

Računalniška tomografija v učilnici

Matija Milanič^{1,2}, Urban Simončič^{1,2}, Jošt Stergar^{1,2}, Gorazd Planinšič¹, Aleš Mohorič¹

¹ Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

² Institut Jožef Stefan, Ljubljana

Izvelek

Medicinsko slikanje je danes nepogrešljiv pripomoček sodobne medicine za odkrivanje in zdravljenje bolezni. Pomembna slikovna tehnika je računalniška tomografija (CT), ki omogoča vpogled v notranjost telesa in je lani praznovala 50 let. V prispevku predstavimo aktivnost, ki bo dijakom s proučevanjem razširjanja žarkov svetlobe po prostoru pomagala razumeti osnovne fizikalne zakonitosti CT-slikanja. Aktivnost je mogoče izvesti s preprosto opremo, ki je na razpolago v vsaki učilnici fizike.

Ključne besede: računalniška tomografija, svetlobni žarki, usmerjeno svetilo, točkasto svetilo, difuzno svetilo, povratna projekcija

Computed Tomography in the Classroom

Abstract

Today, medical imaging is an indispensable part of modern medicine, both for the detection and treatment of diseases. An important imaging technique is computed tomography (CT), which is used to obtain internal images of the body. Year 2021 marked the 50th anniversary of the first CT scan. This paper introduces an activity that will help students understand the basic physical principles of CT imaging by studying the propagation of light rays through space. The activity can be carried out with simple equipment, available in any physics classroom.

Keywords: computed tomography, light beams, collimated light, point light, diffuse light, back projection.

Uvod

Medicinsko slikanje se v medicini uporablja za vpogled v človeško telo pri diagnostiki, intervencijskih posegih pa tudi pri vidnem prikazu funkcije tkiv in organov na področju fiziologije ter anatomije. Vključuje množico različnih slikovnih tehnik, ki so se razvile v zadnjih sto letih, med drugim: ultrazvočno slikanje (UZ) in slikanje z magnetno resonanco (MRI), ki spadata med tehnike in ne povzročata ionizacije v tkivih; ter slikanje z rentgensko svetlobo (RTG), računalniško tomografijo (CT) in pozitronsko emisijsko tomografijo (PET), ki spadajo med tehnike, ki povzročajo ionizacijo v tkivih [1].

Računalniška tomografija (CT) je tehnika, ki za slikanje uporablja na tisoče meritev rentgenskih žarkov, prepuščenih pod različnimi koti skozi telo pacienta. Rezultat slikanja je množica dvodimenzionalnih slik prečnih prereзов telesa pacienta, s katerimi lahko ustvarimo tridimenzionalno sliko – za razliko od starejše tehnike slikanja z rentgensko svetlobo, kjer je slika projekcija telesa na fotografski film ali polje tipal. Tehnika omogoča

zdravniku neposreden vpogled v notranjost pacienta, kot je prikazano na Sliki 1. CT-slika razkriva prisotnost akutnih in kroničnih bolezni ter poškodb z izjemno na-



Slika 1: CT-slika preseka prsnega koša človeka. Vidijo se koža, mišice, rebra, hrbtenica, pljuča in srce [2].

tančnostjo. Spodnja CT-slika kaže presek prsnega koša pacienta, kjer so lepo vidne kosti (bela barva), mehka tkiva (sivi odtenki) in prazen prostor, napolnjen z zrakom (črna barva).

Vredno je izpostaviti zanimivo zgodovino razvoja CT-slikanja [3]. Centralni raziskovalni laboratorij britanskega glasbenega podjetja EMI je bil v šestdesetih letih prejšnjega stoletja gonilo razvoja stereozvoka, televizijskih oddajnikov in radarja. Podjetje EMI pa je znano po založništvu pomembnih glasbenikov, med katere spada tudi skupina The Beatles. V tistem času se je pod pokroviteljstvom britanskega ministrstva za zdravje razvoja nove slikovne naprave lotil EMI-jev elektroinženir radarske tehnike Godfrey Hounsfield, ki je 1. oktobra 1971 posnel prvo CT-sliko. Lani je tako minilo 50 let od prvega CT-slikanja. Za izdelavo CT-naprave je leta 1979 skupaj s fizikom Allanom Cormackom, ki je pripravil teoretično osnovo delovanja CT-slikanja, prejel Nobelovo nagrado za medicino.

Od prve klinične uporabe pred 50 leti je danes CT postal izpopolnjen in vsestranska slikovna tehnika, ki je za svoj razvoj potrebovala napredek na mnogih drugih področjih znanosti in tehnike [3]. Zgodnja leta razvoja CT so sovpadala npr. z izboljšano obdelavo podatkov, razvojem polprevodniških detektorjev rentgenske svetlobe, izboljšanjem sistema ležajev in integracijo polprevodniške elektronike, kar je skupaj omogočilo hitrejše in natančnejše delovanje CT-sistema. Razvoj računalnikov v tistem času je zagotovil kakovostnejše slike, kar je razširilo uporabo tehnike zunaj ozkega področja medicinskega slikanja. Področja uporabe zunaj medicine so številna in se raztezajo od slikanja zelo majhnih predmetov, kot so mušice, slikane z ločljivostjo pod 20 nm, pa do slikanja velikih vesoljskih plovil za odkrivanje strukturnih nepravilnosti pred poletom v vesolje. Večina se nas je za-

gotovo srečala s CT-slikanjem za pregledovanje prtljage na letališčih, ki ga redno uporabljajo od leta 2002.

Danes je CT-slikanje nepogrešljivo orodje v vsaki bolnišnici in diagnostični zdravstveni ustanovi. Po svetu se letno opravi okoli 300 milijonov CT-slikanj [4]. V naši največji zdravstveni ustanovi (UKC Ljubljana) pa je bilo leta 2022 opravljenih 24.258 CT-slikanj [5]. Številke kažejo zelo razširjeno uporabo CT-slikanja in s tem na velik pomen podatkov, ki jih vsebuje CT-slika, tako na področju medicinske diagnostike kot načrtovanja zdravljenja.

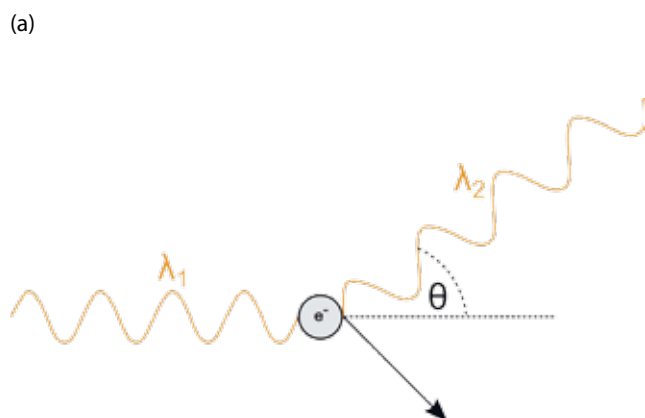
Namen tega prispevka je dijakom približati fizikalne zakonitosti CT-slikanja. Opisali bomo aktivnosti, ki bodo pomagale razumeti, kako širjenje žarkov okoli ovir na njihovi poti zagotovi potrebne podatke za ugotavljanje lokacije in oblike ovir. Dijaki bodo spoznali, da je izredno pomembno, kakšno svetilo uporabimo za osvetljevanje ovir, in da več različnih poti žarkov omogoča natančnejšo določitev oblike in lege ovir v prostoru. Oprema, ki je potrebna za izvedbo aktivnosti, je preprosta in dostopna v vsaki učilnici fizike.

Fizikalno ozadje

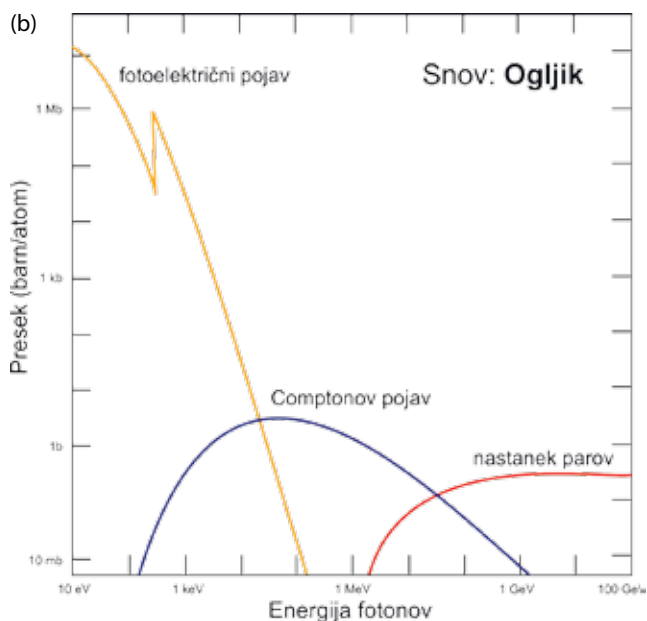
Interakcija rentgenske svetlobe s snovjo [6]

Pri prehodu skozi snov se tok rentgenske svetlobe zmanjšuje, in sicer zaradi absorpcije ter sipanja v snovi. Merjenje sprememb toka svetlobe, ki izhaja iz snovi, je osnovna fizikalna zakonitost CT-slikanja. Stranski učinek prehoda rentgenske svetlobe pa je absorpcija dela njene energije ali energije nabitih delcev, ustvarjenih z rentgensko svetlobo.

Visokoenergijski fotoni v rentgenski svetlobi interagirajo z atomi snovi na več načinov, pri čemer so glavni meha-



Slika 2: (a) Shematski prikaz Comptonovega pojava, kjer se foton z valovno dolžino λ_1 sipa na atomu. Rezultat sipanja sta nov foton z valovno dolžino λ_2 in prosti elektron e^- . (b) Interakcijski preseki za fotone različnih energij v primeru atoma ogljika pri treh vrstah interakcij fotonov s snovjo. Povzeto po [6].



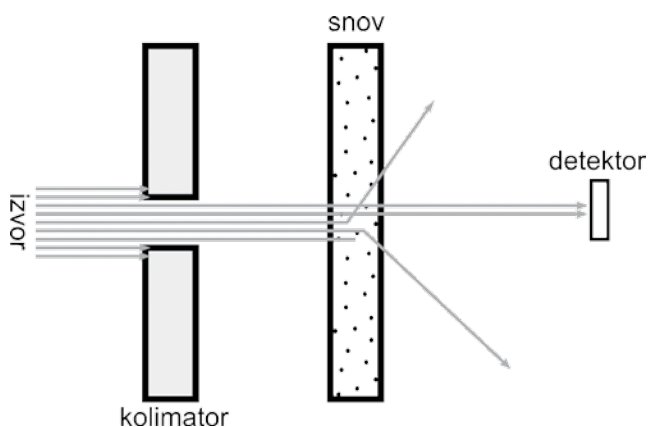
nizmi: (a) fotoelektrični pojav, ki prevladuje na področju energij med nekaj eV in nekaj 10 keV, (b) Comptonov pojav, ki prevladuje na področju med nekaj 10 keV in nekaj MeV, ter (c) tvorba parov elektron-pozitron, ki se pojavi nad 2,01 MeV. Ker se pri medicinskem CT-slikanju večinoma uporabljajo fotoni z energijo med 30 in 150 keV, je glavni mehanizem interakcije Comptonov pojav.

Pri Comptonovem pojavu oz. sipanju opazovalni sistem predstavlja mirujoči atom snovi in vpadni foton. Foton se na atomu sipa, po sipanju pa atom zapusti nov foton z nižjo energijo in atomov elektron. Pri pojavu se skupna energija sistema ohranja, kar opišemo z ohranitvenim zakonom:

$$h\nu_0 = h\nu + W_{ke} + W_i \quad (1)$$

kjer je $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$ Planckova konstanta, ν_0 in ν sta frekvenci vpadnega in sipanega fotona, W_{ke} je kinetična energija izstopnega elektrona, W_i pa je ionizacijska energija atoma. Foton po sipanju spremeni smer potovanja, tako da potuje pod kotom θ glede na prvotno smer. Shemo pojava kaže Slika 2a. Slika 2b kaže interakcijske preseke za našete interakcije fotonov pri različnih energijah za atom ogljika (C). Presek predstavlja verjetnost, da bo določen fizikalni proces potekal, ko foton na svoji poti naleti na delec snovi. Presek je izražen v enotah površine (1 barn = 10^{-28} m^2). Na nek način si presek lahko predstavljamo kot efektivno velikost atoma snovi, ki ga mora foton zadeti, da pride do procesa. S slike je razvidno, da je Comptonov pojav prevladujoč pojav za fotone pri energijah med nekaj 10 keV in 10 MeV.

Potovanje snopa vzporednih oziroma usmerjenih žarkov rentgenske svetlobe skozi snov kaže shema na Sliki 3. Nekaj fotonov prepotuje snov brez interakcij, nekaj se jih sipa in nekaj se jih absorbira zaradi fotoelektričnega pojava ali nastanka parov. Delež fotonov, ki med potjo ne interagirajo, opišemo z atenuacijo svetlobe. Atenuacijo v snovi opišemo z eksponentnim pojemanjem:



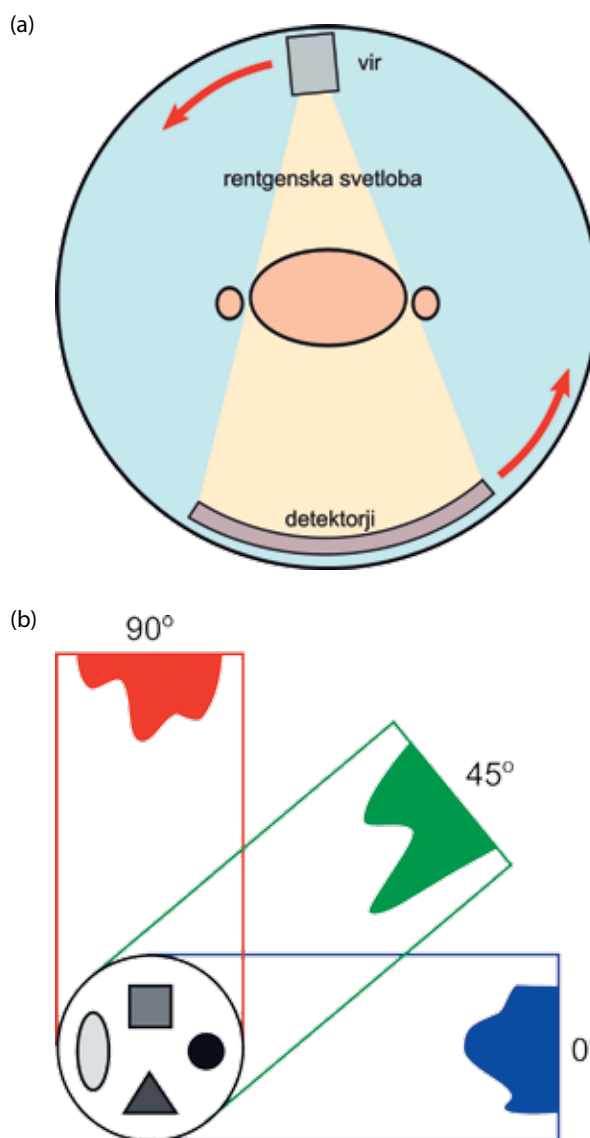
Slika 3: Shema prehoda snopa rentgenske svetlobe skozi snov, ki kaže žarke svetlobe, ki ne interagirajo s snovjo, ki se sipajo ali se absorbirajo v snovi. Detektor dosežejo predvsem žarki svetlobe, ki ne interagirajo s snovjo.

$$N(z) = N_0 \cdot e^{-\mu_a \cdot z} \quad (2)$$

kjer N_0 predstavlja število fotonov v snopu pred vstopom v snov, z debelino plasti snovi in μ_a atenuacijski koeficient, ki je odvisen od vrste snovi in je sorazmeren interakcijskemu preseku. Atenuacija rentgenske svetlobe ob prehodih skozi telo pod različnimi koti služi kot osnova za CT-slikanje.

CT-slikanje

Osnovne sestavne dele CT-naprave kaže Slika 4a. Zaslونke v viru rentgenske svetlobe usmerijo svetlobo skozi telo, svetlobo, prepuščeno pod različnimi koti, pa zazna niz detektorjev. Vir in niz detektorjev se zavrtita okoli pacienta, da se izmeri prepuščeno sevanje okrog celotnega telesa, tj. v razponu 360° . Fotoni med potjo skozi



Slika 4: (a) Shema običajne CT-naprave. Glavni sestavni deli so vir rentgenske svetlobe in niz detektorjev. Sestavni deli se zavrtijo okoli telesa (v sredini kroga), da rentgenska svetloba (pahljača) preslika telo pod vsemi koti. (b) Primer slikanja telesa pod različnimi koti. Povzeto po [3].

telo interagirajo s tkivi in delež prepuščenih fotonov je mogoče izračunati z enačbo (2). Sodobne CT-naprave izmerijo prepuščene žarke pod tisoč različnimi koti (cca. vsake $0,4^\circ$).

CT-slikanje sloni na ideji, da slikanje istega predmeta pod različnimi koti naredi različne projekcije predmeta. Slika 4b kaže primer slikanja telesa z različnimi deli in prepustnostmi pod različnimi koti, s čimer vsakič dobimo drugačno projekcijo.

Iz projekcij, posnetih pod različnimi koti, računalnik izračuna porazdelitev atenuacijskih koeficientov tkiv v preseku telesa oz. CT-sliko. Kot algoritem se klasično uporablja filtrirana povratna projekcija, ki uporablja preproste trigonometrične zveze za povezavo med geometrijo poti žarkov skozi telo in vrednostjo atenuacijskega koeficienta v izbranih točkah telesa. Dandanes se namesto povratne projekcije zaradi čedalje močnejših računalnikov vse več uporabljajo iterativne metode za rekonstrukcijo, ki so sicer računsko zahtevnejše, upoštevajo pa značilnosti CT-slikovnih sistemov, sipanja v tkivih in statističnega šuma. Slika, pridobljena z iterativnimi metodami, je manj obremenjena s statističnim šumom. To omogoča uporabo nižjih tokov rentgenske svetlobe ob enaki kakovosti CT-slik ali izboljšanje kakovosti CT-slik ob enakem toku. Druga vrsta algoritmov pa sloini na metodah strojnega učenja, ki so hitrejše od iterativnih metod, kakovost slik pa je primerljiva ali celo boljša.

Aktivnost za dijake

Aktivnost je zasnovana tako, da je primerna za dijake, ki že poznajo širjenje svetlobnih žarkov v praznem prostoru in v primeru ovir na njihovi poti. Ker ni potrebno poznavanje zapletenejših pojavov s področja geometrijske optike (npr. leče), je mogoče aktivnost izvesti tudi z dijaki nižjih letnikov, če prej usvojijo znanje o tem, kako se širijo žarki iz svetila in kako jih predmeti na njihovi poti ustavijo. Slednje je mogoče pojasniti na primer na osnovi širjenja valov po vodni gladini.

Primeren uvod v aktivnost je risanje vzporednih žarkov na list papirja. Dijaki potem opazujejo, kako ti žarki osvetlijo zaslon, ki ga narišejo pravokotno na žarke. Nato v pot žarkov vrišejo lik, npr. kvadrat ali krog, in

opazujejo, kako se slika žarkov na zaslonu spremeni. S tem osvežijo pojem sence oziroma projekcije predmeta na zaslonu, kar je pomembno za razumevanje praktičnega dela aktivnosti.

Priprava aktivnosti

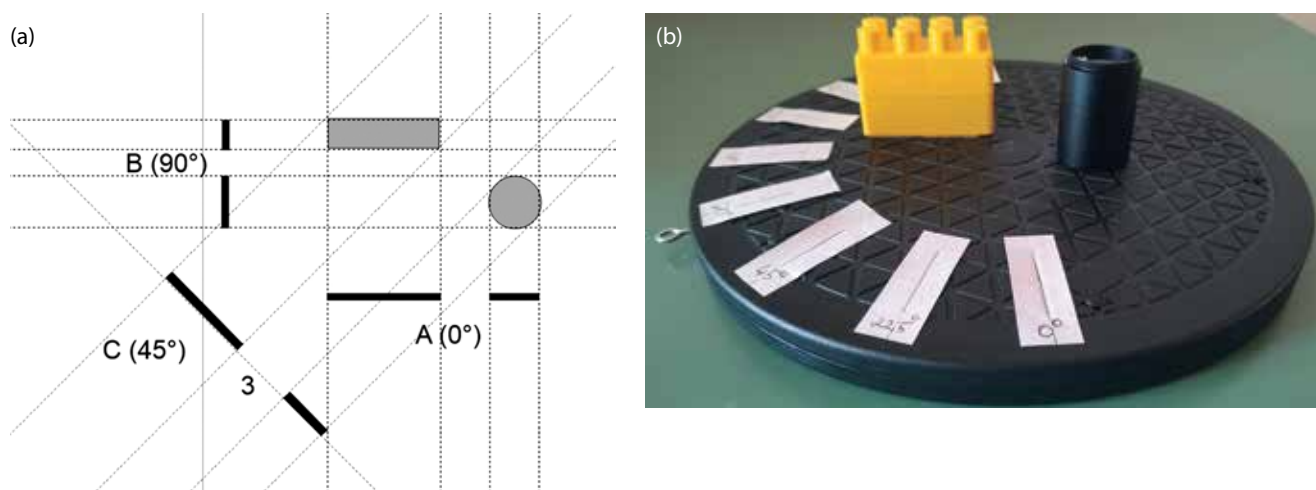
Za praktični del proučevanja CT-slikanja pripravimo preprost model CT-slikovne naprave, kjer namesto rentgenske uporabimo vidno svetlobo. Sestavni deli eksperimentalnega modela so naštetih spodaj.

- *Vrtljiv krožnik za hrano*. Na robovih krožnika označimo stopinje od 0° do 180° v izbranih korakih. V našem primeru smo izbrali korak $22,5^\circ$. Slika 5a kaže krožnik, ki smo ga uporabili.
- *Kartonasta škatla*. Kartonasta škatla je primerne velikosti, da jo lahko poveznemo čez krožnik. Na eni strani izrežemo odprtino za zaslon, na katero prilepimo list milimetrskega papirja (Slika 5b). Na drugi strani izrežemo odprtino, skozi katero bo v škatlo svetil svetlobni vir (Slika 5c). Na strani zaslona na dnu škatle izrežemo špranjo, ki omogoča vrtenje krožnika, ko je škatla povezana čezenj.
- *Svetilo*. Uporabimo tri različna svetila glede na način širjenja žarkov po prostoru. Prvo svetilo je **usmerjeno svetilo**, ki oddaja snop čim bolj vzporednih svetlobnih žarkov. V našem primeru uporabimo diaproyektor, ki ga odmaknemo na razdaljo približno 1 m od vstopne odprtine. Tako dosežemo, da so žarki, ki ustvarjajo senčno sliko, približno vzporedni. Drugo svetilo je **točkasto svetilo**. Zanj uporabimo lučko na mobilnem telefonu. Tretje svetilo je **difuzno svetilo**, ki oddaja svetlobo približno enakomerno po vsem prostoru. V našem primeru je to običajna žarnica, ki jo lahko pokrijemo s prosojno tkanino.

V našem primeru na krožnik položimo dva predmeta. Eden je kvader iz kock, drugi pa valj. Shemo postavitve in njeno fotografijo kaže Slika 6. Na shemi so prikazani tudi svetlobni žarki, ki osvetlujejo predmete pod tremi različnimi koti zasuki krožnika, kar bo pojasnjeno v nadaljevanju. Čez krožnik poveznemo škatlo, tako da je oznaka za 0° najbližje sredini zaslona (milimetrskega papirja). Dijaki ne vedo, kaj se skriva v škatli, in to skušajo ugotoviti med aktivnostjo. Zdaj skozi osvetljevalno



Slika 5: (a) Slika vrtljivega krožnika z označenimi koti zasuka na področju 0 – 180° s korakom $22,5^\circ$. (b) Slika zaslona z milimetrskim papirjem. (c) Slika odprtine za svetlobo.



Slika 6: (a) Shema postavitve kvadra (prvi predmet) in valja (drugi predmet). S črtkanimi črtami so prikazani svetlobni žarki, ki osvetlujejo predmete pod tremi različnimi koti zasuka krožnika: A – 0° , B – 90° in C – 45° . Svetlobni vir je ves čas na istem mestu, premikajo se predmeti z vrtenjem krožnika. Črne črte predstavljajo sence, ki jih ustvarijo predmeti ob zastiranju svetlobe pri izbranem kotu. (b) Fotografija predmetov na krožniku.

odprtino usmerimo svetilo in eksperiment je pripravljen za izvedbo.

Izvedba aktivnosti

Slikanje z usmerjenim virom svetlobe

V tem delu dijaki kot svetilo uporabijo usmerjen vir svetlobe. Dijaki pred začetkom razumejo, da so svetlobni žarki približno vzporedni. Na podlagi senčnih slik oz. projekcij na zaslonu, ki jih opazujejo med vrtenjem krožnika, skušajo ugotoviti, kakšne so oblike neznanih predmetov na krožniku v škatli. Svetloba najprej osvetljuje zaslon pri legi krožnika 0° (Slika 7a). Na podlagi samo te projekcije ne morejo napovedati, kakšno prostorsko obliko imajo neznani predmeti v škatli. Neznani predmeti imajo lahko različne oblike, na primer kvader, valj, n -kotna prizma, in ne morejo napovedati njihove velikosti v smeri pravokotno na zaslon. Za določitev oblike potrebujejo več podatkov, zato v naslednjem koraku krožnik zavrtijo za 90° (Slika 7b). S kombinacijo teh dveh projekcij že lahko sklepajo, da je prvi predmet podolgovate oblike, drugi pa ima enako velikost v obeh pravokotnih smereh opazovanja. Še vedno pa na podlagi samo dveh projekcij ne morejo napovedati točne oblike predmetov. Zato postopek ponovijo še pri kotu 45° (Slika 7c). Na podlagi dodatne projekcije že lahko sklepajo, da je prvi predmet res podolgovate oblike, saj se mu širina projekcije z večanjem kota zasuka zmanjšuje. Drugi

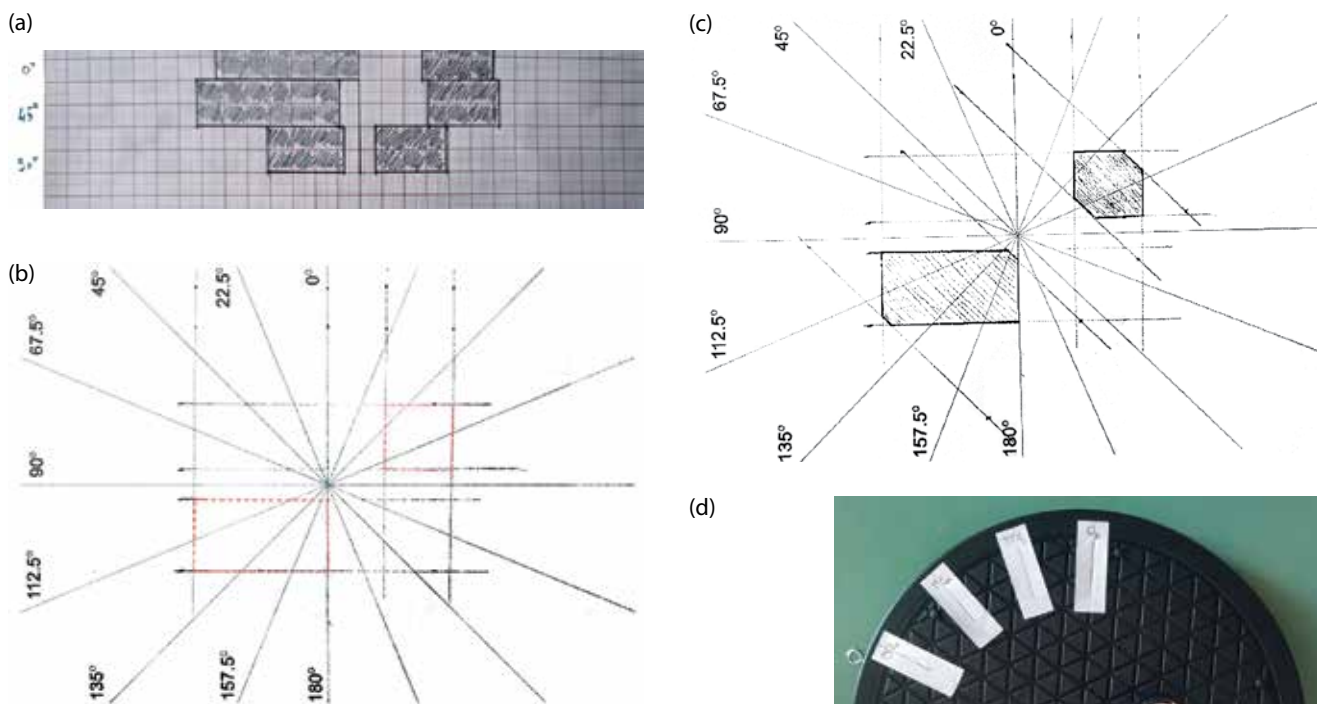
predmet pa je zelo verjetno osno simetričen, saj se širina projekcije na zaslonu s kotom zasuka ne spreminja.

Pod vodstvom učitelja dijaki na listu milimetrskega papirja narišejo tri pasove in vsakega označijo s kotom zasuka. Pri vsakem zasuku v ustrezen pas pripišejo širino in mesto senc, kot jih vidijo na zaslonu. Dobljeno sliko, ki na vodoravni osi prikazuje projekcijo v prostorski, na navpični pa različne kote opazovanja projekcij, imenujemo sinogram. Ta je ime dobil po sliki točke v prostoru, ki se ob opazovanju pod različnimi koti preslika v sinusoido. Primer sinograma je prikazan na Slika 8a. Narisali smo samo projekcije pri treh različnih kotih, pri sodobnih CT-napravah pa je teh kotov okoli tisoč in je zato tudi sinogram ustrezno kompleksnejši in s tem tudi natančnejši. Sinogram vsebuje podatke o oblikah slikanih predmetov, vendar jih ne podaja v na pogled razumljivi obliki. Zato jih je treba pretvoriti v berljivejšo obliko.

Sinogram se v lokacije in oblike neznanih predmetov pretvori s povratno projekcijo. Postopku pravimo tudi *rekonstrukcija prostorske slike*, ki jo pri pravih CT-sistemih opravi računalnik, dijaki pa jo bodo opravili ročno. Uporabijo predpripravljen list z vrisanimi opornimi črtami pod koti, ki ustrezajo pasovom sinograma. Nato oporni črti pri kotu 0° vrisujejo vzporednice, ki ustrezajo robovom projekcij v sinogramu pri istem kotu (oporna črta predstavlja sredino sinograma). Postopek ponovijo še pri kotu 90° in si ogledajo nastalo sliko (Slika 8b). V presečiščih vzporednic pri kotih 0° in 90° že lahko prepoznajo



Slika 7: Projekcije neznanih predmetov na zaslonu pri kotih zasuka (a) 0° , (b) 90° in (c) 45° .



Slika 8: (a) Sinogram neznanih predmetov pri treh različnih kotih. (b) Rekonstrukcija neznanih predmetov z uporabo informacij pri kotih 0° in 90° . S črtkanimi črtami sta prikazana lika, ki nastaneta na presečiščih vzporednic. (c) Rekonstrukcija neznanih predmetov z uporabo informacij pri vseh treh kotih. Liki, ki pri tem nastanejo, so šrafrani. (d) Tlorisni posnetek predmetov na krožniku.

oblike neznanih predmetov, ki so na Sliki 8b označeni s črtkanimi črtami. Prvi predmet je v našem primeru res podolgovat, drugi pa kvadraten. Dodajo še vzporednice pod kotom 45° , poudarijo robove presečišč ter šrafrajo notranjost nastalih likov (Slika 8c). Nastalo sliko primerjajo z resnično postavitvijo neznanih predmetov na krožniku (Slika 8d), kar naredijo tako, da umaknejo škatlo s krožnika. Postopek risanja sinograma in povratne projekcije lahko izvede učitelj, saj je lahko za dijake sprva nerazumljiv in časovno zahteven.

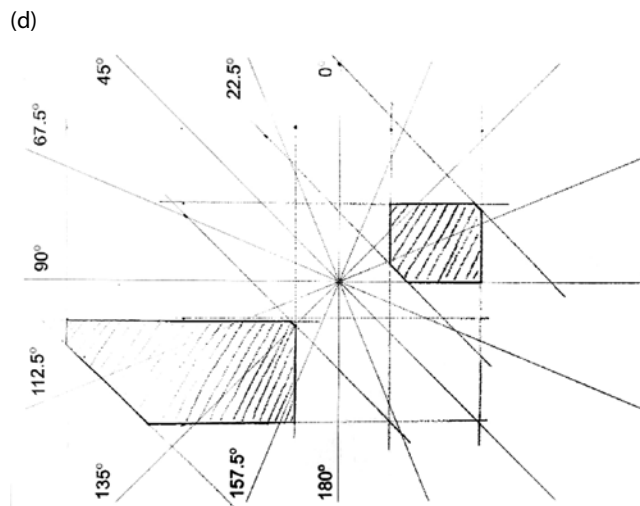
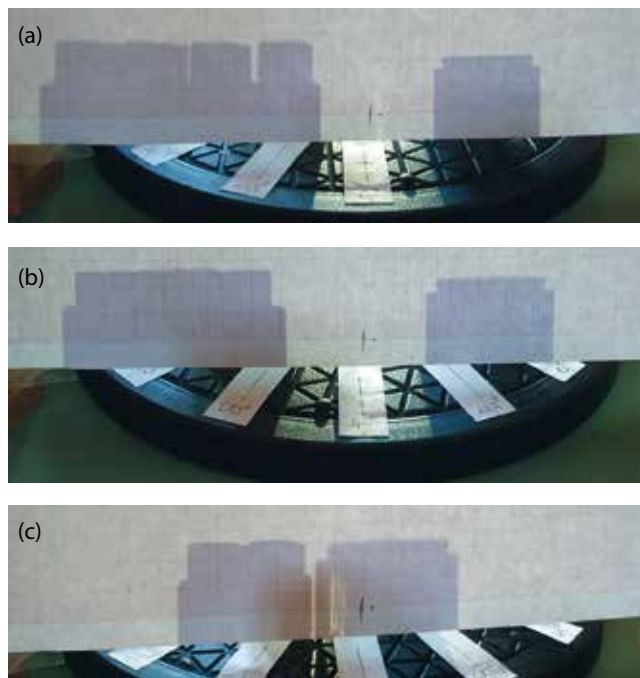
Po ogledu resnične postavitve predmetov dijaki ugotovijo, da mesta predmetov na rekonstruirani sliki ustrezajo neznanim predmetom. Prav tako so ustrezne tudi prečne in vzdolžne dimenzije predmetov, kar lahko preverijo z merjenjem dimenzij predmetov. V prikazanem primeru (Slika 8c) sta dva robova slike prvega predmeta (kvader), ki ustrežata kotu zasuka 45° , nekoliko odškrnjena. To je posledica tega, da so robovi uporabljenega kvadra nekoliko zaobljeni. Pri drugem predmetu (valj) pa sta ta robova zelo očitno odrezana, kar se sklada s tem, da valj nima ostrih robov. Dijaki na tem mestu razmislijo, kako bi lahko dobili še podrobnejšo sliko predmetov. To dosežejo z risanjem sinograma pri več kotih. V tem primeru bi oblika valja postala večkotnik, ki vse bolj posnema krog. Pri resničnih CT-sistemih z okoli tisoč koti bi se namesto večkotnika izrisal krog.

Slikanje s točkastim virom svetlobe

V naslednjem delu dijaki aktivnost ponovijo s točkastim virom svetlobe, kjer svetlobni žarki izhajajo iz svetila z majhno površino pod različnimi koti. Dijaki predlagajo, katero svetilo bi lahko ustrezalo modelu točkastega svetila. V našem primeru smo uporabili LED-svetilo mobilnega telefona, ki smo ga pritrdili na odprtino v škatli za osvetljevanje.

Projekcije pri kotih 0° , 45° in 90° kaže Slika 9. Natančnejši pregled projekcij, pri katerih dijaki preverijo širine projekcij, pokaže, da je njihova širina odvisna od kota. V primeru valja, ki ima isti premer neodvisno od kota zasuka, je širina projekcije v prikazanem primeru pri kotu 0° enaka 4 cm, pri 45° 4,5 cm in pri 90° 5,1 cm. Dijaki poskušajo pojasniti, zakaj se širine senc s kotom spreminjajo. Pri tem uporabijo poznavanje širjenja svetlobnih žarkov iz točkastega svetila. Opažene spremembe širine projekcije lahko pojasnijo s tem, da se z zasukom spreminjajo razdalje med valjem in zaslonom ter valjem in svetilom.

V prikazanem primeru je pri kotu 0° valj najbližje zaslonu, zato žarki, ki ga osvetlujejo, opravijo najkrajšo pot do zaslona (Slika 8d). Prečno razširjanje teh žarkov je zato v tem primeru najmanjše. Pri kotu 90° pa je valj najdlje od zaslona in žarki do zaslona opravijo najdaljšo pot. Zdaj je prečno razširjanje žarkov največje in s tem tudi projek-



Slika 9: Projekcije predmetov na zaslon pri kotih (a) 0° , (b) 45° in (c) 90° , ko je uporabljeno točkasto svetilo. (d) Rekonstrukcija slike iz podatkov, dobljenih s točkastim svetilom.

cija na zaslonu najširša. Enake ugotovitve sledijo tudi v primeru kvadra, le da situacija zaradi različne vzdolžne in prečne dimenzije ni tako preprosta. V primeru usmerjenega svetila (Slika 7) se dimenzija projekcije valja na zaslon s kotom ne spreminja, saj so žarki, ki osvetlujejo valj in zaslon, vzporedni. Posledično se tudi s potovanjem žarkov po prostoru razdalja med njimi ne spreminja.

Če dijaki uporabijo projekcije pri vseh treh različnih kotih in enak postopek kot v primeru usmerjenega svetila, ugotovijo, da rekonstruirana slika predmetov ne ustreza pravi postavitvi (Slika 9d). Tako ima rekonstrukcija valja v prečni smeri drugačno dimenzijo kot v vzdolžni smeri, čeprav bi morala biti ista. Rekonstrukcija kvadra pa je še manj natančna, saj je večji del levega roba odrezan. Uporabljena metoda rekonstrukcije predpostavlja, da so žarki, ki ustvarijo projekcijo na zaslonu, vzporedni, kar pa v primeru točkastega svetila ne drži. Žarki iz točkastega svetila izhajajo v obliki središčno simetrične pahljače in z oddaljevanjem od svetila se razdalja med posameznimi žarki povečuje. Zato je širina projekcije predmeta na zaslonu odvisna od mesta predmeta na krožniku in od oddaljenosti od svetila in zaslona.

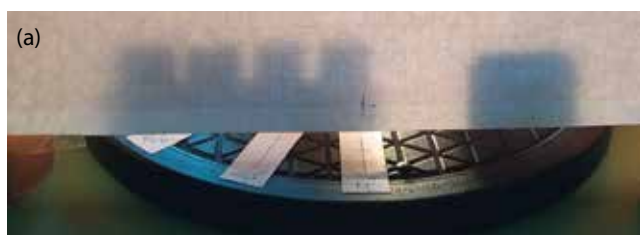
Vprašanje na tem mestu je, ali je točkasto svetilo uporabno za slikanje predmetov. Rešitev problema je na-

tančno upoštevanje geometrije osvetljevanja v postopku povratne projekcije, pri čemer je treba poznati točno lokacijo vira in pot žarkov od svetila do zaslona. Tudi v pravih CT-sistemih (Slika 4a) je za slikanje uporabljen točkast vir, iz katerega rentgenska svetloba izhaja v obliki pahljače. Pravzaprav je v tem primeru zaželen točkast vir, saj razsežna svetila vnesejo nezaželene napake v postopek rekonstrukcije (npr. nepopolna usmerjenost žarkov).

Slikanje z difuznim virom svetlobe

Na koncu dijaki ponovijo aktivnost še z difuznim oziroma mlečnim virom svetlobe. To je razsežno svetilo, iz katerega v vsaki točki izhajajo žarki pod poljubnimi koti. Dijaki razmislijo, kakšno svetilo bi ustrezalo temu modelu svetila. V našem primeru je bila uporabljena navadna namizna svetilka, prekrita s prosojno tkanino.

Slika 10 kaže projekciji pri kotih 0° in 90° , pri čemer je bilo uporabljeno difuzno svetilo. Ob primerjavi z ustreznimi projekcijami v primeru usmerjenega svetila (Slika 7) sledi, da imajo projekcije zamegljene robove. Projekcije predmetov, ki so bližje zaslonu, imajo ostrejša robove (valj na Slika 10a) kot projekcije predmetov, ki so dlje od zaslona (valj na Slika 10b). Robovi so zamegljeni zato, ker žarki osvetlujejo predmet pod različnimi koti, pri



Slika 10: Projekciji pri zasukih (a) 0° in (b) 90° ob uporabi izotropnega svetila.

čemer opravijo različno pot in zato osvetlujejo različne dele zaslona.

Na podlagi tega dela aktivnosti dijaki ugotovijo, da difuzno svetilo ni primeren svetlobni vir za CT-slikanje. Za slikanje so primerna svetila, ki na zaslonu dajo ostre robove predmetov.

Zaključek

CT-slikanje je ena izmed najpomembnejših slikovnih tehnik, ki se danes uporablja v medicini. Z njegovo pomočjo zdravniki odkrivajo vzroke in posledice različnih bolezni ter načrtujejo in spremljajo zdravljenje. Slikanje temelji na rekonstrukciji presekov skozi telo na podlagi projekcij, dobljenih z rentgensko svetlobo, ki potuje skozi telo iz veliko različnih smeri.

Namen tega članka je predstaviti aktivnost za dijake, ki sloni na istih zakonitostih kot CT-slikanje in jo je mogoče izvesti v učilnici s preprostimi pripomočki. Na podlagi rezultatov aktivnosti dijaki spoznajo osnovne značilnosti tega medicinskega slikanja. V središču so projekcije predmetov na zaslonu, ki nastanejo zaradi predmetov v svetlobnem snopu, ki osvetluje zaslon. Spoznamo, da različna svetila na zaslonu ustvarijo različne projekcije. Ugotovimo, da iz samih projekcij težko sklepamo o obliki predmetov, medtem ko uporaba preproste povratne projekcije omogoča rekonstrukcijo oblike predmetov. Pokažemo tudi, da za uspešno rekonstrukcijo lege in oblike predmetov, skritih v škatli – predmeti predstavljajo organe, škatla pa telo – potrebujemo usmerjeno svetilo, iz katerega izhajajo vzporedni žarki. Po drugi strani

je za rekonstrukcijo slike iz projekcij točkastega svetila potrebno poznavanje kotov, pod katerimi se širijo žarki iz točkastega svetila, kar ima za posledico kompleksnejši postopek rekonstrukcije. Difuzno svetilo zaradi osvetljevanja predmetov pod različnimi koti ustvari zelo zbrisane projekcije in tako ne omogoča natančne rekonstrukcije predmetov. Ugotovili smo tudi, da z večanjem števila zasukov vira svetlobe in s tem ustreznih projekcij na zaslonu dobimo tudi več podatkov o slikanih predmetih. Vsaka dodatna projekcija tako doda podrobnosti v rekonstruirano sliko.

Predmeti, ki so bili uporabljeni pri aktivnosti, so bili za svetlobo popolnoma neprepustni in bi ustrezali CT-slikanju predmetov z zelo velikim absorpcijskim koeficientom. Mogoča nadgradnja aktivnosti, ki bi jo še bolj približala medicinskemu CT-slikanju, bi bila uporaba predmetov, ki so delno prepustni za svetlobo, npr. obarvano steklo ali posoda z obarvano tekočino. V tem primeru bi bil postopek rekonstrukcije slike nekoliko zapletenejši, saj bi morali izmeriti količino prepuščene svetlobe in upoštevati eksponentni zakon oslabitve vpadne svetlobe (enačba 2). Več o tovrstni rekonstrukciji lahko preberete v [7] in [8].

Članek je nastal na podlagi aktivnosti, ki so jo izvedli učitelji fizike pri stalnem strokovnem izpopolnjevanju na Fakulteti za matematiko in fiziko 17. decembra 2021 [9]. Aktivnost je bila na podlagi odzivov sodelujočih izboljšana tako, da bolje naslavlja ustreznost podajanja novih znanj dijakom. Vabimo vse, ki jo boste preizkusili z dijaki, da nam sporočite svoje izkušnje in odzive dijakov.

Viri in literatura

- [1] Franklin K. (2019). Introduction to biological physics for the health and life sciences. Second edition. (ur.) Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- [2] CT scan. Wikipedia 2022. Dostop: 31. 3. 2022, <https://en.wikipedia.org/wiki/CT_scan>
- [3] Boone J, McCollough C. Computed tomography turns 50. Phys Today 2021; 74(9):34–40.
- [4] Schockel L, Jost G, Seidensticker P, Lengsfeld P, Palkowitsch P, Pietsch H. Developments in X-Ray Contrast Media and the Potential Impact on Computed Tomography. Invest Radiol 2020; 55(9):592–597.
- [5] Letno poročilo 2020. Univerzitetni klinični center Ljubljana 2021. Dostop: 31. 3. 2022, <https://www.kclj.si/dokumenti/UKCL_POSLOVNO_POROCILO_2020_za_intranet.pdf>
- [6] Hobbie RK, Roth BJ. Intermediate Physics for Medicine and Biology. 5th ed. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015.
- [7] Fagerstrom JM. Computed tomography, sinograms, and image reconstruction in the classroom. Physics Education 2020; 55:034001.
- [8] Mylott E., Klepetka R., Dunlap JC., Widenhorn R. An easily assembled laboratory exercise in computed tomography. Eur J Phys 2011; 32(5):1227–1235.
- [9] Milanič M., Simončič U., Stergar J., Planinšič G., Mohorič A. Računalniška tomografija – CT. Fakulteta za matematiko in fiziko 2021. Dostop: 31. 3. 2022, <<http://sss.fmf.uni-lj.si/index.php?mode=4&id=435>>