

▣ 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 konvekcijsko-difuzijskem modelu, ki neposredno osvetlitev opisuje s konvekcijskim, sipanje pa z difuzijskim procesom. V naši metodi smo konvekcijo nadomestili s sledenjem poti. Metodo smo performančno in kvalitativno ovrednotili in primerjali s konvekcijsko-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 konvekcijsko-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 konvergence 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 postavitvev 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 konvergence 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 obsevalni 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 obsevalni volumen, ki hrani obsevanost za poljubno točko na regularni mreži. V zadnjem koraku z metodo korakanja vzdolž žarka združimo informaciji iz obsevalnega 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 vokslov volumna, 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 podglavljih.

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 ovrednotenje predstavljeni 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

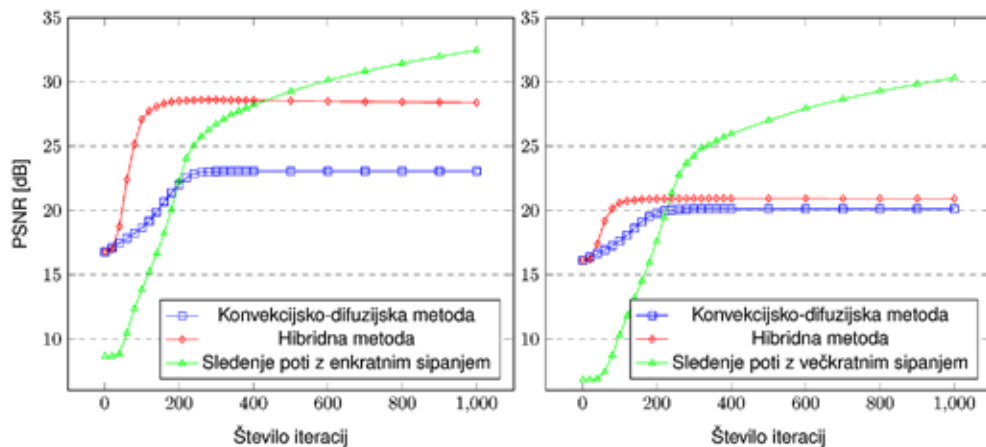
4.2 Kvalitativno ovrednotenje

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.

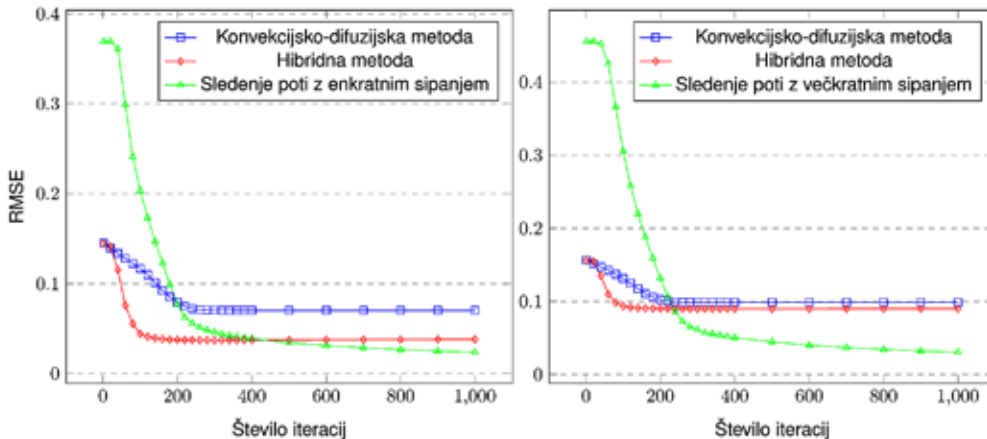
Izvedli smo več meritev pod različnimi osvetlitvenimi pogoji. Na sliki 2 so zgoraj vidni rezultati upodabljanja volumna osvetljenega z eno lučjo, spodaj pa s tremi lučmi. Grafi vrednosti PSNR so prikazani na sliki 3 (ena luč) in na sliki 5 (tri luči), grafi vrednosti RMSE pa so prikazani na sliki 4 (ena 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.



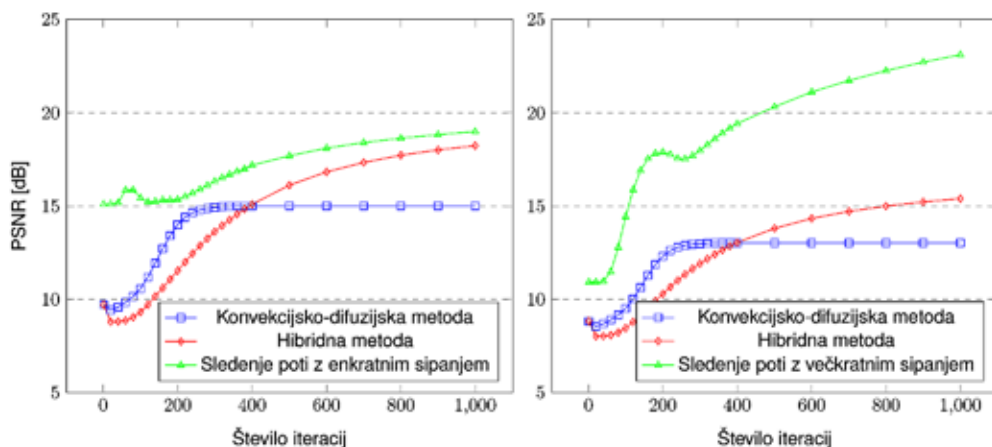
Slika 2: Rezultati upodabljanja slike računalniške tomografije glave otroka z eno lučjo (zgoraj) in s tremi lučmi (spodaj). Od leve proti desni: Sledenje poti z večkratnim sipanjem, sledenje poti z enkratnim sipanjem, konveksijsko-difuzijska metoda, hibridna difuzijska metoda.



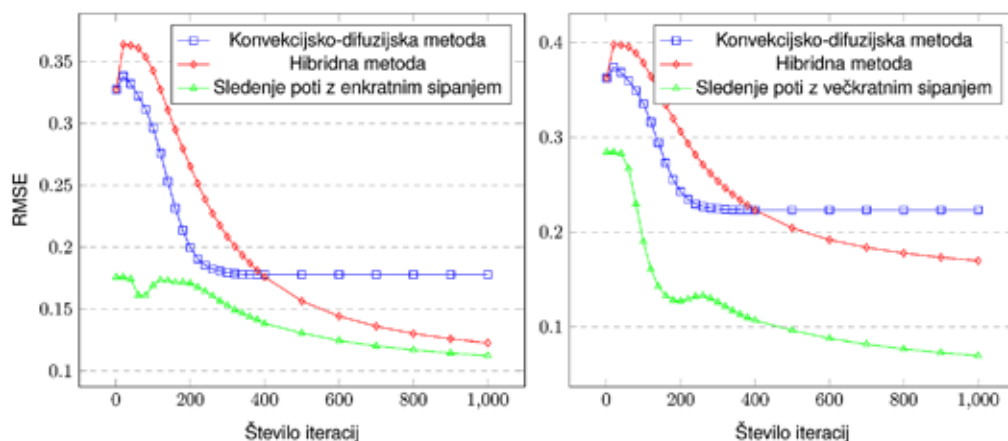
Slika 3: Vrednosti PSNR za volumen, osvetljen z eno lučjo, glede na sledenje poti z enkratnim sipanjem (levo) in z večkratnim sipanjem (desno).



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 konveksijsko-difuzijsko metodo. Bistvena prednost hibridne metode je nepristranski izračun neposredne osvetlitve s sledenjem poti, zaradi česar je metoda bolj točna od konveksijsko-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 konveksijsko-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 konveksijsko-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 konveksijsko-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 konveksijsko-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. Konveksijsko-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 konveksijsko-difuzijske metode, v kateri smo konveksijo 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 konveksijsko-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, 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.



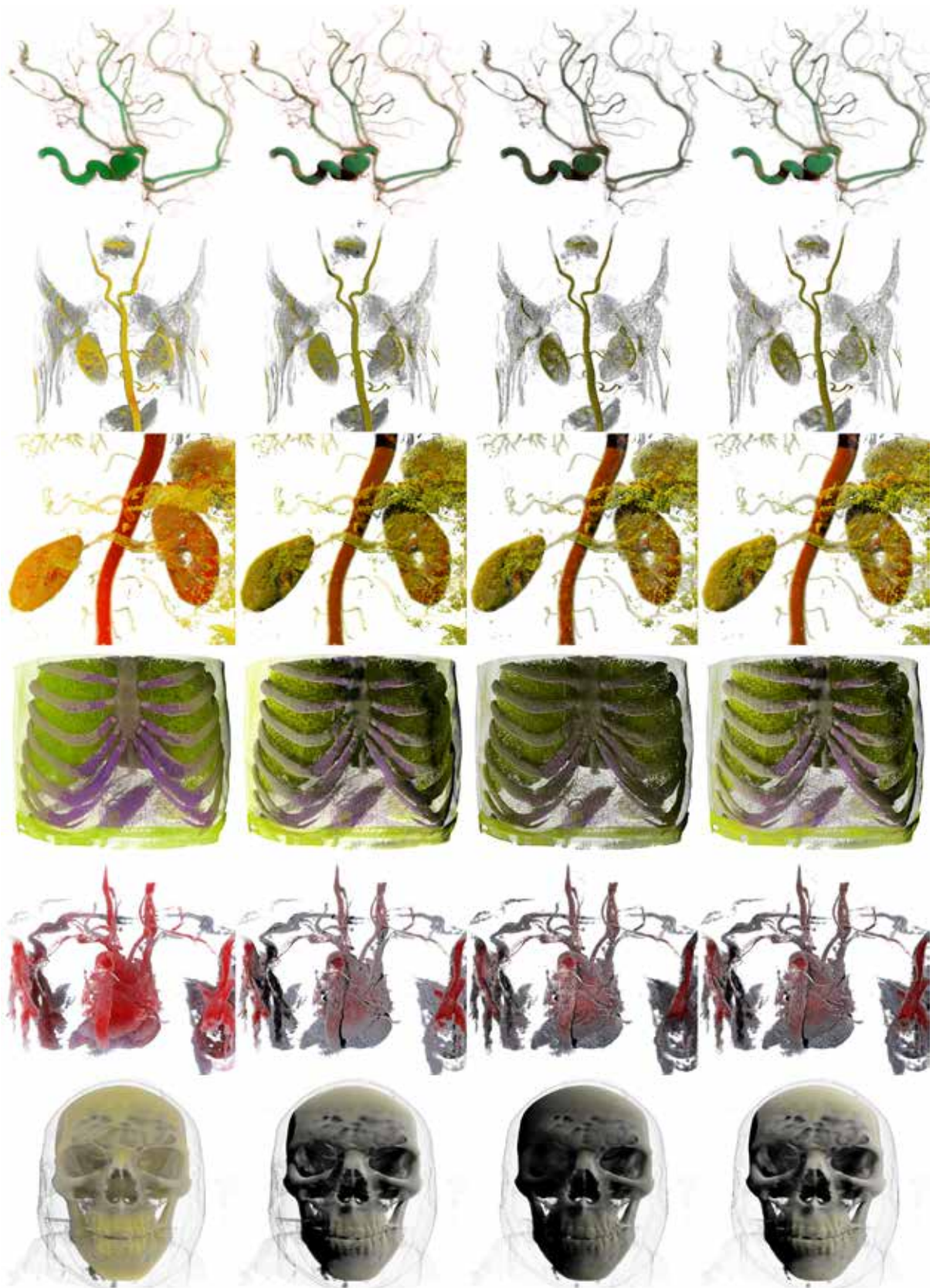
Slika 7: Koraki postopka upodabljanja s konvekcijsko-difuzijsko metodo.



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>