

2021 < ŠTEVILKA 4 < LETNIK XXIV < ISSN 1318-1882

04 UPORABNA INFORMATIKA

U P O R A B N A I N F O R M A T I K A

2021 ŠTEVILKA 4 OKT/NOV/DEC LETNIK XXIX ISSN 1318-1882

Znanstveni prispevki

Uroš Šmajdek, Žiga Lesar, Ciril Bohak, Matija Marolt
Hibridna difuzijska metoda za globalno osvetlitev volumetričnih podatkov 183

Pregledni znanstveni prispevki

Jurij Mihelič, Mojca Ferle
Računalniška emulacija kot strategija digitalnega ohranjanja računalniških sistemov in programske opreme 196

Kratki znanstveni prispevki

Dejan Štepec, Danijel Skočaj
Nenadzorovana detekcija rakavih regij v histoloških slikah s pomočjo preslikav slika-v-slika 208

Peter Rot, Peter Peer, Vitomir Štruc
Detekcija manipulacij za ohranjanje zasebnosti mehkih atributov na slikah obraza 214

Informacije

Iz slovarja 220

Ustanovitelj in izdajatelj

Slovensko društvo INFORMATIKA
Litostrojska cesta 54, 1000 Ljubljana

Predstavniki

Niko Schlamberger

Odgovorni urednik

Saša Divjak

Uredniški odbor

Andrej Kovačič, Evelin Krmac, Ivan Rozman, Jan Mendling, Jan von Knop, John Taylor, Jurij Jaklič, Lili Nemeč Zlatolas, Marko Hölbl, Mirjana Kljajić Borštnar, Mirko Vintar, Pedro Simões Coelho, Saša Divjak, Sjaak Brinkkemper, Slavko Žitnik, Tatjana Welzer Družovec, Vesna Bosilj-Vukšič, Vida Groznik, Vladislav Rajkovič

Recenzentski odbor

Alenka Kavčič, Aleksander Sadikov, Aljaž Košmerlj, Andrej Brodnik, Andrej Kovačič, Bor Plestenjak, Borut Batagelj, Borut Werber, Borut Žalik, Boštjan Žvanut, Božidar Potočnik, Branko Kavšek, Branko Šter, Ciril Bohak, Danijel Skočaj, David Jelenc, Dejan Georgiev, Dejan Lavbič, Denis Trček, Dobravec Tomaž, Domen Mongus, Eva Krhač, Evelin Krmac, Franc Solina, Gregor Weiss, Igor Kononenko, Inna Novalija, Irena Nančovska Šerbec, Ivan Gerlič, Janez Demšar, Jurij Jaklič, Jurij Mihelič, Katarina Puc, Lovro Šubelj, Luka Pavlič, Luka Čehovin, Marina Trkman, Marjan Heričko, Marjan Krisper, Marko Bajec, Marko Hölbl, Marko Robnik Šikonja, Martin Vodopivec, Matevž Pesek, Matija Marolt, Matjaž Divjak, Mihaela Triglav Čekada, Mirjana Kljajić Borštnar, Mojca Indihar Štemberger, Monika Klun, Niko Schlamberger, Patricio Bulić, Peter Trkman, Polona Rus, Sandi Gec, Saša Divjak, Slavko Žitnik, Tomaž Erjavec, Uroš Godnov, Uroš Rajkovič, Vida Groznik, Vladislav Rajkovič, Vlado Stankovski, Živa Rant

Tehnični urednik

Slavko Žitnik

Lektoriranje angleških izvlečkov

Marvelingua (angl.)

Oblikovanje

KOFEIN DIZAJN, d. o. o.

Prelom in tisk

Boex DTP, d. o. o., Ljubljana

Naklada

200 izvodov

Naslov uredništva

Slovensko društvo INFORMATIKA
Uredništvo revije Uporabna informatika
Litostrojska cesta 54, 1000 Ljubljana
www.uporabna-informatika.si

Revija izhaja četrtletno. Cena posamezne številke je 20,00 EUR. Letna naročnina za podjetja 85,00 EUR, za vsak nadaljnji izvod 60,00 EUR, za posameznike 35,00 EUR, za študente in seniorje 15,00 EUR. V ceno je vključen DDV.

Revija Uporabna informatika je od številke 4/VII vključena v mednarodno bazo INSPEC.

Revija Uporabna informatika je pod zaporedno številko 666 vpisana v razvid medijev, ki ga vodi Ministrstvo za kulturo RS.

Revija Uporabna informatika je vključena v Digitalno knjižnico Slovenije (dLib.si).

© Slovensko društvo INFORMATIKA

Vabilo avtorjem

V reviji Uporabna informatika objavljamo kakovostne izvirne članke domačih in tujih avtorjev z najširšega področja informatike v poslovanju podjetij, javni upravi in zasebnem življenju na znanstveni, strokovni in informativni ravni; še posebno spodbujamo objavo interdisciplinarnih člankov. Zato vabimo avtorje, da prispevke, ki ustrezajo omenjenim usmeritvam, pošljejo uredništvu revije po elektronski pošti na naslov ui@drustvo-informatika.si.

Avtorje prosimo, da pri pripravi prispevka upoštevajo navodila, objavljena v nadaljevanju ter na naslovu <http://www.uporabna-informatika.si>.

Za kakovost prispevkov skrbi mednarodni uredniški odbor. Članki so anonimno recenzirani, o objavi pa na podlagi recenzij samostojno odloča uredniški odbor. Recenzenti lahko zahtevajo, da avtorji besedilo spremenijo v skladu s priporočili in da popravljeni članek ponovno prejmejo v pregled. Uredništvo pa lahko še pred recenzijo zavrne objavo prispevka, če njegova vsebina ne ustreza vsebinski usmeritvi revije ali če članek ne ustreza kriterijem za objavo v reviji.

Pred objavo članka mora avtor podpisati izjavo o avtorstvu, s katero potrjuje originalnost članka in dovoljuje prenos materialnih avtorskih pravic. Nenaročeni prispevkov ne vračamo in ne honoriramo. Avtorji prejmejo enoletno naročnino na revijo Uporabna informatika, ki vključuje avtorski izvod revije in še nadaljnje tri zaporedne številke.

S svojim prispevkom v reviji Uporabna informatika boste prispevali k širjenju znanja na področju informatike. Želimo si čim več prispevkov z raznoliko in zanimivo tematiko in se jih že vnaprej veselimo.

Uredništvo revije

Navodila avtorjem člankov

Članke objavljamo praviloma v slovenščini, članke tujih avtorjev pa v angleščini. Besedilo naj bo jezikovno skrbno pripravljeno. Priporočamo zmernost pri uporabi tujk in – kjer je mogoče – njihovo zamenjavo s slovenskimi izrazi. V pomoč pri iskanju slovenskih ustreznih priporočamo uporabo spletnega terminološkega slovarja Slovenskega društva Informatika Islovar (www.islovar.org).

Znanstveni članek naj obsega največ 40.000 znakov, strokovni članki do 30.000 znakov, obvestila in poročila pa do 8.000 znakov.

Članek naj bo praviloma predložen v urejevalniku besedil Word (*.doc ali *.docx) v enojnem razmaku, brez posebnih znakov ali poudarjenih črk. Za ločilom na koncu stavka napravite samo en prazen prostor, pri odstavkih ne uporabljajte zamika.

Naslovu članka naj sledi za vsakega avtorja polno ime, ustanova, v kateri je zaposlen, naslov in elektronski naslov. Sledi naj povzetek v slovenščini v obsegu 8 do 10 vrstic in seznam od 5 do 8 ključnih besed, ki najbolje opredeljujejo vsebinski okvir članka. Pred povzetkom v angleščini naj bo še angleški prevod naslova, prav tako pa naj bodo dodane ključne besede v angleščini. Obratno velja v primeru predložitve članka v angleščini. Razdelki naj bodo naslovljeni in oštevilčeni z arabskimi številkami.

Slike in tabele vključite v besedilo. Opremite jih z naslovom in oštevilčite z arabskimi številkami. Vsako sliko in tabelo razložite tudi v besedilu članka. Če v članku uporabljate slike ali tabele drugih avtorjev, navedite vir pod sliko oz. tabelo. Revijo tiskamo v črno-beli tehniki, zato barvne slike ali fotografije kot original niso primerne. Slik zaslonov ne objavljamo, razen če so nujno potrebne za razumevanje besedila. Slike, grafikoni, organizacijske sheme ipd. naj imajo belo podlago. Enačbe oštevilčite v oklepajih desno od enačbe.

V besedilu se sklicujte na navedeno literaturo skladno s pravili sistema APA navajanja bibliografskih referenc, najpogosteje torej v obliki (Novak & Kovač, 2008, str. 235). Na koncu članka navedite samo v članku uporabljeno literaturo in vire v enotnem seznamu po abecednem redu avtorjev, prav tako v skladu s pravili APA. Več o sistemu APA, katerega uporabo omogoča tudi urejevalnik besedil Word 2007, najdete na strani <http://owl.english.purdue.edu/owl/resource/560/01/>.

Članku dodajte kratek življenjepis vsakega avtorja v obsegu do 8 vrstic, v katerem poudarite predvsem strokovne dosežke.

▣ Hibridna difuzijska metoda za globalno osvetlitev volumetričnih podatkov

Uroš Šmajdek¹, Žiga Lesar¹, Ciril Bohak^{2,1}, Matija Marolt¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Računalništvo in Informatiko, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, Slovenija ²King Abdullah University of Science and Technology, Visual Computing Center, Thuwal, Saudi Arabia us6796@student.uni-lj.si, {ziga.lesar, ciril.bohak, matija.marolt}@fri.uni-lj.si

Izvleček

V članku predstavljamo hibridno difuzijsko metodo za interaktivno osvetljevanje in upodabljanje volumetričnih podatkov. Metoda temelji na konvekcijo-difuzijskem modelu, ki neposredno osvetlitev opisuje s konvekcijem, sipanje pa z difuzijskim procesom. V naši metodi smo konvekcijo nadomestili s sledenjem poti. Metodo smo performančno in kvalitativno ovrednotili in primerjali s konvekcijo-difuzijsko metodo, sledenjem poti z enkratnim sipanjem in s sledenjem poti z večkratnim sipanjem. Rezultati kažejo na primerljivo kvaliteto končnih slik, pridobljenih s hibridno metodo, glede na konvekcijo-difuzijsko metodo, poleg tega pa naš pristop prinaša mnoge prednosti, predvsem nepristranskost, neodvisnost od števila luči in zmanjšano porabo pomnilnika.

Ključne besede: Difuzija, globalna osvetlitev, volumetrični podatki.

Abstract

In this paper, we present a hybrid diffusion method for the interactive illumination and rendering of volumetric data. The method is based on the convection-diffusion model, which describes the direct illumination with a convection process and scattering with a diffusion process. In our method, convection was replaced with path tracing. We evaluated both the performance of the implementation and the quality of the final images and compared them with the convection-diffusion method, path tracing with single scattering and path tracing with multiple scattering. Results show a similar performance and quality of images, rendered with our method, with respect to the convection-diffusion method, while our approach offers additional advantages, in particular unbiasedness, independence from the number of lights and lower memory requirements.

Keywords: Diffusion, global illumination, volumetric data

1 UVOD

Uporaba fizikalno pravilne osvetlitve v vizualizaciji omogoča uporabnikom lažje razločevanje med posameznimi značilnicami in lastnostmi v prikazanih podatkih. To je še posebej pomembno, kadar prikazujemo prostorske strukture (npr. geometrijo), kjer ravno osvetlitev prispeva ogromno k dojetanju globine in oblik. Pri upodabljanju volumetričnih podatkov, kjer svetloba prodira skozi snov v odvisnosti od njenih lastnosti, je dobro prostorsko zaznavo še bistveno težje zagotoviti.

Primere takšnih volumetričnih podatkov najdemo na različnih znanstvenih področjih, kot so: medi-

cina, kjer takšne podatke dobimo z uporabo različnih radioloških tehnik (računska tomografija [Kalender et al., 1990], magnetna resonanca [Foster, 1984], tridimenzionalni ultrazvok [Huang and Zeng, 2017]; pozitronska emisijska tomografija [Bailey et al., 2005]), meteorologija, kjer lahko takšne podatke zajamemo s sateliti in/ali radarji, astronomija, kjer lahko volumetrične podatke prav tako zajamemo na različne načine [Taylor, 2015] (s svetlobnimi ali radijskimi teleskopi, z detektorji gravitacijskih valov), vsa področja, ki uporabljajo mikroskopijo (presevna tomografija [Kawata and Minami, 1986], krio-elektronska tomografija [Koning and Koster, 2009]), fizika, kjer so takšni

podatki večinoma rezultati simulacij in drugod. Prav vsem področjem pa je skupna potreba po čimbolj razpoznavni vizualizaciji takšnih podatkov, ki daje uporabnikom dober vpogled v njihovo strukturo in podrobnosti, kar med drugimi omogočajo tudi metode fizikalno pravilnega osvetljevanja.

Fizikalno pravilno osvetlitev dobro opisuje enačba upodabljanja, kot jo definira Kajiya [Kajiya, 1986], ki temelji na enačbi sevalnega prenosa [Chandra-sekhar, 1960]. Za njeno reševanje se najpogosteje uporablja metoda volumetričnega korakanja vzdolž žarkov, predstavljena v delu [Levoy, 1988]. Metoda zaradi aproksimacije z Riemannovo vsoto ne daje točnih rezultatov, prav tako pa ni primerna za simulacijo naprednejših svetlobnih pojavov, kot je sipanje. Za točne rezultate se dandanes vse pogosteje uporabljajo metode Monte Carlo in njene izpeljanke. Slaba stran metod Monte Carlo je njihova počasna konvergenca, kar velja še posebej za materiale, kjer prevladuje sipanje svetlobe in je posledično treba simulirati večkratne odboje in uporabiti prilagodljivo vzorčenje. V našem delu naslavljam problem počasne konvergenca metod Monte Carlo v tovrstnih materialih s hitro aproksimacijo sipanja z uporabo difuzijske metode. Poglavitna prispevka članka sta:

- hibridna difuzijska metoda, ki omogoča interaktiven izračun osvetlitve volumetričnih podatkov in njihov realno-časoven izris;
- performančno in kvalitativno ovrednotenje ter primerjava z obstoječimi pristopi za upodabljanje volumetričnih podatkov, ki so v široki uporabi.

V poglavju 2 naše delo najprej umestimo v raziskovalno področje. V poglavju 3 na kratko predstavimo našo metodo in jo primerjamo z izbranimi obstoječimi metodami. Rezultate in ovrednotenje naše metode v primerjavi z izbranimi metodami predstavimo v poglavju 4. Na koncu v poglavju 5 predstavimo še sklepne ugotovitve in podamo izhodišče za nadaljnje delo.

2 PREGLED PODROČJA

Začetki upodabljanja volumetričnih podatkov segajo v 80. leta prejšnjega stoletja. Takrat so bili razviti različni ad-hoc pristopi, denimo projekcija največje intenzitete in emisijsko-absorpcijski model [Max, 1995], ki se zaradi svoje preprostosti pogosto še danes uporabljajo v praksi. Ti pristopi so fizikalno nerealistični, ne opisujejo senc in senčenja, posledično pa je v upodobitvah težko ocenjevati globino,

razdalje in medsebojno postavitve predmetov. Z dodajanjem senc in senčenja so nastale prve fizikalno osnovane metode [Drebin et al., 1988, Sobierajski and Kaufman, 1994], ki so bile kasneje prilagojene tudi za interaktivno uporabo [Parker et al., 2005]. Alternativna pristopa za izračun osvetlitve volumetričnih podatkov sta še sledenje žarkov [Levoy, 1988] in algoritem izsevnosti [Rushmeier and Torrance, 1987], ki pa ne dosegata znatne pohitritve ali boljše kvalitete rezultatov. Odličen pregled najpogosteje uporabljenih metod v praksi najdemo v knjigi avtorjev Engel in sodelavcev [Engel et al., 2004].

Fizikalno osnovano upodabljanje volumnov sta prva predstavila Kajiya in Von Herzen [Kajiya and Von Herzen, 1984], Kajiya pa je pristop kasneje posplošil s t. i. enačbo upodabljanja ter predstavil njeno rešitev z metodo Monte Carlo. Zaradi počasne konvergenca metode Monte Carlo in zaradi kompleksnosti same enačbe upodabljanja je bilo razvitih mnogo izboljšav (tako metodoloških kot tudi algoritmčnih), med katerimi sta najpomembnejši dvosmerno sledenje poti [Lafortune and Willems, 1993] in rešitev z algoritmom Metropolis-Hastings [Veach and Guibas, 1997]. Lafortune je dvosmerno sledenje poti kasneje prilagodil tudi za upodabljanje volumnov [Lafortune and Willems, 1996], Pauly pa je na podoben način razširil algoritem Metropolis-Hastings [Pauly et al., 2000]. Aktualen pregled metod Monte Carlo za upodabljanje volumetričnih podatkov najdemo v preglednem članku avtorjev Novák in sodelavcev [Novák et al., 2018]. Jensen je predstavil združen koncept dvostopenjskega osvetljevanja in zemljevida fotonov [Jensen, 1996], ki ga je kasneje razširil tudi za upodabljanje volumnov [Jensen and Christensen, 1998]. Dvostopenjsko osvetljevanje je ključno za metodo predstavljeno v tem članku, saj omogoča izračun globalne osvetlitve neodvisno od položaja in orientacije kamere. Nadaljnje razširitve in prilagoditve tehnike zemljevidov fotonov so predstavljene v [Jönsson et al., 2012].

Vzporedno je Stam predstavil uporabo difuzijske enačbe za aproksimacijo večkratnega sipanja [Stam, 1995], ki temelji na delu Kajiyae [Kajiya and Von Herzen, 1984]. Večkratno sipanje predstavlja časovno najzahtevnejši del osvetljevanja kar je razlog, da je pristop postal odlična alternativa za izboljšavo interaktivnosti pri upodabljanju volumnov. Kasneje so raziskovalci predstavili izboljšave in razširitve, kot so dipolna difuzija [Jensen et al., 2001], večpol-



Slika 1: Postopek upodabljanja s hibridno difuzijsko metodo. Vhodni podatki so uporabljeni za izračun neposredne osvetlitve in sipanja, katerih skupni rezultat je obevalni volumen. V zadnjem koraku vhodne podatke združimo z osvetlitvijo in jih projiciramo na zaslon.

na difuzija [Donner and Jensen, 2005], kvantizirana difuzija [D'Eon and Irving, 2011], pretočno omejena difuzija [Koerner et al., 2014] ter reševanje z metodo končnih elementov [Arbree et al., 2011]. Pojavili so se tudi hibridni pristopi, ki združujejo zgoraj omenjene metode sledenja poti in zemljevida fotonov [Li et al., 2005, Donner and Jensen, 2008, Jarosz et al., 2011, Habel et al., 2013]. Za naše delo je bila še posebej zanimiva rešitev konveksijsko-difuzijske enačbe na grafični strojni opremi [Zhang and Ma, 2013], ki je služila kot osnova za razvoj dvostopenjske hibridne metode, predstavljene v tem članku.

3 HIBRIDNA DIFUZIJSKA METODA

Hibridna difuzijska metoda temelji na združitvi dveh pristopov za izračun globalne osvetlitve volumnov: sledenja poti in konveksijsko-difuzijske metode. Obe metodi imata določene prednosti in pomanjkljivosti, ki vplivajo na natančnost in hitrost upodabljanja: sle-

$$(\omega \cdot \nabla)L(\mathbf{x}, \omega) = \sigma_a(\mathbf{x})L_e(\mathbf{x}_t, \omega) - \sigma_a(\mathbf{x})L(\mathbf{x}, \omega) - \sigma_s(\mathbf{x})L(\mathbf{x}, \omega) + \sigma_s(\mathbf{x})L_s(\mathbf{x}, \omega), \quad (1)$$

$$L_s(\mathbf{x}, \omega) = \int_{S^2} f_p(\mathbf{x}, \omega, \omega')L(\mathbf{x}, \omega') d\omega', \quad (2)$$

kjer sta σ_a in σ_s koeficienta absorpcije in sipanja, L_e emisija ter f_p fazna funkcija, ki določa porazdelitev smeri sipanja. Če enačbo integriramo vzdolž smeri ω

denje poti je točno, vendar moramo ob vsaki spremembi pogleda do tedaj izračunano sliko zavreči, medtem ko je konveksijsko-difuzijska metoda bistveno hitrejša, ampak je zaradi uporabe konveksije za izračun neposredne osvetlitve netočna. Hibridna difuzijska metoda združuje prednosti sledenja poti in konveksijsko-difuzijske metode v sledečih treh korakih:

1. izračun neposredne osvetlitve, za kar uporabljamo sledenje poti,
2. aproksimacija večkratnega sipanja, kar rešujemo z difuzijo, in
3. projekcija, s katero podatke preslikamo na zaslon.

Postopek je shematično prikazan na sliki 1. Loče- no računanje osvetlitve in projekcije nam omogoča spreminjanje pogleda brez potrebe po ponovnem izračunu celotne slike, medtem ko difuzijska metoda poskrbi za hitro aproksimacijo večkratnega sipanja svetlobe.

Neposredno osvetlitev v volumnu izračunamo tako, da za vsak voksel uporabimo metodo sledenja poti. V naslednjem koraku neposredni osvetlitvi dodamo sipanje z uporabo difuzije. Rezultat prvih dveh korakov je obevalni volumen, ki hrani obsevanost za poljubno točko na regularni mreži. V zadnjem koraku z metodo korakanja vzdolž žarka združimo informaciji iz obevalnega volumna in prenosne funkcije ter s tem izračunamo barvo posameznega piksla na zaslonu.

V nadaljnjih podpoglavjih predstavimo izbrani obstoječi metodi, na katerih temelji naš pristop in implementacijske podrobnosti predlagane metode.

3.1 Sledenje poti

Prenos svetlobe skozi medij opisuje diferencialna enačba sevalnega prenosa [Chandrasekhar, 1960], ki jo sestavljajo štiri členi, ki opisujejo spremembo sevalnosti L zaradi emisije, absorpcije, izsipanja in vsipanja svetlobe pri prehodu skozi infinitezimalen del volumna v točki \mathbf{x} in smeri ω :

do ozadja na globini d , dobimo volumetrično enačbo upodabljanja, kjer je prispevek sevalnosti v točki $\mathbf{x}_t = \mathbf{x} - t\omega$ vzdolž žarka utežen s prepustnostjo T :

$$L(\mathbf{x}, \omega) = T(d)L(\mathbf{x}_d, \omega) + \int_{t=0}^d T(t) [\sigma_a(\mathbf{x}_t)L_e(\mathbf{x}_t, \omega) + \sigma_s(\mathbf{x}_t)L_s(\mathbf{x}_t, \omega)] dt, \quad (3)$$

$$T(t) = \exp\left(-\int_{s=0}^t (\sigma_a(\mathbf{x}_s) + \sigma_s(\mathbf{x}_s)) ds\right). \quad (4)$$

Sledenje poti je algoritem za reševanje volumetrične enačbe upodabljanja z metodo Monte Carlo

[Fong et al., 2017], tako da integral nadomestimo s sledečo cenilko:

$$\langle L(\mathbf{x}, \omega) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T(t)}{p(t)} [\sigma_a(\mathbf{x}_t)L_e(\mathbf{x}_t, \omega) + \sigma_s(\mathbf{x}_t)L_s(\mathbf{x}_t, \omega)], \quad (5)$$

kjer je $p(t)$ poljubna gostota porazdelitve vzdolž žarka. Vzorce generiramo tako, da simuliramo proste poti fotonov od kamere do interakcije z medijem, ob interakciji simuliramo absorpcijo ali sipanje, nato pa ta postopek ponavljamo do trka

z virom svetlobe. Za potrebe analitičnega in nepristranskega vzorčenja medij homogeniziramo z dodajanjem fiktivnega medija gostote σ_n , ki ne vpliva na prenos svetlobe, saj svetlobe ne absorbira, ampak jo le sipa v smeri vpadnega žarka:

$$\sigma_n(\mathbf{x})L(\mathbf{x}, \omega) = \sigma_n(\mathbf{x}) \int_{S^2} \delta(\omega - \omega')L(\mathbf{x}, \omega') d\omega'. \quad (6)$$

Če zgornjo enačbo dodamo v enačbo (1), moramo primerno posodobiti tudi rešitev (3) in prepustnost (4). Če gostoto fiktivnega medija izberemo tako, da je $\sigma = \sigma_a + \sigma_s + \sigma_n$ konstanta, je prepustnost $T(t) = e^{-\sigma d}$ analitično obrnljiva, vzorčenje prostih poti z eksponentno gostoto porazdelitve $p(t) = \sigma T(t)$ je s tem

nepristransko, poleg tega pa se s to izbiro porazdelitve izognemo vrednotenju prepustnosti. Ta pristop, imenovan Woodcockovo sledenje [Woodcock et al., 1965], ki je bil kasneje posplošen [Galtier et al., 2013], smo uporabili tudi v naši implementaciji.

3.2 Konvekcijsko-difuzijski model

Konvekcijsko-difuzijski model opisuje dinamiko svetlobe v točki \mathbf{x} z diferencialno enačbo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(\mathbf{x}) = -c\mathbf{u}(\mathbf{x}) \cdot \nabla \rho(\mathbf{x}) - \sigma_a(\mathbf{x})\rho(\mathbf{x}) + \sigma_s(\mathbf{x})\nabla^2 \rho(\mathbf{x}), \quad (7)$$

kjer trije členi na desni strani enačbe opisujejo prenos svetlobe, absorpcijo in sipanje. V enačbi je ρ energijska gostota, \mathbf{u} normalizirana smer svetlobe in c hitrost svetlobe. Reševanje enačbe razdelimo na dva

dela: reševanje konvekcijske enačbe (8), kjer pridobimo aproksimacijo neposredne osvetlitve vokslovolumna, ter reševanje difuzijske enačbe (9), kjer pridobimo aproksimacijo sipanja:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(\mathbf{x}) = -c\mathbf{u}(\mathbf{x}) \cdot \nabla \rho(\mathbf{x}) - \sigma_a(\mathbf{x})\rho(\mathbf{x}), \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(\mathbf{x}) = \sigma_s(\mathbf{x})\nabla^2 \rho(\mathbf{x}). \quad (9)$$

Reševanje enačbe (8) ponovimo za vsak vir svetlobe, saj konvekcija deluje le v eni smeri. Smerni odvod

diskretiziramo z usmerjeno metodo končnih razlik prvega reda [Courant et al., 1952]:

$$(\Delta\rho_{i,j,k}(t))_x = \begin{cases} \frac{\rho_{i+1,j,k}(t) - \rho_{i,j,k}(t)}{\Delta x} & : u_x(\mathbf{x}) < 0 \\ \frac{\rho_{i,j,k}(t) - \rho_{i-1,j,k}(t)}{\Delta x} & : u_x(\mathbf{x}) > 0 \end{cases}, \quad (10)$$

$$(\Delta\rho_{i,j,k}(t))_y = \begin{cases} \frac{\rho_{i,j+1,k}(t) - \rho_{i,j,k}(t)}{\Delta x} & : u_y(\mathbf{x}) < 0 \\ \frac{\rho_{i,j,k}(t) - \rho_{i,j-1,k}(t)}{\Delta x} & : u_y(\mathbf{x}) > 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$(\Delta\rho_{i,j,k}(t))_z = \begin{cases} \frac{\rho_{i,j,k+1}(t) - \rho_{i,j,k}(t)}{\Delta x} & : u_z(\mathbf{x}) < 0 \\ \frac{\rho_{i,j,k}(t) - \rho_{i,j,k-1}(t)}{\Delta x} & : u_z(\mathbf{x}) > 0 \end{cases}. \quad (12)$$

Neposredna osvetlitev v naslednjem časovnem koraku $\Delta t = 1$ za vokal \mathbf{x} širine Δx je tako izražena kot:

$$\rho_{i,j,k}(t + \Delta t) = (1 - \sigma_a(\mathbf{x})) \left(\rho_{i,j,k}(t) - \frac{\Delta x \mathbf{u}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \rho_{i,j,k}(t)}{2(1 - \sigma_a(\mathbf{x}))} \right). \quad (13)$$

Z zgornjim postopkom izračunano neposredno osvetlitev uporabimo za reševanje difuzijske enačbe (9) in s tem izračunamo aproksimacijo vpliva sipanja na osvetlitev volumna. Za namen reševanja enačbo

diskretiziramo s centralnimi diferencami, kar nam omogoča, da vrednost v vokslu \mathbf{x} v naslednjem časovnem koraku izračunamo kot uteženo vsoto okoliških vokslor (6-okolica $v \in V$):

$$\rho_{i,j,k}(t + \Delta t) = \sigma_s(\mathbf{x}) \nabla^2 \rho_{i,j,k}(t) = \frac{\sigma_s(\mathbf{x})}{\Delta x^2} \left(\sum_{v \in V} \rho_v(t) - 6\rho_{i,j,k}(t) \right). \quad (14)$$

3.3 Združitev metod

Naša metoda združuje zgoraj opisane pristope. Zanašamo se na razbitje konvekcijsko-difuzijskega modela na dva dela (enačbi 8 in 9), pri čemer za računanje neposredne osvetlitve namesto konvekcije uporabimo sledenje poti (enačba 3). Pri sledenju poti ne simuliramo sipanja, saj ga izračunamo z difuzijo. Prav tako žarki ne izvirajo iz kamere, temveč iz vo-

lumna, saj z njimi računamo obsevanost vokslor in ne sevalnosti v pikslor. Rešitev računamo progresivno in jo hranimo v volumnu neposredne osvetlitve. Difuzijsko enačbo rešujemo ločeno, prav tako njeno rešitev hranimo v ločenem volumnu. V koraku projekcije končno sliko upodobimo z naslednjo enačbo:

$$L(\mathbf{x}, \omega) = T(d)L(\mathbf{x}_d, \omega) + \int_{t=0}^d T(t)\sigma_a(\mathbf{x})\rho(\mathbf{x})L_e(\mathbf{x}_t, \omega)dt, \quad (15)$$

kjer T izračunamo po enačbi 4, σ_a in L_e pa dobimo prek prenosne funkcije.

Na koncu v koraku projekcije uporabimo preprostejši emisijsko-absorpcijski model, realiziran s tehniko korakanja vzdolž žarkor [Max, 1995], kjer namesto emisije uporabimo seštevek izračunane neposredne osvetlitve in vpliva sipanja iz prejšnjih korakov, izvor žarkor pa je odvisen od položaja kamere. Rezultat tega koraka je slika osvetljenega volumna. Računanje osvetlitve in projekcijo izvajamo vzporedno, tako da je na zaslonu hitro viden približek končne slike, nato pa se slika sčasoma izboljšuje.

Hibridna metoda je prilagojena za izvajanje na grafični kartici in je primerna za interaktivno rabo. Naša referenčna implementacija je zgrajena s sodobnimi spletnimi tehnologijami na podlagi ogrodja VPT [Lesar et al., 2018], za izrabo grafične strojne opreme pa izkorišča programska vmesnika WebGL 2.0 in WebGL 2.0 Compute.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

Našo metodo smo primerjali s konvekcijsko-difuzijsko metodo ter z metodo sledenja poti. Izvedli smo tako performančno kot kvalitativno ovrednotenje, ki sta podrobneje opisana v sledečih podpoglavjih.

Za vhodne podatke smo uporabili volumen računalniške tomografije glave otroka dimenzij 256 x 256 x 98 vokslov, ki smo jo upodobili v ločljivosti 1024 x 1024 pikslov. Fazna funkcija je bila za potrebe primerjave vedno izotropna. Razlog za to je v difuzijski metodi, ki predpostavlja optično gost medij, v katerem se smerni aspekt sipanja izgubi že po majhnem številu odbojev fotona [Stam, 1995].

Vse teste smo izvajali na prenosnem računalniku z naslednjimi specifikacijami:

- Procesor: Intel(R) Core(TM) i5-7300HQ CPU @ 2.50GHz,
- Pomnilnik: 16 GB,
- OS: Windows 10 Pro,
- Grafična kartica: GeForce GTX 1050.

4.1 Performančno ovrednotenje

Pri performančnem ovrednotenju smo primerjali hibridno in konveksijsko-difuzijsko metodo ter metodo sledenja poti. Merili smo količino iteracij, ki jih vsaka metoda izvede v eni sekundi pri upodabljanju končne slike. Izvedli smo dva nabora meritev, na podatkih osvetljenih z eno in s tremi lučmi. Vsak nabor meritev smo ponovili petkrat in povprečili rezultate. Rezultati meritev so zbrani v tabeli 1.

Tabela 1: Rezultati performančnega ovrednotenja predstavljani v obliki števila iteracij na sekundo (več je boljše). Označbe stolpcem predstavljajo ovrednotene metode, in sicer SP ES – sledenje poti z enkratnim sipanjem, SP VS – sledenje poti z večkratnim sipanjem, KD – konveksijsko-difuzijska metoda, HD – hibridna difuzijska metoda.

Št. luči	SP VS	SP ES	KD	HD
1	2.396	4.404	0.808	0.726
3	2.266	4.125	0.247	0.560

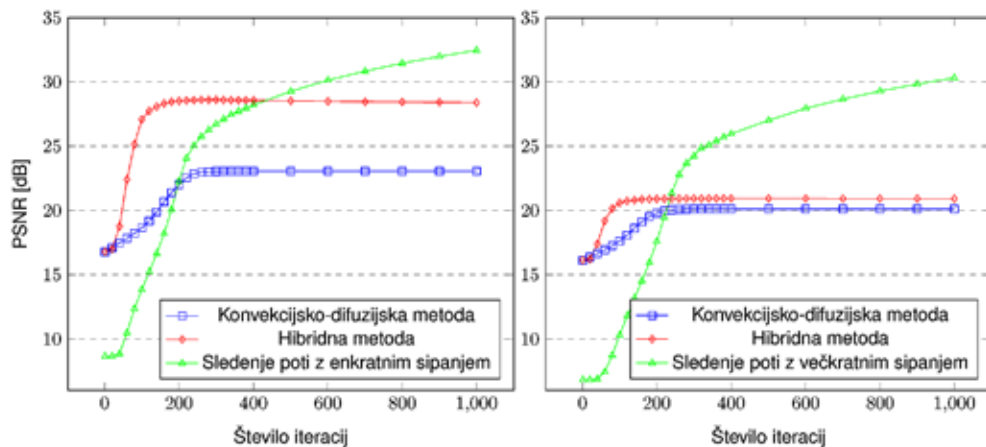
4.2 Kvalitativno ovrednotenje

Pri kvalitativnem ovrednotenju smo primerjali hibridno in konveksijsko-difuzijsko metodo z metodo sledenja poti. Za merjenje smo uporabili razmerje med signalom in šumom (angl. peak signal to noise ratio, PSNR), ter koren povprečne kvadratne napake (angl. root mean square error, RMSE), kjer smo za referenco vzeli sledenje poti z večkratnim sipanjem. Prav tako smo primerjali hitrost konvergence obeh metod, tako da smo obe metriki računali po različnem številu iteracij upodabljanja.

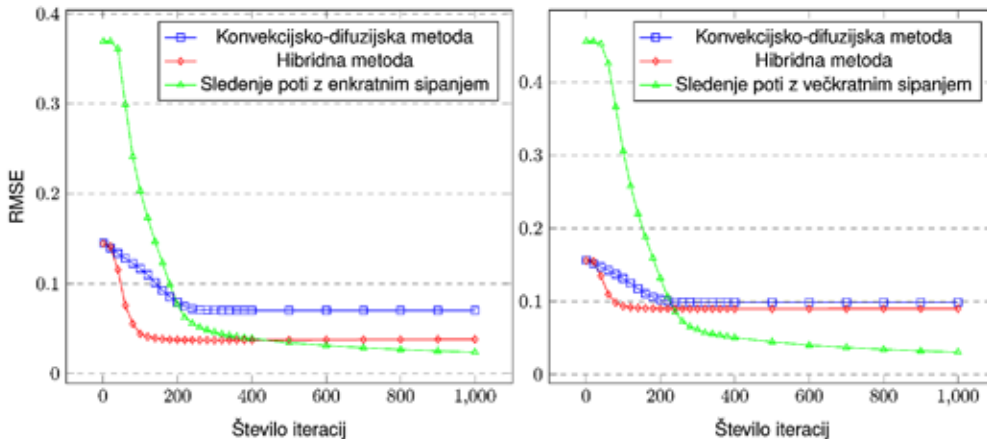
Izvedli smo več meritev pod različnimi osvetlitvenimi pogoji. Na sliki 2 so zgoraj vidni rezultati upodabljanja volumna osvetljenega z eno lučjo, spodaj pa s tremi lučmi. Grafi vrednosti PSNR so prikazani na sliki 3 (ena luč) in na sliki 5 (tri luči), grafi vrednosti RMSE pa so prikazani na sliki 4 (ena luč) in sliki 6 (tri luči). V vseh slikah levi graf prikazuje primerjavo glede na referenčno sliko, upodobljeno s sledenjem poti z enkratnim sipanjem, desni pa z večkratnim sipanjem. Vse referenčne slike smo upodobili s približno 1.300.000 iteracijami.



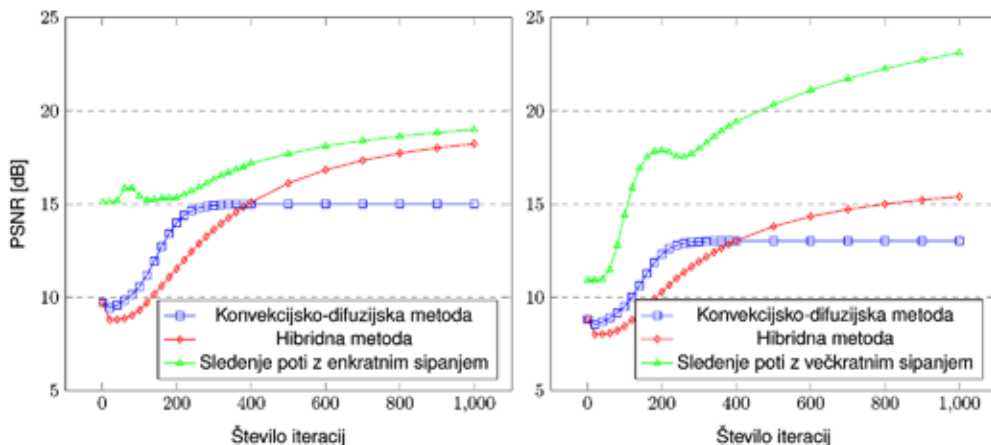
Slika 2: Rezultati upodabljanja slike računalniške tomografije glave otroka z eno lučjo (zgoraj) in s tremi lučmi (spodaj). Od leve proti desni: Sledenje poti z večkratnim sipanjem, sledenje poti z enkratnim sipanjem, konveksijsko-difuzijska metoda, hibridna difuzijska metoda.



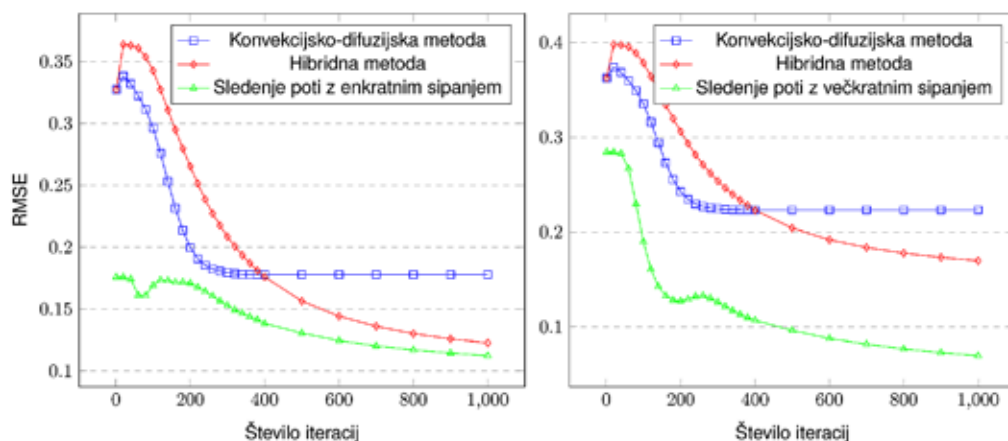
Slika 3: Vrednosti PSNR za volumen, osvetljen z eno lučjo, glede na sledenje poti z enkratnim sipanjem (levo) in z večkratnim sipanjem (desno).



Slika 4: Vrednosti RMSE za volumen, osvetljen z eno lučjo, glede na sledenje poti z enkratnim sipanjem (levo) in z večkratnim sipanjem (desno).



Slika 5: Vrednosti PSNR za volumen, osvetljen s tremi lučmi, glede na sledenje poti z enkratnim sipanjem (levo) in z večkratnim sipanjem (desno).



Slika 6: Vrednosti RMSE za volumen, osvetljen s tremi lučmi, glede na sledenje poti z enkratnim sipanjem (levo) in z večkratnim sipanjem (desno).

4.3 Diskusija

Rezultati razkrivajo, da je hibridna metoda tako performančno kot kvalitativno primerljiva s konvekcijsko-difuzijsko metodo. Bistvena prednost hibridne metode je nepristranski izračun neposredne osvetlitve s sledenjem poti, zaradi česar je metoda bolj točna od konvekcijsko-difuzijske, kar je razvidno iz grafov na slikah 3 in 5, kjer pri manjšem številu iteracij metoda doseže višje vrednosti PSNR. Enako lahko razberemo tudi iz grafov na slikah 4 in 6, kjer pri manjšem številu iteracij metoda doseže nižje vrednosti RMSE. Grafi kažejo tudi primerljive rezultate v primerjavi z večkratnim sipanjem glede na konvekcijsko-difuzijsko metodo. Rezultat sledenja poti z večkratnim sipanjem, viden na sliki 2, je obarvan precej drugače, kar je posledica izbrane prenosne funkcije, ki je v primeru večkratnega sipanja odgovorna za hitrejšo pojemanje nekaterih barvnih kanalov. Primerjava hitrosti izvajanja (tabela 1) kaže na to, da so iteracije konvekcijsko-difuzijske in hibridne metoda počasnejše od iteracij sledenja poti. Ena iteracija sledenja poti pa ne pomeni nujno enega vzorca, kar potrjuje tudi počasnejša konvergenca. Ena iteracija pomeni en premik fotona in eno interakcijo z medijem, za vzorec končne slike pa potrebujemo celotno pot fotona z vsemi vmesnimi interakcijami z medijem.

Za razliko od konvekcijsko-difuzijskega modela, predstavljenega v prejšnjem poglavju, nam hibridni pristop omogoča izvedbo skupnega izračuna vplivov različnih virov svetlobe. S tem se močno zmanjša poraba pomnilnika pri večji količini svetlobnih virov, saj nam ni treba hraniti ločenih obsevalnih volumnov. Obsevalni volumen za posamezen svetlobni

vir je enake ločljivosti kot vhodni volumen. Hibridna metoda v primerjavi s konvekcijsko-difuzijsko metodo uporablja sledenje poti in tako zmanjša pristranskost končne osvetlitve. Izračuni zahtevnejših korakov (neposredne osvetlitve in sipanja) so neodvisni od položaja kamere, zato nam ni treba zavreči trenutnega stanja ob spremembi pogleda na volumen, kar bistveno izboljša interaktivnost upodabljanja. Konvekcijsko-difuzijska metoda ima še eno pomanjkljivost, ki jo hibridna metoda odpravi. Propagacija neposredne osvetlitve skozi prostor je počasna, zato je velik del volumna na začetku simulacije temen (primeri slik so v prilogi A). Hibridna metoda te pomanjkljivosti nima zaradi uporabe sledenja poti.

5 SKLEP

V članku smo predstavili hibridno difuzijsko metodo za upodabljanje volumnov. Pri razvoju metode smo izhajali iz konvekcijsko-difuzijske metode, v kateri smo konvekcijo nadomestili z metodo sledenja poti. Razvito metodo smo ovrednotili na zbirki medicinskih volumetričnih podatkov, saj se metode fizikalno osnovanega osvetljevanja volumetričnih podatkov največkrat uporabljajo ravno na tej domeni. Rezultati kažejo, da je metoda primerljiva z obstoječimi pristopi, ponuja pa kar dve bistveni prednosti: manjšo porabo pomnilnika pri večjem številu luči in bolj točen izračun neposredne osvetlitve. Glavna pomanjkljivost tako hibridne kot konvekcijsko-difuzijske metode je nezmožnost simulacije barvnega zamika kot posledice večkratnega sipanja, čemur se bomo posvetili v nadaljnjem delu. V nadaljnjem delu bomo naslovili tudi možnost uporabe volumna manjše resolucije za

shranjevanje prispevka osvetlitve, kar bi še dodatno zmanjšalo tako prostorsko kot tudi računsko zahtevnost metode. Zanima nas, ali bi bila takšna metoda kljub nižjemu številu prispevkov še vedno primerna za vizualizacijo volumetričnih podatkov. Kljub predstavljenim omejitvam naš prispevek dokazuje, da je osvetlitev, izračunana s hibridnim pristopom, tako kvalitativno kot performančno primerna za interaktivno upodabljanje volumnov.

LITERATURA

- [1] [Arbree et al., 2011] Arbree, A., Walter, B., and Bala, K. (2011). Heterogeneous subsurface scattering using the finite element method. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(7):956–969.
- [2] [Bailey et al., 2005] Bailey, D. L., Maisey, M. N., Townsend, D. W., and Valk, P. E. (2005). *Positron emission tomography*, volume 2. Springer.
- [3] [Chandrasekhar, 1960] Chandrasekhar, S. (1960). *Radiative Transfer*. Dover Books on Intermediate and Advanced Mathematics. Dover Publications.
- [4] [Courant et al., 1952] Courant, R., Isaacson, E., and Rees, M. (1952). On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences. *Communications on Pure and Applied Mathematics*.
- [5] [D'Eon and Irving, 2011] D'Eon, E. and Irving, G. (2011). A quantized-diffusion model for rendering translucent materials. In *ACM SIGGRAPH 2011 Papers*, SIGGRAPH '11, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [6] [Donner and Jensen, 2005] Donner, C. and Jensen, H. W. (2005). Light diffusion in multi-layered translucent materials. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1032–1039.
- [7] [Donner and Jensen, 2008] Donner, C. and Jensen, H. W. (2008). Rendering translucent materials using photon diffusion. In *ACM SIGGRAPH 2008 Classes*, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [8] [Drebin et al., 1988] Drebin, R. A., Carpenter, L., and Hanrahan, P. (1988). Volume rendering. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 22(4):65–74.
- [9] [Engel et al., 2004] Engel, K., Hadwiger, M., Kniss, J. M., Lefohn, A. E., Salama, C. R., and Weiskopf, D. (2004). Real-time volume graphics. In *ACM Siggraph 2004 Course Notes*, pages 29–es.
- [10] [Fong et al., 2017] Fong, J., Wrenninge, M., Kulla, C., and Habel, R. (2017). Production volume rendering. In *ACM SIGGRAPH*, pages 1–79, New York, New York, USA. ACM Press. [Foster, 1984] Foster, M. A. (1984). Magnetic resonance in medicine and biology.
- [11] [Galtier et al., 2013] Galtier, M., Blanco, S., Caliot, C., Coustet, C., Dauchet, J., El Hafi, M., Eymet, V., Fournier, R., Gautrais, J., Khuong, A., et al. (2013). Integral formulation of null-collision monte carlo algorithms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 125:57–68.
- [12] [Habel et al., 2013] Habel, R., Christensen, P. H., and Jarosz, W. (2013). Photon beam diffusion: A hybrid monte carlo method for subsurface scattering. *Computer Graphics Forum*, 32(4):27–37.
- [13] [Huang and Zeng, 2017] Huang, Q. and Zeng, Z. (2017). A review on real-time 3d ultrasound imaging technology. *BioMed research international*, 2017.
- [14] [Jarosz et al., 2011] Jarosz, W., Nowrouzezahrai, D., Sadeghi, I., and Jensen, H. W. (2011). A comprehensive theory of volumetric radiance estimation using photon points and beams. *ACM Trans. Graph.*, 30(1).
- [15] [Jensen, 1996] Jensen, H. W. (1996). Global illumination using photon maps. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, pages 21–30, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- [16] [Jensen and Christensen, 1998] Jensen, H. W. and Christensen, P. H. (1998). Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 311–320. Association for Computing Machinery.
- [17] [Jensen et al., 2001] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M., and Hanrahan, P. (2001). A practical model for subsurface light transport. In *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 511–518, New York, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [18] [Jönsson et al., 2012] Jönsson, D., Kronander, J., Ropinski, T., and Ynnerman, A. (2012). Historygrams: Enabling interactive global illumination in direct volume rendering using photon mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12):2364–2371.
- [19] [Kajiya, 1986] Kajiya, J. T. (1986). The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4):143–150.
- [20] [Kajiya and Von Herzen, 1984] Kajiya, J. T. and Von Herzen, B. P. (1984). Ray tracing volume densities. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 18(3):165–174.
- [21] [Kalender et al., 1990] Kalender, W. A., Seissler, W., Klotz, E., and Vock, P. (1990). Spiral volumetric ct with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology*, 176(1):181–183.
- [22] [Kawata and Minami, 1986] Kawata, S. and Minami, S. (1986). The principle and applications of optical microscope tomography. *Acta histochemica et cytochemica*, 19(1):73–81.
- [23] [Koerner et al., 2014] Koerner, D., Portsmouth, J., Sadlo, F., Ertl, T., and Eberhardt, B. (2014). Flux-limited diffusion for multiple scattering in participating media. *Computer Graphics Forum*, 33(6):178–189.
- [24] [Koning and Koster, 2009] Koning, R. I. and Koster, A. J. (2009). Cryo-electron tomography in biology and medicine. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger*, 191(5):427–445.
- [25] [Lafortune and Willems, 1993] Lafortune, E. P. and Willems, Y. D. (1993). Bi-directional path tracing. In *Proceedings of Third International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques (Compugraphics '93)*, pages 145–153, Alvor, Portugal.
- [26] [Lafortune and Willems, 1996] Lafortune, E. P. and Willems, Y. D. (1996). Rendering participating media with bidirectional path tracing. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, pages 91–100, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- [27] [Lesar et al., 2018] Lesar, v., Bohak, C., and Marolt, M. (2018). Real-time interactive platform-agnostic volumetric path tracing in webgl 2.0. In *Proceedings of the 23rd International ACM Conference on 3D Web Technology*, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [28] [Levoy, 1988] Levoy, M. (1988). Display of surfaces from volume data. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 8(3):29–37.
- [29] [Li et al., 2005] Li, H., Pellacini, F., and Torrance, K. E. (2005). A hybrid monte carlo method for accurate and efficient subsurface scattering. In *Proceedings of the Sixteenth*

- Eurographics Conference on Rendering Techniques*, pages 283–290, Goslar, DEU. Eurographics Association.
- [30] [Max, 1995] Max, N. (1995). Optical models for direct volume rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1(2):99–108.
- [31] [Novák et al., 2018] Novák, J., Georgiev, I., Hanika, J., and Jarosz, W. (2018). Monte carlo methods for volumetric light transport simulation. In *Computer Graphics Forum*, volume 37, pages 551–576. Wiley Online Library.
- [32] [Parker et al., 2005] Parker, S., Parker, M., Livnat, Y., Sloan, P.-P., Hansen, C., and Shirley, P. (2005). Interactive ray tracing for volume visualization. In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, pages 15–es.
- [33] [Pauly et al., 2000] Pauly, M., Kollig, T., and Keller, A. (2000). Metropolis light transport for participating media. In *Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pages 11–22. Springer.
- [34] [Rushmeier and Torrance, 1987] Rushmeier, H. E. and Torrance, K. E. (1987). The zonal method for calculating light intensities in the presence of a participating medium. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4):293–302.
- [35] [Sobierajski and Kaufman, 1994] Sobierajski, L. M. and Kaufman, A. E. (1994). Volumetric ray tracing. In *Proceedings of the 1994 symposium on Volume visualization*, pages 11–18.
- [36] [Stam, 1995] Stam, J. (1995). Multiple scattering as a diffusion process. In Hanrahan, P. M. and Purgathofer, W., editors, *Rendering Techniques '95*, pages 41–50, Vienna. Springer Vienna.
- [37] [Taylor, 2015] Taylor, R. (2015). Frelled: A realtime volumetric data viewer for astronomers. *Astronomy and computing*, 13:67–79.
- [38] [Veach and Guibas, 1997] Veach, E. and Guibas, L. J. (1997). Metropolis light transport. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 65–76, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [39] [Woodcock et al., 1965] Woodcock, E., Murphy, T., Hemmings, P., and Longworth, S. (1965). Techniques used in the gem code for monte carlo neutronics calculations in reactors and other systems of complex geometry. In *Proc. Conf. Applications of Computing Methods to Reactor Problems*, pages 557–579.
- [40] [Zhang and Ma, 2013] Zhang, Y. and Ma, K.-L. (2013). Fast global illumination for interactive volume visualization. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pages 55–62, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

■

Uroš Šmajdek je magistrski študent na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Njegovi interesi ležijo predvsem v področjih računalniške grafike in tehnologije iger.

■

Žiga Lesar je asistent in doktorski študent na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Ukvarja se predvsem z računalniško grafiko in visokozmogljivim računalništvom, raziskuje pa interaktivno upodabljanje medicinskih podatkov s spletnimi tehnologijami. Za svoje delo je leta 2014 prejel univerzitetno Prešernovo nagrado.

■

Ciril Bohak je podoktorski raziskovalec na King Abdullah University of Science and Technology v Saudovi Arabiji in docent na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Njegovi raziskovalni interesi so računalniška grafika, vizualizacija, tehnologija iger in poigritev e-učenja.

■

Matija Marolt je izredni profesor na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Je predstojnik Laboratorija za računalniško grafiko in multimedije. Njegove raziskave so na področjih segmentacije in rekonstrukcije bioloških in medicinskih podatkov, pridobivanja informacij iz glasbe s poudarkom na semantičnih opisih in razumevanju zvočnih signalov, pridobivanju in organizaciji glasbenih arhivov in interakcije med človekom in računalnikom.

A PRILOGA

V prilogi so zbrane slike, ki ponazarjajo postopek upodabljanja s konvekcijsko-difuzijsko metodo (slika 7) in s hibridno metodo (slika 8). S slik je razvidno,

da hibridna metoda bistveno prej vrne razpoznavne rezultate. Slike so upodobljene na CT podatkih otroške glave¹.



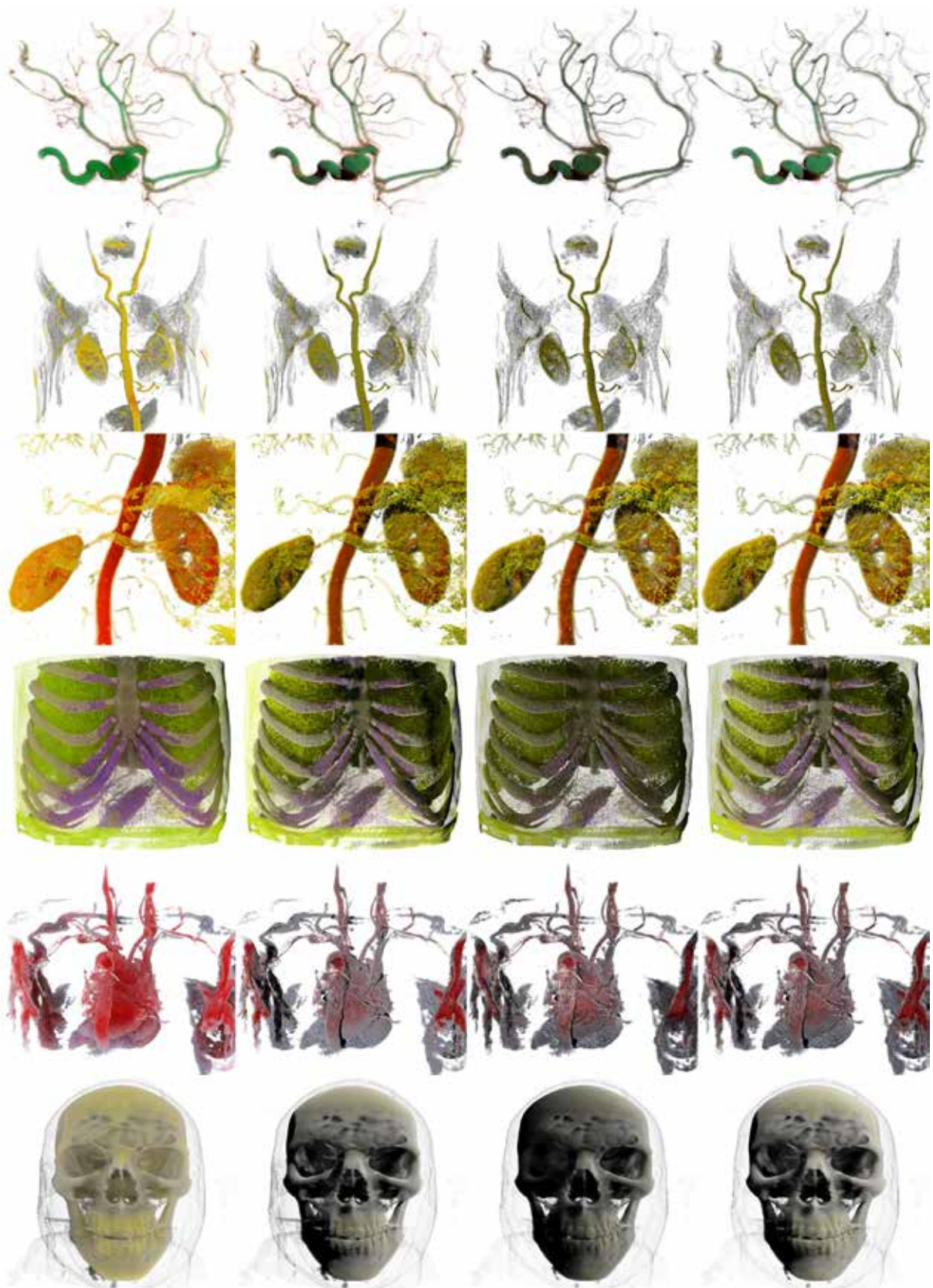
Slika 7: Koraki postopka upodabljanja s konvekcijsko-difuzijsko metodo.



Slika 8: Koraki postopka upodabljanja s hibridno metodo.

Slika 9 prikazuje delovanje hibridne metode v primerjavi z ostalimi metodami na širšem naboru volumnov. Od leve proti desni: sledenje poti z večkratnim sipanjem, sledenje poti z enkratnim sipanjem, konvekcijsko-difuzijska metoda in hibridna difuzijska metoda.

¹ <http://schorsch.efi.fh-nuernberg.de/data/volume/>



Slika 9: Primerjava metod osvetljevanja na širšem naboru volumnov.

Upodobljene zbirke podatkov, kot si sledijo po vrsticah, so:

- primer angiografije žil v glavi²,
- primer angiografije žil prsnega koša¹,
- primer CT podatkov ledvic¹,
- primer CT podatkov prsnega koša³,
- primer CT podatkov prsnega koša¹,
- primer CT podatkov glave odraslega moškega¹.

² <https://klacansky.com/open-scivis-datasets/>

³ <http://ngavrilov.ru/invols/index.php?id=Download>

■ Računalniška emulacija kot strategija digitalnega ohranjanja računalniških sistemov in programske opreme

Jurij Mihelič¹, Mojca Ferle²

¹Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani, Večna pot 113, 1000 Ljubljana ²Mestni muzej Ljubljana, Muzej in galerije mesta Ljubljane, Gosposka 15, 1000 Ljubljana jurij.mihelic@fri.uni-lj.si, mojca.ferle@mgml.si

Izvleček

Z razvojem in vzponom področij kot so elektrotehnika, računalništvo ter informatika je vzniklo tudi področje digitalnega ohranjanja, ki se ukvarja z ohranjanjem digitalnih artefaktov. Zaradi interdisciplinarnosti področja in širokega nabora pristopov, katerih sistematičen pregled podamo v prvem delu članka, se v osrednjem delu članka osredotočimo predvsem na računalniško emulacijo, ki skupaj z muzejskim pristopom nudi enovit pristop k digitalnemu ohranjanju. Glavni namen članka je opisati metode, pristope, tehnike in izkušnje, ki smo jih pridobili z digitalnim ohranjanjem slovenske računalniške zapuščine in izvedbe emulatorjev dveh starodobnih računalnikov. Poleg emulacije procesorja in naprav so za digitalno ohranjanje računalniških sistemov pomembni tudi drugi vidiki ohranjanja, kot sta emulacija okolja in integracija z gostiteljem. V članku podamo sistematičen pregled ohranitvenih vidikov emulacije skupaj s sistemskimi tehnikami za njihovo izvedbo.

Ključne besede: digitalno ohranjanje, digitalni artefakt, muzejski pristop, računalniška emulacija

Abstract

Due to the development and rise of areas such as electrical engineering, computer science and informatics, the area of digital preservation has also emerged the main focus of which is the preservation of digital artifacts. In the first part of the article, we give a systematic review of a wide range of approaches to digital preservation, followed by the main contribution which focuses mainly on computer emulation which accompanied, with the museum approach, offers a unified and complete approach to digital preservation. The main purpose of the article is to describe the methods, approaches, techniques and experiences gained by the digital preservation of Slovenian computer legacy and implementations of emulators of two rare retro computers. In addition to processor and device emulation, other aspects of preservation, such as environment emulation and host integration, are also important for the digital preservation of computer systems. The article provides a systematic overview of the preservation aspects of emulations together with system techniques for their implementation.

Keywords: Digital preservation, digital artefact, musealization, computer emulation

1 UVOD

Človek, kot del družbe, praktično že od svojih začetkov na takšen ali drugačen način obdeluje informacije, jih ustvarja, hrani in deli z drugimi. Večina informacij je bila še pred nekaj desetletji ustvarjena in zapisana na papir, danes pa je nenehen in hiter razvoj informacijske tehnologije močno spremenil tisočletja uveljavljeno prakso, saj večina informacij nastane in je zapisana neposredno v digitalni obliki.

Posledice razvoja so nova znanja, odkritja, izboljš-

šave, inovacije in izdelki, ki pogosto hitro prodrejo tako v vsakdanja življenja ljudi kot tudi gospodarske dejavnosti, še hitreje pa zastarajo in posledično izgubijo na gospodarski in ekonomski pomembnosti. S tem pa neredko pridobijo kulturno vrednost in postanejo del kulturne dediščine, s čimer se odpira nov izziv njihove ohranitve v ustrezni obliki, ki omogoča njihov nadaljnji dostop.

Ohranjanje je uveljavljena družbena dejavnost, s katero se navadno ukvarjajo ustanove, kot so knjižni-

ce, arhivi, galerije in muzeji, njen glavni namen je zagotavljanje dolgoročne javne dostopnosti in uporabnosti objektov (tudi artefaktov) ohranjanja. Objekt zanimanja je lahko kar koli (npr. knjiga, slika, orodje), le da nosi neko kulturno, družbeno ali drugo vrednost.

Kadar gre pri dejavnosti ohranjanja za *digitalne artefakte* oz. informacije (npr. programska in strojna oprema), področju pravimo *digitalno ohranjanje*. Pri tem je pomembno poudariti razliko med digitalnim ohranjanjem in *digitalizacijo* v osnovi nedigitalnih podatkov z namenom njihovega ohranjanja, pri čemer slednje lahko naknadno povzroči potrebo po digitalnem ohranjanju. Z drugimi besedami, digitalno ohranjanje se osredotoča na digitalne artefakte, tako izvorno digitalne (angl. born-digital) kot digitalizirane. V nasprotju z nedigitalnimi podatki, za katere je dokaj jasno, v čigavi odgovornosti je njihovo ohranjanje (npr. nacionalne knjižnice), pa temu ni tako za digitalne podatke.

Razlog za razvoj novonastalega področja se vsekokor skriva v že omenjenem hitrem razvoju informacijske tehnologije; posledično pa tudi njenem hitrem zastaranju, saj npr. pomnilni mediji, podatkovni formati, strojna in programska oprema, s časom hitro postanejo zastareli in redko uporabljeni v praksi. Digitalno ohranjanje je izredno interdisciplinarno področje, ki zajema vede in znanosti od arhivistike, dokumentalistike, knjižničarstva, muzeologije preko upravljanja informacij in znanja, semantičnih tehnologij, podatkovnih baz, systemske programske opreme, elektrotehnike do upravljanja digitalnih pravic, varnosti, zakonodaje, psihologije in biologije. Pomembnosti področja se zavedata tudi Evropska komisija in Ministrstvo za kulturo Republike Slovenije, ki v okviru digitalne agende želita spodbuditi evropski digitalni potencial [Ministrstvo za kulturo Republike Slovenije, 2013].

Z razmahom Interneta in svetovnega spleta se pojavlja vse več izvorno digitalnih vsebin kot so spletne strani, fotografije, avdio in video vsebine, podatkovne zbirke ipd. Za mnoge izmed teh vsebin je z vidika digitalne ohranitve poskrbljeno s strani Internetnega arhiva¹. Kljub temu pa nekatere izmed njih predstavljajo, zaradi hrambe v zapletenih oblikah in formatih, še posebej trd oreh za digitalno ohranjanje, sem sodijo npr. interaktivne spletne strani, igričarska okolja, družbena omrežja in programska oprema.

Digitalni objekti z vidika ohranjanja niso samostojni oz. neodvisni. Za njihovo ohranitev in ustrezno upodabljanje moramo pogosto ohraniti še okolje, v katerem obstajajo, npr. tako pripadajočo strojno kot programsko opremo. Slednja je tipičen primer, katere format hrambe močno vpliva na pristop k njenemu ohranjanju. Če je hranjena v obliki izvorne programske kode in je na voljo ustrezen prevajalnik za novejšo izvajalno platformo, potem je ohranjanje lahko relativno preprosto. Če pa gre za strojno kodo za zastarelo izvajalno platformo, pa je njeno ohranjanje lahko izredno velik izziv, saj je treba ohraniti tudi samo platformo. Dober primer tega je ohranjanje retro računalniških iger za zastarele igralne konzole in računalnike, kjer je treba zagotoviti še ohranitev ustreznega izvajalnega okolja, operacijskega sistema, samega računalnika in morebitnih pripadajočih naprav.

V tem članku usmerimo pozornost k digitalnemu ohranjanju računalniških sistemov, strojne in programske opreme. Izmed različnih pristopov k reševanju tega izziva se podrobneje lotimo emulacije, ki je sicer inženirsko gledano dokaj zahtevna, vendar po vložnem začetnem trudu nudi celovito rešitev. Naše izkušnje, predstavljene v tem članku, temeljijo na raziskovanju virov, dokumentacije, načrtovanju in izvedbi emulatorjev [Horvat in Mihelič, 2018] za dva starodobna računalnika slovenske izdelave (Iskra Delta Partner in Gorenje Dialog), poleg tega pa tudi na rezultatih² izvedbe projekta SloRaDe³, v okviru katerega so študentje različnih usmeritev raziskovali ozadje in zgodovino slovenske računalniške dediščine. Zgodovinski pogled na podjetje Iskra Delta se nahaja v npr. [Bufon, 2018, Škrubej, 2008].

S tem člankom želimo zadostiti več ciljem. Osnovni in splošni cilj prispevka je predstavitev področja digitalnega ohranjanja, opredelitev pojma digitalnega artefakta ter opis taksonomije pristopov k digitalnemu ohranjanju. Glavni cilj članka je predstavitev emulacije kot pristopa k digitalnemu ohranjanju, pri čemer se na celovit način osredotočimo predvsem na ohranitvene vidike emulacije, probleme, težave in izzive, ki se pojavljajo pri njeni izvedbi. Osnovnemu cilju članka metodološko zadostimo preko pregleda splošne literature o emulaciji in digitalnem ohranjanju. Pregled ohranitvenih vidikov pa temelji pred-

¹ <https://archive.org>

² <https://jurem.github.io/SloRaDe/>

³ Gre za projekt ŠIPK – Študentski inovativni projekti za družbeno korist

vsem na obstoječih izkušnjah z izvedbo zgoraj naštetih projektov. Primerjava tehnik in analiza pristopov je zaradi narave področja predvsem kvalitativna.

V naslednjem razdelku opišemo področje digitalnega ohranjanja, podamo njegove osnovne smernice, predstavimo različne poglede na digitalne artefakte in pristope za digitalno ohranjanje. V tretjem razdelku opišemo muzejski pristop, njegovo vlogo in proces muzealizacije. Glavni razdelek članka je četrti, v katerem se podrobneje lotimo emulacije kot pristopa k digitalnemu ohranjanju artefaktov, opišemo naše izkušnje s tem pristopom pri digitalnem ohranjanju slovenskih starodobnih računalnikov. V zadnjem poglavju zaključimo članek.

2 DIGITALNO OHRANJANJE

V tem razdelku najprej predstavimo digitalno ohranjanje, njegovo strateško vlogo v družbi, osredotočimo se na pregled oblik digitalnih artefaktov in naštejemo pristope k digitalnemu ohranjanju.

2.1 Strategija digitalnega ohranjanja

Pomembnost digitalnega ohranjanja je v sodobni družbi že zaznana, v nedavni preteklosti je bilo zagagnanih že več pobud za njeno vzpodbujanje, med drugim tudi v okviru zadnjih nekaj evropskih programov za raziskave in tehnološki razvoj. Primer dobrih praks so predstavljeni v [Strodl et al., 2007] s poudarkom na oblikovanju strategije in načrtovanju ohranitvenih dejavnosti.

Ameriška neprofitna organizacija *Online Computer Library Center* je leta 2006 definirala strategijo [Online Computer Library Center, 2006] dolgotrajnega ohranjanja digitalnih objektov, ki nudi več od dobrega sistema za varnostno kopiranje. Strategijo grafično ponazorimo s piramidno shemo, predstavljeno na sliki 1.



Slika 1: Primer različnih pogledov na digitalni artefakt

Strateška shema sestoji iz več slojev, pri čemer vsak sloj sloni na izbranem vidiku prizadevanja za digitalno ohranjanje. Odločitve na nekem sloju temeljijo na nižjih slojih, zato dejavnosti digitalnega ohranjanja potekajo po slojih od spodaj navzgor. Kratek opis posameznih slojev oz. prizadevanj je:

- ocenitev tveganja izgube artefakta oz. digitalne vsebine zaradi tehnoloških značilnosti, kot so npr. lastniški datotečni formati in programska oprema,
- ovrednotenje vsebine digitalnih objektov z vidika načinov in težavnosti pretvorbe formatov in drugih ohranitvenih dejavnosti,
- ugotavljanje primernih metapodatkov, potrebnih za vsako vrsto objekta in povezanosti z objekti,
- zagotavljanje dostopa do vsebine.

2.2 Oblika digitalnih artefaktov

Omenili smo že, da gre pri digitalnem ohranjanju predvsem za ohranjanje artefaktov, katerih narava je v osnovi digitalna, najsi bodo to izvorno digitalni ali naknadno digitalizirani nedigitalni (analogni) artefakti. Ne glede na izvor digitalnega artefakta, pa ločimo več pogledov na obliko, kako želimo ohraniti artefakt [Webb, 2003, Guttenbrunner, 2007].

- **Fizična oblika** Pri ohranjanju artefakta v fizični obliki gre za obravnavo izzivov, ki se nanašajo na fizikalne lastnosti objektov ohranjanja (npr. propadanje pomnilnih medijev).
- **Logična oblika** Zajema surove podatke (zaporedje bitov), ki jih artefakt fizično predstavlja, pri čemer imajo podatki navadno neko logično strukturo in obliko zapisa.
- **Konceptualna oblika** Obravnava dejanskega objekta, ki je shranjen, pri čemer je pomembna semantika samega objekta.
- **Kontekstna oblika** Ohranjanje konteksta, v katerem je bil ustvarjen digitalni artefakt. Kontekst se hrani v obliki metapodatkov kot dodaten dokument.

Kot primer različnih pogledov na digitalni artefakt si oglejmo sliko 2⁴, kjer a) fizično obliko digitalnega artefakta predstavlja pomnilni medij disketa, ki b) z vidika logične oblike hrani datoteko (datoteka

⁴ Vir slike pod a) je https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radio_Shack_TRS-80_Floppy_Disk.jpg, ostale slike so last avtorjev



Slika 2: Primer različnih pogledov na digitalni artefakt

je na sliki predstavljena kot šestnajstiški in tekstovni delni izpis njene vsebine), katere c) konceptualna vsebina je slika, katere d) kontekst je podan z metapodatki (metapodatki se hranijo v dokumentu, ki nastane v procesu muzealizacije).

2.3 Pristopi digitalnega ohranjanja

Za ohranjanje digitalnega artefakta v literaturi [Webb, 2003, Guttenbrunner, 2007] najdemo več pristopov in rešitev, ki jih naštejemo in na kratko predstavimo v naslednjem seznamu.

- **Muzejski pristop** Hranjenje izvorne strojne in programske opreme na ustrezen način z namenom ohranjanja njene javne dostopnosti.
- **Analogna preobrazba** Pretvorba digitalnih podatkov v nedigitalni format, ki ga je lažje dolgotrajno hraniti, npr. tiskanje na papir.
- **Osveževanje oz. replikacija** Prenos podatkov iz enega pomnilnega medija na drugega, pri čemer sta oba medija iste vrste.
- **Migracija** Prenos podatkov iz enega pomnilnega medija na drugega, pri čemer sta medija različne vrste, pri čemer je ciljni medij praviloma tehnološko sodobnejši.
- **Preoblikovanje** Pretvorba formata zapisa podatkov iz izvornega, starega formata v novega, sodobnejšega, ki omogoča nadaljnjo dostopnost artefakta.
- **Uporaba standardov** Zagotavljanje dolgotrajnega dostopa do artefakta preko uporabe odprtih, podprtih, dostopnih in dogovorjenih standardov

(npr. datotečnih formatov) namesto zaprtih ali lastniških.

- **Zagotavljanje kompatibilnosti** Izvedba programske ali strojne opreme na način, da zagotavlja kompatibilnost s starejšimi različicami.
- **Nadgraditev** Nadgraditev in dopolnitev podatkov z meta podatki, dokumenti, programsko in strojno opremo, ki omogoča dostop do oz. pregled vsebine artefakta.
- **Emulacija** Izvedba nove programske opreme, ki oponaša izvorno programsko ali strojno opremo.

V praksi digitalno ohranjanje navadno izvedemo s kombinacijo več različnih pristopov. V tem članku se osredotočimo predvsem na emulacijo, ki skupaj z muzejskim pristopom nudi celovit pristop k digitalnemu ohranjanju.

3 MUZEJSKI PRISTOP

V tem razdelku predstavimo osnovno vlogo muzejev v družbi in sam proces muzealizacije, ki je pomemben tudi z vidika digitalnega ohranjanja.

3.1 Vloga muzejev

Muzeji kot osrednje ustanove za hranjenje premične kulturne dediščine, evidentirajo, zbirajo, dokumentirajo, vrednotijo, ohranjajo, interpretirajo, raziskujejo in predstavljajo snovno in nesnovno kulturno dediščino od prazgodovine do danes. V 90. letih 20. stoletja so računalniki v življenje ljudi vstopili skozi široko odprta vrata in danes si življenja brez njih ne more-

mo več predstavljati. Postali so nepogrešljivo orodje v vsakdanjem življenju ljudi vseh generacij v delovnem in vedno bolj tudi prostem času. Z vidika razvoja in uporabe v vsakdanjem življenju so tako računalniki postali tudi predmet zanimanja humanističnih, družboslovnih ved, med njimi tudi muzejske stroke.

Od začetnega bolj ali manj naključnega zbiranja (ohranjanje prvih računalnikov, strojne in programske opreme, ki so se uporabljali v muzejih) so se bolj sistematičnega zbiranja računalniške opreme lotili muzeji, ki se ukvarjajo tudi/ali z novejšo in sodobno zgodovino. Rezultat tega je bila prva pregledna razstava o razvoju računalnikov Goto 1982, ki so jo skupaj z Računalniškim muzejem idr. ustanovami in posamezniki pripravili v Muzeju novejše zgodovine Slovenije leta 2012 [Bezek et al., 2012]. Pomembno delo na tem področju opravlja tudi skupina zanesenjakov, organiziranih v Društvo računalniški muzej, ki se je že zgodaj zavedala tako pomembnosti dosežkov »slovenske računalniške industrije« kot tudi neomejenih možnosti uporabe. Zavidljiva zbirka počasi prerašča v slovenski računalniški muzej.⁵

V muzejih je računalniška oprema predmet zanimanja/zanimiva z več zornih kotov:

- z vidika razvoja izvorne slovenske računalniške (strojne in programske) opreme; s tem tudi muzeji pripomorejo h krepitvi zavedanja o pomembnosti le te, saj je v zlati dobi razvoja, v 70. in 80. letih 20. stoletja, slovensko računalniško inženirstvo šlo v korak z razvojem v svetu;
- z vidika vsesplošne uporabnosti, implementacije računalnikov in sodobne tehnologije v vse pore človekovega delovanja in življenja;
- kot uporabno delovno orodje za obdelavo muzejskih predmetov; sodelovanje muzejskih strokovnjakov pri razvoju aplikacij za obdelavo, muzealizacijo predmetov (prva slovenska muzejska aplikacija MODES [Simikič, 2002], danes so v uporabi Fundus [Knez, 2010], Galis in Kronos).

3.2 Proces muzealizacije

Poleg zbiranja predmetov/digitalnih artefaktov je ena osnovnih nalog tudi njihovo dokumentiranje in urejena ter hitro dostopna dokumentacija. V muzeju dokumentiranje premične dediščine obsega zbiranje, urejanje, hranjenje, interpretacijo in predstavljanje zbranih podatkov in dejstev o predmetih.

Govorimo o več fazah, ki se začnejo z *evidentiranjem predmeta* (potencialnega predmeta za uvrstitev v muzejsko zbirko in zbiranjem podatkov za popis), ki mu sledi faza *akcesije* – zbiranje podatkov o pridobivanju (datumu pridobitve, lokaciji, lastniku, stanju na terenu).

Pridobitvi sledi *popis* predmeta. Standardni identifikacijski obrazec predmeta kulturne dediščine (Object ID) za popis zajema naslednja polja: inventarna številka, datum popisa, vrsta predmeta, material in tehnika, mere, napisi in oznake, posebnosti in značilnosti, naslov/ime predmeta, vsebina, čas/obdobje, izdelovalec/avtor, opis predmeta, kraj nastanka/najdbe, fotografija/vizualni zapis predmeta. Z nastajanjem t. i. *dokumentacijskega obrazca* o predmetu, govorimo o t. i. *inventarizaciji predmeta*. Z osnovnim inventarnim obrazcem je povezana vsa druga dokumentacija (evidenca, akcesija, obrazec o konservatorskih pregledih/posegih, vizualna dokumentacija (tekstovna, zvočna, filmska idr.), lokacija/hramba v depozitu, in sekundarna dokumentacija (podatki o objavah, razstavah, dokumentacija o izposoji).

Skozi faze obdelave predmeta, v procesu muzealizacije predmet – muzealijo uvrstimo v muzejsko zbirko, s tem dobi status kulturnega spomenika. Gre za dinamičen proces, dokumentacija o predmetu se stalno dopolnjuje. Podatki so tudi osnova za izpis – inventarne knjige predmetov kot temeljnega dokumenta muzejskih zbirk. Po načelih muzejske stroke dokumentiran digitalni artefakt lahko pridobi status muzealije in postane spomenik premične kulturne dediščine.

3.3 Raziskovanje konteksta muzealije

Pri raziskovanju širšega konteksta muzealije/v našem primeru digitalnih muzealij nas ne zanimajo le tehnične specifikacije računalniške opreme, temveč npr. tudi izkušnje razvijalcev opreme v danih družbenih razmerah, vloga odločevalcev – financerjev in naročnikov, ter končna uporabnost računalniške opreme ter implementacija na različnih ravneh, v gospodarstvu, javni upravi in zasebno, kaj je vplivalo na zaton razvoja slovenske računalniške industrije ipd.

V zadnjem času so lahko predmet raziskovanja vedno bolj aktualne razne oblike zasvojenosti z računalniško tehnologijo, socialna neenakost/razslojenost, ki jo povzroča (ne)dostopnost do svetovnega spleta, socialna vključenost in izključenost ipd. Za zbiranje podatkov in raziskovanje teh in podobnih

⁵ <https://www.racunalniski-muzej.si/>

tem v družboslovju uporabljamo specifične družboslovne raziskovalne metode dela, ki jih v nadaljevanju kratko opišemo [Flere, 2000, Ragin, 2007]: *intervju, anketa, opazovanje*.

- **Intervju** ali znanstveni pogovor je metoda zbiranja podatkov s pogovorno komunikacijo. Lahko je nestrukturiran: pogovor o določeni temi, sogovornika ne omejujemo z vnaprej določenimi vprašanji ali strukturiran: usmerjen pogovor po vprašalniku, zelo blizu anketi.
- **Anketa** je vnaprej pripravljen vprašalnik in možni odgovori, do katerih izprašanec izrazi svoja stališča.
- **Opazovanje** je lahko pasivno ali opazovanje z lastno udeležbo. Največkrat uporabimo intervju in opazovanje.

Sistematično opazovanje (določi se načrt in predmet raziskovanja) je metoda zbiranja podatkov, kjer dogodki potekajo po notranji logiki, opazovalec pasivno spremlja, opazuje in zapisuje potek dogajanja (lahko z avdio ali video snemanjem). Opazovanje z udeležbo je metoda zbiranja podatkov, kjer je opazovalec/raziskovalec aktivno vključen v proces dogajanja, ki ga raziskuje (stopnje udeležbe so lahko različne). Opazovanje in intervju omogočata predvsem kvalitativno analizo vsebine, strukturiran pogovor in anketa pa omogočata kvantitativno (statistično) analizo. Pogosto raziskujemo z dopolnjevanjem predstavljenih metod. Vsaka metoda ima prednosti in slabosti, razlikujejo se v zanesljivosti, preverljivosti in objektivnosti. Nekaj nestrukturiranih intervjujev s ključnimi osebami, ki so v preteklosti sodelovali pri nastajanju prvih slovenskih računalnikov, je bilo zbranih v okviru zgoraj omenjenega projekta SloRaDe.

Pri preučevanju fenomenov računalniške oz. digitalne dobe s pomočjo intervjujev (etnologi govorimo o ustnih virih), dobimo podatke in dejstva, ki pomembno dopolnjujejo pričevalnost predmetov. Dokumentarno vrednost imajo tudi spominski zapisi in memoarska literatura, npr. za raziskovanje razvoja slovenske računalniške industrije knjiga Hladna vojna in bitka za informacijsko tehnologijo [Škrubej, 2008]. Osnovni medij predstavljanja je v muzejih razstava, kjer muzealije in izsledke raziskav predstavimo zainteresirani in širši javnosti.

4 OHRANITVENI VIDIKI EMULACIJE

V tem delu predstavimo načine in oblike emulacije, ki so pomembni za digitalno ohranjanje. Na emulacijo se osredotočimo celovito, vključno z vidiki, ki so v literaturi mnogokrat zapostavljeni, npr. emulacija naprav in okolja.

4.1 Emulacija

Na področju digitalnega ohranjanja so prvotno prevladovali pristopi kot je npr. migracija. Pogled na uporabo emulacije v ta namen pa je bil obravnavan s skepticizmom, predvsem zaradi tehnične zahtevnosti in višjih začetnih stroškov [van der Hoeven et al., 2007]. Danes se emulacija obravnava kot enakovreden pristop, pomemben predvsem zaradi avtentične upodobitve zahtevnih digitalnih artefaktov brez zmanjšanja njihove integritete.

Emulacija je sicer precej širok pojem, ki ga v tem članku obravnavamo z vidika systemske programske opreme [Smith and Nair, 2005], saj je naš glavni namen digitalno ohranjanje računalniških sistemov tako strojne kot programske opreme. S tega vidika je *emulator* programska oprema za nek računalniški sistem (gostitelj), ki oponaša delovanje (drugega) računalniškega sistema (gost). Njen glavni poudarek je na imitaciji obnašanja gosta, ki je na zunaj opazno, samo notranje stanje sistema pri tem ni pomembno. Namen emulatorja je, da se lahko uporabi kot nadomestek za izvorni emulirani sistem. Podobna ideja, osnovana na *univerzalnem navideznem računalniku* je opisana v [Lorie, 2001].

Pojem, ki je zelo soroden emulaciji, je *simulacija*, pri čemer je meja med obema pogosto zabrisana, zaradi česar je razlikovanje včasih težavno. Vseeno poskušajmo poudariti nekatere razlike med njima. Pri simulaciji gre običajno za oponašanje, ki temelji na modelu sistema, pri čemer je lahko omogočeno tudi opazovanje njegovega stanja – gre za notranje stanje simulatorja. Nadalje emulacija z natančnim oponašanjem poustvarja izvorno izkušnjo emuliranega sistema, ki ga je v okviru danega okolja praviloma moč uporabljati na način enakovreden izvorni uporabi. Primeri simulacije so simulator letenja, fizikalni simulatorji in simulatorji vremena. Dobro izvedeno (npr. realno-časovno) simulacijo lahko obravnavamo tudi kot emulacijo; v nadaljevanju članka bomo zato (kot je običajno na tem področju) govorili predvsem o emulaciji računalniškega sistema, četudi bo v ozadju morda simulacija.

V praksi najdemo kopico emulatorjev računalniških sistemov. Pri tem mnogi poleg emulacije izbranih delov sistema zaradi razlogov učinkovitosti omogočajo tudi *virtualizacijo*, kjer gre za preslikavo vmesnikov in virov navideznega sistema v vmesnike in vire gostitelja. Sem sodijo emulatorji računalnikov, ki temeljijo na Intelovi x86 arhitekturi (npr. Bochs, QEMU, Virtual PC, VirtualBox), emulatorji hišnih oz. mini računalnikov kot so ZX Spectrum, Commodore 64, Atari 800XL in emulatorji retro igralnih konzol, kot je SEGA. Glavni namen teh emulatorjev je različen, gre pa pri emuliranju mini računalnikov in igralnih konzol, predvsem za digitalno ohranjanje računalniških iger in poistovetenje igralne izkušnje.

Obstajajo tudi emulatorji, npr. Dioscuri [van der Hoeven et al., 2007], ki so bili ustvarjeni neposredno za digitalno ohranjanje. Primer ohranjanja slovenskega starodobnega računalnika najdemo v [Horvat in Mihelič, 2018], kjer gre primarno za neposredno digitalno ohranjanje samega računalnika, ohranjanje samih pripadajočih digitalnih dokumentov je (lahko) sekundarnega pomena. Med najbolj pogosto uporabljanimi in popularnimi emulatorji najdemo predvsem emulatorje računalnikov in konzol, ki omogočajo prostočasne dejavnosti z igranjem retro računalniških iger. S tem retro igre postanejo kulturni artefakt in izobraževalno orodje oz. nova živa umetnost [Carta, 2017].

Pri pristopu emulacija kot servis (EaaS) [von Suchodoletz et al., 2013] v igro vstopa ohranitvena ustanova (angl. memory institution), ki ponuja storitev emulacije. Pri tem uporabniku ni potrebno uporabljati specifičnih emulatorjev, ampak za dostop do storitve uporablja obstoječe spletne odjemalce. Celota lahko temelji na oblaknem računalništvu oz. porazdeljenem EaaS modelu, kjer gre za odmik od končnega uporabnika k specializiranim ponudnikom, pri čemer lahko slednji (knjižnice, arhivi, muzeji) dobijo novo poslovno priložnost z avtentično reprodukcijo digitalnih objektov in procesov.

4.2 Nivoji emulacije

Pri izvedbi emulacije se lahko osredotočimo na različne dele oz. nivoje računalniškega sistema [Guttenbrunner and Rauber, 2012]. Primer nivojskega pogleda na računalniški sistem je predstavljen na sliki 3. Strojna oprema, kot osnova računalniškega sistema, je pogosto predmet emulacije (primeri so navedeni v predhodnem razdelku), vendar to ni edina možnost.

Obstaja tudi več emulatorjev operacijskih siste-

mov (primera sta emulatorja Wine in DOSBox), ki običajno preslikajo systemske klice enega sistema v drugega. Celoten računalniški sistem pa vključuje tudi programsko opremo oz. aplikacije, katerih pogosto ne emuliramo v celoti, ampak izvedemo le en del (primer so pregledovalniki dokumentov, ki so bili ustvarjeni z neko drugo aplikacijo). Nadalje, pri celoviti izvedbi za izboljšanje uporabniške izkušnje emuliramo še okolje samega sistema in seveda tudi vmesnik med okoljem in sistemom, pri čemer gre pri slednjem za poistovetenje izvorne izkušnje uporabe vhodno-izhodnih naprav, npr. prilagoditev razmerij zaslonske slike ali poustvarjanje izvornih šumov in zvokov, ki jih oddajajo naprave.

4.3 Notranji vpogled

Temelj emulacije računalnika je ustrezna tehnična izvedba navideznega stroja, ki oponaša delovanje izvorne arhitekture procesorja in pripadajoče strojne opreme. Pri tem gre predvsem za elemente, kot so procesor, registri, pomnilnik, strojni ukazi, vrste naslavljanja ipd. Osnovna izvedba izvajalnika navideznega stroja, torej komponenta emulatorja, ki izvaja ukaze gosta v okviru gostitelja, običajno temelji na tolmačenju. Naprednejša izvedba je možna s prevajanjem strojne kode gosta v ukaze, ki jih omogoča procesor gostitelja. Kadar sta si arhitekturi gosta in gostitelja podobni (npr. pripadata isti družini procesorjev), je ta način izredno učinkovit, saj gre pri prevajanju le za kopiranje ukazov. In nenazadnje, kadar sta si arhitekturi enaki in še nekaterih dodatnih pogojih [Popek and Goldberg, 1974], pa se gostovi ukazi lahko neposredno izvajajo na gostiteljevem procesorju. Podrobno obravnavo pristopov emulacije in virtualizacije najdemo v [Smith and Nair, 2005],



Slika 3: Nivoji emulacije računalniškega sistema [Guttenbrunner and Rauber, 2012]

obravnava računalniške arhitekture pa v [Hennessy and Patterson, 2003, Kodek, 2008]

Emulacija procesorja se običajno osredotoča le na programerju vidne lastnosti procesorja (registri, ukazi itd.). Izjemoma pa se emulirajo specifične značilnosti izvedbe samega procesorja (npr. časovno obnašanje signalov) ali pa nekatere nedokumentirane funkcionalnosti ipd.

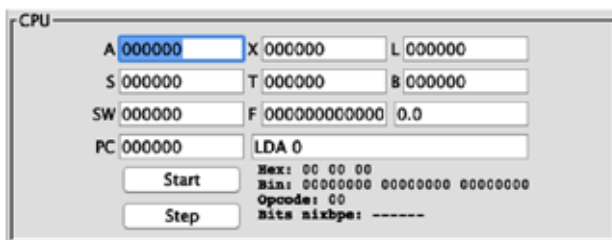
Emulator lahko nudi funkcionalnost notranjega vpogleda, kar pomeni, da omogoča opazovanje ključnih elementov modela emuliranega sistema. Z opazovanjem modela, pa emulacija pravzaprav postane simulacija, kot smo opisali zgoraj. Primer grafičnega vmesnika emulatorja SicSim/SicTools [Mihelič in Dobravec, 2015], ki omogoča vpogled v stanje procesorja, je na sliki 4, kjer je prikazan vpogled v programsko vidne registre in strojni ukaz, ki se trenutno izvaja.

Poleg vpogleda v sistem nekateri emulatorji celo omogočajo tudi spreminjanje elementov emuliranega sistema. Obe funkciji, tako vpogled v stanje, kot njegovo spreminjanje, sta lahko koristni pri digitalnem ohranjanju računalniških sistemov. Dober primer tega je npr. ohranjanje starodobnih redkih računalnikov, kjer je dostop do izvorne strojne opreme in dokumentov težaven. Vpogled v notranje stanje emulatorja uporabniku tako omogoča lažje in hitrejše spoznavanje izvornega računalniškega sistema in njegove arhitekture, pozitivno pripomore lahko tudi v izobraževalnem procesu.

Večina emulatorjev žal ne nudi notranjega vpogleda, saj njihov glavni namen ni študija in ohranjanje samega računalnika, ampak predvsem zagotavljanje uporabnosti in dostopnost celotnega računalniškega sistema.

4.4 Nadzor izvajanja

Notranjemu vpogledu komplementaren del emulatorja je nadzornik izvajalnega stroja emulatorja. Sem



Slika 4: Primer grafičnega vmesnika, ki omogoča vpogled v stanje procesorja in nadzor nad izvajalnikom.

sodijo predvsem osnovne funkcionalnosti, kot so zagon izvajalnika, prekinitvev in nadaljevanje izvajanja ter izvajanje po korakih. Med napredne funkcionalnosti sodijo funkcije ustvarjanja slik izvajanja (angl. snapshot), hibernacija oz. shranjevanje celotnega stanja stroja na disk in obnavljanje stanja iz diska.

Poleg zgoraj naštetih funkcionalnosti pa so možne tudi statistične oz. računovodske funkcionalnosti. Primeri teh so prikazi različnih kazalnikov izvajanja, kot so grafični okvirji na sekundo, število prebranih in zapisanih bajtov, statistika vhodno-izhodnih dogodkov itd.

Omenimo še, da je pri samem izvajanju zelo pomembna tudi hitrost izvajanja ukazov. V ta namen obstaja več različnih tehnik izvedbe izvajalnega dela navideznega stroja [Smith and Nair, 2005]. V okviru nadzora izvajalnika pa imamo lahko na voljo tudi nastavitev hitrosti. Primer tega najdemo v SicTools emulatorju [Mihelič in Dobravec, 2015], ki je implementiran v programskem jeziku Java s pomočjo časovnika oz. razreda Timer. Največja natančnost oz. resolucija tega časovnika ni zadostna, zato lahko uporabimo preprosto tehniko izvedbe več ukazov pri vsakem proženju časovnika, da dosežemo zadovoljivo hitrost.

4.5 Pomnilni mediji

Pomemben vidik pri digitalnem ohranjanju računalniških sistemov je tudi obravnava pomnilnih medijev. Pogosto uporabljan pomnilni medij iz druge polovice dvajsetega stoletja je disketa, primer katere najdemo na sliki 2 a). Skozi zgodovino je bilo razvitih več vrst disket (npr. razlike v fizični velikosti) in še več formatov zapisa podatkov na njih. Tehnika digitalnega ohranjanja disket je izdelava njihovih bitnih slik.

Za branje disket potrebujemo posebno bralno-pisalno napravo oz. enoto, imenovano disketnik. Žal pa disketne enote, ki so bile v uporabi pri osebni računalnikih, največkrat niso kompatibilne s starejšimi enotami drugih računalnikov. Poleg tega je magnetni zapis na disketah pogosto oslavljen zaradi zastarnosti. Posledično je izdelava bitnih slik lahko zelo zahtevno opravilo.

Pri digitalnem ohranjanju disket si lahko pomagamo z namenskimi bralniki, kot je npr. kryoflux naprava, ki je pravzaprav le prilagodljiv kontrolnik za klasično disketno enoto za osebni računalnik, katerega je moč konfigurirati na različne načine. Težave s formati razrešimo z ustreznim tehničnim znanjem (s področja obratnega inženirstva) in informacijami,

žal pa so diskete še vedno lahko v slabem stanju in posledično neberljive.

Na manjših mini računalnikih pa so se namesto disket pogosto raje uporabljale takrat vseprisotne in cenejše audio kasete z magnetnim trakom. Primera dveh kaset z igrama za mini računalnik ZX Spectrum najdemo na sliki 5. Osnovna različica omenjenega mini računalnika ni imela pripadajočega kasetnika, računalnik je podpiral preprosto povezavo kar z domačim hišnim kasetofonom. Ravno zaradi te raznolikosti vhodnih kasetnih naprav, je pri branju podatkov s kaset, pogosto potrebna fina nastavitvev bralne glave kasetnika. Shranjevanje na kasete tako nudi več desetletno obstojnost podatkov.

Fizično kopijo kasete je možno preprosto izdelati s kasetofonom, ki vsebuje dve bralno/pisalni enoti ali pa preko povezave dveh kasetofonov; gre za enak postopek kot je kopiranje glasbe, saj so podatki na kasetah shranjeni v obliki različnih piskov. Seveda takšna kopija vsebuje tudi morebitne napake, ki so prisotne na izvorni kaseti.

Druga možnost je izdelava digitalne kopije. To lahko naredimo s posebnimi programi, ki so seveda navadno na voljo le za originalni računalnik. V takem primeru seveda pride prav ustrezen emulator. Spomnimo še na programe, ki so na kaseti zapisani v posebnem formatu, katerega namen je običajno hitrejše nalaganje programa s t.i. *turbo nalagalniki*. Programi za izdelavo digitalne kopije, običajno ne razpoznajo takšnih formatov.

Podobno kot z disketami je s trdimi diski. Potrebno je dobro poznavanje datotečnih sistemov tako s fizičnega kot z logičnega vidika. Vsi smo vajeni hierarhične datotečne organiziranosti, zato pogosto pozabljamo, da je nekoč lahko bilo drugače. Na primer, računalnik Partner ima tako 10 datotečnih področij za hranjenje datotek, brez hierarhične organiziranosti.

Pri delujočih starih računalnikih lahko do pomnilnih medijev dostopamo tudi neposredno, pri tem pa moramo paziti, da obstoječih podatkov ne prepisemo ali celo uničimo. Najbolje je tako čim prej izdelati bitne slike pomnilnih medijev ali naprav. Dobra in v praksi preizkušena tehnika (na računalniku Partner [Horvat in Mihelič, 2018]), uporabna za delujoče starodobne računalnike, je izdelava posebnega programa, ki neposredno prebere vgrajeni fizični disk in njegovo vsebino pošlje na nek vmesnik (npr. RS-232). Na ta vmesnik se povežemo s sodobnim računalnikom in prebrano vsebino shranimo v ustrezen so-

doben format. Prednost te tehnike je, da kar najmanj posegamo v originalni sistem, in da je uporabna tudi v primeru (pogosto) nedelujočih disketnih enot.

4.6 Prikazovalne naprave

Prikazovalne naprave, ki vključujejo predvsem računalniške monitorje, so med najpomembnejšimi napravami z vidika digitalnega ohranjanja. Zraven sodijo še video kartice, katerih emulacija je ključna za uspešno celovito izvedbo. Pogosto emulatorji nudijo tudi možnost zajema zaslonske slike, kar je ena izmed pomembnejših funkcij digitalnega ohranjanja.

Starejši sistemi navadno temeljijo na tekstovnem prikazu. Pri tem je potrebno poistovetiti izvorno pisavo. Neposreden dostop do bralnega pomnilnika (ROM) kartice je mogoč s posebnimi elektronskimi bralnimi napravami in zahteva strokovno znanje, saj obstaja tudi nevarnost uničenja.

Drug nevsiljiv način je spet s pomočjo posebnega programa, ki zaporedoma izriše vse znake (v ustrezni povečavi), katere nato preprosto prerišemo (lahko ročno ali celo na nek bolj avtomatski način). Če računalnik podpira branje video pomnilnika, lahko znake kar od tam prepisemo v datoteko (in izvedemo njen prenos).

Pri emulaciji prikazovalnih naprav je težje simulirati njihovo notranje stanje, kot je npr. vrstično osveževanje starih zaslonov s katodno cevjo, zato včasih uberemo bližnjice, npr. sliko prikažemo kar na modernem zaslonu. Pri tem pa vseeno lahko emuliramo nekatere ostale značilnosti, kot je npr. svetlost zaslona, imitacija ogrevanja zaslona s katodno cevjo itd.



Slika 5: Kaseti

4.7 Ostale naprave

Emulacija tipkovnice je nujen del praktično uporabnega emulatorja. Najbolj pogosta izvedba je z uporabo moderne tipkovnice, pri čemer je potrebno izvesti preslikavo bralnih kod tipk iz moderne na starodobno tipkovnico. Dodatno imajo nekatere starodobne tipkovnice različne signalne lučke, ki jih ni mogoče preslikati, lahko pa jih namesto tega prikažemo preko grafičnega uporabniškega vmesnika.

Oglejmo si še primer zanimive tehnike, ki je bila uporabljena pri izvedbi emulatroja za računalnik Dialog, za katerega nismo imeli na voljo originalne tipkovnice, zato je bil velik izziv, kako dobiti vpogled v sam sistem. Predlaganih rešitev je bilo več: od predelave obstoječih tipkovnic do emulacije originalne tipkovnice preko Arduino komponent. Končno izvedena rešitev je bila predelava nalagalne bitne slike operacijskega sistema, tako je sistem namesto s tipkovnice bral kode tipk iz serijskih vrat, kamor se je vzpostavilo povezavo s sodobnim računalnikom in ustreznim terminalskim programom.

Starodobni računalniki podpirajo tudi nekatere druge vhodno-izhodne naprave, kot so npr. zaporedna in vzporedna vrata, miška, grafična tablica in tiskalnik. Navadno gre za zelo specifične naprave in načine izvedbe, posledično izvedba zopet zahteva veliko strokovnega znanja, čeprav programsko največkrat ni zahtevna. Emulacija tiskalnika se pogosto izvede s tiskanjem v datoteko.

4.8 Integracija z gostiteljem

Pomemben in zanimiv vidik izvedbe emulacije, še posebej v kontekstu digitalnega ohranjanja, je integracija z gostiteljem. Integracija z gostiteljem omogoča preprost prenos podatkov od gosta do gostitelja in tudi v nasprotni smeri, pri čemer lahko izkorišča sodobne možnosti, ki jih nudi gostitelj.

Funkcionalnosti, ki sodijo v ta sklop, so npr. zajem zaslonskih slik, funkcionalnost odložišča, deljenje map ipd. Zajem zaslonskih slik lahko naredimo na dva načina: neposredno z branjem gostovega zaslonskega pomnilnika in ustrezne pretvorbe v sodoben slikovni zapis ali posredno preko gostiteljeve funkcionalnosti zajema slike, saj smo že za sam prikaz slike morali izvesti branje gostovega zaslonskega pomnilnika.

Izvedba odložišča in njegovih funkcionalnosti kopiranja, rezanja in lepljenja je še posebej zanimiva, saj starodobni sistemi teh funkcionalnosti ne podpirajo. Delna izvedba je vseeno mogoča, saj lahko kopiranje

izvedemo z branjem zaslonskega pomnilnika, lepljenje pa s simuliranjem pritiskov tipk na emulirani tipkovnici.

4.9 Emulacija okolja

Za poistovetenje celostne izkušnje pri uporabi emulatorja je pomembna tudi pristnost oz. posnemanje izvornega okolja digitalnega artefakta. Starejši domači računalniki so kot prikazovalnik pogosto uporabljali zaslon na osnovi katodne cevi, ki potrebujejo nekaj sekund, da se ogrejejo in s tem dosežejo polno svetilnost. Učinek ogrevanja lahko preprosto imitiramo na sodobnih zaslonih, bolj zahtevno pa je posnemanje ukrivljenosti zaslona, prikaza slikovnih vrstic z ustrezno osveževalno frekenco ipd. K vzdušju pripomore tudi fotografija oz. slika izvornega artefakta, ki se npr. prikaže ob zagonu. Nekateri računalniki imajo poseben razpored ali pomen tipk, v teh primerih koristi tudi slika originalne tipkovnice.

Dokaj preprosto lahko izvedemo tudi specifične zvoke, ki so jih oddajali starodobni računalniki, npr. brnenje ventilatorjev, zvok pritiska tipke, zvok vrtenja trdih diskov in premikanja njihovih bralno/pisalnih glav. Po naših izkušnjah emulacija okolja veliko prispeva k pristnosti uporabniške izkušnje, tako npr. emulator Partnerja imitira ogrevanje zaslona, zagon trdega diska, zvočno oglašanje s piskanjem in utripanje lučk tipkovnice [Horvat and Mihelič, 2018].

4.10 Ostali vidiki

Med ostalimi vidiki najprej omenimo ovrednotenje emulacije. Teorija in praksa takšnega ovrednotenja sta obširno predstavljeni v preglednem članku [Duretec et al., 2015]. Nadalje v članku [Guttenbrunner and Rauber, 2012] avtorji predstavijo ogrodje za ovrednotenje evaluacije s testi za določanje stopnje posnemanja lastnosti izvornega sistema.

Med manj tehnične, a še vedno pomembne vidike, sodijo še odgovori na pravna vprašanja, kot so npr. ali sploh lahko emuliramo ali izvajamo obratni inženiring danega sistema, ne da bi pri tem kršili avtorske pravice? Pri tem je treba upoštevati avtorske pravice tako nad samim sistemom, posameznimi komponentami kot nad nameščeno programsko opremo. Podatki emuliranih sistemov (npr. bitna slika izvornega trdega diska in drugih pomnilnih medijev) lahko vsebujejo tudi osebne in druge občutljive podatke. Pred objavo takšnih podatkov je tako treba izvesti vsaj anonimizacijo podatkov.

5 SKLEP

V članku smo predstavili področje digitalnega ohranjanja, pri tem smo več pozornosti posvetili računalniški emulaciji, ki skupaj z muzejskim pristopom nudi celovito rešitev za ohranjanje digitalnih artefaktov. Večji del prispevka je posvečen opisu različnih vidikov računalniške emulacije, ki so uporabni za digitalno ohranjanje. Opis temelji na izkušnjah, pridobljenih s sodelovanjem v več različnih projektih digitalnega ohranjanja starodobnih računalnikov.

Emulatorja računalnikov Gorenje Dialog in Iskra-Delta Partner, na katerih temelji večina predstavljanih tehnik in izkušenj, sta (po našem vedenju) prva emulatorja slovenskih starodobnih računalnikov. Primerov takšnih računalnikov v slovenskem prostoru je še več, npr. IskraDelta Triglav, dela za prihodnost je tako še dovolj. Prav tako bi se obravnava lahko razširila na širši jugoslovanski prostor, katerega del smo nekoč Slovenci bili. Pri tem bi bilo nujno povezovanje z ustreznimi deležniki tega prostora.

ZAHVALA

Avtorja se zahvalujeta udeležencem projekta Slovenska računalniška dediščina (Študentski inovativni projekti za družbeno korist), katerega rezultati so predstavljeni na <https://jurem.github.io/SloRaDe/>. Dodatna zahvala gre tudi Mateju Horvatu za razvoj in izvedbo emulatorjev.

LITERATURA

- [1] [Bezek et al., 2012] Bezek, P., Čosić, V., Rosina, D., Špetič, A., Vrničar, I., and Zornada, G. (2012). *Goto 1982: razvoj računalniške kulture na Slovenskem*. Ljubljana: Muzej novejšje zgodovine Slovenije.
- [2] [Bufon, 2018] Bufon, V. M. (2018). Iskra delta – od kotlovnice do industrijskega podjetja: Ob 40. obletnici ustanovitve delte. *Uporabna informatika*, XXVI(4):153–159.
- [3] [Carta, 2017] Carta, G. (2017). Metadata and video games emulation: an effective bond to achieve authentic preservation? *Records Management Journal*, 27(2).
- [4] [Duretec et al., 2015] Duretec, K., Kulmukhametov, A., Rauber, A., and Becker, C. (2015). Benchmarks for digital preservation tools. In *Proceedings of the 12th International Conference on Digital Preservation*, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- [5] [Flere, 2000] Flere, S. (2000). *Sociološka metodologija. Temelji družboslovnega raziskovanja*. Maribor: Pedagoška fakulteta.
- [6] [Guttenbrunner, 2007] Gutenbrunner, M. (2007). Digital preservation of console video games. [Guttenbrunner and Rauber, 2012] Gutenbrunner, M. and Rauber, A. (2012). A measurement framework for evaluating emulators for digital preservation. *ACM Trans. Inf. Syst.*, 30(2).
- [7] [Hennessy and Patterson, 2003] Hennessy, J. and Patterson, D. (2003). *Computer Architecture - A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann.
- [8] [Horvat and Mihelič, 2018] Horvat, M. and Mihelič, J. (2018). Emulacija računalnika Iskra Delta Partner. *Elektrotehniški vestnik*, 85:185–191.
- [9] [Knez, 2010] Knez, D. (2010). Fundus: razvoj in uporaba sistema za dokumentiranje zbirk oddelka za zgodovino in uporabno umetnost v NMS. In *Zbornik 11. zborovanja Slovenskega muzejskega društva*, pages 78–87.
- [10] [Kodek, 2008] Kodek, D. (2008). *Arhitektura in organizacija računalniških sistemov*. Bi-tim.
- [11] [Lorie, 2001] Lorie, R. A. (2001). Long term preservation of digital information. In *Proceedings of the 1st ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries*, JCDL '01, page 346–352, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [12] [Mihelič and Dobravec, 2015] Mihelič, J. and Dobravec, T. (2015). SicSim: A simulator of the educational SIC/XE computer for a system-software course. *Computer Applications in Engineering Education*, 23:137–146.
- [13] [Ministrstvo za kulturo Republike Slovenije, 2013] Ministrstvo za kulturo Republike Slovenije (2013). Smernice za zajem, dolgotrajno ohranjanje in dostop do vsebin kulturne dediščine v digitalni obliki.
- [14] [Online Computer Library Center, 2006] Online Computer Library Center, I. (2006). *OCLC Digital Archive Preservation Policy and Supporting Documentation*.
- [15] [Popek and Goldberg, 1974] Popek, G. J. and Goldberg, R. P. (1974). Formal requirements for virtualizable third generation architectures. *Commun. ACM*, 17(7):412–421.
- [16] [Ragin, 2007] Ragin, C. C. (2007). *Družboslovno raziskovanje. Enotnost in raznolikost metode*. Ljubljana: Fakulteta za družbene vede.
- [17] [Simikič, 2002] Simikič, A. (2002). Dokumentacijski sistem v Slovenskem etnografskem muzeju. *Etnolog*, 12(1):317–326.
- [18] [Smith and Nair, 2005] Smith, J. E. and Nair, R. (2005). *Virtual Machines: Versatile Platforms for Systems and Processes*. Morgan Kaufmann.
- [19] [Strodl et al., 2007] Strodl, S., Becker, C., Neumayer, R., and Rauber, A. (2007). How to choose a digital preservation strategy: Evaluating a preservation planning procedure. In *Proceedings of the 7th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries*, JCDL '07, page 29–38, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [20] [van der Hoeven et al., 2007] van der Hoeven, J., Lohman, B., and Verdegem, R. (2007). Emulation for digital preservation in practice: The results. *The International Journal of Digital Curation*, 2(2):123–132.
- [21] [von Suchodoletz et al., 2013] von Suchodoletz, D., Rechert, K., and Valizada, I. (2013). Towards emulation-as-a-service: Cloud services for versatile digital object access. *The International Journal of Digital Curation*, 8(1):131–142.
- [22] [Webb, 2003] Webb, C. (2003). Guidelines for the preservation of the digital heritage.
- [23] [Škrubej, 2008] Škrubej, J. (2008). *Hladna vojna in bitka za informacijsko tehnologijo*. Pasadena.

■

Jurij Mihelič je leta 2006 doktoriral iz računalniških znanosti na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani, kjer trenutno poučuje kot docent. Njegova raziskovalna področja vsebujejo inženiring algoritmov, sistemsko programsko opremo, operacijske sisteme, izvajalna okolja in programske jezike.

■

Mojca Ferle je leta 1989 diplomirala na Filozofski fakulteti Univerze v Ljubljani iz etnologije in sociologije kulture. Od leta 1991 je zaposlena v Mestnem muzeju Ljubljana, Muzeju in galerijah mesta Ljubljane kot kustodinja za urbano etnologijo in skrbnica zbirke za tekstil, leta 2016 je pridobila naziv muzejska svetnica. Poleg zanimanja za etnologijo meščanstva večkrat sodeluje v delovnih skupinah za muzejsko dokumentacijo in terminologijo; sodelovala je tudi kot delovna mentorica pri študentskih projektih FRI.

■ Nenadzorovana detekcija rakavih regij v histoloških slikah s pomočjo preslikav slika-v-sliko

Dejan Štepec^{1,2*}, Danijel Skočaj²

¹ XLAB d.o.o., Pot za Brdom 100, 1000, Ljubljana, Slovenia

² University of Ljubljana, Faculty of Computer and Information Science, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, Slovenia
dejan.stepec@xlab.si

Izveček

V delu predstavimo nenadzorovan pristop za detekcijo vizualnih anomalij v medicinskih slikah, kjer je cilj odkriti vizualne značilnosti, ki pomembno odstopajo od pričakovane normalne predstavitve. Glede na naravo pojava anomalij in kompleksnih procesov, ki jih tvorijo, je težko pridobiti ekspertno označene podatke. Pridobitev tako označenih podatkov je še posebej zahtevna na biomedicinskem področju, kjer nam take podatke lahko zagotovijo zgolj domenski eksperti. Poleg tega so podatki na biomedicinski domeni veliko bolj kompleksni tako z vidika njihove predstavitve kot dimenzionalnosti. V tem delu ta problem naslovimo na nenadzorovan način z uporabo metode za preslikavo slika-v-sliko, ki pomembno izboljša trenutne nenadzorovane pristope in deluje z zmogljivostjo, ki je podobna nadzorovanemu pristopu.

Ključne besede: detekcija anomalij, nenadzorovano učenje, globoko učenje, generativne nasprotniške mreže, preslikave slika-v-sliko, digitalna patologija

Abstract

Detection of visual anomalies refers to the problem of finding patterns in different imaging data that do not conform to the expected visual appearance, and is a widely studied problem in different domains. Due to the nature of anomaly occurrences and underlying generating processes, it is hard to characterize them and obtain labelled data. Obtaining labelled data is especially difficult in biomedical applications, where only trained domain experts can provide labels, which are often diverse and complex to a large degree. The recently presented approaches for unsupervised detection of visual anomalies omit the need for labelled data and demonstrate promising results in domains where anomalous samples significantly deviate from the normal appearance. Despite promising results, the performance of such approaches still lags behind supervised approaches and does not provide a universal solution. In this work, we present an image-to-image translation-based framework that significantly surpasses the performance of existing unsupervised methods and approaches the performance of supervised methods in a challenging domain of cancerous region detection in histology imagery.

Keywords: Anomaly detection, unsupervised learning, deep-learning, generative-adversarial-networks, image-to-image translation, digital pathology

1 INTRODUCTION

Anomaly detection represents an important process of determining instances that stand out from the rest of the data. Detecting such occurrences in different data modalities has wide applications in different domains such as fraud detection, cyber-intrusion, industrial in-

spection, and medical imaging [Chandola et al., 2009]. Detecting anomalies in high-dimensional data (e.g. images) is a particularly challenging problem that has recently seen a significant rise of interest, due to the prevalence of deep-learning-based methods.

* Partially supported by the EU Horizon 2020 research project iPC (826121).

The success of current deep-learning-based methods has mostly relied on the abundance of available data. Anomalies generally occur rarely, in different shapes and forms, and are thus extremely hard or even impossible to label.

Supervised deep-learning-based anomaly detection approaches have seen great success in different industrial and medical application domains [Ehteshami Bejnordi et al., 2017, Tabernik et al., 2019]. The success of such methods is the most evident in the domains with well-known characterization (and possibly a finite set) of the anomalies and abundance of labeled data. Specific to the detection of visual anomalies, we usually also want to localize the actual anomalous region in the image. Obtaining such detailed labels to learn supervised models is a costly process and in many cases also impossible. There is an abundance of data available in the biomedical domain, but it is usually of much higher complexity and diversity. Domain complexity prevents large-scale crowd annotation efforts and only trained biomedical experts can usually annotate such data.

Weakly supervised approaches address such problems by requiring only image-level labels (e.g. disease present or not) and are able to detect and delineate anomalous regions solely from such weakly labeled data, without the need for detailed pixel or patch-level labels [Campanella et al., 2019]. On the contrary, few-shot approaches reduce the number of required labeled samples to the least possible amount [Tian et al., 2020].

In an unsupervised setting, only normal appearance samples are available (e.g. healthy, defect-free), which are usually available in larger quantities and are easier to obtain. Deep generative methods, in a form of autoencoders (AE) or generative adversarial networks (GAN), have been recently applied to the problem of unsupervised detection of visual anomalies and have shown promising results in different industrial and medical application domains [Schlegl et al., 2019, Baur et al., 2020b, Baur et al., 2020a, Bergmann et al., 2020]. Current approaches require normal appearance samples for training, in order to detect and segment deviations from that normal appearance, without the need for labeled data. They usually model normal appearance with low-resolution AE or GAN models and the overall performance still lags significantly behind supervised approaches.

In this work, we present a novel high-resolution image-to-image translation-based method for unsupervised detection of visual anomalies that significantly surpasses the performance of existing unsupervised approaches and closes the gap towards the supervised counterparts. We particularly focus on a challenging problem of cancerous region detection from gigapixel histology imagery, which has been already addressed in a supervised [Ehteshami Bejnordi et al., 2017], as well as in a weakly supervised setting [Campanella et al., 2019]. Extremely large histology imagery (patch-based processing) and the highly variable appearance of the different tissue regions represent a unique challenge for existing unsupervised approaches.

2 IMAGE-TO-IMAGE TRANSLATION AS A PRETEXT FOR ANOMALY DETECTION

Inspired by the multimodal image-to-image translation methods [Huang et al., 2018, Lee et al., 2020], we propose an example guided image translation method (Figure 1) [Štepec and Skočaj, 2021], which in comparison with SteGANomaly [Baur et al., 2020a] enables anomaly detection without cycle-reconstruction during the inference, specially crafted intermediate domain distribution, and Gaussian filtering. Similar to MUNIT [Huang et al., 2018], we assume that the latent space of images can be decomposed into content and style spaces. We also assume that images in both domains share a common content space C , as well as style space S (i.e. they both come from the same **healthy** domain). This differs from MUNIT [Huang et al., 2018], where style space is not shared, due to semantically different domains X and Y . Similar to MUNIT [Huang et al., 2018], our translation model consists out of encoder E_{ij} and decoder G_j networks for each space $i \in \{C, S\}$ and domains $j \in \{X, Y\}$. Those subnetworks are used for autoencoding, as well as cross-domain translation, by interchanging encoders and decoders from different domains. Style latent codes s_x and s_y are randomly drawn and additionally transformed by a multilayer perceptron (MLP) network f for a cross-domain translation. Randomness addresses the memorization effect, large present in autoencoder-based anomaly detection approaches.

During anomaly detection (Figure 1), an input image x is encoded with E_{cx} to produce content vector c_x , which is then joined with the style code s_y

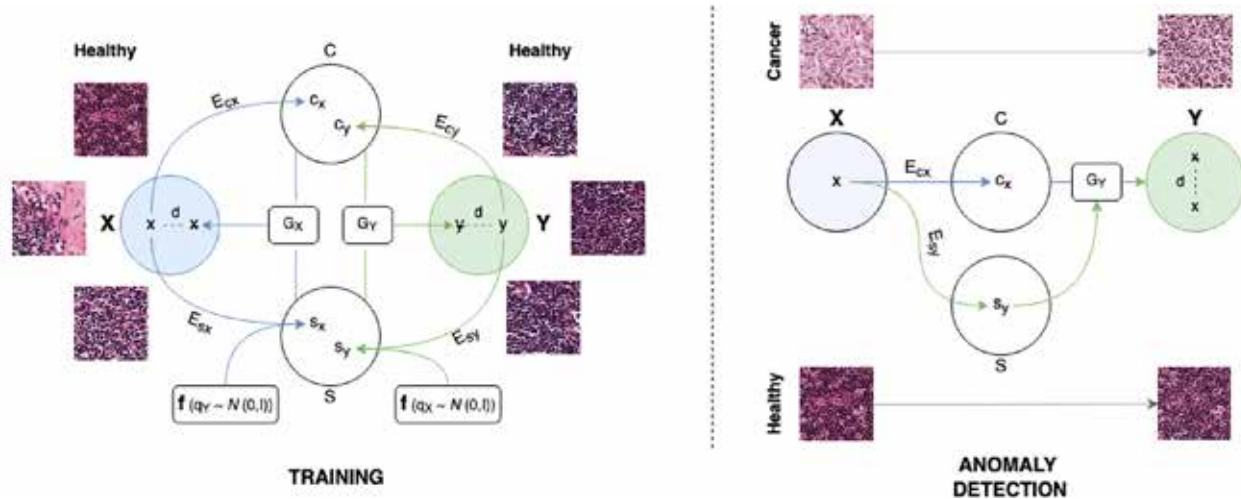


Figure 1: Our proposed unsupervised anomaly detection method, based on the image-to-image translation. We disentangle a latent space into shared content and style spaces, implemented via domain-specific (blue and green colors) encoders E and decoders G. Anomaly detection is performed with an example-guided image translation. Best viewed in digital version with zoom.

extracted from the original image x , with the style encoder E_{s_y} of the target domain Y . This presents an input to decoder G_y which generates y . This is basically an example guided image translation, used also in MUNIT [Huang et al., 2018] and DRIT++ [Lee et al., 2020] methods. Content-style space decomposition is especially well suited for histopathological analysis due to different staining procedures, which causes the samples to significantly deviate in their visual appearance. Style-guided translation ensures that the closest looking normal appearance is found, taking into account also the staining appearance. We then measure an anomaly score using distance metric d (e.g. perceptual LPIPS distance [Zhang et al., 2018] or Structure Similarity Index (SSIM) [Wang et al., 2004]), between the original image x and its reconstruction*.

3 EXPERIMENTS AND RESULTS

3.1 Histology Imagery Dataset.

We address the aforementioned problems of anomaly detection pipeline on a challenging domain of digital pathology, where whole-slide histology images (WSI) are used for diagnostic assessment of the spread of cancer. This particular problem was already addressed in a supervised setting [Ehteshami Bejnordi et al., 2017], as a competition², with provided

clinical histology imagery and ground truth data. A training dataset with ($n=110$) and without ($n=160$) labeled cancerous regions (used as anomalies) is provided, as well as a test set of 129 images (49 with and 80 without labeled cancerous regions). Raw histology imagery, presented in Figure 2a, is first preprocessed, in order to extract the tissue region (Figure 2b). We used the approach from IBM³, which utilizes a combination of morphological and color space filtering operations. Patches of 512×512 are then extracted from the filtered image and filtered according to the tissue (Figure 2c) and cancer (Figure 2d) coverage. We only use patches with tissue and cancerous region coverage over 90 % (i.e. green patches). With this procedure, we produce a dataset of healthy (i.e. no overlap with cancerous label) and cancerous patches (i.e. > 90% overlap with cancerous label).

We train the models on random 80,000 healthy tissue patches extracted from a training set of healthy and cancerous (coverage=0% - cancerous samples also contain healthy tissue) WSIs ($n=270$). The baseline supervised approach is trained on randomly extracted healthy ($n=25,000$) and cancerous patches ($n=25,000$). The methods (i.e. supervised baseline and proposed ones) are evaluated on healthy ($n=7673$) and cancerous ($n=16,538$) patches extracted from a cancerous test set of WSIs ($n=49$). We mix healthy training patches of both cohorts (i.e. healthy patches

² <https://camelyon16.grand-challenge.org/>
³ <https://github.com/CODAIT/deep-histopath>

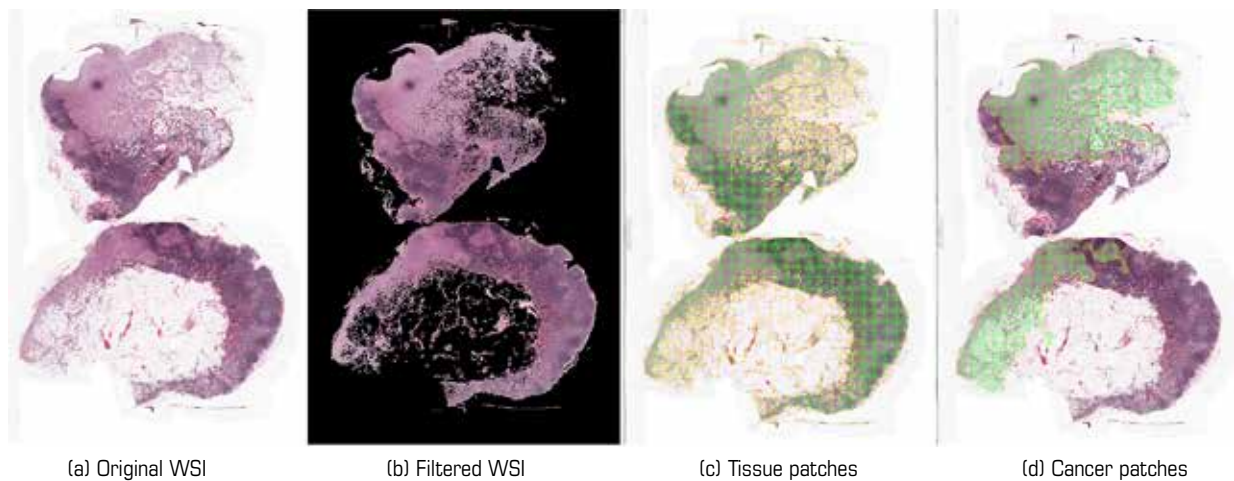


Figure 2: Preprocessing of the original WSI presented in a) consists of b) filtering tissue sections and c) extracting tissue patches, based on the tissue (green $\geq 90\%$, orange $\leq 10\%$ and yellow in-between) and d) cancerous region coverage (green $\geq 90\%$, orange $\leq 30\%$ and yellow in-between). Best viewed in a digital version with zoom.

from cancerous WSIs) in order to demonstrate the robustness of the proposed approach against a small percentage of possibly contaminated healthy appearance data (e.g. non-labeled isolated tumor cells in cancerous samples).

3.2 Unsupervised Anomaly Detection.

We compare the proposed method against GAN-based f-AnoGAN [Schlegl et al., 2019] and StyleGAN2 [Karras et al., 2020] methods. Both methods separately model normal appearance and perform latent space mapping for anomaly detection. The f-AnoGAN method models normal appearance using Wasserstein GANs (WGAN) [Arjovsky et al., 2017], which is limited to a resolution of 64^2 and uses an encoder-based fast latent space mapping approach. The StyleGAN2 method enables high-resolution image synthesis (up to 1024^2) and also implements an iterative optimization procedure, based on Learned Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS) [Zhang et al., 2018] distance metric. We evaluate the performance

of the proposed and StyleGAN2 methods on patches of 512^2 , while center-cropped 64^2 patches are used for the f-AnoGAN method. Additionally, we compare the performance against the supervised DenseNet-121 [Huang et al., 2017] baseline model, trained and evaluated on 512^2 patches. We evaluate the proposed method using Structural Similarity Index Measure (SSIM) [Wang et al., 2004] and LPIPS reconstruction error metrics as an anomaly score. We use the same metrics (i.e. SSIM and LPIPS) as also as an alternative to the original f-AnoGAN anomaly score implementation, as well as to measure StyleGAN2 reconstruction errors.

We first evaluate the methods by inspecting the distribution of anomaly scores across healthy and cancerous patches, as presented in Figure 3. We compare our proposed approach (Figures 3a and 3b) against f-AnoGAN (Figure 3c) and StyleGAN2 (Figure 3d) methods and report significantly better distribution disentanglement between healthy and cancerous patches.

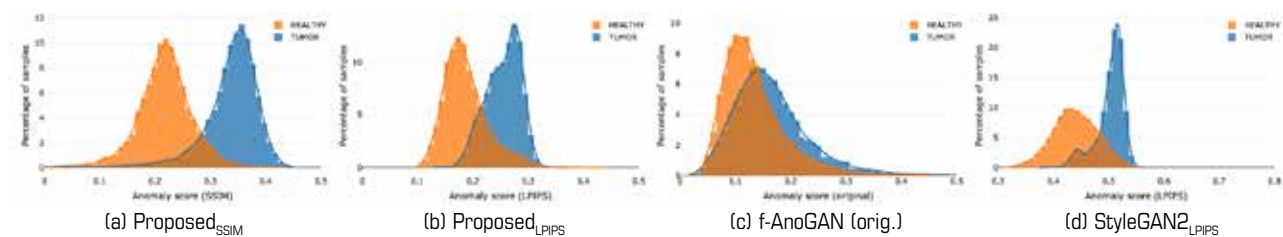


Figure 3: Distribution of anomaly scores on healthy and cancerous histology imagery patches (a) for the proposed method (SSIM metric), (b) proposed method (LPIPS metric), (c) f-AnoGAN (original metric) and (d) StyleGAN2 (LPIPS metric). Results for the proposed and StyleGAN2 methods are reported for 5122 patches, while 642 patches are used for f-AnoGAN.

The area under the ROC curve (AUC) and Average Precision (AP) scores are reported in Table 1 for all the methods and different anomaly scores. We also report F1 and classification accuracy measures, calculated at the Youden index of the ROC curve. We notice that the performance of the proposed method approaches the performance of the supervised baseline in terms of both reconstruction error metrics (i.e. LPIPS and SSIM). The performance of the f-AnoGAN significantly improves using SSIM and LPIPS metrics, in comparison with the originally proposed anomaly score. This shows the importance of the selection of the appropriate reconstruction error metric. The StyleGAN2 method shows good distribution disentanglement using the LPIPS distance metric, while the SSIM metric fails to capture any significant differences between the two different classes (i.e. healthy and anomalous). The proposed method demonstrates consistent performance across both anomaly score metrics, as well as different evaluation measures.

Table 1: **Performance statistics (F1, Classification Accuracy - CA) calculated at Youden index of Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the corresponding area under the ROC curve (AUC) and Average Precision (AP) scores summarizing ROC and Precision-Recall (PR) curves.**

	AUC	AP	F1	CA
Supervised	0.954	0.974	0.925	0.901
Proposed (SSIM)	0.947	0.976	0.920	0.895
Proposed (LPIPS)	0.900	0.914	0.886	0.847
StyleGAN2 (LPIPS)	0.908	0.940	0.872	0.836
StyleGAN2 (SSIM)	0.580	0.711	0.674	0.588
f-AnoGAN (original)	0.650	0.443	0.502	0.637
f-AnoGAN (SSIM)	0.887	0.916	0.886	0.846
f-AnoGAN (LPIPS)	0.865	0.902	0.875	0.830

4 CONCLUSION

In this work, we presented an image-to-image translation-based unsupervised approach that significantly surpasses the performance of existing GAN-based unsupervised approaches for the detection of visual anomalies in histology imagery and also approaches the performance of supervised methods. The method is capable of closely reconstructing presented healthy histology tissue samples, while unable to reconstruct cancerous ones and is thus able to detect such samples with an appropriate visual distance measure. The image-to-image translation-

-based framework offers a promising multi-task platform for a wide range of problems in the medical domain and can be now further extended with the capabilities for anomaly detection and applied to the completely new set of domains where labeled data is hard to obtain. Additional research is needed to investigate effectiveness in other biomedical modalities, as well as to exploit the benefits of using such a framework in a multi-task learning setting.

REFERENCES

- [1] [Arjovsky et al., 2017] Arjovsky, M., Chintala, S., and Bottou, L. (2017). Wasserstein generative adversarial networks. In *ICML*, pages 214–223. PMLR.
- [2] [Baur et al., 2020a] Baur, C., Graf, R., Wiestler, B., Albarqouni, S., and Navab, N. (2020a). Steganomaly: Inhibiting cycle-gan steganography for unsupervised anomaly detection in brain mri. In *MICCAI*, pages 718–727. Springer.
- [3] [Baur et al., 2020b] Baur, C., Wiestler, B., Albarqouni, S., and Navab, N. (2020b). Scale-space autoencoders for unsupervised anomaly segmentation in brain mri. In *MICCAI*, pages 552–561. Springer.
- [4] [Bergmann et al., 2020] Bergmann, P., Fauser, M., Sattlegger, D., and Steger, C. (2020). Uninformed students: Student-teacher anomaly detection with discriminative latent embeddings. In *CVPR*, pages 4183–4192.
- [5] [Campanella et al., 2019] Campanella, G., Hanna, M. G., Geneslaw, L., Mirafior, A., Silva, V. W. K., Busam, K. J., Brogi, E., Reuter, V. E., Klimstra, D. S., and Fuchs, T. J. (2019). Clinical-grade computational pathology using weakly supervised deep learning on whole slide images. *Nature medicine*, 25(8):1301–1309.
- [6] [Chandola et al., 2009] Chandola, V., Banerjee, A., and Kumar, V. (2009). Anomaly Detection: A Survey. *ACM Comput. Surv.*, 41(3):15:1–15:58.
- [7] [Ehteshami Bejnordi et al., 2017] Ehteshami Bejnordi, B., Veta, M., Johannes van Diest, P., van Ginneken, B., Karssemeijer, N., Litjens, G., van der Laak, J. A. W. M., and the CAMELYON16 Consortium (2017). Diagnostic Assessment of Deep Learning Algorithms for Detection of Lymph Node Metastases in Women With Breast Cancer. *JAMA*, 318(22):2199–2210.
- [8] [Huang et al., 2017] Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., and Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In *CVPR*, pages 4700–4708.
- [9] [Huang et al., 2018] Huang, X., Liu, M.-Y., Belongie, S., and Kautz, J. (2018). Multimodal unsupervised image-to-image translation. In *ECCV*, pages 172–189.
- [10] [Karras et al., 2020] Karras, T., Laine, S., Aittala, M., Hellsten, J., Lehtinen, J., and Aila, T. (2020). Analyzing and improving the image quality of stylegan. In *CVPR*, pages 8110–8119.
- [11] [Lee et al., 2020] Lee, H.-Y., Tseng, H.-Y., Mao, Q., Huang, J.-B., Lu, Y.-D., Singh, M., and Yang, M.-H. (2020). Dri++: Diverse image-to-image translation via disentangled representations. *International Journal of Computer Vision*, pages 1–16.
- [12] [Schlegl et al., 2019] Schlegl, T., Seeböck, P., Waldstein, S. M., Langs, G., and Schmidt-Erfurth, U. (2019). f-AnoGAN: Fast Unsupervised Anomaly Detection with Generative Adversarial Networks. *Medical Image Analysis*, 54:30–44.

- [13] [Štepec and Skočaj, 2021] Štepec, D. and Skočaj, D. (2021). Unsupervised detection of cancerous regions in histology imagery using image-to-image translation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 3785–3792.
- [14] [Tabernik et al., 2019] Tabernik, D., Šela, S., Skvarč, J., and Skočaj, D. (2019). Segmentation-Based Deep-Learning Approach for Surface-Defect Detection. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- [15] [Tian et al., 2020] Tian, Y., Maicas, G., Pu, L. Z. C. T., Singh, R., Verjans, J. W., and Carneiro, G. (2020). Few-shot anomaly detection for polyp frames from colonoscopy. In *MICCAI*, pages 274–284. Springer.
- [16] [Wang et al., 2004] Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., and Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4):600–612.
- [17] [Zhang et al., 2018] Zhang, R., Isola, P., Efros, A. A., Shechtman, E., and Wang, O. (2018). The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric. In *CVPR*, pages 586–595.

■

Dejan Štepec is a Lead Data Scientist at XLAB d.o.o. and a Ph.D. student at the Faculty of Computer and Information Science at the University of Ljubljana. He completed his master's studies at the University of Ljubljana in 2017. His main research interests lie in the fields of computer vision and machine learning. He is currently mostly focusing on advancing the field of digital pathology with approaches that require as little labeled data as possible.

■

Danijel Skočaj is an associate professor at the University of Ljubljana, Faculty of Computer and Information Science. He is the head of the Visual Cognitive Systems Laboratory. He obtained a Ph.D. in computer and information science from the University of Ljubljana in 2003. His main research interests lie in the fields of computer vision, machine learning, and cognitive robotics.

Detekcija manipulacij za ohranjanje zasebnosti mehkih atributov na slikah obraza

Peter Rot^{1,2}, Peter Peer², Vitomir Štruc¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

²Fakulteta za računalništvo in informatiko, Večna pot 113, 1000 Ljubljana

peter.rot@fe.uni-lj.si, peter.peer@fri.uni-lj.si, vitomir.struc@fe.uni-lj.si

Izvleček

V strokovni literaturi se vse pogosteje pojavljajo potrebe po metodah za zagotavljanje zasebnosti v slikovnih podatkih. Na področju analize obrazov so raziskovalci predlagali metode, ki preslikajo sliko obraza tako, da je samodejno luščenje mehkih biometričnih lastnosti oteženo, obenem pa je vizualni videz slike podoben izvorni sliki. V tem članku predlagamo nov detekcijski postopek, ki zaznava, ali je bila slika spremenjena s tovrstnimi metodami. Postopek temelji na dejstvu, da razvrščevalnik mehkih biometričnih lastnosti tipično vrne različen rezultat za zaščiteno sliko in za sliko, ki je obdelana s postopkom za obnavljanje slike. Z eksperimenti pokažemo, da lahko to razliko uporabimo za detekcijo sprememb na sliki, ki so posledica uporabe metod za zaščito zasebnosti. Prednost naše metode je, da ne potrebuje znanja o uporabljeni metodi za zaščito zasebnosti. Detektor ovrednotimo na štirih metodah za ohranjanje zasebnosti mehkih atributov in na treh raznovrstnih zbirkah slik obrazov. Rezultati kažejo, da ima predlagan postopek vrsto prednosti pred konkurenčnimi rešitvami in da z visoko natančnostjo detektira manipulirane slike.

Ključne besede: analiza obraza, globoko učenje, mehke biometrične značilnosti, zasebnost

Abstract

In scientific literature, there is a growing need for methods to ensure the privacy in digital images. In the field of face analytics, researchers have proposed privacy-preserving techniques which transform face images in such a way that the automatic extraction of soft-biometrics (e.g., gender) is prevented, while the visual appearance gets minimally degraded. We present a novel technique to detect whether or not an image was manipulated with such privacy-preserving techniques. Our detector exploits the fact that the soft-biometric classifier gives different results for privacy-enhanced images and their reconstructed versions. In our experiments, we have demonstrated that this difference can be exploited to detect whether an image was privacy-enhanced. The advantage of our method is that the used privacy-enhancing technique does not need to be known in advance (black-box scenario). Our approach is evaluated considering four privacy-enhancing techniques for soft-biometrics on three versatile face datasets. The results show that our approach has a number of advantages over competing techniques and that it detects privacy-enhancement with high accuracy.

Keywords: Face analytics, deep learning, soft-biometrics, privacy

1 UVOD

Nedaven napredek na področju računalniškega vida je izboljšal zmogljivosti sistemov za avtomatsko analizo obraza. S sodobnimi sistemi je možno povezati sliko obraza z identiteto posameznika in izluščiti obrazne lastnosti, kot so spol, starost, etnična pripadnost ali sorodstvena razmerja [Dantcheva et al., 2015]. Tehnologija se uporablja v mnogih aplikaci-

jah, npr. za zagotavljanje varnosti, kontrolo mej, preiskovanje kaznivih dejanj in za analize na socialnih omrežjih. Kljub številnim pozitivnim vidikom je možno tovrstne tehnologije za analizo biometričnih podatkov zlorabiti, kar močno ogroža zasebnost posameznikov [Meden et al., 2021]. Zato raziskovalci razvijajo mehanizme za zaščito zasebnosti [Mirjalili et al., 2019a, Mirjalili et al., 2020], ki bi hkrati zagotovili

i) uporabnost biometričnih podatkov in *ii*) ustrezen nivo zasebnosti uporabnikov. Zanimiva podskupina tovrstnih mehanizmov, s katero se ukvarjamo v tem delu, so tehnike za ohranjanje zasebnosti mehkih biometričnih značilnosti (tj. starost, spol, etnična pripadost ipd.), ki hkrati skušajo *i*) otežiti avtomatsko analizo obraznih značilnosti in *ii*) ohraniti vizualno podobo slike. Take tehnike so v praksi uporabne predvsem pri aplikacijah za deljenje slik ali na socialnih omrežjih, saj onemogočajo nezaželene avtomatske analize brez privolitve uporabnikov za namene ciljnega oglaševanja, demografskih analiz, diskriminacije in podobno.

Kljub številnim tehnikam za ohranjanje zasebnosti [Mirjalili et al., 2018, Mirjalili et al., 2019b] se mnoge zanašajo na to, da napadalec ne bo poskušal rekonstruirati zaščitene informacije [Rot et al., 2021]. V tem delu s pomočjo rekonstrukcije slike, ki izniči učinek metode za zaščito zasebnosti, želimo zaznavati, ali je bila slika obraza manipulirana z metodo za zaščito zasebnosti ali ne. Razumevanje, do katere mere je možno zaznati takšne manipulacije, je v praksi pomembno za uporabnike metod za zaščito zasebnosti, saj s tem spoznajo omejitve uporabljenih metod. Hkrati je to razumevanje pomembno za ponudnike storitev, ki upravičeno želijo zanesljivo izluščiti mehke biometrične značilnosti z avtomatskim postopkom. V tovrstnih sistemih bi bile lahko slike, na katerih je zaznana manipulacija, zavrnjene ali označene za bolj podroben nadaljnji pregled.

2 SORODNA DELA

2.1 Ohranjanje zasebnosti mehkih obraznih atributov

Raziskovalci so predlagali številne metode [Chhabra et al., 2018, Mirjalili et al., 2020], ki s spreminjanjem slikovnih elementov na sliki obraza otežijo avtomatsko analizo mehkih biometričnih značilnosti. Dodaten cilj je ohraniti zmožnost avtomatske verifikacije osebe. Avtorji tehnike SAN [Mirjalili et al., 2018] so predlagali samo-kodirnik, ki temelji na konvolucijski nevronske mreži. Izboljšana verzija SAN je FlowSAN [Mirjalili et al., 2019b], s katero avtorji zvišajo raven splošne uporabnosti za druge razpoznavalnike mehkih atributov (tj. kako dobro metoda generalizira), ki niso bili vključeni v fazo učenja. Avtorji *k*-AAP [Chhabra et al., 2018] so predlagali tehniko, pri kateri se s pomočjo nasprotniških primerov da zaščititi množico več obraznih atributov. Ideja, da se z nasprotni-

škimi primeri da pretentati razvrščevalnik mehkih biometričnih značilnosti, je predstavljena tudi v delu [Rozsa et al., 2019].

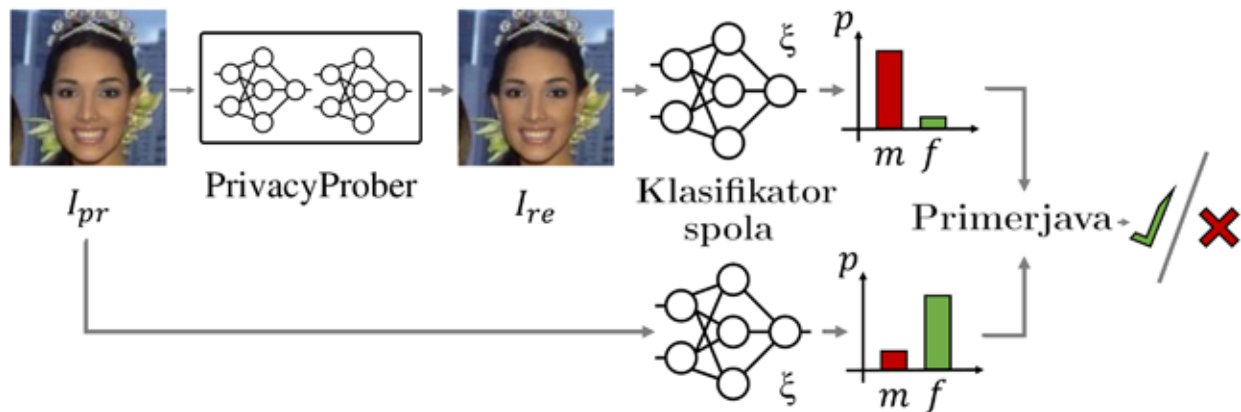
Raziskovalci [Rot et al., 2021] so demonstrirali, da z rekonstrukcijo slike obraza lahko izničimo učinek tehnik za ohranjanje zasebnosti. V tem delu rekonstrukcijo slike uporabimo za detekcijo, ali je bila na sliki uporabljena tehnika za ohranjanje zasebnosti ali ne.

2.2 Detekcija manipulacij za ohranjanje zasebnosti

Detekcija manipulacij za ohranjanje zasebnosti mehkih biometričnih značilnosti je nov problem, ki v odprti literaturi še ni bil naslovljen. Čeprav je zaznava tovrstnih manipulacij delno povezana z nasprotniški primeri [Cennamo et al., 2019, Meena and Tyagi, 2019], je pomembna razlika v tem, da metode za ohranjanje zasebnosti (med drugim) vsebujejo tudi sintezo slik [Mirjalili et al., 2019b], kar naredi ta problem znatno bolj obširen. Naše delo se razlikuje tudi od obstoječih postopkov za detekcijo globokih ponaredkov [Mirsky and Lee, 2020], ki odgovarjajo na vprašanje »Ali je bila slika manipulirana?«. Naš algoritem namreč odgovarja na bolj specifično vprašanje »Ali je bil manipuliran izbran obrazni atribut (npr. spol)?« Razlika je tudi v tem, da je primarni cilj globokih ponaredkov prelisiti človeka, medtem ko se obravnavane metode osredotočajo na zaščito zasebnosti pri avtomatski analizi. Sodobne metode za detekcijo manipulacij, kot je npr. [Agarwal et al., 2020], so tipično ovrednotene v transparentnem scenariju (bela škatla), kjer je znano, s katero metodo za ohranjanje zasebnosti je bila slika manipulirana. V tem delu pa predstavimo detekcijsko metodo, ki tega znanja ne potrebuje (črna škatla). Naš algoritem primerjamo s pristopom T-SVM iz [Agarwal et al., 2020].

3 ZAZNAVANJE MANIPULACIJ

Detekcijska shema je prikazana na Sliki 1., pri čemer ξ označuje razvrščevalnik, ki napoveduje izbrano obrazno značilnost (v našem primeru gre za binarno napoved spola). Detektor predpostavlja, da bo razvrščevalnik ξ v primeru, ko je bila slika manipulirana z metodami za ohranjanje zasebnosti, generiral drugačno napoved pred in po rekonstrukciji slike. Natančneje, pri podani manipulirani sliki I_{pr} pričakujemo, da ξ generira drugačne posteriorne verjetnosti $p(C_k | I_{pr})$ kot pri slikah $p(C_k | I_{re})$, ki so bile rekonstruirane. V našem delu za rekonstrukcijo slik uporabimo



Slika 1: Detekcija manipulacij, ki jih povzroči metoda za ohranjanje zasebnosti, s pomočjo postopka za rekonstrukcijo slik PrivacyProber. Predlagana detekcijska shema izrablja razlikovanje med i) napovedjo originalne slike in ii) napovedjo rekonstruirane slike. Za razliko od drugih detektorjev manipulacij, predlagan postopek ne potrebuje faze učenja (t. i. scenarij črne škatle) in deluje le na podlagi primerjave napovedi.

metodo PrivacyProber [Rot et al., 2021], ki je podrobneje opisana v nadaljevanju. Pri členu $C_k \in \{C_m, C_f\}$ označba m označuje moški spol in f ženski spol.

S primerjavo posteriornih verjetnosti je mogoče določiti, ali je bila slika modificirana ali ne. V naših eksperimentih smo za primerjavo posteriornih verjetnosti uporabili simetrično verzijo Kullback-Leibler divergence:

$$D_{SKL}(p, q) = D_{KL}(p||q) + D_{KL}(q||p),$$

kjer

$$D_{KL}(p||q) = \sum_{x \in \mathcal{X}} p(x) \log \left(\frac{p(x)}{q(x)} \right)$$

in kjer $p = p(C_k | I_{pr})$, $q = p(C_k | I_{re})$, C_k in D_{SKL} uporabljamo za merjenje manipulacij (oz. ohranjanje zasebnosti).

Pomembno je izpostaviti, da za razliko od obstoječih shem za detektiranje manipulacij predlagani postopek ne potrebuje učenja, zaradi česar ne potrebuje primerkov manipuliranih slik. Zanaša se izključno na ugotovitev, da se po uspešni odstranitvi učinka, ki ga je povzročila metoda za ohranjanje zasebnosti, napoved razvrščevalnika spremeni. Za detektor torej lahko pričakujemo, da deluje, ko PrivacyProber povzroči dovoljšno rekonstrukcijo skrite informacije o obraznem atributu.

4 EVALVACIJA IN REZULTATI

Za preizkus v kako splošnem primeru lahko predlagano metodo uporabljamo (tj. kakšna je njena sposobnost generalizacije), smo v poskusih uporabili tri raznovrstne zbirke obrazov, in sicer LFW [Huang et

al., 2007], MUCT [Milborrow et al., 2010] in Adience [Eidinger et al., 2014]. Za ovrednotenje postopka smo za vsako izmed preizkušanih metod za zaščito zasebnosti mehkih biometričnih značilnosti (k -AAP, FGSM, FlowSAN-3 in FlowSAN-5) izbrali 698 zaščitenih in 698 originalnih slik, pri čemer je bil delež moških in žensk uravnotežen. Slike so bile nadalje naključno razdeljene v štiri disjunktno množice, kar nam omogoča poročanje standardnega odklona. Metoda za rekonstrukcijo slike je v našem delu najbolje delujoča implementacija PrivacyProber-ja iz dela [Rot et al., 2021], natančneje PP-DI (PrivacyProber with Denoising and Inpainting). PP-DI je rekonstrukcijska metoda, ki na sliki obnovi informacijo o mehkih biometričnih atributih s sekvenčno vezavo *i*) mreže za odstranjevanje šuma (angl. denoising) in *ii*) mreže za slikovno vrisovanje (angl. inpainting). Rezultati kažejo na to, da naš detekcijski algoritem dosega skoraj idealne rezultate na podatkovnih zbirkah LFW in MUCT. Povprečne AUC ocene na podatkovni zbirki Adience so slabše, tj. 0.828 za k -AAP, 0.828 za FGSM, 0.696 za FlowSAN-3 in 0.751 za FlowSAN-5. To pripisujemo dejstvu, da je podatkovna zbirka Adience bolj zahtevna, kar se je izkazalo tudi v delu [Rot et al., 2021]. V primerjavi z drugima dvema zbirkama (LFW in MUCT) ima namreč večjo variabilnost pri svetlobnih pogojih, pozah obrazov in vsebuje slike slabše kvalitete.

Ponovno poudarjamo, da problem detekcije manipulacij, ki jih naredijo algoritmi za ohranjanje zasebnosti mehkih obraznih značilnosti, še ni bil obravnavan v odprti literaturi. Kljub temu smo delovanje našega postopka primerjali s sodobno detekcijsko

metodo T-SVM [Agarwal et al., 2020], ki je sicer razvita za reševanje ožjega problema detekcije nasprotniških primerov. Detekcija nasprotniških primerov je namreč po nekaterih karakteristikah podobna našemu izzivu. T-SVM deluje tako, da slike obrazov najprej preslika z diskretno valjčno transformacijo (discrete wavelet transform, DWT) in z diskretno sinusno transformacijo (discrete sine transform, DST). Iz preslikav nato izlušči GIST značilke, na podlagi katerih se uči model z metodo podpornih vektorjev (support vector machine, SVM). T-SVM za razliko od našega postopka torej potrebuje primerke slik, na katerih so prisotne manipulacije, ki jih povzročijo metode za ohranjanje zasebnosti. V naših eksperimentih zato za primerjavo obravnavamo dve različni strategiji, in sicer:

- **Scenarij bele škatle:** Pri tej strategiji predpostavljamo dostop do vseh modelov za ohranjanje zasebnosti mehkih atributov. V naših eksperimentih je bil T-SVM ločeno naučen za vsak model za ohranjanje zasebnosti. Za učenje detektorjev smo uporabili učni del podatkovne zbirke LFW, testirali pa smo na testnih delih vseh obravnavanih zbirk (LFW, MUCT in Adience).
- **Scenarij črne škatle:** Za to strategijo predpostavljamo dostop le do enega modela za zaščito za-

sebnosti. T-SVM detektor mora zato generalizirati za vse ostale modele, do katerih ni imel dostopa. V naših eksperimentih obravnavamo dva ločena modela za detekcijo. Prvi model T-SVM (A) je naučen samo na slikah iz podatkovne zbirke LFW, ki so bile manipulirane s FlowSAN-5. Drugi model T-SVM (B) je naučen izključno na slikah, ki so bile manipulirane z metodo k -AAP, ponovno samo na slikah iz LFW. Oba obravnavana modela sta testirana na vseh podatkovnih zbirkah in modelih za ohranjanje zasebnosti.

Tabela 1. prikazuje, da je T-SVM pri scenariju bele škatle na podatkovni zbirki LFW primerljiv z našim postopkom, na podatkovnih zbirkah MUCT in Adience pa deluje občutno slabše. Iz tega rezultata lahko sklepamo, da karakteristike podatkovnih zbirk močno vplivajo na T-SVM, kljub temu, da modelu damo občutno prednost in mu omogočimo dostop do primerkov zaščitenih slik. Za razliko od T-SVM naš detektor namreč ne potrebuje tovrstnih učnih primerov. Opazimo, da T-SVM v primeru bele škatle in T-SVM(A) v primeru črne škatle ne naredi nobene napake. Postopka FlowSAN na sliki namreč naredita značilne vzorce (razvidne tudi na Sliki 2.), ki se jih model nauči dobro razpoznavati.

Tabela 1: ocene AUC ($\mu \pm \sigma$) za detekcijo manipulacij, ki jih povzročijo metode za ohranjanje zasebnosti. Naš postopek, ki ne potrebuje učne faze (tj. scenarij črne škatle), primerjamo s sodobno tehniko T-SVM za detekcijo nasprotniških primerov, pri čemer ločeno obravnavamo oba scenarija (bele in črne škatle).

Model za ohranjanje zasebnosti	Zbirka	Naš model	Bela škatla		Črna škatla	
			T-SVM	T-SVM (A) †	T-SVM (B) ‡	
k -AAP	LFW	0.980 ± 0.003	0.984 ± 0.007	0.743 ± 0.013	0.984 ± 0.007	
	MUCT	0.984 ± 0.001	0.534 ± 0.021	0.727 ± 0.030	0.534 ± 0.021	
	Adience	0.828 ± 0.002	0.541 ± 0.007	0.604 ± 0.008	0.541 ± 0.007	
FGSM	LFW	0.992 ± 0.001	0.955 ± 0.011	0.894 ± 0.013	0.921 ± 0.016	
	MUCT	0.995 ± 0.000	0.852 ± 0.012	0.858 ± 0.015	0.552 ± 0.030	
	Adience	0.877 ± 0.004	0.624 ± 0.009	0.595 ± 0.016	0.471 ± 0.014	
FlowSAN-3	LFW	0.980 ± 0.002	1.000 ± 0.000	1.000 ± 0.000	0.997 ± 0.002	
	MUCT	0.991 ± 0.003	1.000 ± 0.000	1.000 ± 0.000	0.524 ± 0.020	
	Adience	0.696 ± 0.003	1.000 ± 0.000	1.000 ± 0.000	0.609 ± 0.005	
FlowSAN-5	LFW	0.976 ± 0.002	1.000 ± 0.000	1.000 ± 0.000	0.998 ± 0.001	
	MUCT	0.991 ± 0.004	1.000 ± 0.000	1.000 ± 0.000	0.531 ± 0.018	
	Adience	0.751 ± 0.003	1.000 ± 0.000	1.000 ± 0.000	0.563 ± 0.005	

† Detekcijski model je učen na FlowSAN-5 in LFW.

‡ Detekcijski model je učen na k -AAP in LFW.



Slika 2: Primeri napačnih napovedi predlaganega postopka. Prva vrstica prikazuje slike, na katerih postopek ni zaznal, da so bile slike manipulirane z metodo za zaščito zasebnosti. V drugi vrstici so primeri, kjer je postopek detektiral manipulacije na slikah, kljub temu, da le-te niso bile prisotne.

Ko gledmo AUC ocene za scenarij črne škatle, vidimo, da so detekcijski rezultati T-SVM na splošno slabši. T-SVM (A), ki je učen na slikah, manipuliranih z FlowSAN-5, še vedno lahko zagotovi idealno detekcijo za oba FlowSAN modela na vseh podatkovnih zbirkah, a je hkrati manj kompetitiven za detekcijo k -AAP in FGSM.

T-SVM (B) model, učen na manipuliranih slikah s k -AAP na podatkovni zbirki LFW, je med primerjanimi modeli najmanj kompetitiven. Naš postopek premaga le v redkih primerih na LFW podatkovni zbirki.

Predstavljeni rezultati demonstrirajo dodano vrednost našega postopka, ki ne potrebuje učenja in primerkov manipuliranih slik. Učinkovitost našega detektorja je tudi manj občutljiva na spremembo testnih podatkov, za razliko od T-SVM, ki ima manjše sposobnosti za generalizacijo na druge podatkovne zbirke.

Primeri napak predlaganega postopka so prikazani na Sliki 2. Za vsako izmed obravnavanih metod za zaščito zasebnosti sta prikazana primera za oba tipa napake – prva vrstica prikazuje napačno negativne, druga pa napačno pozitivne primere.

5 SKLEP

V tem delu smo proučevali problem detekcije manipulacij na slikah, ki jih naredijo tehnike za zaščito za-

sebnosti mehkih biometričnih značilnosti. Predlagali smo nov algoritem za detekcijo in ga ovrednotili na štirih sodobnih metodah za zaščito zasebnosti in na treh eksperimentalnih podatkovnih zbirkah. Rezultati naše študije kažejo na to, da s predlaganim detektorjem lahko zaznamo manipulacije vseh obravnavanih modelov za ohranjanje zasebnosti. Iz teh rezultatov sledi, da:

- V primeru, da sistem zaščito zasebnosti lahko zazna, zaščitene slike lahko avtomatsko označimo za ročni pregled ali za procesiranje z bolj prefinjenimi tehnikami. Tovrstno procesiranje bi lahko onemogočilo učinek metod za ohranjanje zasebnosti.
- Metode za zaščito zasebnosti mehkih atributov bi morale biti podane z vnaprej definiranimi garancijami, ki bi zagotovile, da zaščitene slike ne bi mogle biti zlorabljene. To vzbuja potrebo po formalnih modelih za zaščito zasebnosti mehkih biometričnih značilnosti, ki bi omogočili matematično izračunljivo stopnjo zagotovljene zasebnosti. Formalne metode za ohranjanje zasebnosti so bile v odprti literaturi za zdaj razvite le za namene deidentifikacije, za zaščito mehkih atributov pa še ne.

V nadaljnjem delu zato načrtujemo raziskati možnosti formalnih metod za ohranjanje zasebnosti mehkih atributov, ki bi naslavljale prej omenjene izzive in bi zasebnost ohranjale tudi v primeru bolj

naprednega procesiranja slik. Metodo načrtujemo evalvirati tudi na drugih obraznih atributih.

LITERATURA

- [1] [Agarwal et al., 2020] Agarwal, A., Singh, R., Vatsa, M., and Ratha, N. K. (2020). Image Transformation based Defense Against Adversarial Perturbation on Deep Learning Models. *Transactions on Dependable and Secure Computing*.
- [2] [Cennamo et al., 2019] Cennamo, A., Freeman, I., and Kummer, A. (2019). A Statistical Defense Approach for Detecting Adversarial Examples. *International Conference on Pattern Recognition and Intelligent Systems*.
- [3] [Chhabra et al., 2018] Chhabra, S., Singh, R., Vatsa, M., and Gupta, G. (2018). Anonymizing k-Facial Attributes via Adversarial Perturbations. *Proceedings of International Joint Conferences on Artificial Intelligence*.
- [4] [Dantcheva et al., 2015] Dantcheva, A., Elia, P., and Ross, A. (2015). What Else Does Your Biometric Data Reveal? A Survey on Soft Biometrics. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security (TIFS)*, 11(3):441–467.
- [5] [Eidinger et al., 2014] Eidinger, E., Enbar, R., and Hassner, T. (2014). Age and Gender Estimation of Unfiltered Faces. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security (TIFS)*, 9(12):2170–2179.
- [6] [Huang et al., 2007] Huang, G. B., Berg, M. R., Berg, T., and E., L.-M. (2007). Labeled Faces in the Wild.: A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments. *University of Massachusetts, Amherst, Technical Report 07-49*.
- [7] [Meden et al., 2021] Meden, B., Rot, P., Terhörst, P., Damer, N., Kuijper, A., Scheirer, W. J., Ross, A., Peer, P., and Štruc, V. (2021). Privacy-enhancing face biometrics: A comprehensive survey. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 16:4147–4183.
- [8] [Meena and Tyagi, 2019] Meena, K. and Tyagi, V. (2019). Image Forgery Detection: Survey and Future Directions. *Data, Engineering and Applications, Springer*, pages 163–194.
- [9] [Milborrow et al., 2010] Milborrow, S., Morkel, J., and Nicolls, F. (2010). The MUCT Landmarked Face Database. *Pattern Recognition Association of South Africa*.
- [10] [Mirjalili et al., 2018] Mirjalili, V., Raschka, S., Nambodiri, A., and Ross, A. (2018). Semi-Adversarial Networks: Convolutional Autoencoders for Imparting Privacy to Face Images. In *International Conference on Biometrics (ICB)*, pages 82–89.
- [11] [Mirjalili et al., 2019a] Mirjalili, V., Raschka, S., and Ross, A. (2019a). FlowSAN: Privacy-enhancing Semi- adversarial Networks to Confound Arbitrary Face-based Gender Classifiers. *IEEE Access*, 7:99735–99745.
- [12] [Mirjalili et al., 2019b] Mirjalili, V., Raschka, S., and Ross, A. (2019b). FlowSAN: Privacy-enhancing Semi- Adversarial Networks to Confound Arbitrary Face-based Gender Classifiers. *IEEE Access* 7, pages 99735–99745.
- [13] [Mirjalili et al., 2020] Mirjalili, V., Raschka, S., and Ross, A. (2020). PrivacyNet: Semi-adversarial Networks for Multi-attribute Face Privacy. *IEEE Transactions on Image Processing (TIP)*, 29:9400–9412.
- [14] [Mirsky and Lee, 2020] Mirsky, Y. and Lee, W. (2020). The creation and detection of deepfakes: A survey. *CoRR*, abs/2004.11138.
- [15] [Rot et al., 2021] Rot, P., Peer, P., and Štruc, V. (2021). PrivacyProber: Assessment and Detection of Soft-Biometric Privacy-Enhancing Techniques. *under review*, pages 1–18.
- [16] [Rozsa et al., 2019] Rozsa, A., Günther, M., Rudd, E. M., and Boulton, T. (2019). Facial Attributes: Accuracy and Adversarial Robustness. *Pattern Recognition Letters*, 124:100–108.

Iz Islovarja

Islovar je spletni terminološki slovar informatike, ki ga objavlja jezikovna sekcija Slovenskega društva INFORMATIKA na naslovu <http://www.islovar.org>. Slovar je javno dostopen za vpoglede in vnašanje novih izrazov.

ávdiodatotéka -e ž (*angl. audio file*) datoteka, ki vsebuje zvočni posnetek; sin. zvočna datoteka

cíljno oddájanje -ega -a s (*angl. narrowcasting, narrowcast*) oddajanje za določeno publiko, ciljno skupino; prim. oddajanje

digitálni médij -ega -a m (*angl. digital media*) medij, ki omogoča zapis, prenos in shranjevanje digitalnih podatkov

drúžbeni médij -ega -a m (*angl. social media*) spletna tehnologija, ki se uporablja za ustvarjanje in izmenjavo digitalnih vsebin v virtualni skupnosti

elektrónski médij -ega -a m (*angl. electronic media*) medij v elektronski ali elektromehanski obliki za predstavitev analognih ali digitalnih vsebin, npr. televizija, radio, internet; prim. digitalni medij

ènovrstno oddájanje -ega -a s (*angl. unicast, unicasting*) oddajanje sporočila izbranemu prejemniku; sin. unikast; prim. večvrstno oddajanje

hípermédij -a m (*angl. hypermedia*) multimedija s hiperpovezavami; prim. nadbesedilo

hkrátno oddájanje -ega -a s (*angl. simultaneous broadcast, simulcast*) istočasno predvajanje programov ali dogodkov v več kot enem mediju ali storitvi, npr. prek radia in televizije hkrati; sin. simultano oddajanje

médij -a m (*angl. media*)

1. snov, na katero je mogoče zapisati podatke, npr. papir, magnetni trak
2. sredstvo, ki omogoča zapisovanje, shranjevanje in prenos podatkov, npr. USB ključ
3. kar omogoča predstavljanje informacij, npr. besedilo, slika, videoposnetek

4. sredstvo javnega komuniciranja in obveščanja

múltimédija -e ž (*angl. multimedia*) medij (3), ki ima zmožnost hkratne predstavitve podatkov z besedilom, sliko, gibljivo sliko, zvokom

nàdbesedílo -a s (*angl. hypertext*) besedilo, ki vsebuje hiperpovezave na druga besedila, slike, objekte; sin. hipertekst; prim. hipermedij

oddájanje -a s (*angl. broadcast, broadcasting*) razpošiljanje avdio- ali videovsebin razpršenemu občinstvu po elektronskih medijih; prim. ciljno oddajanje

pódkast -a m (*angl. podcast, POD*) digitalna vsebina, ki jo je mogoče v obliki avdio- ali videodatotek prenašati s spleta na računalnik ali prenosno napravo

protokól za večvrstno oddájanje -a -- -- m (*angl. multicast protocol*) protokol za sočasno pošiljanje sporočila, podatkov izbrani skupini prejemnikov; prim. protokol za enovrstno oddajanje

protokól za ènovrstno oddájanje -a -- -- -- m (*angl. unicast protocol*) protokol za pošiljanje sporočila, podatkov izbranemu prejemniku; prim. enovrstno oddajanje, protokol za večvrstno oddajanje

véčpredstávnost -i ž (*angl. multimedia*) predstavitev vsebine istočasno v obliki besedila, slike, zvoka

véčvrstno oddájanje -ega -a s (*angl. multicast, multicasting*) hkratno oddajanje sporočila, podatkov izbranim prejemnim računalnikom; prim. enovrstno oddajanje

vídeodatotéka -e ž (*angl. video file*) datoteka, ki vsebuje videoposnetek

Izpitni centri ECDL

ECDL (European Computer Driving License), ki ga v Sloveniji imenujemo evropsko računalniško spričevalo, je standardni program usposabljanja uporabnikov, ki da zaposlenim potrebno znanje za delo s standardnimi računalniškimi programi na informatiziranem delovnem mestu, delodajalcem pa pomeni dokazilo o usposobljenosti. V Evropi je za uvajanje, usposabljanje in nadzor izvajanja ECDL pooblaščen ustanova ECDL Fundation, v Sloveniji pa je kot član CEPIS (Council of European Professional Informatics) to pravico pridobilo Slovensko društvo INFORMATIKA. V državah Evropske unije so pri uvajanju ECDL močno angažirane srednje in visoke šole, aktivni pa so tudi različni vladni resorji. Posebno pomembno je, da velja spričevalo v 148 državah, ki so vključene v program ECDL. Doslej je bilo v svetu v program certificiranja ECDL vključenih že preko 16 milijonov oseb, ki so uspešno opravile preko 80 milijonov izpitov in pridobile ustrezne certificate. V Sloveniji je bilo doslej v program certificiranja ECDL vključenih več kot 18.000 oseb in opravljenih več kot 92.000 izpitov. V Sloveniji sta akreditirana dva izpitna centra ECDL, ki imata izpostave po vsej državi.



Znanstveni prispevki

Uroš Šmajdek, Žiga Lesar, Ciril Bohak, Matija Marolt
HIBRIDNA DIFUZIJSKA METODA ZA GLOBALNO OSVETLITEV
VOLUMETRIČNIH PODATKOV

Pregledni znanstveni prispevki

Jurij Mihelič, Mojca Ferle
RAČUNALNIŠKA EMULACIJA KOT STRATEGIJA DIGITALNEGA
OHRANJANJA RAČUNALNIŠKIH SISTEMOV IN PROGRAMSKE OPREME

Kratki znanstveni prispevki

Dejan Štepec, Danijel Skočaj
NENADZOROVANA DETEKCIJA RAKAVIH REGIJ V HISTOLOŠKIH SLIKAH
S POMOČJO PRESLIKAV SLIKA-V-SLIKO

Peter Rot, Peter Peer, Vitomir Štruc
DETEKCIJA MANIPULACIJ ZA OHRANJANJE ZASEBNOSTI MEHKIH
ATRIBUTOV NA SLIKAH OBRAZA

Informacije

IZ ISLOVARJA

ISSN 1318-1882



9 771318 188001