. B. Greenslade Jr., *A Scientific Mystery*, *Phys. Teach.* **67** (2019), str. 221.

[6] T. M. Holzberlein, *How to become dizzy with Derman's optical puzzle*, *Phys. Teach.* **20** (1982), 401–402.

[7] *Real image from a concave mirror*, dostopno na `www.berkeleyphysicsdemos.net/node/723`, ogled 22. 9. 2020.