KO‘P LED YORITGICHLI SAHNALARDA TASVIR SIFATINI OSHIRISH UCHUN FIZIK JIHATDAN ASOSLANGAN BRDF VA MONTE-KARLO USULLARIGA TAYANGAN GEOMETRIK MODELLASHTIRISH

Tastanova Saida Aldiyarovna[1], Karimbayeva Aziza Saidazim qizi[1]

[1]Muhammad al-Xorazmiy nomidagi TATU. Televizion va media texnologiyalari kafedrasi
E-mail: aziza.karimbayeva92@gmail.com

KEYWORDS

Fotorealistik renderlash, BRDF, Cook–Torrance, Oren–Nayar, Monte-Karlo, Rendering Equation, LED yoritish, global yoritish

ABSTRACT

This paper addresses the problem of image quality improvement in three-dimensional geometric scenes illuminated by multiple LED light sources. Since the classical Lambertian model is insufficient to represent the optical properties of real materials, a composite reflectance model combining Oren–Nayar for diffuse reflection and Cook–Torrance BRDF for specular reflection is employed. The lighting process is formulated using the Rendering Equation introduced by Kajiya, and its solution is approximated by Monte Carlo integration. The proposed approach jointly considers scene geometry, surface material properties, camera configuration, and multi-light LED placement to achieve photorealistic rendering. The results demonstrate improved visual realism for real materials and the feasibility of optimizing lighting configurations in complex scenes.

Kirish: Uch o‘lchamli geometrik sahnalarda bir vaqtning o‘zida bir nechta LED yoritgichlardan foydalanilganda, ularning joylashuvi, yo‘nalishi va intensivligi tasvir sifatiga bevosita ta’sir qiladi. An’anaviy yondashuvlar yoritgichlarni qo‘lda joylashtirish yoki oddiy Lambertian, Monte-carlo kabi shunga o‘xshash modellar bilan cheklanadi.

Afsuski, bu kompyuter tomonidan yaratilgan tasvirlarning aksariyatini juda o‘xshash va haqiqiy dunyodan juda farq qiladigan yon ta’sirga ega. Lambert sirtining taxmini ba’zi materiallar (masalan, plastmassa) uchun juda yaxshi ishlaydi, ya’ni agar boshqa materiallar aniq ifodalanishi kerak bo‘lsa, turli xil modellardan foydalanish kerak.

Muammo: Geometrik sahna, obyektlar joylashuvi va kamera pozitsiyasini hisobga olgan holda, bir nechta LED yoritgichlarni fizik jihatdan asoslangan reflektans modeli orqali optimal joylashtirish muammosi yuzaga keladi. Shuningdek obyekt sirtlari doim biz o‘ylagandek bo‘lavermaydi. Obyektlar yorug‘likni aks etruvchi, yutuvchi, o‘tkazuvchi kabi bir qator xususiyatlarga ega bo‘lishi mumkin. Yorug‘lik bilan ishlaganda sahnalarni yortish muamollari yuzaga keladi.

Tasvir sifatini oshirishda ham sahnadagi yorug‘lik manbalarini joylashuvini geometrik modellashtirishda, yogu‘lik tushishi va obyektlar kompyuter grafikasidagi maqsadlardan biri raqamli obyekt modellaridan sintetik tasvirlarni ishlab chiqarishdir. Ba’zi ilovalar uchun fotorealizm talab qilinganda. Bu yerda visual realizm atamasi inson kuzatuvchilari sintetik tasvir va tasvirni yaratish uchun raqamli modeli ishlatilgan haqiqiy obyektning haqiqiy fotosurati o‘rtasidagi iloji boricha kam farqni sezishlari kerak. Bu realizmga sahnadagi geometriya va materiallarning batafsil modelini ishlab chiqarish orqali erishish mumkin.

Metodlar bo‘limi: ***Cook-Torrance Yoritish Modeli*** tomonidan taqdim etilgan model, iloji boricha ko‘proq jismoniy realizmga intiladi, yuqoridagi tilga olingan modellar faqat kompyuter grafikasi uchun maxsus yaratilganidan farqli o‘laroq, Kuk-Torrance modeli fizik xususiyatlardan foydalanadi va BRDFdan kutilgan barcha yoqimli xususiyatlarga (masalan, energiya

© S.A. Tastanova, A.S. Karimbayeva

tejash, murakkab subtuzilmalar va bashoratli natija) egaligi bilan ajralib turadi.[5]

Kuk-Torrance kabi BRDFlar parametrlarni fizik o‘xshashliklar bilan ishlatishda ham afzalliklarga egaligi bilan ajralib turadi, ya’ni rassomlar real ko‘rinadigan obyektlarni yaratish uchun sirt xususiyatlarini osongina sozlashlari mumkin. Natijada obyektlarni sirt ko‘rinishi tabiy ifodalaniladi. [2]

Kuk-Torrance modeli sirt mikroskopik mukammal Lambert reflektorlaridan iborat deb taxmin qiladi, ular mikrofasetlar deb ataladi. Yoritish tenglamasidagi bir nechta atamalar bu mikrofasetlarning qanday yo‘naltirilganligi, niqoblanganligi va soyalanganligi bilan bog‘liq.

Cook–Torrance yoritish modeli odatda quyidagicha yoziladi. (1)

$$I = k_a + k_d\,\rho\,(L \cdot N) + k_s\,\frac{D(\beta)\,G(\theta_i)\,F(\theta_i)}{\pi\,(E \cdot N)} \quad (1)$$

Spekulyar reflektans (ρ) bu sirtning yorug‘likni oynadek yaltiroq qaytarish qobiliyati. (2)

Ya’ni, sirtga tushgan nur tomoshabin (kamera) tomonga qanchalik kuchli va to‘plangan holda qaytishini ifodalaydi.[3][4]

$$\rho = k_s\,f_{att}\,\frac{D(\beta)\,G(\theta_i)\,F(\theta_i)}{\pi\,(L \cdot N)(E \cdot N)} \quad (2)$$

Normal Distribution Function (NDF) (Beckmann taqsimoti) (D) — bu sirt ustidagi mikroyuzalar (microfacetlar) qanday burchaklarda joylashganini ko‘rsatadi. Ya’ni sirt qanchalik silliq yoki g‘adir-budir ekanini matematik tarzda ifodalaydi.(3)

Mikrofaset BRDF ning asosiy tarkibiy qismlaridan biri uning normal taqsimot funktsiyasi bo'lib, u sirtning mikroskopik shaklini statistik jihatdan mikrofaset yo‘nalishlarining taqsimoti sifatida tavsiflaydi[1].

$$D(\beta) = \frac{e^{-\left(\frac{\tan\beta}{m}\right)^2}}{4m^2\cos^4\beta} \quad (3)$$

Oren–Nayar modeli esa qo‘pol sirtlardan chiqayotgan nurlanish tushayotgan yorug‘lik yo‘nalishi bilan kuzatuv yo‘nalishi orasidagi burchak kichraygan sari ortishini hisobga oladi. Bu hodisa mikroyuzachalar (microfacet) geometriyasidagi foreshortening effekti va sirt bo‘shliqlaridagi ichki aks etishlar (interreflection) bilan izohlanadi. Model sirtni V-shaklli yivlar ko‘rinishida joylashgan Lambertian mikroyuzachalardan tashkil topgan deb qaraydi. Sirtning qo‘polligi mikroyuzachalar qiyaliklarining Gauss taqsimotining standart og‘ishi σ\sigma σ orqali parametrlanadi: σ\sigmaσ katta bo‘lsa, sirt qo‘polroq bo‘ladi va Lambertga bo‘ysunmaslik effekti kuchayadi. [2] Oren–Nayar diffuz reflektans modeli (4)

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho}{\pi}[A + Bmax(0, cos(\phi_i - \phi_r))sin\,\alpha tan\,\beta] \quad (4)$$

bu yerda to‘g‘ridan-to‘g‘ri yoritish va sirt ichidagi qayta aks etish (interreflection) hadlari hisobga olingan. A va B parametrlari σ\sigma σ orqali aniqlanadi va energiya saqlanishi hamda fizik jihatdan asoslanganlikni ta’minlaydi.

Model haqiqiy materiallar ustida o‘tkazilgan fotometrik o‘lchovlar bilan tasdiqlangan: masalan, gips Gips: σ ≈ 30°, Qum: σ ≈ 35°, Mato: σ ≈ 42°, Loy: σ ≈ 40° Ushbu tajribalar Oren–Nayar modelining kuzatiladigan nurlanish o‘zgarishlarini aniq bashorat qilishini ko‘rsatib, realistik diffuz ko‘rinishlarni modellashtirishda Lambert modeliga nisbatan ustun ekanini tasdiqlaydi. Composite BRDF (Oren–Nayar + Cook–Torrance)

Modellashtirishga bag‘ishlangan harakatlarning bir qismi materiallarning aks ettiruvchi xususiyatlarini modellashtirishga qaratilishi kerak, chunki bu vizual realizmda asosiy omil hisoblanadi. Bu fizik modellar yordamida materiallarning aks ettirishining yo‘nalishli taqsimotini tavsiflash orqali amalga oshiriladi. Ushbu modellar samarali global yoritish hisoblash algoritmlarini loyihalash uchun mos bo‘lishi kerak. [6]

Composite BRDF (Oren–Nayar + Cook–Torrance) modeli (5)

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_d^{ON}(\omega_i, \omega_o) + f_s^{CT}(\omega_i, \omega_o) \quad (5)$$

Yuzaga tushgan yorug‘lik obyekt sirtidan ikki asosiy usulda qaytadi: diffuz (mat) va spekulyar (yaltiroq). Diffuz qaytishda yorug‘lik

(cc) BY © S.A. Tastanova, A.S. Karimbayeva

barcha yo‘nalishlarga deyarli bir xil tarqaladi, spekulyar qaytishda esa yorug‘lik ma’lum yo‘nalishda “yarqirab” qaytadi. Real materiallarning ko‘rinishi aynan ushbu ikki komponentning birgalikdagi ta’siri natijasida hosil bo‘ladi.[7]

Bu jarayon fizik jihatdan BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) orqali modellashtiriladi. Ideal diffuz (Lambertian) sirt uchun BRDF barcha tushuvchi va chiquvchi yo‘nalishlar uchun bir xil qiymatga ega bo‘lib, u quyidagicha ifodalanadi.(6)

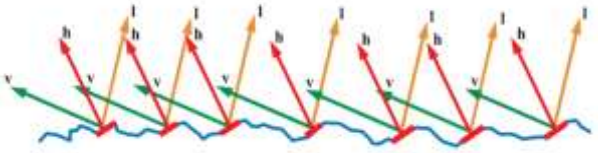
$$f_r(\omega_o, \omega_i) = \frac{\rho_d}{\pi} \qquad (6)$$

bu yerda bu yerda ρ_d— diffuz aks ettirish koeffitsienti (albedo). Ushbu modelning yarimsharsimon integrali 1 dan oshmaydi, ya’ni energiya saqlanish qonuniga mos keladi. Ideal diffuz sirt real hayotda deyarli uchramasa-da, hisoblashning soddaligi va fizik jihatdan to‘g‘ri bo‘lgani sababli diffuz materiallarni modellashtirishda keng qo‘llaniladi. Real sahnalarda esa diffuz komponent spekulyar komponent bilan birga ishlatiladi, bu esa obyektlarning haqiqiy ko‘rinishini beradi.— diffuz aks ettirish koeffitsienti (albedo). Ushbu modelning yarimsharsimon integrali 1 dan oshmaydi, ya’ni energiya saqlanish qonuniga mos keladi. Ideal diffuz sirt real hayotda deyarli uchramasa-da, hisoblashning soddaligi va fizik jihatdan to‘g‘ri bo‘lgani sababli diffuz materiallarni modellashtirishda keng qo‘llaniladi. Real sahnalarda esa diffuz komponent spekulyar komponent bilan birga ishlatiladi, bu esa obyektlarning haqiqiy ko‘rinishini beradi. [3],[4]

Cook–Torrance spekulyar component (7)

$$f_s^{CT} = \frac{D(h)G(\omega_i,\omega_o,h)F(\omega_i,h)}{4(\omega_i \cdot n)(\omega_o \cdot n)} \qquad (7)$$

Mazkur modelda H vektori (half-vector) formulada bevosita ko‘rinmasa-da, u D (Normal Distribution Function) va G (Geometry Function) funksiyalarida muhim rol o‘ynaydi. H vektori sirt yuzasidagi yorug‘likni aynan kuzatuvchi tomonga qaytaruvchi mikrofasetlarning normal yo‘nalishini ifodalaydi. Boshqacha aytganda, normal vektori H ga teng bo‘lgan mikrofasetga tushgan yorug‘lik nuri ko‘zimizga qaytadi.(1-rasm)



1-rasm *Mikrofaset modelida H (half-vector) vektorining geometrik talqini*

Tushish burchagi qaytish burchagiga teng bo‘lgani sababli, H vektori amaliyotda kiruvchi yorug‘lik yo‘nalishi (L) va kuzatuvchi yo‘nalishi (V) vektorlarining yig‘indisini normallashtirish orqali aniqlanadi:[8]

$$H = \frac{V + L}{\| V + L \|}$$

D va G taqsimot funksiyalari mikrofasetlar yo‘nalishining statistik taqsimotini va ularning soya hamda o‘zaro to‘sish effektlarini taxminiy modellashtiradi. Ushbu funksiyalar uchun turli xil matematik modellardan foydalanish mumkin. Amaliyotda keng qo‘llaniladigan variantlardan biri Bryus Uolter (Bruce Walter) tomonidan taklif etilgan GGX (Trowbridge–Reitz) taqsimotidir, u sirt yaltiroqligini realroq ifodalashi bilan ajralib turadi.[9]

Ushbu usulning asosiy jihati shundaki, yorug‘likning sirtga tushishi va sirt orqali kuzatuvchiga qaytishda yo‘qotilgan miqdori sirtning makronormaliga nisbatan simmetrik bo‘ladi. Shu sababli, G (geometriya) funksiyasini ikki qismga ajratish mumkin:

1. Yo‘qolgan yorug‘likning birinchi yarmi N va L orasidagi burchakdan hisoblanadi.

2. Keyin xuddi shu formuladan foydalanib, yo‘qolgan yorug‘likning ikkinchi yarmi V va N orasidagi burchakdan hisoblanadi.

Natijada, G funksiyasining bu ikki yarim komponenti GGX mikrofaset taqsimotini aniqroq tasvirlaydi va sirt yaltiroqligini fizik jihatdan ishonchli ifodalaydi.

D-funksiyasi har bir mikrofasetning normal yo‘nalishini H vektori bilan solishtiradi va sirt qo‘polligi asosida spekulyar yorug‘likning kuchini taqsimlaydi. GGX taqsimoti fizik jihatdan ishonchli va samarali bo‘lib, real sirtlarning yaltiroqligini aniqroq ifodalaydi.

(cc) BY © S.A. Tastanova, A.S. Karimbayeva

F. Fresnel refleksiya koeffitsiyentlari yorug'lik nuri ikki turli muhit chegarasiga tushganda, u bir qismi aks ettiriladi, bir qismi esa sinadi. Bu jarayonni fizik jihatdan Fresnel tenglamalari aniq tavsiflaydi. Fresnel koeffitsiyenti materialning spekulyar refleksiya xususiyatini burchakka bog'liq tarzda hisoblaydi.

$4(\omega_i \cdot n)(\omega_o \cdot n) -$ Pastki qism yorug'likning kirish va chiqish burchaklari bilan bog'liq taqsimotini normallashtiradi va spekulyar aks ettirishni fizik jihatdan ishonchli qiladi. Nurning sirtga qanday burchak bilan tushgani va kameraga qaytgani hisobga olinadi.

Natijalar bo'limi: Hammasini bir gapda aytsak. Oren–Nayar – mat va qo'pol sirtlar uchun Cook–Torrance – yaltiroq sirtlar uchun (metall, lak, plastik) Ikkalasini qo'shsak real hayotdagidek ko'rinish chiqadi

Asosiy formula nimani anglatadi? (7)

$$L_o(x, \omega_o) = \sum_{j=1}^{M} \int_{\Omega^+} f_r$$

$$(x, \omega_i, \omega_o)\ L_j(x, \omega_i)\ (\omega_i \cdot n)\ d\omega_i \qquad (7)$$

x nuqtadan kameraga chiqayotgan yorug'lik hamma LED lampalardan kelayotgan yorug'liklarning yig'indisi, formula qaysi tomondan kelayotgani, sirt materiali qandayligi,

nur qanchalik tik tushayotgani barchasi hisobga olinadi.

Qismlarga ajratib: $L_o(x, \omega_o) - \rightarrow$ kamera tomonga chiqayotgan yakuniy yorug'lik,

$\sum_{j=1}^{M}$ - → sahnadagi M ta LED lampaning hammasini qo'shib chiqladi. Sahnada lampalar bir neshta bo'lishi ehtimoldan holi emas.

$L_j(x, \omega_i) \rightarrow$ *j-LED dan x nuqtaga kelayotgan nur,*

$f_r(x, \omega_i, \omega_o) \rightarrow$sirt materiali nurni qanday aks ettiradi.

(Oren–Nayar + Cook–Torrance!)

$(\omega_i \cdot n)$- → nur sirtga qanchalik tik tushsa, shuncha kuchli ta'sir qiladi (qiyshiq tushsa – kamroq)

$\Omega^+ \rightarrow$ sirt ustidagi "yarim shar" (faqat yuqoridan kelgan nurlar hisoblanadi)

Yorug'likni hisoblash uchun kerak bo'ladi Monte Carlo formulasi. Kajiya (1986) tomonidan taklif qilingan Rendering Tenglamasi (Rendering Equation) kompyuter grafikasida yorug'likning tarqalishini tavsiflovchi asosiy integral tenglamadir.

Monte-Karlo usuli - bu tasodifiy (random) sonlar yordamida murakkab matematik masalalarni sonli baholash usulidir. U ayniqsa analitik yechimi yo'q yoki juda murakkab bo'lgan integrallar, ehtimollik jarayonlari va ko'p o'lchamli masalalar uchun qo'llaniladi. Monte-Karlo usuli- Yoritish tizimlarini optimizatsiya qilish masalasi odatda, murakkab geometriya, ko'p sirtlar, ko'p marta aks ettirish va ehtimollik tabiatiga ega nurlanish jarayonlari bilan bog'liq bo'ladi.[10]

Tenglamaning umumiy ko'rinishini tahlil qilsak (8)

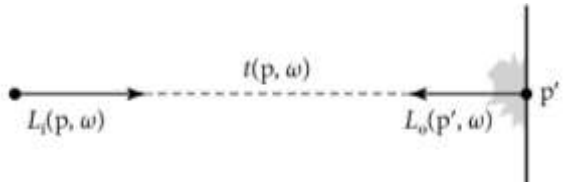
$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega^+} f_r(x, \omega_i, \omega_o)\ L_i(x, \omega_i)\ (\omega_i \cdot n)\ d\omega_i \qquad (8)$$

LTE asosidagi asosiy printsip energiya balansidir . Energiyadagi har qanday o'zgarish biron bir jarayonga "zaryadlanishi" kerak va biz barcha energiyani kuzatib borishimiz kerak. Yorug'lik chiziqli jarayon deb faraz qilganimiz uchun, tizimdan chiqadigan energiya miqdori va kiruvchi energiya miqdori o'rtasidagi farq ham chiqarilgan va yutilgan energiya o'rtasidagi farqga teng bo'lishi kerak. Bu g'oya ko'plab miqyos darajalarida amal qiladi. Makro darajada bizda quvvatning saqlanish qonuni mavjud:

$\Phi_o - \Phi_i = \Phi_e - \Phi_a$- Jismdan chiqadigan quvvat va unga kiradigan quvvat o'rtasidagi farq, u chiqaradigan quvvat va yutgan quvvat, o'rtasidagi farqga teng . $\Phi_o \Phi_i \Phi_e - \Phi_a$- Sirtda energiya muvozanatini ta'minlash uchun chiqish nurlanishi chiqarilgan nurlanish va sochilgan tushgan nurlanishning ulushiga teng bo'lishi kerak. Chiqarilgan nurlanish bilan sochilgan

(cc) BY © S.A. Tastanova, A.S. Karimbayeva

nurlanish esa sochilish tenglamasi bilan beriladi. (2-rasm)



2-rasm *nuqtasidan chiqayotgan yorug'lik va sirtning o'zidan chiqayotgan (emissiya) yorug'lik.*

Bo'sh fazodan o'tayotgan nurlanish o'zgarmaydi. Shuning uchun, nuqtadan yo'nalishdagi nurlanish bo'ylab tushayotgan nurlanishni hisoblash uchun biz nur kesishadigan birinchi sirtni topishimiz va u yerdagi yo'nalishdagi chiqish nurlanishini hisoblashimiz mumkin. Nur tashlash funksiyasi nur kesishadigan birinchi sirtdagi nuqtani beradi

nuqtasidan chiqayotgan yorug'lik va sirtning o'zidan chiqayotgan (emissiya) yorug'lik.

Nuqtaga barcha yo'nalishlardan kelayotgan yorug'lik yig'indisi (yarim sfera bo'yicha integral).

Kosinus qonuni (yorug'lik tushish burchagi bo'yicha kuchsizlanishi). Ushbu tenglama nurlarni kuzatish (ray tracing), radioziti (radiosity) va boshqa algoritmlarni yagona matematik modelga birlashtiradi. Global yoritish: Faqat to'g'ridan-to'g'ri yorug'likni emas, balki ob'ektlar orasidagi yorug'lik almashinuvini ham hisobga oladi.

Monte-Karlo usuli: Kajiya ushbu tenglamani yechish uchun Monte-Karlo integrallash usuliga asoslangan Path Tracing (yo'llarni kuzatish) algoritmini taklif qilgan. [13][14]

Tasvir sifatini oshirishda sahnadagi yorug'lik manbalarini joylashuvini geometrik modellashtirishda,

L_e (emissiya) ni o'rniga, L_i ni ko'p LED: $\sum_{j=1}^{M} L_j$ qilib yozilgan versiyasi. Ya'ni bu Rendering Equation'ning multi-light kengaytmasi. (9)

$$L_o(x, \omega_o) \approx \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \frac{f_r\left(x, \omega_{i_k}, \omega_o\right) L\left(x, \omega_{i_k}\right) \left(\omega_{i_k} \cdot n\right)}{p\left(\omega_{i_k}\right)} \quad (9)$$

Har safar tasodifiy bir yo'nalish tanlaymiz shu tomondan kelgan nur qanchalik kuchli ekanini hisoblanadi. Sirt uni kameraga qanchalik yaxshi qaytarishini hisoblaydi va hammasini o'rtacha qiymatlari olinadi.

Qismlar:

N– nechta tasodifiy namuna olindi (qancha ko'p bo'lsa, shuncha aniq)

ω_{i_k} tanlangan yo'nalish

$p(\omega_{i_k})$– shu yo'nalish tanlanish ehtimoli

yuqoridagi surat → "qancha foydali yorug'lik keldi?"

Monte-Karlo usuli murakkab matematik masalalarni, xususan, funksiyalarni integral orqali hisoblash kabi muammolarni tasodifiy namunalash asosida taxminiy yechish usulidir. Bu yondashuvda shunday tasodifiy o'zgaruvchi tanlanadiki, uning kutilgan qiymati yechilayotgan masalaga teng bo'ladi. So'ngra ko'plab tasodifiy namunalar olinib, ularning o'rtacha qiymati hisoblanadi va shu orqali yechimga yaqinlashiladi.

Monte-Karlo usulining asosiy afzalliklari kontseptual soddaligi va turli xil murakkab muammolarga qo'llash mumkinligi. U stoxastik jarayonlar bilan bog'liq masalalarda (masalan, nurlanish va yorug'lik tarqalishi) ayniqsa samaralidir.

Monte-Karlo texnikalari sahnada siz x nuqtada turibsiz.

Atrofingizda 10 ta LED bor. Har tomondan nur keladi, ammo hamma tomonni ko'rib chiqish murakkabdir. 100 ta tasodifiy tomonni tekshirasiz ularning o'rtacha yorug'ligini olasiz taxminan haqiqiy yorug'lik chiqadi.

Tadqiqotning maqsadi : Mazkur ishning asosiy maqsadi kompyuter grafikasi va fotorealistik tasvir sintezi jarayonida yorug'likning sirtlar bilan o'zaro ta'sirini fizik jihatdan asoslangan modellar orqali tavsiflash hamda murakkab sahnalarda yoritishni aniqroq hisoblash usullarini tahlil qilishdan iborat. Xususan, sirt materiallarining diffuz va spekulyar aks ettirish xususiyatlarini Oren–Nayar va Cook–Torrance BRDF modellari yordamida modellashtirish, yorug'lik tarqalishini Rendering Equation asosida ifodalash va ushbu integral tenglamani Monte-Karlo usuli orqali sonli yechish imkoniyatlarini asoslash ko'zda tutiladi.

XULOSA

Tahlillar shuni ko'rsatdiki, sirtlarning real vizual ko'rinishini modellashtirishda yagona soddalashtirilgan reflektans modeli (masalan, Lambert) yetarli aniqlikni ta'minlamaydi. Oren–Nayar modeli qo'pol va mat sirtlarda diffuz aks ettirishni aniqroq tavsiflaydi, Cook–Torrance

(cc) BY

mikrofaset modeli esa yaltiroq materiallarda spekulyar refleksiyani fizik jihatdan asoslangan tarzda ifodalaydi. Ushbu modellarni birlashtirgan Composite BRDF turli materiallarning optik xususiyatlarini yagona model doirasida ifodalash imkonini berib, vizual realizmni oshiradi. Rendering Equation yorug‘likning sahna bo‘ylab tarqalishini yagona matematik asosda ifodalaydi hamda to‘g‘ridan-to‘g‘ri va bilvosita yoritish komponentlarini birgalikda hisoblash imkonini beradi. Ushbu tenglamaning analitik yechimi amaliy jihatdan murakkab bo‘lgani sababli, uni yechishda Monte-Karlo integrallash usullaridan foydalanish samarali yondashuv hisoblanadi. Monte-Karlo usuli yuqori o‘lchamli va murakkab integrallarni hisoblashda konseptual soddaligi va universalligi bilan ajralib turadi hamda fotorealistik renderlash algoritmlarining muhim tarkibiy qismi hisoblanadi.

Umuman olganda, fizik jihatdan asoslangan reflektans modellarini global yoritish tenglamasi va Monte-Karlo baholash usullari bilan birgalikda qo‘llash fotorealistik tasvirlar yaratishda ishonchli nazariy va amaliy asosni ta’minlaydi.

ADABIYOTLAR

1. Losasso, F. (n.d.). *Surface Reflection Models*. NVIDIA.
2. Kajiya, J. T. (1986). The rendering equation. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 20(4), 143–150.
3. Pharr, M., Jakob, W., & Humphreys, G. (2016). *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
4. Pharr, M., Jakob, W., & Humphreys, G. (2016). *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. Morgan Kaufmann.
5. Heitz, E. (2016). The Ellipsoid Normal Distribution Function. *Computer Graphics and Applications*.
6. Rajapboev, M. X., & Jumanov, A. N. (TOSHKENT 2023). *Geodezik o‘lchashlarni matematik hisoblash nazariyasi*.
7. Folie, C. (2007). Physically correct surface models. Vienna University of Technology seminar course material.
8. Habr. (2016). *Physically Based Rendering va mikrofaset modellari haqida sharh*.
9. *An Overview of BRDF Models*. (2012). Technical Report LSI-2012-001.
10. Tastanova, S. A., & Karimbayeva, A. S. (yil ko‘rsatilmagan). *Yorug‘lik manbalarini pavilonda geometrik joylashuvini hisobga olgan holda Monte-Karlo yoritish modelini qurish*.
11. Nuraliev, F., Narzulloyev, O., Tastanova, S. (2023). Optimization of Fractal Structure Pattern Colors in Carpet Design Using Genetic Algorithm. In: Zaynidinov, H., Singh, M., Tiwary, U.S., Singh, D. (eds) Intelligent Human Computer Interaction. IHCI 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13741. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27199-1_59
12. F. Nuraliev, I. S. Nabiyev and S. Tastanova, "Automated System for Visualization and Optimization of Color Parameters of Fractal Images Using Artificial Intelligence," 2024 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Seoul, Korea, Republic of, 2024, pp. 93-97, doi: 10.1109/ICISCT64202.2024.10956211
13. Fakhriddin Nuraliev, Bakhbergen Nurimbetov, Kamolitdin Ismailov, Aziza Karimbaeva; Geometric modeling of three-dimensional fractal structures. Case studies on the Sierpinski triangle and the Menger sponge. AIP Conf. Proc. 7 October 2025; 3377 (1): 020007.
14. Kerimkhulle, S., Mukhanova, A., Kantureyeva, M., Koishybaeva, M., & Azieva, G. (2023). Applying a housing construction model to improve a small town demographic dynamics. AIP Conference Proceedings, 2784(1), 050018. https://doi.org/10.1063/5.0125066
15. Karimabayeva A.S., Sultonova M.T., Nurimbetov B.T., Gubenko V.A. Monte-Karlo asosidagi global yoritishda yangi perceptual RGB moslashuv usuli // Muhammad al-Xorazmiy avlodlari: ilmiy-amaliy va axborot-tahliliy jurnal. – Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, 2026. – №1 (35), mart. – ISSN 2181-9211.

© S.A. Tastanova, A.S. Karimbayeva