

Medpomnjenje obsevanosti za globalno osvetlitev volumetričnih podatkov

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

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Računalništvo in Informatiko, Večna pot 113, 1000 Ljubljana

²King Abdullah University of Science and Technology, Visual Computing Center, Thuwal, Saudi Arabia

E-pošta: us6796@student.uni-lj.si, {ziga.lesar, matija.marolt, ciril.bohak}@fri.uni-lj.si

Irradiance caching for global illumination of volumetric data

In this paper, we present a method for interactive illumination and rendering of volumetric data with irradiance caching. We store the irradiance field in a separate volume and we compute it independently of the camera position and orientation with unbiased path tracing. For the projection on the screen we use the Riemann sum. We solve the problem of noise in the irradiance volume by separating the computation of the color and illumination components of the final rendering, and we additionally filter the illumination component with a bilateral filter. Results show that our method converges faster than path tracing, while its independence of the camera view allows for greater interactivity.

Povzetek

V članku predstavimo metodo za interaktivno osvetlitev in upodabljanje volumetričnih podatkov z medpomnjenjem obsevanosti. Polje obsevanosti hranimo v ločenem volumnu in ga izračunamo neodvisno od položaja in orientacije kamere z nepristranskim sledenjem poti. Za projekcijo na zaslon uporabimo Riemannovo vsoto. Problem šuma v obsevalnem volumnu rešujemo z ločenim izračunom barvne in osvetlitvene komponente končne slike, osvetlitveno komponento pa dodatno filtriramo z bilateralnim filtrom. Rezultati kažejo, da naša metoda konvergira hitreje od sledenja poti, poleg tega pa neodvisnost od pogleda kamere omogoča večjo interaktivnost.

1 Uvod

Fizikalno osnovana osvetlitev v vizualizaciji omogoča uporabnikom boljše enostavnejše razločevanje oblik, kar je še posebej pomembno pri preučevanju kompleksnejših struktur v tridimenzionalnem prostoru. Pravilna osvetlitev je ključna za pravilno dojetje globine in oblik, kar je še posebej pomembno pri volumetričnih podatkih, kjer svetloba ob prehajanju snovi izgublja svojo moč in s tem nakazuje, kateri deli podatkov so bolj ali manj presevni, hkrati pa se strukture v podatkih medsebojno senčijo in s tem pripomorejo k boljšemu dojetanju njihove prostorske postavitve.

Enačbo upodabljanja za izračun fizikalno pravilne osvetlitve je v svojem delu predstavil Kajiya [8] in temelji na enačbi sevalnega prenosa [1]. Najpogosteje se za

njeno reševanje uporablja metoda volumetričnega korakanja vzdolž žarkov [15], ki pa zaradi aproksimacije z Riemannovo vsoto ne daje točnih rezultatov in zato ni primerna za simulacijo kompleksnejših svetlobnih pojavov kot je sipanje. Za točen izračun se uporabljajo metode Monte Carlo in njene izpeljanke. Njihova slaba lastnost je počasna konvergenca, ki je še posebej izrazita v primeru sipanja, kjer je treba simulirati večkratne odboje in pri tem uporabiti prilagodljivo vzorčenje. V našem pristopu naslovimo počasno konvergenco metod Monte Carlo z medpomnjenjem že izračunane obsevanosti, ki se med upodabljanjem ne preneha izboljševati. Medpomnjenje obsevanosti je neodvisno od pogleda, kar omogoča spreminjanje pogleda brez ponovnega računanja. Ker je zaradi počasne konvergenca v medpomnjenih podatkih prisotnega veliko šuma, pri izrisu podatke o obsevanosti zgladimo z bilateralnim filtrom. Glavna prispevka članka sta:

- metoda za interaktiven prikaz volumetričnih podatkov z medpomnjenjem obsevanosti;
- glajenje obsevanosti pred združitvijo z barvno informacijo.

V nadaljevanju članka naprej predstavimo pregled področja in vanj vpnemo naše delo, nato v poglavju 3 predstavimo našo metodo, ki jo v poglavju 4 ovrednotimo in rezultate diskutiramo, na koncu pa v poglavju 5 podamo še sklepne ugotovitve in nakažemo možne nadaljnje izboljšave.

2 Pregled področja

Upodabljanje volumnov s fizikalno osnovanim pristopom sta prva predstavila Kajiya in Von Herzen [9], kar je vodilo do posplošenega pristopa – enačbe upodabljanja, ki ga predstavi Kajiya [8] skupaj z rešitvijo z uporabo metode Monte Carlo. Počasna konvergenca metode Monte Carlo in kompleksnost same enačbe upodabljanja sta vzpodbudili razvoj mnogih izboljšav. Med pomembnejšimi izboljšavami sta dvosmerno sledenje poti [12] in uporaba algoritma Metropolis-Hastings [18]. Dvosmerno sledenje poti je bilo posplošeno tudi za upodabljanje volumnov [13]. Dva popularna alternativna pristopa za izračun globalne osvetlitve volumnov sta še sledenje

žarkov [15] in algoritem izsevnosti [16], ki pa ne dosega znatne pohitritve ali izboljšave kvalitete. Vzporedno je Jensen predstavil pristop, ki združuje dvostopenjsko osvetljevanje in zemljevid fotonov [5], kasneje pa ga je razširil za upodabljanje volumnov [6]. Dvostopenjsko osvetljevanje predstavlja tudi osnovo za metodo, predstavljeno v tem članku, saj omogoča izračun globalne osvetlitve neodvisno od položaja in orientacije kamere. Pregled kasnejših prilagoditev in razširitev tehnike zemljevidov fotonov je predstavljen v [7].

Medpomnjenje obsevanosti so prvi predstavili Ward et al. v delu [19] in deluje predvsem zaradi dejstva, da je neposredno obsevalno polje večinoma gladko. Křivánek et al. predstavijo medpomnjenje sevalnega polja, ki hrani in interpolira smerno odvisno sevanje z uporabo sferičnih harmonikov [11]. Jarosz et al. so kmalu za tem predstavili medpomnjenje sevalnosti za volumne [4]. Khlebnikov et al. predstavijo sistem za medpomnjenje in izračun obsevanosti za volumne [10], ki združuje tri vzporedne procese: (1) upodabljanje, (2) izračun novih medpomnjenih vrednosti in (3) odpravljanje napak pri izračunu novih vnosov.

Zaradi hitrega razvoja tehnologije današnje grafične kartice vsebujejo veliko količino grafičnega pomnilnika in tako hranjenje večje količine podatkov na njih ni več problematično. Zaradi tega dandanes številne pomnilniške optimizacije, naslovljene v zgoraj omenjenih delih, niso več potrebne. S tem se lahko sistemi za medpomnjenje obsevanosti poenostavijo, kar predstavimo tudi v tem članku. Naša rešitev sicer zahteva več pomnilnika, a je hkrati tudi bistveno bolj učinkovita pri izračunu končne upodobitve. V članku predstavimo tudi implementacijo v spletnem orodju za upodabljanje volumetričnih podatkov VPT [14].

3 Medpomnjenje obsevanosti

Naša metoda za izračun obsevanosti temelji na postopku sledenja poti, s katerim rešujemo volumetrično enačbo upodabljanja [2]. Sevalnost L v točki \mathbf{x} in smeri ω je vsota dveh prispevkov, uteženih s prepustnostjo T vzdolž žarka $\mathbf{x}_t = \mathbf{x} - t\omega$: sevalnosti ozadja, ki preseva skozi volumen, ter izhodne sevalnosti L_i vzdolž žarka:

$$L(\mathbf{x}, \omega) = T(d)L(\mathbf{x}_d, \omega) + \int_{t=0}^d T(t)L_i(\mathbf{x}_t, \omega) dt, \quad (1)$$

kjer je prepustnost modelirana z Beer-Lambertovim zakonom:

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

Koeficienta σ_a in σ_s določata količino absorpcije in sipanja na enoto razdalje, z njima pa lahko opišemo tudi izhodno sevalnost volumna, sestavljeno iz emisije in sipanja:

$$L_i(\mathbf{x}, \omega) = \sigma_a(\mathbf{x})L_e(\mathbf{x}, \omega) + \sigma_s(\mathbf{x})L_s(\mathbf{x}, \omega),$$

kjer L_s opisuje svetlobo, ki v točko \mathbf{x} vpada iz poljubne smeri in se lomi v smeri ω :

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

V zgornji enačbi fazna funkcija f_p določa porazdelitev smeri sipanja. V tem delu predpostavljamo izotropno fazno funkcijo, $f_p = 1/4\pi$, ter izotropno emisijo L_e , ki je v praktičnih primerih lahko tudi 0. Izstopna sevalnost je zato neodvisna od smeri primarnega žarka ω , za delovanje metode pa posledično zadošča že izračun obsevanosti:

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

Polje obsevanosti hranimo v ločenem volumnu, računamo pa ga lahko neodvisno od položaja in orientacije kamere. Enačbo 3 računamo z metodo Monte Carlo, tako da simuliramo poti fotonov od poljubne točke v volumnu do svetlobnega vira. Za izračun prostih poti fotonov uporabljamo t. i. metodo delta [20, 3], ki je nepristranska in učinkovita. Pri projekciji na zaslon enačbo (1) diskretiziramo z Riemannovo vsoto, saj je hitrejša od sledenja poti, poleg tega pa končna slika ne vsebuje visokofrekvenčnega šuma zaradi stohastičnega postopka.

Zaradi počasne konvergence izračuna osvetlitve s tehnikami Monte Carlo je v obsevalnem volumnu prisoten šum, ki je še posebej izrazit v začetnih korakih po spremembi osvetlitve. V končni upodobitvi se to odraža v obliki visokofrekvenčnega šuma, ki je zelo moteč in uporabniku ne omogoča neoviranega pregledovanja volumna. Ta problem naslovimo z ločitvijo izračuna barvne in osvetlitvene komponente končne slike. Pred končno združitvijo osvetlitveni prispevek filtriramo z uporabo bilateralnega filtra [17]. Prednost uporabe takšnega filtra pred npr. Gaussovimi je, da ohranja robove (visoke frekvence). Filtrirani osvetlitveni prispevek piksla \mathbf{x} izrazimo z uteženo vsoto pikslov \mathbf{x}_i v njegovi okolici Ω :

$$L^*(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_i \in \Omega} w(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})L(\mathbf{x}_i)}{\sum_{\mathbf{x}_i \in \Omega} w(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})},$$

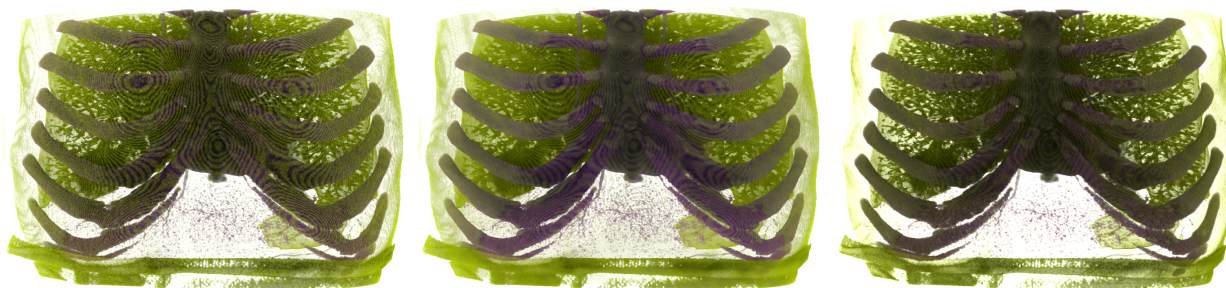
kjer je utež w zmnožek jedra obsega za glajenje razlik v intenziteti f_r in prostorskega jedra za glajenje razlik v položajih pikslov:

$$w(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) = f_r(\|L(\mathbf{x}_i) - L(\mathbf{x})\|)f_s(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}\|).$$

4 Rezultati in diskusija

Našo metodo smo primerjali z metodo sledenja žarkov z enkratnim sipanjem. Ovrednotili smo kakovost in zmožljivost metod in rezultate dopolnili z diskusijo. Vhodni podatki so volumetrični CT podatki prsnega koša¹ dimenzij $512 \times 150 \times 350$, osvetljenega z okoljsko osvetlitvijo bele barve. Podatki so bili upodobljeni v ločljivosti 1024×1024 pikslov. Teste smo izvajali na prenosnem računalniku s procesorjem Intel® Core™ i5-10400F @ 2.90GHz, 16 GB pomnilnika, operacijskim sistemom Microsoft Windows 10 Pro in grafično kartico Nvidia GeForce GTX 1060 3GB. Na sliki 1 so prikazani izračunani rezultati vseh treh metod po 100 sekundah.

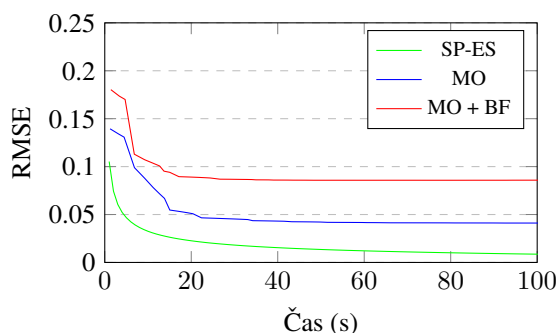
¹<http://schorsch.efi.fh-nuernberg.de/data/volume/>



Slika 1: Primerjava upodobitev z metodo sledenja poti brez medpomnjenja (levo), z medpomnjenjem (sredina) in z medpomnjenjem in filtriranjem (desno) po 100 sekundah.

4.1 Ovrednotenje kakovosti

Kakovost predstavljenih metod smo ovrednotili z metriko RMSE (angl. root-mean-square error), kjer smo za referenčno sliko vzeli rezultat sledenja poti z enkratnim sipanjem, pridobljenem po 5 minut trajajočem izračunu. Rezultati glede na čas izvajanja so prikazani z grafom na sliki 2.



Slika 2: Vrednosti RMSE za volumen, glede na sledenje poti z enkratnim sipanjem po 5-minutnem izračunu: sledenje poti z enkratnim sipanjem (SP-ES), medpomnjenje obsevanosti (MO) in medpomnjenje obsevanosti z bilateralnim filtriranjem (MO + BF). Graf prikazuje prvih 100 sekund konvergenca.

4.2 Ovrednotenje zmogljivosti

Pri ovrednotenju zmogljivosti smo naslovili dva vidika: (1) hitrost konvergence metod in (2) prostorsko zahtevnost metod. Za primerjavo hitrosti konvergence metod smo v tabeli 1 zbrali čase, ko je razlika v RMSE med sliko, upodobljeno s posamezno metodo in končno sliko (po 5 minut trajajočem izračunu), manjša od 10^{-2} .

Tabela 1: Primerjava hitrosti konvergence metod: sledenje poti z enkratnim sipanjem (SP-ES), medpomnjenje obsevanosti (MO) in medpomnjenje obsevanosti z bilateralnim filtriranjem (MO + BF).

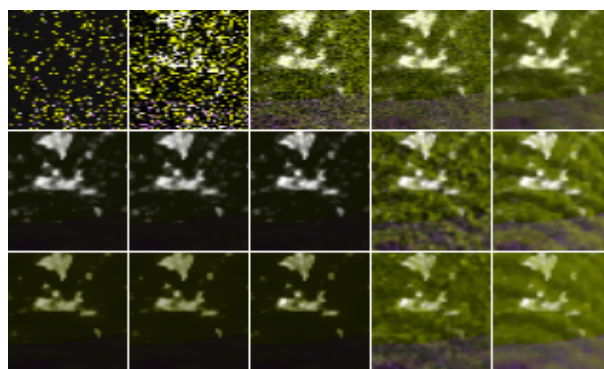
SP-ES	MO	MO + BF
70,11 s	20,38 s	13,70 s

Metoda sledenja poti z enkratnim sipanjem v pomnilniku hrani izvorni volumen velikosti n^3 in teksturo s trenutnim stanjem fotonov velikosti m^2 , skupaj

$O(n^3 + m^2)$. Pri metodi z medpomnjenjem obsevanosti to teksturo zamenjamo z volumnom velikosti n^3 , skupaj $O(2n^3)$. Metoda medpomnjenja obsevanosti z bilateralnim filtriranjem dodatno potrebuje še ločeno teksturo velikosti m^2 , v kateri hranimo barvno in osvetlitveno komponento končne slike, skupaj $O(2n^3 + m^2)$.

4.3 Diskusija

S slike 1 je razvidno, da so končni rezultati vseh metod zelo podobni. Zaradi diskretizacije enačbe 1 z Riemannovo vsoto so na sredinski in desni sliki vidni prekrivni artefakti. Razlike v posameznih časovnih obdobjih so prikazane na sliki 3, s katere je razvidno, da je metoda enkratnega sipanja v začetnih korakih precej šumna. To je še bolj izrazito v obdobjih izračuna krajših od ene sekunde. S slike je prav tako razvidno, da je osvetlitev metode z medpomnjenjem bolj neenakomerna kot pri metodi z medpomnjenjem in filtriranjem. Pri tem naj še izpostavimo, da je osvetlitev pri predstavljenih metodah medpomnjena in je posledično pri spremembi pogleda kamere ni treba ponovno izračunavati, kar pa ne velja za osnovno metodo.



Slika 3: Slika prikazuje primerjavo konvergence metod v različnih časovnih obdobjih od leve proti desni: 150 ms, 1, 3, 12 in 100 sekund. V prvi vrstici so rezultati metode sledenja poti brez medpomnjenja, v drugi z medpomnjenjem in v tretji z medpomnjenjem in filtriranjem.

Z grafa na sliki 2 je razvidno, da najhitreje konvergira metoda z medpomnjenjem in filtriranjem, druga najhitreje pa metoda z medpomnjenjem. To je še posebej izrazito v kratkih časovnih obdobjih, ko je osvetlitev z metodo z medpomnjenjem izrazito neenakomerna. Naj-

primerneje bi bilo tako rezultate metode s filtriranjem uporabiti v začetnih korakih, nato pa filtriranje izklopiti. Te izsledke potrjujejo tudi rezultati v tabeli 1. Slika 4 prikazuje delovanje predstavljenih metod na podatkih drugih tkiv. Rezultati metod so vizualno primerljivi.



Slika 4: Primerjava metod na različnih volumnih. Po vrsticah, od zgoraj navzdol: slika CT glave odraslega moškega¹, slika CT prsnega koša¹, slika CT ledvic¹. Po stolpcih, od leve proti desni: enkratno sipanje, medpomnjenje obsevanosti, medpomnjenje in filtriranje.

5 Sklep

V članku smo predstavili metodo medpomnjenja obsevanosti s filtriranjem osvetlitve za interaktivno upodabljanje volumetričnih podatkov. Za razliko od bolj naprednega sledenja poti naša metoda bistveno hitreje konvergira. Ker je izračun osvetlitve neodvisen od postavitve kamere, se lahko izognemo ponovnemu izračunu ob vsakem premiku kamere in s tem pridobimo na interaktivnosti. Prednosti naše metode dobimo na račun pristranskosti kot posledice diskretizacije obsevanosti ter večje porabe pomnilnika. Rezultati kažejo, da uporaba filtriranja po zadostni konvergenci ni več smiselna, saj v sliko vnese dodatno pristranskost, zato bi bilo smiselno v prihodnosti metodo dopolniti s postopnim pojeanjem moči filtra. Napake se pojavijo tudi pri projekciji na zaslon, kjer integral diskretiziramo z Riemannovo vsoto. Z bolj primerno diskretizacijo (npr. s trapeznim pravilom) bi končna slika vsebovala manj prekrivnih artefaktov. Hitrost konvergence in porabo pomnilnika bi lahko še izboljšali z manjšo ločljivostjo obsevalnega volumna, seveda na račun večje pristranskosti.

Literatura

- [1] Subrahmanyan Chandrasekhar. *Radiative Transfer*. Dover Books on Intermediate and Advanced Mathematics. Dover Publications, 1960.
- [2] Julian Fong, Magnus Wrenninge, Christopher Kulla, and Ralf Habel. Production volume rendering. In *ACM SIGGRAPH*, pages 1–79, New York, New York, USA, 2017. ACM.
- [3] Mathieu Galtier, Stephane Blanco, Cyril Caliot, Christophe Coustet, Jérémie Dauchet, Mouna El Hafi, Vincent Eymet, Richard Fournier, Jacques Gautrais, Anais Khuong, et al. Integral formulation of null-collision monte carlo algorithms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 125:57–68, 2013.
- [4] Wojciech Jarosz, Craig Donner, Matthias Zwicker, and Henrik Wann Jensen. Radiance caching for participating media. *ACM Transactions on Graphics*, 27(1):7:1–7:11, mar 2008.
- [5] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In *Proc. of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, pages 21–30, Berlin, Heidelberg, 1996. Springer-Verlag.
- [6] Henrik Wann Jensen and Per H. Christensen. Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. In *Proc. of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 311–320. ACM, 1998.
- [7] D. Jönsson, J. Kronander, T. Ropinski, and A. Ynnerman. Historygrams: Enabling interactive global illumination in direct volume rendering using photon mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12):2364–2371, 2012.
- [8] James T. Kajiya. The rendering equation. *ACM SIGGRAPH*, 20(4):143–150, Aug 1986.
- [9] James T. Kajiya and Brian P. Von Herzen. Ray tracing volume densities. *ACM SIGGRAPH*, 18(3):165–174, 1984.
- [10] Rostislav Khlebnikov, Philip Voglreiter, Markus Steinberger, Bernhard Kainz, and Dieter Schmalstieg. Parallel irradiance caching for interactive monte-carlo direct volume rendering. *Computer Graphics Forum*, 33(3):61–70, 2014.
- [11] Jaroslav Krivánek, Pascal Gautron, Sumanta Pattanaik, and Kadi Bouatouch. Radiance caching for efficient global illumination computation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(5):550–561, 2005.
- [12] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Bi-directional path tracing. In *Proc. of 3rd International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques (Compugraphics '93)*, pages 145–153, December 1993.
- [13] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Rendering participating media with bidirectional path tracing. In *Proc. of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, pages 91–100, Berlin, 1996. Springer-Verlag.
- [14] Žiga Lesar, Ciril Bohak, and Matija Marolt. Real-time interactive platform-agnostic volumetric path tracing in WebGL 2.0. In *Proc. of the 23rd International ACM Conference on 3D Web Technology*, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [15] Marc Levoy. Display of surfaces from volume data. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 8(3):29–37, 1988.
- [16] Holly E. Rushmeier and Kenneth E. Torrance. The zonal method for calculating light intensities in the presence of a participating medium. *ACM SIGGRAPH*, 21(4):293–302, aug 1987.
- [17] Carlo Tomasi and Roberto Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images. In *Sixth international conference on computer vision (IEEE Cat. No. 98CH36271)*, pages 839–846. IEEE, 1998.
- [18] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Metropolis light transport. In *Proc. of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 65–76, USA, 1997. ACM.
- [19] Gregory J. Ward, Francis M. Rubinstein, and Robert D. Clear. A ray tracing solution for diffuse interreflection. *ACM SIGGRAPH*, 22(4):85–92, June 1988.
- [20] E Woodcock, T Murphy, P Hemmings, and S Longworth. 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, 1965.