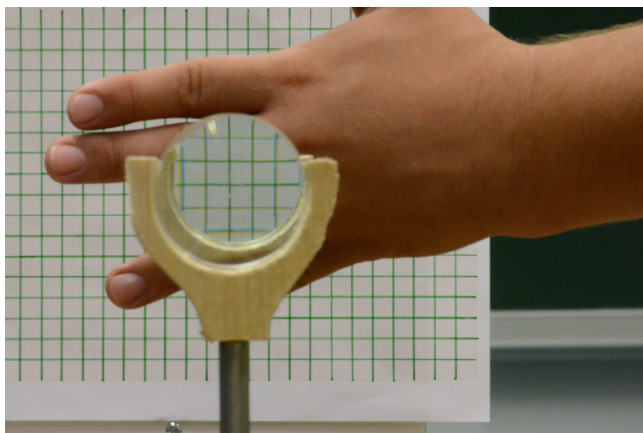


# Optična »nevidnost« z lečami

↓↓↓

ROBERT HAUKO, JAKOB MURKO, LEO STRMŠEK, JANA PADEŽNIK GOMILŠEK IN ROBERT REPNIK

→ Kako doseči optično »nevidnost«? Ali bolje rečeno: Kako optično preslikati območje iz geometrijske sence predmeta (»ozadja«) pred predmet in ustvariti iluzijo (delnega) izginotja predmeta? Fotografija na sliki 1 kaže, da je to mogoče. Za opisano »čarovnijo« lahko uporabimo leče, zrcala ali kombinacijo obojega. V spodnjih vrsticah sledi opis ustvarjanja »nevidnosti« z lomom svetlobe.

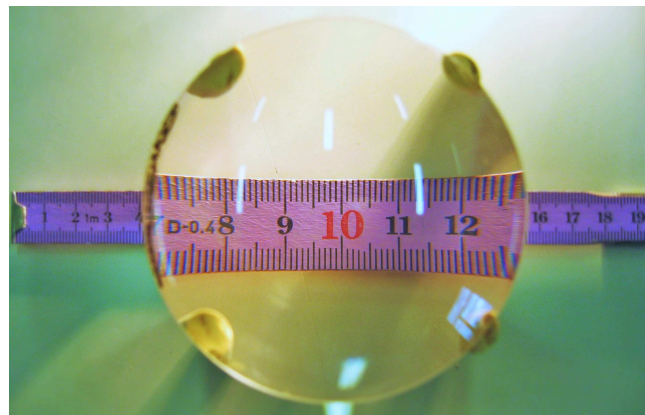


**SLIKA 1.**

Deli roke lahko postanejo »nevidni«.

Za začetek je dovolj le ena zbiralna leča. Predmet (merilni trak) postavimo med gorišče in lečo tako, da leži vzporedno z goriščno ravnino. V tem primeru deluje zbiralna leča kot lupa, nastane pokončna povečana slika merilnega traku. Na sliki 2 je prikazana fotografija traku, vendar pa - na fotografiji ne vidimo vseh enot merilnega traku. Kam so »izginile«?

Na sliki 3 je prikazana shema preslikave, pri čemer je  $f$  goriščna razdalja leče,  $a$  oddaljenost predmeta



**SLIKA 2.**

Fotografija merilnega traku - deloma skozi lupo, deloma neposredno. Na sliki ni številčnih oznak med 5 in 7 ter med 13 in 15.

od leče in  $b$  razdalja med sliko in lečo. K nastanku slike prispeva vsa svetloba, ki izhaja iz predmeta in vpade na lečo. Lego slike posamezne točke predmeta (npr. točke 1 ali 2) lahko konstruiramo z dvema žarkoma: vzporedni žarek na drugi strani leče poteka skozi desno gorišče leče, središčni žarek ne spremeni smeri. Navidezna slika je v presečišču njunih podaljškov. Tudi podaljški vseh drugih žarkov iz iste točke predmeta, ki gredo skozi lečo, se sekajo v tej točki. Dobimo pokončno povečano sliko predmeta. Ta je tem večja, čim bližje levemu gorišču je predmet.

Ko opazujemo sliko z očesom ali fotoaparatom, vidimo samo svetlobo, ki vpade na zenico ali objektiv fotoaparata. Na dani razdalji od leče jo ponazorimo z žarki iz posamezne točke predmeta, ki gredo skozi majhen del leče (npr. temnejši zeleni snop na sliki 3 za sliko točke 1). Če želimo videti preslikavo celotnega predmeta, moramo opazovati zelo blizu zelo majhne leče ali pa spreminjati lego očesa. V primeru, ko opazujemo sliko z očesom ali fotoapa-

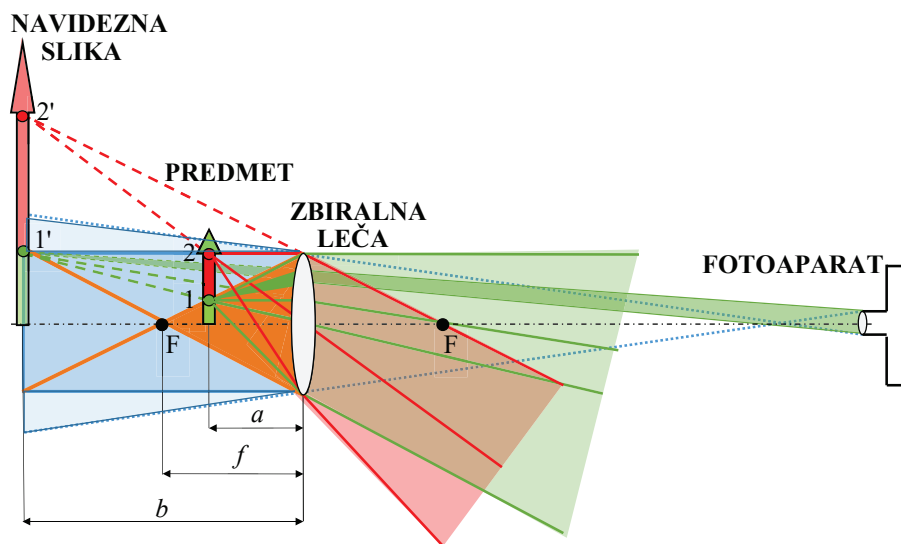
ratom na optični osi na veliki oddaljenosti od leče, vidimo samo del slike, ki leži v »geometrijski sencii« leče (modro območje). Pri takem opazovanju vidimo le svetlobo, ki je po lomu na leči skoraj vzporedna z optično osjo in vpade v oko ali na objektiv fotoaparata. V limiti neskončne oddaljenosti jo ponazorimo z žarki, ki potekajo iz točk predmeta znotraj stožca z vrhom v gorišču in osnovno ploskvijo na leči (oranžno območje), »geometrijska senca« pa dobi obliko valja (temnejše modro območje). Za opazovalca rdeči deli predmeta navidezno izginejo, opazuje lahko preslikan spodnji del predmeta ter neposredno vrhni del predmeta (mimo leče), oboje je označeno zeleno. Na fotografiji merilnega traku (slika 2) torej manjkajo dolžinske enote v območju, ki je na sliki 3 označeno z rdečim.

Iz podobnih razlogov ne opazimo slike posameznih delov predmeta tudi v primeru, ko predmet postavimo na razdaljo  $a$  od leče tako, da velja  $f < a < 2f$  (slika 4). V približku velja, da pri opazovanju na veliki oddaljenosti od leče ne vidimo točk, ki ležijo v prostoru za lečo zunaj označenih oranžnih stož-

cev. To območje imenujemo »skrito območje« in ga lahko izkoristimo za umeščanje predmetov, katerih dele želimo »narediti nevidne«.

Zdaj nam preostane še drugi del naloge - preslikava ozadja. Ko postavimo lečo pred navpično ravnino (»ozadje«) tako, da je ravnina leče z njo vzporedna, goriščna ravnina leče pa je na sredini med lečo in ozadjem, nastane na razdalji  $b$  od leče enako velika obrnjena slika ozadja. S pogojem  $a = 2f$  iz enačbe leče  $1/a + 1/b = 1/f$  izračunamo vrednost  $b = a$ , za razmerje med velikostjo slike in predmeta  $m = -b/a$  pa  $m = -1$ .

Slika 5 prikazuje potek žarkov pri preslikavi ozadja. Pri preslikavi posamezne točke ozadja sodeluje vsa svetloba, ki izhaja iz te točke in vpade na lečo. Ko z očesom ali fotoaparatom opazujemo sliko daleč stran od leče, nas iz tega snopa doseže le svetloba, ki je skoraj vzporedna z optično osjo. Za točko 1 na sliki 5 ponazorimo to svetlobo s snopom žarkov, ki so skoraj vzporedni z goriščnim žarkom in potekajo skozi spodnji rob leče (zeleno). Točka 2 je od optične osi enako oddaljena kot rob leče. Svetlobo, ki izhaja



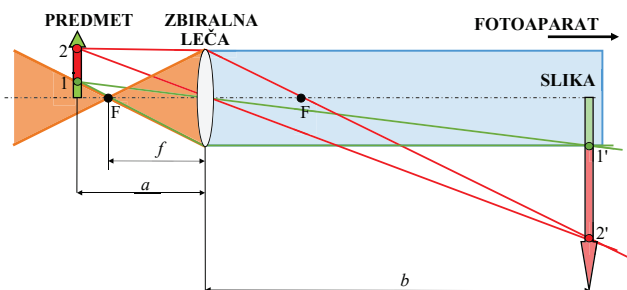
SLIKA 3.

Shema preslikave pri lupi in opazovanje slike predmeta na končni razdalji od leče. Zaradi preglednosti je predmet narisano na eni strani optične osi. Razdalja med sliko in lečo ( $b$ ) je odvisna od lege predmeta ( $a$ ) in goriščne razdalje leče ( $f$ ). Prikazani so žarki, s katerimi konstruiramo nastanek slike dveh točk predmeta (točki 1 in 2). Večina žarkov po lomu na leči ne seka objektiv fotoaparata. Vidimo lahko - skozi lečo ali neposredno mimo nje - samo zeleno obarvane dele predmeta. V limitnem primeru, ko opazujemo na neskončni razdalji od leče, vidimo preslikane samo tiste dele predmeta, ki se nahajajo znotraj oranžnega stožca.

18

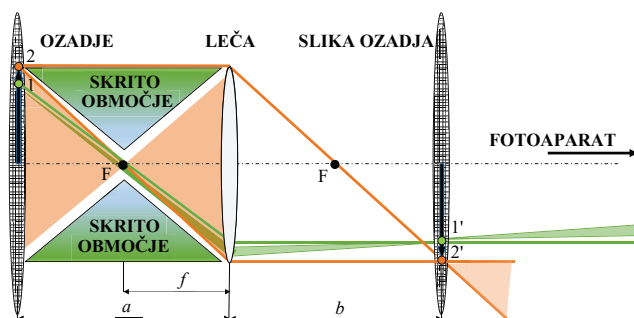
nadaljevanje  
na strani

15  
nadaljevanje  
s strani



SLIKA 4.

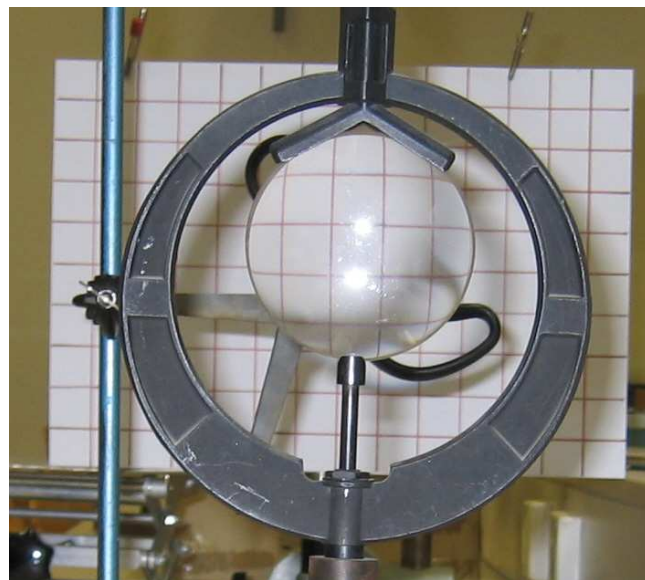
Shema preslikave za predmet na razdalji  $a$  od leče, tako da velja  $f < a < 2f$ , pri čemer je  $f$  goriščna razdalja leče in  $b$  razdalja med sliko in lečo. Tudi v tem primeru lahko pri opazovanju na optični osi daleč od leče vidimo samo del slike, ki leži v »geometrijski senci« leče. V limiti neskončne razdalje postane to območje valj (modro), vidimo lahko le preslikave točk predmeta, ki ležijo znotraj levega oranžnega stožca.



SLIKA 5.

Nastanek slike ozadja s potekom žarkov in skritim območjem za nevidni predmet. Pri opazovanju slike z očesom ali s fotoaparatom so pomembni le žarki, ki so po lomu na leči skoraj vzporedni z optično osjo (npr. zeleno obarvan snop).

iz te točke in vpade na lečo, ponazorimo s snopom žarkov, ki ga omejujeta goriščni in vzporedni žarek (oranžna črta). Ti žarki ne sekajo objektiva fotoaparata. Točka 2 leži na robu vidnega območja in jo lahko opazimo šele v limiti neskončne oddaljenosti fotoaparata od slike. Velja, da na nastanek slike vplivajo le žarki z ozadja, ki potekajo skozi oranžna svetlobna stožca z vrhom v gorišču in z osnovnima ploskvama na ozadju oziroma leči. Tako smo pokazali, da predmeti v »skritem območju« ne ovirajo nastanka slike ozadja, če jo opazujemo na op-



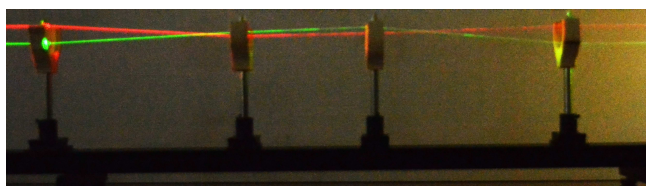
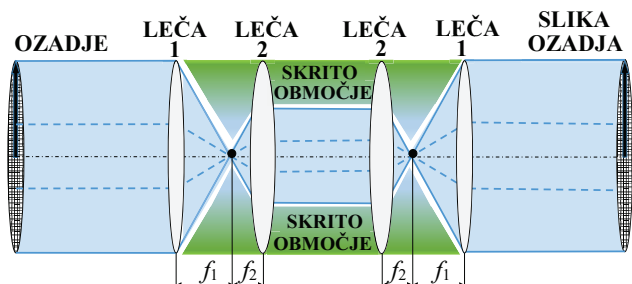
SLIKA 6.

Optično izginjanje delov predmeta z uporabo zbiralne leče. Predmete, ki jih skrivamo (škarje, del palice), postavimo v bližino goriščne ravnine leče tako, da poteka optična os leče mimo njih.

tični osi leče v veliki razdalji od leče (mного večji od goriščne razdalje leče). »Skrito območje« povečamo z uporabo leče s čim večjo goriščno razdaljo. Slika 6 prikazuje fotografiji izginjanje delov predmetov – škarij in kovinske palice. Slika ozadja je zrcaljena glede na optično os leče, vendar tega ne opazimo, saj smo izbrali ozadje, ki je na to os zrcalno simetrično.

Z uporabo večjega števila leč lahko odpravimo zrcaljenje slike ter zmanjšamo odvisnost od zornega

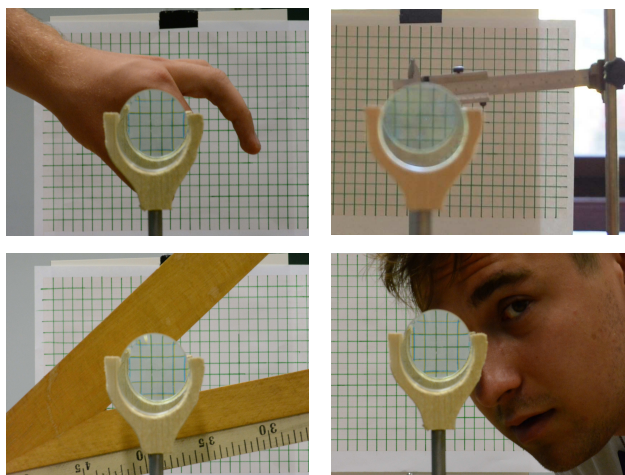




SLIKA 7.

Prikaz poteka žarkov pri uporabi sistema iz štirih zbiralnih leč. Razdalja med zunanjsima paroma leč (leči 1 in 2) je enaka vsoti njunih goriščnih razdalj, razdalja med notranjsima lečama pa je v splošnem lahko poljubna. Zgoraj je shema poteka žarkov, spodaj pa fotografija eksperimenta in dveh skrajnih žarkov. Potek žarkov je dobro viden zaradi sipanja laserske svetlobe na parafinski pari.

kota opazovanja in morebitnega odklona točke opazovanja od optične osi. Enega od možnih sistemov predstavlja simetrična postavitev dveh parov enakih zbiralnih leč [1], prikazana na sliki 7. Ideja zakrivanja ostaja ista, »skrito območje« se precej poveča, slika ozadja ni obrnjena. Snop vzporednih žarkov iz oddaljenega ozadja po lomih na prvih dveh lečah zožimo, z lomoma na drugih dveh lečah pa dobimo prvotno širino snopa z ohranjeno orientacijo.



SLIKA 8.

»Izginjanje« delov predmetov z uporabo lečja iz štirih zbiralnih leč. Opisani eksperiment je v obliki filma dostopen na spletnih straneh [2].

Na sliki 8 so prikazane fotografije »nevidnih predmetov«, pri katerih smo uporabili opisani sistem iz štirih leč.

Ste dobili ob branju tudi že lastno idejo ustvarjanja »nevidnosti«? In kako doseči »nevidnost« z odbojem svetlobe na zrcalih? O tem kdaj drugič, za motivacijo k lastnemu raziskovanju pa tokrat le povezava na enega od posnetkov na spletnih straneh [3].

## Literatura

- [1] J. S. Choi in J. C. Howell, *Paraxial ray optics cloaking*, Optics Express, 22, 29465–29478, 2014.
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=KH6W9qFwsWw>, ogled: 3. 3. 2017.
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=oJb9RnAVDuE>, ogled: 3. 3. 2017.

× × ×

[www.presek.si](http://www.presek.si)
[www.dmfa.si](http://www.dmfa.si)