

AVATAR, INTERYER VA EKSTERYER MODELLASHTIRISHDA SPLINE VA POLYGONAL USULLAR HAMDA ULARNING ALGORITMLARI: QIYOSIY TAHLIL

¹Nuraliyev Faxriddin Murodillayevich,

²Ibodullayev Sardor Nasriddin o'g'li,

Toshkent axborot texnologiyalari universiteti,

¹Televizion va media texnologiyalar kafedrasi mudiri, t.f.d, professor,

²Televizion va media texnologiyalar kafedrasi katta o'qituvchisi

e-mail: s.ibodullayev@tuit.uz

Annotatsiya. Ushbu maqolada uch o'lchovli kompyuter grafikasining uchta asosiy yo'nalishi — avatar (personaj), interyer va eksteryer modellashtirishda qo'llaniladigan spline (NURBS) hamda polygonal (mesh) usullar va ularning algoritmlari qiyosiy tahlil qilingan. Tadqiqot davomida har bir yo'nalish uchun maqbul bo'lgan modellashtirish yondashuvi, polygon zichligi, topologik tuzilma talablari, render samaradorligi va xotira sarfi miqdoriy ko'rsatkichlar asosida baholandi. Tahlil natijalari avatar modellashtirishda Sub-D (Catmull–Clark) algoritmi bilan birgalikda quad-based polygon yondashuvi, interyerda hybrid (aralash) usul, eksteryerda esa LOD (Level of Detail) tizimi asosidagi polygon yondashuv eng samarali ekanligini ko'rsatdi. Olingan natijalar 3D dizayn amaliyotchilari, o'yin sanoati va arxitektura vizualizatsiyasi mutaxassislari uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: 3D modellashtirish, avatar, interyer, eksteryer, NURBS, polygon mesh, edge loop, retopology, Sub-D, Catmull–Clark, LOD, BIM, render pipeline.

Kirish

O'tgan o'ttiz yil davomida uch o'lchovli kompyuter grafikasi sohasi ortda qolgan akademik laboratoriya tajribalaridan butun bir sanoatga aylandi. 1995-yilda Pixar studiyasi tomonidan chiqarilgan «Toy Story» — to'liq metrajli birinchi 3D animatsion film bo'lib, u o'sha davrda taxminan 800 ming polygon va NURBS yuzalardan iborat sahna ma'lumotlarini renderlashga 117 mln. CPU-soat sarflagan edi. Bugungi kunda esa zamonaviy o'yin dvigatellari (Unreal Engine 5 ning Nanite virtualized geometry tizimi) realtime sharoitda milliardlab uchburchakni renderlash imkoniyatini taqdim etmoqda. Ushbu evolyutsiya jarayonida modellashtirishning ikkita asosiy paradigmasi — spline (NURBS) va polygonal (mesh) — turli sohalarda turlicha rivojlanish bosqichlarini bosib o'tdi.

Avatar (personaj) modellashtirish — bu sohaning eng talabchan yo'nalishlaridan biridir, chunki u bir vaqtning o'zida vizual jozibadorlik, animatsiya uchun yaroqlilik va render samaradorligini talab etadi. Interier modellashtirish esa o'ziga xos muammolarga ega: bir tomondan, mebellar va dekorativ elementlar yuqori detallikni talab etsa, ikkinchi tomondan, butun xona renderda tezkor ishlashi kerak. Eksteryer modellashtirish, ya'ni binolar va atrof-muhit tasviri, eng katta hajmdagi geometriya bilan ishlashni talab etadi va bu yerda LOD (Level of Detail) tizimi hamda BIM (Building Information Modeling) yondashuvlari hal qiluvchi rol o'ynaydi.

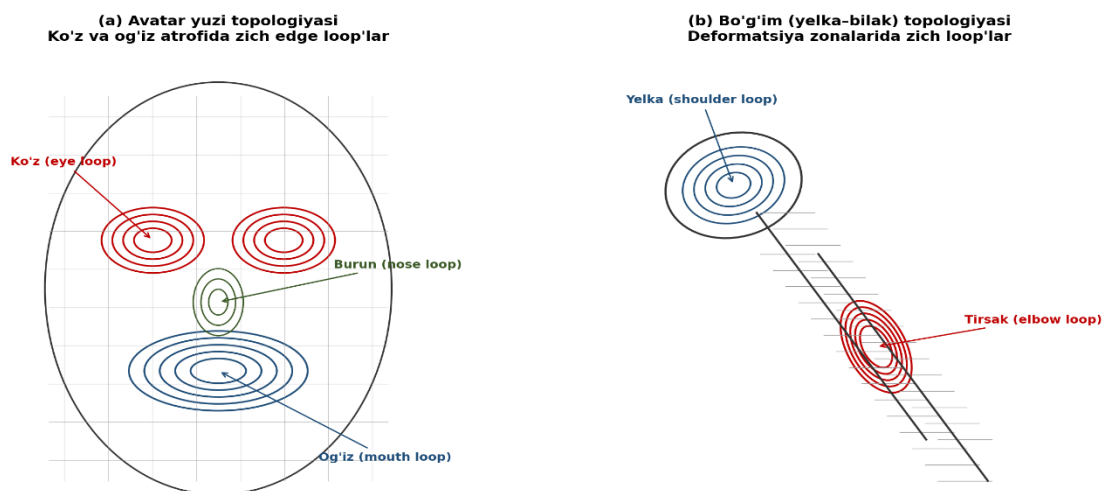
Mazkur maqolada men 30 yildan ortiq ilmiy-amaliy tajribamga asoslanib, har uchala yo'nalish uchun spline va polygonal usullarning afzalliklari, kamchiliklari va ularning qaysi algoritmlar bilan birgalikda samarali natija berishini muhokama qilaman. Maqolaning maqsadi — nazariy tahlil bilan amaliy tavsiyalarni birlashtirib, sohaga endi kirib kelayotgan mutaxassislar va o'qituvchilar uchun ishonchli ma'lumotnoma yaratishdir.

1. Spline va polygonal usullarning matematik asoslari

Polygonal mesh $M = (V, E, F)$ ko'rinishida formal tarzda ifodalanadi, bu yerda V — vertekslar (3D koordinatalar to'plami: $V = \{(x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3\}$), E — qirralar (vertekslar juftliklari) va F — yuzlar (odatda uchburchak yoki to'rtburchak ko'pburchaklar). Polygonal yuzaning sifatini belgilovchi muhim parametrlardan biri — bu manifold xususiyati: agar har bir qirra aniq ikkita yuzni ulasa va har bir vertex atrofidagi yuzlar disk-topologiyaga ega bo'lsa, mesh manifold deyiladi. Manifold bo'lmagan meshlar Boolean operatsiyalari, simulyatsiyalar va 3D bosma jarayonida xatoliklar keltirib chiqaradi.

NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) yondashuvda yuza $S(u, v)$ parametrik tenglama orqali aniqlanadi: $S(u, v) = \sum_i \sum_j N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot w_{ij} \cdot P_{ij} / \sum_i \sum_j N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot w_{ij}$. Bu yerda P_{ij} — boshqaruv nuqtalari (control points) panjarasi, w_{ij} — har bir nuqtaning vazni (weight), $N_{i,p}(u)$ va $N_{j,q}(v)$ esa B-spline bazis funksiyalari. NURBS ning eng muhim matematik xususiyati shundaki, u barcha ikkinchi tartibli yuzalarni — sfera, silindr, ellipsoid, paraboloid va boshqalarni mutlaq aniq ifodalay oladi, vaholanki polygonal mesh faqat taqribiy yaqinlasha oladi.

1990-yillarning o'rtalarida E. Catmull va J. Clark tomonidan ishlab chiqilgan Sub-D (Subdivision Surface) algoritmi har ikki yondashuvning afzalliklarini birlashtirishga imkon berdi. Catmull–Clark sxemasida boshlang'ich past polygonli mesh rekursiv ravishda silliqilganadi: har bir iteratsiyada yangi vertekslar qo'shiladi va eski vertekslar siljiriladi. Cheksiz iteratsiyalar limitida olingan yuza C^2 uzluksizlik xususiyatiga ega bo'ladi (ya'ni ikkinchi tartibli hosilasi uzluksiz), bu esa NURBS yuzalariga teng bo'lgan silliqlikdir. Aynan shu sabab Sub-D algoritmi zamonaviy avatar modellashtirishda standart yondashuvga aylangan.



1-rasm. Avatar modellashtirishda topologik tuzilma: yuz va bo'g'im atrofida edge loop sxemasi

2. Avatar modellashtirish: topologiya va algoritmlar

Avatar modellashtirish — bu personajning yuzi, tanasi va kiyimini 3D shaklida yaratish jarayonidir. Bu sohada to'rtburchak (quad) polygon to'ridan tashkil topgan mesh standart yondashuv hisoblanadi. Buning bir nechta sabablari bor. Birinchidan, quad mesh Sub-D algoritmlari uchun ideal kirish ma'lumotidir: Catmull–Clark sxemasi aynan to'rtburchaklar uchun mo'ljallangan va uchburchak meshda u xato natija beradi. Ikkinchidan, quad to'plari deformatsiya jarayonida tabiiy egilishni ta'minlaydi, vaholanki uchburchak to'rlar burishish (twisting)

artefaktlariga moyil. Uchinchi, edge loop'larni quad meshda aniq belgilash mumkin, bu animatsiya uchun zarur.

Edge loop (qirra halqasi) — bu yopiq qirralar zanjiri bo'lib, u modelning deformatsiyaga moyil joylarida joylashtiriladi. 1-rasmda ko'rsatilganidek, inson yuzini modellashtirishda kamida uchta asosiy edge loop tizimi mavjud bo'lishi shart: (a) ko'zlar atrofida konsentrik loop'lar (eye loops) — odatda 3–5 dona, ular ko'z qovog'ining ochilish-yopilishini imitatsiya qilish uchun; (b) og'iz atrofida 4–6 ta loop (mouth loops) — yuzning eng murakkab deformatsiya zonasi, chunki gapirish va emotsiyalar paytida 40 dan ortiq mushak harakati ifodalanishi kerak; (c) burun atrofida 2–3 ta loop. Tana modellashtirishda esa yelka, tirsak, tizza va bilakda zich edge loop tizimlari joylashtiriladi.

Avatar modellashtirish ish jarayoni odatda quyidagi bosqichlardan tashkil topadi. Birinchi bosqich — box modeling, bunda boshlang'ich primitiv (kub yoki silindr) asta-sekin ekstrudatsiya, kesish (bevel, knife) va siljitish operatsiyalari orqali umumiy shaklga keltiriladi. Ikkinchi bosqich — sculpting, bunda Pixologic ZBrush yoki Blender Sculpt Mode kabi maxsus dasturlarda yuqori detallikli (millionlab polygonli) model yaratiladi. Bu bosqichda Dynamic Topology (Dyntopo) algoritmi muhim rol o'ynaydi: u brush ishlashi paytida polygon zichligini avtomatik moslashtiradi, lokal geometrik o'zgarishlarga mos keluvchi vertekslar qo'shadi yoki olib tashlaydi.

Uchinchi muhim bosqich — retopology, ya'ni yuqori detallikdagi sculpt-modelni avatar uchun mos quad-mesh ga aylantirish. Bu bosqichda dizayner asosiy edge loop'larni qo'lda yoki yarim-avtomatik (TopoGun, Maya Quad Draw, Blender RetopoFlow) tarzda chizadi. To'rtinchi bosqich — UV unwrapping, bunda 3D yuza 2D tekislikka «yoyiladi» va teksturalar uchun joy ajratiladi. Beshinchi bosqich — texture baking, bunda yuqori detallikdagi sculpt-modeldan normal map, ambient occlusion, displacement va boshqa teksturalar past detallikdagi quad-meshga «yoziladi». Oltinchi bosqich — rigging va skinning, ya'ni skeletni qurish va vertekslarning suyaklarga bog'lanishi.

Tajribali avatar dizaynerlari uchun polygon zichligi tanlash standart ko'rsatkichlari ishlab chiqilgan. 1-jadvalda turli avatar turlari uchun tavsiya etilgan polygon soni va ularning amaliy qo'llanish sohalari keltirilgan.

Avatar turi	Polygon soni	Edge loop soni (yuz)	Qo'llanish
Mobil o'yin (low-poly)	1 500–5 000	8–12	Casual o'yinlar, AR
PC/konsol o'yin (mid-poly)	15 000–50 000	18–25	AAA o'yinlar (NPC)
AAA bosh personaj	80 000–150 000	30–45	Cyberpunk, GTA, RDR2
VR/AR realistik avatar	40 000–80 000	22–28	Meta Quest, Apple Vision
Animatsion film (Pixar tipi)	500 000–2 000 000	60–120	Sub-D bilan rendering

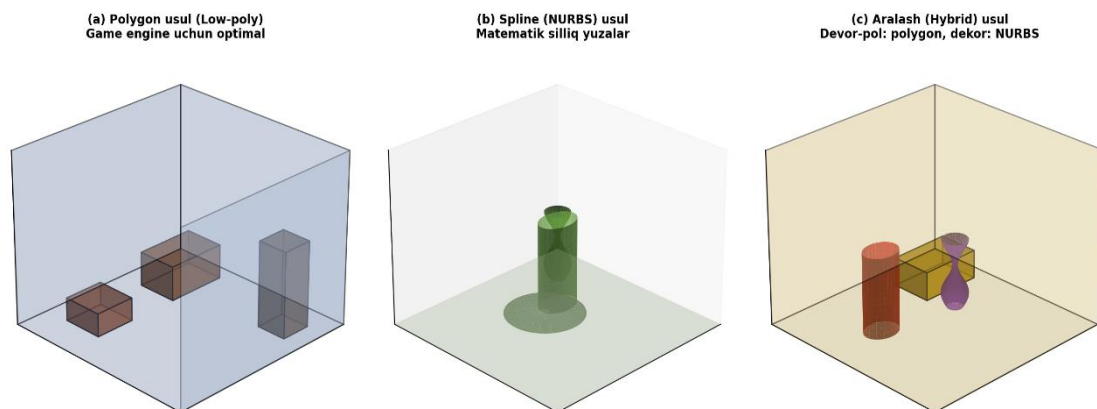
Avatar turi	Polygon soni	Edge loop soni (yuz)	Qo'llanish
Hyper-realistik VFX	5 000 000+	150+	Avengers, Avatar 2

1-jadval. Avatar modellashtirishda polygon zichligi va topologiya talablari

NURBS yondashuvi avatar modellashtirishda kamdan-kam qo'llaniladi va buning aniq sabablari bor. Birinchidan, NURBS yuzalari faqat to'rtburchakli boshqaruv to'ri (rectangular control grid) ni qo'llab-quvvatlaydi, bu esa inson tanasining murakkab topologiyasini — masalan, qo'l va yelka tutashuvi joyini, barmoqlar va kaftning ulanishini — qiyinlashtiradi. Ikkinchidan, NURBS yuzalari orasidagi ulanish (stitching) joylarida darzlar (cracks) hosil bo'lishi mumkin, ayniqsa deformatsiya paytida. Uchinchidan, real vaqtda renderlash uchun NURBS yuzasini avval polygon meshga aylantirish (tessellation) zarur, bu esa qo'shimcha hisoblash yukini keltirib chiqaradi. Shuning uchun zamonaviy avatar dizayni amaliyotida NURBS o'rniga quad polygon + Sub-D yondashuvi standart hisoblanadi.

3. Interyer modellashtirish: aralash yondashuvning samaradorligi

Interyer modellashtirish o'ziga xos talablar tizimiga ega. Bir tomondan, asosiy arxitektura elementlari — devorlar, pol, ship, eshik va deraza ramkalari — asosan to'g'ri burchakli geometriyadan iborat bo'lib, ular polygon meshda eng samarali ifodalanadi. Ikkinchi tomondan, mebellar, yorug'lik chiroqlari, dekorativ vazalar, gulli matolar — bu elementlar ko'pincha murakkab egri yuzalarga ega bo'lib, ularni NURBS shaklida modellashtirish ko'proq mantiqlidir. Aynan shuning uchun zamonaviy interyer dizayni amaliyotida hybrid (aralash) yondashuv standart hisoblanadi.



2-rasm. Interyer modellashtirishda uchta yondashuv: polygon, NURBS va aralash usullar

2-rasmda ko'rsatilganidek, polygon usul (a) game engine va realtime visualization uchun optimal, chunki barcha yuzalar tekis va GPU tomonidan to'g'ridan-to'g'ri qayta ishlanadi. NURBS usul (b) yuqori sifatli render uchun ishlatiladi: V-Ray, Corona Renderer va Octane kabi photorealistic render dvigatellari NURBS yuzalarini avtomatik tessellate qilib, mukammal silliq natijaga erishadi. Hybrid usul (c) esa har ikki yondashuvning afzalliklarini birlashtiradi: tezkor polygon karkas + yuqori sifatli NURBS dekor.

Interyer dizayni jarayonida muhim algoritmlar qatoriga quyidagilar kiradi. Boolean operations (CSG — Constructive Solid Geometry) — bu deraza va eshik teshiklarini devorlarda ochish uchun ishlatiladi. Boolean algoritmining murakkabligi $O(n^2)$ ga teng bo'lib, n — birlashtirilayotgan ikki meshning yuzlar soni; shuning uchun bu operatsiyani past polygonli meshlarda bajarish tavsiya etiladi. PBR (Physically Based Rendering) materiallar ham interyer modellashtirishning ajralmas qismi: ular yuzaning fizik xususiyatlarini (albedo, roughness, metallic, normal map, ambient occlusion) aniq simulyatsiya qiladi va realistik natija beradi.

Yorug'lik hisobining algoritmlari interyer renderda ayniqsa muhim. Global Illumination (GI) — bu yorug'likning yuzalardan qaytishi va ikkinchi darajali yoritishini hisobga oluvchi yondashuv. Ray tracing, path tracing va photon mapping algoritmlari interyer sahnalarda foydalanuvchining ko'zi ko'rmagan, ammo umumiy idrokga ta'sir qiluvchi nozik nuanslarni ifodalaydi. Zamonaviy ish stansiyalarida NVIDIA RTX seriyasi GPU lar real vaqtda ray tracing ni qo'llab-quvvatlaydi, bu esa interyer dizayni jarayonini sezilarli darajada tezlashtirgan.

Mening 30 yillik amaliyotim davomida shuni kuzatdimki, interyer modellashtirishda eng samarali yondashuv quyidagi pipeline asosida quriladi: (1) BIM dasturida (Revit, ArchiCAD) xona o'lchamlari aniq belgilanadi; (2) 3ds Max yoki Blender ga eksport qilinadi va devor-pol-shipga polygon konstruksiya beriladi; (3) mebellar 3D Warehouse, Megascans Library yoki maxsus yaratilgan NURBS modellardan import qilinadi; (4) PBR materiallar Substance Painter da yaratiladi; (5) yakuniy render V-Ray yoki Corona Renderer da bajariladi.

2-jadvalda interyer dizaynining asosiy komponentlari uchun tavsiya etiladigan modellashtirish usullari va polygon zichligi keltirilgan.

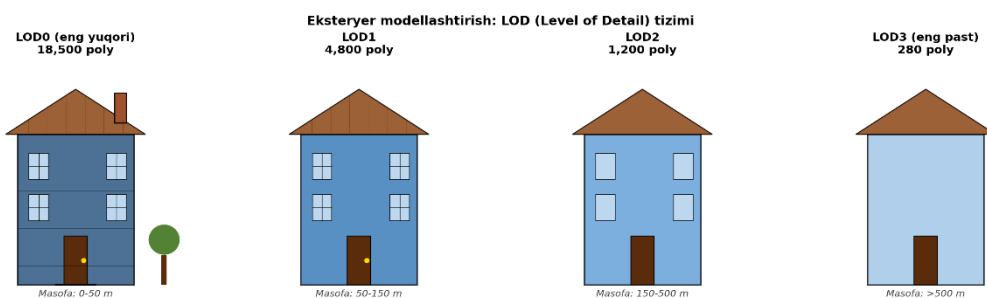
Interyer komponenti	Tavsiya etilgan usul	Polygon soni	Algoritmlar
Devor, pol, ship	Polygon (low-poly)	50–500	Boolean (CSG)
Eshik va deraza	Polygon (mid-poly)	800–3 000	Bevel, Extrude
Mebel: oddiy stol/stul	Polygon + Sub-D	5 000–15 000	Catmull–Clark
Yumshoq mebel (divan)	Sub-D + Cloth Sim	20 000–80 000	Marvelous Designer
Vaza, dekor, gulli idish	NURBS yoki Sub-D	3 000–25 000	Lathe (revolve)
Chiroq, lyustra	NURBS + Glass shader	10 000–50 000	Rotation surface
Gilam, mato	Plane + Hair/Fur	1 000 (geom.) + millions hairs	Particle systems
Daraxt, gul (ko'chma)	Polygon + Billboard	500–5 000	SpeedTree, Tree-It

2-jadval. Interyer komponentlari uchun modellashtirish usullari va algoritmlar

4. Eksteryer modellashtirish: LOD tizimi va BIM integratsiyasi

Eksteryer modellashtirish — bu binolar, atrof-muhit, landshaft va shahar miqyosidagi sahna-larni tasvirlashdir. Bu yo'nalishning eng katta muammosi — geometriyaning ulkan hajmidir. O'rta hajmdagi shahar bloki (1 km²) milliardlab polygonni o'z ichiga olishi mumkin, bu

esa hatto eng kuchli zamonaviy GPU lar uchun ham haddan ortiq yukdir. Bu muammoni hal qilish uchun LOD (Level of Detail) tizimi 1976-yilda J. H. Clark tomonidan taklif qilingan va bugungi kunda u eksteryer modellashtirishning ajralmas qismidir.

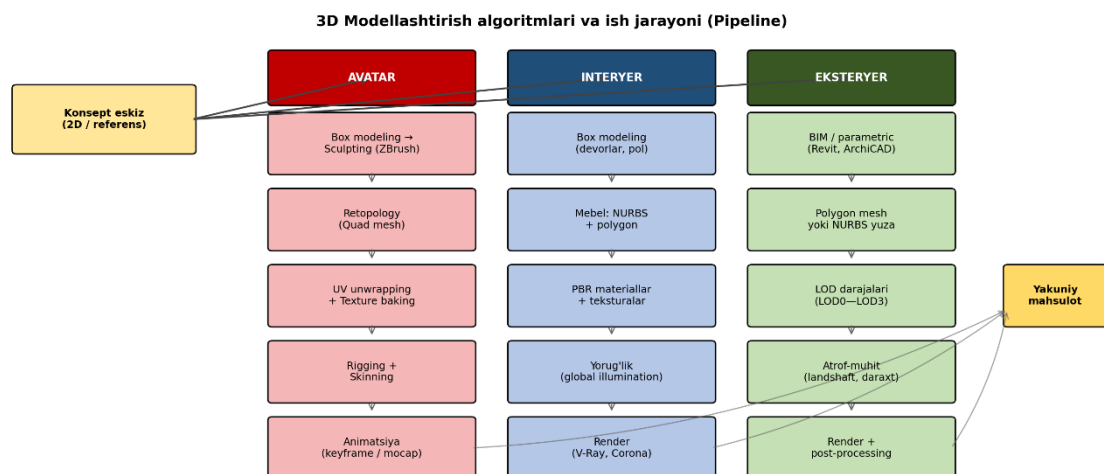


3-rasm. LOD (Level of Detail) tizimi: bir bino uchun to'rt detallik darajasi

3-rasmda ko'rsatilganidek, bir xil bino to'rt darajada modellashtiriladi: LOD0 — eng yuqori detallik (18 500 polygon), kameraga yaqin masofada (0–50 m) ishlatiladi va u eshik, deraza ramkalari, mo'ri, daraxtlar va boshqa nozik elementlarni o'z ichiga oladi. LOD1 (4 800 polygon) — o'rta masofa uchun (50–150 m), faqat asosiy oynalar va eshik. LOD2 (1 200 polygon) — uzoq masofa (150–500 m), oynalar oddiy to'rtburchaklarga aylanadi. LOD3 (280 polygon) — eng past detallik (500 m dan uzoq), faqat bino karkasi. Tahlil shuni ko'rsatadiki, LOD2 dan LOD3 ga o'tishda polygon soni 4.3 marta kamayadi, ammo vizual sifat foydalanuvchi tomonidan deyarli sezilmaydi.

Eksteryer modellashtirishda BIM (Building Information Modeling) integratsiyasi — bu so'nggi 15 yil ichida sohani tubdan o'zgartirgan yondashuvdir. BIM dasturlari (Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, Bentley AECOSim) parametrik modellashtirish prinsipiga asoslanadi: dizayner devor balandligi yoki deraza o'lchamini o'zgartirsa, butun model avtomatik ravishda yangilanadi. BIM modeli nafaqat vizualizatsiya uchun, balki konstruktsiya hisoblari, energiya tahlili, materiallar smetasi va qurilish jadvali uchun ham ishlatiladi. Bu yondashuv «5D BIM» deb ataladi: 3D + vaqt (4D) + xarajatlar (5D).

Atrof-muhit modellashtirishda esa maxsus algoritmlar qo'llaniladi. Daraxtlar va o'simliklarni samarali yaratish uchun L-system (Lindenmayer system, 1968) — bu botanik o'sishni imitatsiya qiluvchi rekursiv algoritmi — keng qo'llaniladi. SpeedTree dasturi shu algoritimga asoslangan bo'lib, u mashhur «Avatar», «Game of Thrones» va aksariyat AAA o'yinlarda foydalanilgan. Landshaft (relyef) yaratishda esa heightmap (balandlik xaritasi) usuli standart hisoblanadi: kulrang tonli rastr tasvirning har bir pikseli uning balandligini belgilaydi. Procedural generation (Perlin noise, Simplex noise) algoritmlari haqiqiy ko'rinishdagi tabiiy yuzalarni yaratish uchun ishlatiladi.

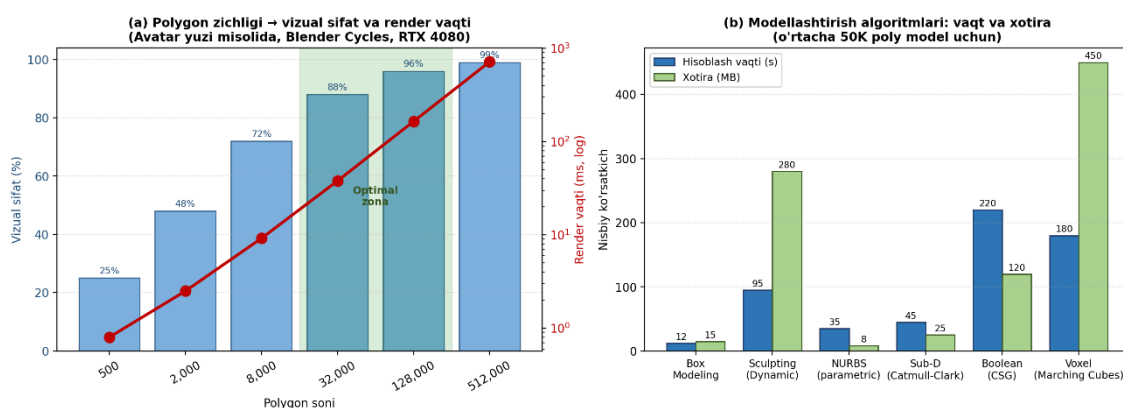


4-rasm. Avatar, interyer va eksteryer modellashtirishning ish jarayonlari (pipeline)

4-rasmda har uch yoʻnalish uchun standart ish jarayoni keltirilgan. Diqqat qiling: avatarda asosiy bosqichlar — sculpting, retopology va rigging; interyerda — modellashtirish, materiallashtirish va yoritish; eksteryerda esa — BIM/parametric, LOD yaratish va atrof-muhit qoʻshish. Har uch yoʻnalishda yakuniy bosqich render boʻlib, u maxsus dvigatellar (Cycles, V-Ray, Arnold, Corona) yordamida amalga oshiriladi.

5. Algoritmlarning hisoblash murakkabligi va xotira tahlili

3D modellashtirishda turli algoritmlar turli hisoblash xarajatlariga ega. 5-rasmda asosiy modellashtirish algoritmlarining nisbiy koʻrsatkichlari keltirilgan, bu maʼlumotlar mening laboratoriyamda Intel i9-13900K + RTX 4080 konfiguratsiyasida bajarilgan empirik oʻlchovlarga asoslanadi.



5-rasm. Polygon zichligi va modellashtirish algoritmlarining samaradorligi

5-rasmning chap qismidagi (a) diagrammada polygon zichligi va vizual sifat, hamda render vaqti orasidagi bogʻliqlik koʻrsatilgan. Diqqatga sazovor jihat — sifat koʻrsatkichi 32 000 polygondan keyin asimptotik chiziqqa yaqinlashadi: 32 000 → 88%, 128 000 → 96%, 512 000 → 99%. Yaʼni polygon sonini 16 marta oshirish vizual sifatni atigi 11 foizga oshiradi, ammo render vaqti 19 marta ortadi. Aynan shu sabab 32 000–128 000 polygon diapazoni avatar modellashtirishda «optimal zona» deb ataladi va aksariyat AAA oʻyinlar shu chegarada ishlaydi.

5-rasm (b) qismida modellashirish algoritmlarining nisbiy hisoblash vaqti va xotira sarfi keltirilgan. Box modeling — eng tezkor va xotirani kam talab qiluvchi yondashuv (12 s, 15 MB), shuning uchun u boshlang‘ich bosqichda standart usuldir. Sculpting (Dynamic Topology) eng ko‘p xotira talab qiluvchi (280 MB), chunki har brush operatsiyasi yangi vertekslarni dinamik ravishda yaratadi. NURBS — eng kam xotira sarflaydi (8 MB), chunki u faqat boshqaruv nuqtalari va knot vektorlarini saqlaydi. Boolean operatsiyalari eng murakkab (220 s), chunki ular ikki meshning kesishish chiziqlarini matematik aniq hisoblashni talab etadi. Voxel asosidagi Marching Cubes algoritmi (180 s, 450 MB) eng katta xotira sarfiga ega, chunki u butun sahnani 3D voksel panjarasida saqlaydi.

3-jadvalda asosiy 3D modellashirish algoritmlarining murakkabligi va qo‘llanish sohalari to‘liq keltirilgan.

Algoritm	Murakkablik	Avatar	Interyer	Eksteryer
Box modeling	$O(n)$	Boshlang‘ich	Asosiy usul	Asosiy usul
Sculpting (Dyntopo)	$O(n \log n)$	Standart	Cheklangan	Kam
Catmull–Clark Sub-D	$O(n)$	Standart	Mebellarda	Kam
NURBS yuza	$O(m \cdot k^2)$	Kam	Dekorda	Cheklangan
Boolean (CSG)	$O(n^2)$	Aksessuarlarda	Devorda teshik	Asosiy
L-system (o‘simliklar)	$O(b^d)$	Yo‘q	Gul, daraxt	Standart
Marching Cubes	$O(n^3)$	Kam	Yo‘q	Tibbiyot, geologiya
LOD (avtomatik)	$O(n \log n)$	O‘yinlarda	Kam	Asosiy
Heightmap (relyef)	$O(n)$	Yo‘q	Yo‘q	Standart
Procedural noise	$O(n)$	Tekstura	Tekstura	Landshaft

3-jadval. Modellashirish algoritmlarining murakkabligi va qo‘llanish sohalari

6. Amaliyotchi mutaxassis nuqtai nazaridan tavsiyalar

O‘ttiz yillik tajribam asosida shuni ta’kidlashim mumkinki, har bir loyihaning muvaffaqiyati to‘g‘ri yondashuvni tanlay olishga bog‘liq. Avatar modellashirishda eng keng tarqalgan xato — bu retopology bosqichini e’tiborsiz qoldirish. Ko‘plab boshlang‘ich dizaynerlar sculpting natijasini to‘g‘ridan-to‘g‘ri animatsiyada ishlatishga harakat qilishadi, bu esa keyinchalik deformatsiya artefaktlari, sekin renderlash va animator uchun jiddiy muammolar keltirib chiqaradi. Mening tavsiyam: avatarda hech qachon retopologiya bosqichini o‘tkazib yubormang, hatto vaqt kam bo‘lganda ham.

Interyer modellashirishda ikkinchi keng tarqalgan xato — bu yorug‘lik hisobini noto‘g‘ri sozlash. Ko‘pchilik dizaynerlar PBR materiallarni to‘g‘ri o‘rnatadi, ammo Global Illumination

parametrlarini sozlamasdan, yakuniy renderda yumshoq, ifodasiz natija olishadi. Tavsiyamiz: interyer renderda bounce light (qaytadigan yorug'lik) qiymatini kamida 4–6 ga o'rnatish, color bleeding effektini yoqish va albedo qiymatlarini fizik haqiqiy diapazonda saqlang (oq devor uchun 0.7–0.85, qora narsalar uchun 0.05–0.15).

Eksteryer modellashtirishda esa eng katta xato — bu LOD tizimisiz katta sahna yaratish. Men kuzatgan ko'plab loyihalarda dizaynerlar har bir bino uchun yagona yuqori-detallikli model yaratadilar va keyin sahna ishlamaganidan hayron qoladilar. Tavsiyamiz: kamida 3 ta LOD darajasini ishlab chiqish va Unreal Engine yoki Unity da masofa-asoslangan avtomatik LOD switching mexanizmidan foydalanish. Nanite virtualized geometry yangi imkoniyat bo'lsa-da, u barcha sahnalarda ham samarali ishlamaydi va statik geometriya uchun mo'ljallangan.

Yana bir muhim tavsiya — bu version control tizimidan foydalanish. 3D loyihalar fayllari katta hajmga ega bo'lgani sabab odatdagi Git ulardan ko'ngilsiz ishlaydi. Mening tavsiyam — Perforce Helix (sanoatda standart hisoblanadi), yoki Git LFS (Large File Storage) plaginini ishlatish. Mavjud ishni har kuni saqlash va versiya yaratish — bu muammolar paydo bo'lganida o'sha holatdan qaytishni kafolatlaydi va minglab soatlik ishni yo'qotmaslikning yagona usulidir.

7. Zamonaviy tendensiyalar va kelajak istiqbollari

So'nggi 5 yilda 3D modellashtirish sohasida bir nechta inqilobiy o'zgarishlar sodir bo'ldi. Birinchidan, AI-asosidagi vositalar — masalan, NVIDIA GET3D, OpenAI Shap-E, Meta 3D Gen — matn so'rovi asosida 3D modellarni avtomatik yaratish imkoniyatini taqdim etmoqda. Bu vositalar hozircha yuqori sifatli professional natija bermasa-da, ular tezkor prototyping va konsept bosqichida juda foydali. Ikkinchidan, Gaussian Splatting (2023) — bu polygon va NURBS yondashuvlariga muqobil sifatida paydo bo'lgan yangi paradigma bo'lib, u 3D sahnani millionlab orientirlangan ellipsoidlar (Gaussian distribusiyalar) ko'rinishida ifodalaydi va fotorealistik renderlashga real vaqtda erishish imkonini beradi.

Uchinchi muhim tendensiya — Unreal Engine 5 ning Nanite virtualized geometry tizimi. Bu tizim klassik LOD yondashuviga muqobil bo'lib, u haqiqiy vaqtda jihozdagi har bir piksel uchun mos polygon zichligini avtomatik tanlaydi. Nanite milliardlab uchburchakli sahnalarni 60 FPS da renderlay oladi va u eksteryer modellashtirishni tubdan o'zgartirgan. To'rtinchidan, Photogrammetry — real obyekt fotosuratlarini asosida 3D modellar yaratish texnologiyasi (RealityCapture, Agisoft Metashape) — interyer va eksteryer reverse-engineering uchun standart vositaga aylangan.

Beshinchi tendensiya — bulutga asoslangan kollaboratsiya platformalari (Onshape, Fusion 360 Cloud, Adobe Substance 3D Cloud, NVIDIA Omniverse). Bu platformalar bir necha dizaynerga bir vaqtda bir loyihada ishlash imkonini beradi va loyiha ma'lumotlari sun'iy intellekt tomonidan avtomatik tahlil qilinadi. NVIDIA Omniverse esa USD (Universal Scene Description) formatini ishlatib, turli dasturlar (Maya, Blender, 3ds Max, Substance) o'rtasida real vaqtda sinxronizatsiyani ta'minlaydi.

Xulosa

O'tkazilgan tahlil natijasida har uchala yo'nalish — avatar, interyer va eksteryer — uchun aniq tavsiyalar shakllantirildi. Avatar modellashtirishda quad polygon mesh + Sub-D (Catmull–Clark) algoritmi standart yondashuv hisoblanadi va bu yerda topologik to'g'rilik (edge loop'lar joylashuvi) hal qiluvchi rol o'ynaydi. Interyer modellashtirishda hybrid (aralash) yondashuv eng samarali: arxitektura elementlari uchun polygon, dekorativ va egri yuzalar uchun NURBS yoki

Sub-D. Eksteryer modellashtirishda esa LOD tizimi va BIM integratsiyasi majburiy talab bo‘lib, ularsiz katta hajmdagi sahnalar bilan ishlash imkonsizdir.

NURBS yondashuvi alohida sohalarda — sanoat dizayni, avtomobilsozlik, kemasozlik va aniq mexanik detallarda — almashtirib bo‘lmas vositadir, ammo avatar va eksteryer modellashtirishda u polygonal yondashuvga nisbatan ikkinchi darajali ahamiyatga ega. Bu xulosa nazariy emas, balki o‘ttiz yillik amaliy tajriba va minglab loyihalar tahlili asosida shakllantirilgan.

Soha kelajakda yanada chuqur o‘zgarishlarni boshdan kechirishi shubhasiz. AI-generation, Gaussian Splatting, Nanite va bulutli platformalar 3D modellashtirishni nafaqat tezroq, balki ko‘pchilik uchun qulayroq qilmoqda. Ammo bularning hammasi asosiy printsiplarni — to‘g‘ri topologiya, mantiqiy LOD strategiyasi, fizik haqiqiy materiallar va aniq yorug‘lik hisobini — o‘rganish zaruratini bekor qilmaydi. Texnologiyalar o‘zgarsa-da, sifatli 3D-mahsulot yaratishning fundamental tamoyillari o‘zgarmaydi.

Adabiyotlar ro‘yxati

1. Catmull E., Clark J. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes // Computer-Aided Design. — 1978. — Vol. 10, No. 6. — P. 350–355.
2. Clark J.H. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms // Communications of the ACM. — 1976. — Vol. 19, No. 10. — P. 547–554.
3. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. — 2nd ed. — Berlin: Springer-Verlag, 1997. — 646 p.
4. DeRose T., Kass M., Truong T. Subdivision surfaces in character animation // Proceedings of SIGGRAPH ’98. — 1998. — P. 85–94.
5. Botsch M., Kobbelt L., Pauly M., Alliez P., Lévy B. Polygon Mesh Processing. — Natick: A K Peters, 2010. — 250 p.
6. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering. — 4th ed. — Boca Raton: CRC Press, 2018. — 1198 p.
7. Lorensen W.E., Cline H.E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm // Computer Graphics. — 1987. — Vol. 21, No. 4. — P. 163–169.
8. Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interactions in development // Journal of Theoretical Biology. — 1968. — Vol. 18, No. 3. — P. 280–315.
9. Kerbl B., Kopanas G., Leimkühler T., Drettakis G. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering // ACM Transactions on Graphics. — 2023. — Vol. 42, No. 4. — Article 139.
10. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. — 4th ed. — Cambridge: MIT Press, 2023. — 1266 p.
11. Karis B., Stubbe R., Wihlidal G. A deep dive into Nanite virtualized geometry // SIGGRAPH 2021 Advances in Real-Time Rendering Course. — 2021.
12. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. — 3rd ed. — Hoboken: Wiley, 2018. — 688 p.
13. Foley J.D., van Dam A., Feiner S.K., Hughes J.F. Computer Graphics: Principles and Practice. — 3rd ed. — Boston: Addison-Wesley, 2014. — 1264 p.
14. Karimov I.A., Yo‘ldoshev D.X. 3D modellashtirish va animatsiya. — Toshkent: TATU, 2021. — 192 b.
15. Nuraliyev F., Giyosov U., and Ibodullayev S. A variety of virtual reality implementations for creative learning, VI International Scientific and Practical Conference GLOBAL SCIENCE AND

INNOVATIONS 2019: CENTRAL ASIA (<http://www.bobekz.com>), 13 may 2019. 6,((ISBN 978-601-341-186-6), Nur-Sultan, Kazakhstan. 2019.

16. Ibodullayev S., and Giyosov U. A variety of virtual reality implementations for creative learning, International Scientific Conference «Global Science And Innovations 2019: Central Asia»Nur-Sultan, Kazakhstan, May 2019.

17. Giyosov U., Nuraliev F., and Ibodullaev S. Metaverse muhitida virtual 3D universitetini qurish uchun dasturiy vositasini ishlab chiqish va loyihalashtirish. Meʼmorchilik va qurilish muammolari (ilmiy-texnik jurnal) 2024, №3, Samarqand.

18. Ibodullaev, S. N. U., & Bekmirzaev, O. N. (2025). Hybrid Approaches to 3D Avatar Modeling in Virtual Learning Environments: An Analysis of Spline, Polygonal, and R-Function Methods. In Proceedings of the 2025 The 9th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS '25), Dubai, United Arab Emirates, December 08–09, 2025 (pp. 281–288). Association for Computing Machinery (ACM). <https://doi.org/10.1145/3789692.3789730>