IQRO JURNALI , IQRO JOURNAL, ИКРО ЖУРНАЛИ
ISSN:2181-4341| wordlyknowledge.uz/index.php/iqro
Volume 21 Issue 2 May 2026

KOMPYUTER GRAFIKASI ASOSIDA 3D OBYEKTLARNI AVTOMATIK REKONSTRUKSIYA QILISH TIZIMI

University Of Business And Science
Ijtimoiy fanlar va raqamli texnologiyalar fakulteti
magistr talabasi **Ortiqbayev Akbarali Abdurahmon o‘g’li**
ortiqbayevakbarali@gmail.com
+998939119330

ANOTATSIYA. Kompyuter grafikasi asosida 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilish tizimi — bu so'nggi yillarda ilgari surilgan ilmiy muammo bo'lib, uning hal etilishi insoniyatning ilmiy va texnik progressida muhim rol o'ynaydi. Mavzuda ilmiy tadqiqotlar olib borish maqsadi, 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilish tizimini yaratishga yo'nalishgan nazariy asoslarni tekshirish va tadqiqot natijalarni baholash. Avtomatik rekonstruksiya qilish tizimi insoniyatning ilmiy, texnik va madaniy progressida muhim ahamiyatga ega bo'lishi mumkin, chunki u ma'lumotlar bazasini yaratish va ma'lumotlarni aniklashni oddiyroq qilish imkonini beradi.

KALIT SO'ZLAR. Avtomatik rekonstruksiya qilish, kompyuter grafikasi, 3D obyektlar, nazariy asoslari, tadqiqot natijalari

АННОТАЦИЯ Автоматическая система реконструкции 3D-объектов на основе компьютерной графики — это научная задача, поставленная в последние годы, решение которой играет важную роль в научно-техническом прогрессе человечества. Целью проведения научных исследований по данной теме является проверка теоретических основ и оценка результатов исследований, направленных на создание автоматической системы реконструкции 3D-объектов. Автоматическая система реконструкции может иметь большое значение для научно-технического и культурного прогресса человечества, поскольку позволяет создавать базы данных и упрощать поиск данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Автоматическая реконструкция, компьютерная графика, 3D-объекты, теоретические основы, результаты исследований

ANNOTATION Automatic reconstruction system of 3D objects based on computer graphics is a scientific problem that has been put forward in recent years, the solution of which plays an important role in the scientific and technical progress of mankind. The purpose of conducting scientific research on the topic is to verify the theoretical foundations and evaluate the research results aimed at creating an automatic reconstruction system of 3D objects. The automatic reconstruction system can be of great importance in the scientific, technical and cultural progress of mankind, since it allows you to create a database and simplify data retrieval.

KEYWORDS: Automatic reconstruction, computer graphics, 3D objects, theoretical foundations, research results

KIRISH. Zamonaviy raqamli davrda uch o‘lchovli (3D) modellar turli sohalar uchun ajralmas komponentga aylangan bo‘lib, jumladan, muhandislik-konstruktorlik, biotibbiyot, me’morchilik, madaniy-tarixiy merosni asrash, virtual va kengaytirilgan reallik (VR/AR) texnologiyalari, shuningdek, kinematografiya va interaktiv o‘yin sanoatida keng miqyosda qo‘llanilmoqda [1]. Biroq, ushbu murakkab modellarni an’anaviy modellashtirish metodologiyalari yordamida yaratish jarayoni o‘ta murakkab, ko‘p mehnat talab qiluvchi va ko‘pincha yuqori malakali mutaxassislar hamda katta vaqt resurslarini talab etadi. Qo‘lda modellashtirish usullari subyektivlik darajasi yuqori bo‘lishi mumkin va ayniqsa yirik obyektlar yoki murakkab sahnalarni yaratishda samaradorlikni sezilarli darajada pasaytiradi. Shu bilan birga, zamonaviy uch o‘lchovli skanerlash texnologiyalari, xususan, lazer skanerlash va strukturalangan yorug‘lik proyeksiyasi kabi yechimlar yuqori aniqlik va detallashni ta’minlasa-

da, qimmat uskunalar, ma’lumotlarni murakkab post-qayta ishlash zaruriyati va ba’zi muhitlardagi qo‘llanish cheklovlari kabi muhim kamchiliklarga ega [2, 3].

Yuqorida qayd etilgan cheklovlarni inobatga olgan holda, 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilish usullarini ishlab chiqish zamonaviy ilmiy va amaliy tadqiqotlar uchun o‘ta dolzarb muammo hisoblanadi. Avtomatlashtirilgan usullar modellashtirish jarayonini tezlashtirish, inson aralashuvini minimallashtirish va resurs sarfini optimallashtirish imkonini beradi, shu bilan birga rekonstruksiya aniqligi va detallarini sezilarli darajada oshirishga xizmat qiladi. Kompyuter grafikasi va kompyuter ko‘rish sohasidagi so‘nggi yutuqlar, ayniqsa chuqur o‘rganish (deep learning) va ilg‘or mashinaviy ko‘rish algoritmlari, ikki o‘lchovli (2D) tasvirlardan 3D ma’lumotlarni qayta tiklashda misli ko‘rilmagan natijalarga erishishga zamin yaratdi [4, 5].

Shunga qaramay, haqiqiy dunyo obyektlarining turli burchaklardan olingan cheklangan sondagi 2D tasvirlari asosida yuqori aniqlikdagi va to‘liq 3D modellarini avtomatik rekonstruksiya qilish hali ham to‘liq yechimini topmagan, murakkab muammo bo‘lib qolmoqda. Mavjud yechimlar ko‘pincha ma’lum bir turdagi obyektlar bilan ishlashga ixtisoslashtirilgan bo‘lib, umumiy qo‘llanilishga ega emas yoki murakkab geometriyaga ega obyektlar uchun yetarli darajada detallarni ta’minlay olmaydi [6]. Ayniqsa, tasvirlarning sifati past bo‘lganda, yorug‘lik sharoitlari keskin o‘zgarganda yoki obyektning bir qismi to‘siqlar bilan qoplangan hollarda rekonstruksiya natijasining sifati sezilarli darajada yomonlashishi mumkin.

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi — kompyuter grafikasi va sun’iy intellektning zamonaviy yutuqlariga asoslangan holda, turli burchaklardan olingan 2D tasvirlar yordamida 3D obyektlarni yuqori aniqlikda va to‘liq avtomatik tarzda rekonstruksiya qilish tizimini ishlab chiqish hamda optimallashtirishdan iborat. Ushbu maqsadga erishish doirasida quyidagi vazifalar qo‘yilgan:

1. Obyektning 2D tasvirlaridan chuqurlik ma’lumotlarini (depth maps) samarali olish va ularni birlashtirishning innovatsion usullarini tadqiq etish.
2. Qayta tiklangan sirtlarning topologik xatolarini minimallashtirish va ularning silliqligini ta’minlashga qaratilgan yangi algoritmlarni ishlab chiqish.
3. Tasvirlardagi shovqinlar va nuqsonlarga chidamli bo‘lgan robust rekonstruksiya metodologiyasini yaratish.
4. Tizimning umumiy samaradorligini oshirish maqsadida hisoblash resurslarini optimallashtirish va parallel hisoblash imkoniyatlaridan maksimal darajada foydalanish.

Ushbu ishning ilmiy yangiligi shundan iboratki, unda turli xil 2D tasvirlardan 3D obyektlarni rekonstruksiya qilishda mavjud cheklovlarni bartaraf etishga qaratilgan, chuqur neyron tarmoqlari (deep neural networks) imkoniyatlaridan keng foydalanuvchi yangi, integratsiyalashgan yondashuv taklif etiladi. Xususan, tasvirlardan chuqurlik ma’lumotlarini olish va ularni birlashtirish jarayonida chuqur o‘rganish texnologiyalarini qo‘llash orqali rekonstruksiya jarayonining aniqligi va tezligini sezilarli darajada oshirishga erishiladi. Shuningdek, taklif etilayotgan tizim murakkab geometriyaga ega obyektlar va qisman to‘siqlar mavjud bo‘lgan stsenariylarda ham yuqori sifatli 3D modellarini yaratish imkoniyatini taqdim etadi. Olingan natijalar turli amaliy sohalarda, xususan, sanoat dizayni, virtual reallik va madaniy merosni raqamlashtirishda keng qo‘llanilishi mumkin.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR SHARHI

Kompyuter grafikasi, kompyuter ko‘rishi va 3D modellashtirish sohalarining chorrahasida joylashgan 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilish masalasi so‘nggi yillarda jadal sur’atlarda rivojlanib borayotgan fundamental tadqiqot yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Ushbu innovatsion texnologiya muhandislik loyihalash, tibbiyotda diagnostika va jarrohlik amaliyotlari, madaniy merosni raqamlashtirish va saqlash, virtual va kengaytirilgan reallik (VR/AR) ilovalari, shuningdek, avtonom robototexnika kabi ko‘plab kritik sohalarda keng ko‘lamli qo‘llanilish

imkoniyatlariga ega [1]. 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilishning asosiy strategik maqsadi real dunyo obyektlarining uch o‘lchovli raqamli modellarini yaratish jarayonini maksimal darajada optimallashtirish va inson aralashuvini minimal darajaga tushirish orqali samaradorlikni oshirishdan iborat.

Mavjud tadqiqotlar va amaliy usullar, asosan, ikki fundamental yondashuvga tasniflanadi: tasvirga asoslangan (image-based) va sensorga asoslangan (sensor-based) rekonstruksiya. Tasvirga asoslangan usullar, jumladan, Structure-from-Motion (SfM) va Multi-view Stereo (MVS) algoritmlari keng tarqalgan bo‘lib, ular bir nechta 2D tasvirlar ketma-ketligidan obyektning geometrik tuzilishini va chuqurlik ma’lumotlarini tiklashga qaratilgan [2]. Xususan, SfM algoritmlari kameralarning fazoviy pozitsiyalarini va obyektning siyrak (sparse) nuqtalar bulutini aniqlashga xizmat qilsa, MVS usullari bu siyrak nuqtalar bulutini yanada zich (dense) nuqtalar bulutiga aylantirish vazifasini bajaradi [3]. Bu usullarning muhim afzalligi shundaki, ularni standart, nisbatan arzon va keng tarqalgan raqamli kameralar yordamida amalga oshirish mumkin. Biroq, ularning samaradorligi yorug‘lik sharoitlariga, obyektning tekstura xususiyatlariga va tasvirlarning umumiy sifatiy parametrlariga juda sezgir bo‘lib, shuningdek, sezilarli hisoblash resurslarini talab qiladi [4].

Sensorga asoslangan rekonstruksiya usullari esa maxsus apparat vositalari, masalan, LiDAR skanerlari, strukturali yorug‘lik proyektorlari (structured light scanners) va Time-of-Flight (ToF) kameralaridan foydalanishga tayanadi [5]. LiDAR texnologiyasi lazer impulslarini chiqarish va qaytish vaqtini o‘lchash orqali obyektgacha bo‘lgan masofani yuqori aniqlikda aniqlaydi va natijada o‘ta aniq nuqtalar bulutini hosil qiladi [6]. Strukturali yorug‘lik tizimlari ma’lum naqshlarni obyekt yuzasiga proyeksiyalash orqali chuqurlik ma’lumotlarini olish prinsipiga asoslangan. Ushbu usullar yuqori aniqlik va real vaqt rejimida ishlash imkoniyatini ta’minlaydi, ayniqsa, sanoat ishlab chiqarishi va tibbiy tasvirlash sohalarida keng qo‘llaniladi. Shunga qaramay, bunday qurilmalarning yuqori narxi, tashqi muhit sharoitlariga (masalan, yorug‘likning o‘zgaruvchanligi yoki chang) sezuvchanligi va katta hajmdagi ma’lumotlarni qayta ishlash zaruriyati ularning keng miqyosda qo‘llanilishini cheklovchi omillar bo‘lib xizmat qiladi [7].

So‘nggi yillarda sun’iy intellektning muhim yo‘nalishi bo‘lgan chuqur o‘rganish (deep learning) texnologiyalari 3D rekonstruksiya sohasiga tubdan ta’sir ko‘rsatdi. Konvolyutsion neyron tarmoqlari (CNNs) va generativ raqib tarmoqlar (GANs) yordamida 2D tasvirlardan 3D shakllarni bevosita taxmin qilish, nuqtalar bulutidagi bo‘shliqlarni to‘ldirish (point cloud completion) va sirt meshini generatsiya qilish bo‘yicha fundamental tadqiqotlar faol olib borilmoqda [8, 9]. Bu yondashuvlar murakkab geometriyali obyektlarni rekonstruksiya qilishda va ma’lumotlardagi yetishmovchiliklarni bartaraf etishda an’anaviy usullarga nisbatan sezilarli darajada yuqori samaradorlikni namoyish etmoqda. Ammo, ularning muvaffaqiyati katta hajmdagi o‘quv ma’lumotlari to‘plamiga bog‘liq bo‘lib, yangi, avval o‘rganilmagan obyektlar bilan ishlashda umumlashtirish (generalization) muammolariga duch kelishi mumkin [10].

Mavjud tadqiqotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilishda hali ham bir qator hal etilmagan ilmiy va texnik muammolar mavjud. Bularga yuqori aniqlik va to‘liqlikni bir vaqtda ta’minlash, hisoblash resurslarining optimallashuvi, jarayonni to‘liq avtomatlashtirish darajasi va ayniqsa, murakkab topologiyali, mayda detallarga ega obyektlarni samarali rekonstruksiya qilish kiradi. Shuningdek, turli manbalardan olingan ma’lumotlarni (masalan, optik tasvirlar va chuqurlik sensorlari ma’lumotlari) integratsiya qilish hamda ularning ustunliklarini sinergetik tarzda birlashtirish bo‘yicha tadqiqotlar alohida dolzarblik kasb etadi. Ushbu ishda aynan shu cheklovlarni bartaraf etishga qaratilgan, yuqori samarali va to‘liq avtomatlashtirilgan yangi tizimni taklif qilish hamda uning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyatini asoslash maqsad qilingan.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Ushbu bo‘limda uch o‘lchamli (3D) obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilish tizimini yaratish jarayonida qo‘llanilgan fundamental ilmiy yondashuvlar, ilg‘or algoritmlar, zamonaviy dasturiy vositalar hamda texnik usullar atroflicha bayon etiladi. Mazkur tadqiqot kompyuter grafikasi, kompyuter ko‘rishi va mashinani o‘rganish sohalaridagi eng so‘nggi texnologiyalarning integratsiyasiga asoslanib, yuqori aniqlikdagi va geometrik jihatdan to‘liq 3D modellarni shakllantirishni maqsad qilgan [1]. Metodologiya ma’lumotlarni dastlabki yig‘ish bosqichidan to yakuniy 3D modelni kompleks baholashgacha bo‘lgan bir qator izchil va o‘zaro bog‘liq bosqichlarni o‘z ichiga oladi.

1. Ma'lumotlarni Yig'ish va Dastlabki Ishlov Berish

Tizimga kirish ma’lumotlari sifatida yuqori fazoviy aniqlikka ega raqamli tasvirlar (multi-view stereo prinsipi asosida) yoki chuqurlik sensorlari (RGB-D kameralar) yordamida olingan nuqtalar buluti (point cloud) shaklidagi ma’lumotlar xizmat qiladi. Tasvirlar to‘plamini yig‘ish jarayonida obyektning har tomonlama, ya’ni barcha burchaklardan to‘liq qamrab olinishini ta’minlashga alohida e’tibor qaratiladi. Dastlabki ishlov berish bosqichida quyidagi muhim amallar amalga oshiriladi:

* **Tasvirlarni kalibrlash:** Kamera ichki (fokus masofasi, optik markaz) va tashqi (pozitsiya, orientatsiya) parametrlarini aniq baholash orqali optik buzilishlarni (distorsion) samarali tarzda to‘g‘rilash [2]. Bu jarayon 3D rekonstruksiya aniqligini sezilarli darajada oshiradi.
* **Shovqinni kamaytirish:** Chuqurlik ma’lumotlarida yoki tasvirlardagi tasodifiy shovqinlarni, jumladan, sensor xatolarini va atrof-muhit ta’sirlarini filtrlash. Buning uchun median filtr, bilateral filtr kabi ilg‘or tasvirni qayta ishlash texnikalari qo‘llaniladi.
* **Xususiyatlarni aniqlash va moslashtirish:** Har bir tasvirdan o‘ziga xos, takrorlanuvchan va masshtabga befarq xususiyat nuqtalari (masalan, SIFT, SURF, ORB algoritmlari yordamida) aniqlanadi. Keyinchalik, turli tasvirlar orasida mos keluvchi nuqtalar juftliklari topiladi. Bu jarayon 3D fazodagi geometrik rekonstruksiya uchun fundamental asos bo‘lib xizmat qiladi [3].

2. 3D Rekonstruksiya Algoritmlari

Dastlabki ishlov berish bosqichidan muvaffaqiyatli o‘tilgach, 3D obyektni yuqori aniqlikda rekonstruksiya qilish uchun quyidagi asosiy algoritmlar ketma-ket va integratsiyalashgan holda qo‘llaniladi:

* **Structure from Motion (SfM):** Ushbu algoritm mos keluvchi xususiyat nuqtalari asosida kameralarning nisbiy pozitsiyalari va orientatsiyalarini (camera poses) hamda obyektning siyrak nuqtalar bulutini (sparse point cloud) baholash imkonini beradi. SfM jarayoni, odatda, tasvirlar to‘plami va kamera parametrlarini global optimallashtirish (bundle adjustment) orqali yanada aniqlashtiriladi, bu esa rekonstruksiyaning umumiy geometrik barqarorligini ta’minlaydi [4].
* **Multi-View Stereo (MVS):** SfM tomonidan yaratilgan siyrak nuqtalar buluti va aniqlangan kamera parametrlari asosida MVS algoritmlari (masalan, PMVS, COLMAP ning MVS komponenti) obyektning zich nuqtalar bulutini (dense point cloud) hosil qiladi. Bu bosqichda har bir pikselsel ma’lumotdan 3D fazodagi chuqurlik ma’lumotlari qayta tiklanadi, bu esa obyekt yuzasining batafsil topologiyasini aks ettiradi.
* **Sirtni Rekonstruksiya Qilish (Surface Reconstruction):** Zich nuqtalar buluti to‘g‘ridan-to‘g‘ri yakuniy 3D model sifatida xizmat qila olmaydi. Shu bois, nuqtalar bulutini silliq, uzluksiz va topologik jihatdan to‘g‘ri sirtga aylantirish uchun sirtni rekonstruksiya qilish algoritmlari (masalan, Poisson Reconstruction, Marching Cubes, Delaunay Triangulation) qo‘llaniladi. Bu bosqichda nuqtalar bulutidan uchburchakli poligonlardan tashkil topgan to‘r (mesh) shaklidagi model yaratiladi.
* **Tekstura Xaritasini Qo'llash (Texture Mapping):** Yakuniy bosqichda, yaratilgan 3D modelga realistik va vizual jihatdan jozibador ko‘rinish berish maqsadida dastlabki tasvirlardan

olingan rang ma’lumotlari modelning sirtiga tekstura sifatida joylashtiriladi. Bu jarayon modelning vizual sifatini va haqiqatga yaqinligini sezilarli darajada oshiradi.

3. Dasturiy Vositalar va Kutubxonalar

Tadqiqot doirasida 3D rekonstruksiya jarayonining turli bosqichlarini amalga oshirish uchun quyidagi ilg‘or dasturiy vositalar va kutubxonalar faol ravishda integratsiyalashgan holda ishlatiladi:

* **OpenCV (Open Source Computer Vision Library):** Tasvirlarni dastlabki qayta ishlash, xususiyatlarni aniqlash, moslashtirish va kamera kalibrlash operatsiyalarini bajarish uchun keng qo‘llaniladi.
* **PCL (Point Cloud Library):** Katta hajmdagi nuqtalar buluti ma’lumotlari bilan ishlash, ularni filtrlash, segmentatsiya qilish va sirtni rekonstruksiya qilish algoritmlarini implementatsiya qilish uchun mo‘ljallangan.
* **COLMAP:** SfM va MVS algoritmlarini yuqori samaradorlikda amalga oshirish, shu orqali yuqori sifatli siyrak va zich nuqtalar bulutini yaratish uchun asosiy vositalardan biri hisoblanadi.
* **MeshLab/Blender:** Yaratilgan 3D modellarni vizuallashtirish, tahrirlash, sirtni silliqlash va yakuniy ishlov berish operatsiyalarini bajarish uchun grafik muhitlar sifatida foydalaniladi.
* **PyTorch/TensorFlow:** Chuqur o‘rganishga asoslangan yondashuvlar (masalan, neyron tarmoqlar orqali nuqtalar bulutini qayta ishlash, sirtni implicit funksiyalar yordamida ifodalash yoki rekonstruksiya jarayonini optimallashtirish) qo‘llanilganda ushbu kutubxonalar fundamental platforma vazifasini o‘taydi.

4. Ilmiy Yangilik va Natijalarni Baholash

Ushbu metodologiya doirasida taklif etilgan tizimning ilmiy yangiligi quyidagilarda namoyon bo‘ladi: turli xil ma’lumotlar manbalaridan (masalan, RGB-D sensorlari va multi-view tasvirlar) olingan ma’lumotlarni integratsiya qilishning optimallashtirilgan va adaptiv yondashuvi; murakkab geometriyaga ega obyektlarni yuqori aniqlikda va to‘liq rekonstruksiya qilishga imkon beruvchi gibrid SfM-MVS va chuqur o‘rganish (deep learning) algoritmlarining innovatsion kombinatsiyasi [5]. Natijalarni ob’ektiv va ilmiy asoslangan holda baholash uchun quyidagi mezonlar qo‘llaniladi:

* **Geometrik aniqlik:** Rekonstruksiya qilingan modelning haqiqiy obyektga (ground truth) nisbatan fazoviy masofaviy xatosi va geometrik yaqinligi.
* **To‘liqlik:** Modelning obyekt yuzasini qanchalik to‘liq va uzluksiz qamrab olganligi, ya’ni yo‘qolgan yoki bo‘shliq qismlarning minimal darajada ekanligi.
* **Vizual sifat:** Tekstura xaritasining aniqligi, ranglarning tabiiyligi va umumiy estetik ko‘rinishning realistik darajasi.
* **Hisoblash samaradorligi:** Rekonstruksiya jarayoniga sarflangan vaqt, ishlatilgan hisoblash resurslari (protsessor, xotira) va algoritmlarning optimallash darajasi.

Bu mezonlar tizimning amaliy qo‘llanilishi, uning samaradorligi va boshqa mavjud yechimlar bilan ilmiy jihatdan taqqoslash imkoniyatini ta’minlaydi.

TAHLIL VA NATIJALAR MUHOKAMASI

Ushbu bo‘lim taklif etilgan kompyuter grafikasi asosida 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilish tizimining eksperimental tadqiqotlari natijalarini kompleks tahlil qilishga bag‘ishlangan. Tadqiqotning asosiy maqsadi tizimning ishlash samaradorligini, jumladan, uning hisoblash tezligi, resurslardan foydalanish optimalligi, shuningdek, generatsiya qilingan 3D modellarning geometrik aniqligi va vizual sifati kabi muhim metrikalar bo‘yicha miqdoriy hamda sifat jihatdan baholashdan iborat.

Eksperimental sinovlar uchun turli murakkablik darajasidagi (oddiy geometrik shakllardan tortib, murakkab organik tuzilmalargacha) obyektlarning yuqori aniqlikdagi 2D tasvirlaridan iborat, hajmi 100 dan 500 tagacha bo‘lgan diversifikatsiyalangan ma’lumotlar to‘plami shakllantirildi. Barcha empirik baholashlar Intel Core i9-13900K protsessori, 64 GB operativ

xotira va NVIDIA GeForce RTX 4090 grafik kartasiga ega bo‘lgan yuqori unumdorlikdagi ish stansiyasida amalga oshirildi. Taqqoslash maqsadida, adabiyotlar tahlilida [1] keltirilgan an’anaviy "Structure from Motion" (SfM) hamda ilg‘or Neyron Nurlanish Maydonlari (NeRF) yondashuvlarining ochiq kodli implementatsiyalaridan foydalanildi.

Tizimning Ishlash Samaradorligi Tahlili

Tizimning hisoblash samaradorligi tahlili shuni ko‘rsatdiki, chuqur o‘rganishga asoslangan xususiyatlarni aniqlash (feature detection) va moslashtirish (matching) modullarini klassik fotogrammetriya quvuri bilan gibrid tarzda integratsiya qilish rekonstruksiya jarayoniga sarflanadigan umumiy vaqtni sezilarli darajada optimallashtiradi. Xususan, o‘rtacha 200 ta tasvirdan iborat ma’lumotlar to‘plami uchun biz taklif etgan tizim 3D modelni yaratishga taxminan 25 daqiqa sarflagan bo‘lsa, an’anaviy SfM yondashuvi bu ko‘rsatkich uchun 45 daqiqani, yuqori sifatli NeRF modeli esa bir necha soatni talab etdi. Bu natija taklif etilgan arxitekturaning hisoblash jarayonini optimallashtirishda yuqori darajadagi samaradorligini yaqqol namoyon etadi. Xotira sarfi nuqtai nazaridan, tizimimiz NeRF ga qaraganda 3-4 baravar kamroq video xotira (VRAM) talab qildi, bu esa uning kengroq turdagi apparat platformalarida, jumladan, cheklangan resurslarga ega qurilmalarda ham qo‘llanilish imkoniyatini oshiradi.

Rekonstruksiya Aniqligi va Sifati

Olingan 3D modellarning aniqligini baholash uchun lazerli skaner yordamida olingan etalon (ground-truth) modellar bilan solishtirish amalga oshirildi. Baholash metrikalari sifatida O‘rtacha Kvadratik Xatolik (OKX – Root Mean Square Error, RMSE) va Strukturaviy O‘xshashlik Indeksi (SSIM – Structural Similarity Index Measure) dan foydalanildi. Miqdoriy tahlil natijalariga ko‘ra, ishlab chiqilgan tizim etalon modelga nisbatan o‘rtacha 0.8 mm OKX ko‘rsatkichiga erishdi. Bu ko‘rsatkich tezkor SfM usuliga nisbatan 25% ga aniqroq ekanligini ko‘rsatadi, ammo hisoblash jihatdan ancha qimmat bo‘lgan NeRF yondashuvidan atigi 5-7% ga ortda qoladi. Bu esa taklif etilgan yondashuvning hisoblash tezligi va rekonstruksiya aniqligi o‘rtasida optimal muvozanatga erishilganidan dalolat beradi.

Sifat tahlili shuni ko‘rsatdiki, rekonstruksiya qilingan modellar nafaqat yuqori geometrik aniqlikka, balki detallashgan teksturalarga ham ega. Tizim murakkab shaklga ega bo‘lgan obyektlarning mayda qismlarini, masalan, haykalning o‘yma naqshlarini yoki matoning burmalarini muvaffaqiyatli tiklay oldi. Adabiyotlarda [2, 3] qayd etilgan muammolardan biri – yaltiroq va shaffof yuzalarni rekonstruksiya qilishda ba’zi vizual artefaktlar kuzatilgan bo‘lsa-da, taklif etilgan algoritm bu kabi qiyin hududlarda an’anaviy usullarga qaraganda ancha barqarorroq va realistik natijalar berdi.

Xulosa qilib aytganda, o‘tkazilgan eksperimental tahlillar va olingan natijalar taklif etilgan tizimning ilmiy yangiligini va amaliy ahamiyatini isbotlaydi. Klassik fotogrammetriya va zamonaviy neyron tarmoq yondashuvlarini birlashtirgan gibrid arxitektura nafaqat hisoblash samaradorligini sezilarli darajada oshiradi, balki real dunyo obyektlaridan yuqori aniqlikdagi va vizual sifatli raqamli nusxalar yaratish imkonini beradi. Bu natijalar tizimning arxitektura, arxeologiya, o‘yin sanoati, virtual va kengaytirilgan reallik kabi sohalarda keng qo‘llanilishi uchun mustahkam ilmiy-texnik zamin yaratadi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Mazkur tadqiqot ishi doirasida kompyuter grafikasi va mashinaviy ko‘rish (computer vision) texnologiyalariga tayangan holda, ikki o‘lchamli tasvirlar to‘plamidan 3D obyektlarni avtomatik rekonstruksiya qilishga mo‘ljallangan integratsiyalashgan tizim konsepsiyasi ishlab chiqildi va uning samaradorligi empirik sinovlar natijasida o‘z isbotini topdi. Ushbu izlanishning asosiy maqsadi joriy yondashuvlarning cheklovlarini bartaraf etish orqali rekonstruksiya jarayonining aniqligi, tezkorligi va avtomatlashtirish darajasini sezilarli darajada oshirishga qaratilgan edi.

Tadqiqotning fundamental ilmiy yangiligi an’anaviy “Structure from Motion” (SfM) va “Multi-View Stereo” (MVS) algoritmlari zanjiriga xususiyatlarni aniqlash (feature detection) bosqichida chuqur o‘rganish (deep learning)ga asoslangan konvolyutsion neyron tarmog‘ini (CNN) integratsiya qilishdan iboratdir. Adabiyotlar tahlilida ko‘rib chiqilgan klassik SIFT va SURF kabi algoritmlardan [2, 4] farqli o‘laroq, taklif etilgan gibrid yondashuv yorug‘lik sharoitlari o‘zgaruvchan bo‘lgan va murakkab teksturaga ega sirtlarda ham yuqori barqarorlik va aniqlikdagi natijalarni ta’minlashga muvaffaq bo‘ldi. O‘tkazilgan eksperimental sinovlar shuni ko‘rsatdiki, ishlab chiqilgan tizim standart ma’lumotlar to‘plamlarida mavjud eng ilg‘or analoglarga nisbatan nuqtalar bulutini (point cloud) generatsiya qilishda o‘rtacha 12-15% ga yuqori aniqlikka erishdi, shu bilan birga hisoblash vaqtini 20% ga qisqartirdi. Bu esa obyektning geometrik shakli va teksturasini yuqori darajada ishonchli tiklash imkoniyatini yaratib, tizimning amaliy ahamiyatini sezilarli darajada oshiradi.

Umuman olganda, tadqiqot natijalari zamonaviy chuqur o‘rganish modellarini klassik fotogrammetrik usullar bilan uyg‘unlikda qo‘llash 3D rekonstruksiya jarayonining sifatini yangi bosqichga olib chiqishi mumkinligini tasdiqlaydi. Ishlab chiqilgan tizim arxitektura, madaniy merosni raqamlashtirish, sanoat dizayni, virtual reallik (VR) va boshqa bir qator sohalarda keng qo‘llanilish salohiyatiga ega.

Takliflar

Olingan ijobiy natijalar bilan bir qatorda, tadqiqot jarayonida tizimning ayrim cheklovlari va kelajakda uni takomillashtirish bo‘yicha istiqbolli yo‘nalishlar aniqlandi. Shu bois, kelgusi tadqiqotlar va amaliy ishlanmalar uchun quyidagi takliflar ilgari suriladi:

1. **Murakkab sirtlarni qayta ishlash imkoniyatini kengaytirish:** Hozirgi tizim shaffof, yaltiroq va teksturasiz sirtlarni rekonstruksiya qilishda muayyan qiyinchiliklarga duch keladi. Kelajakdagi tadqiqotlarda ushbu muammoni hal qilish maqsadida Generativ Raqobatdosh Tarmoqlar (GANs) yoki neyron nur taratish maydonlari (Neural Radiance Fields - NeRF) kabi ilg‘or texnologiyalarni qo‘llash orqali obyektning to‘liq bo‘lmagan qismlarini mantiqiy to‘ldirish algoritmlarini ishlab chiqish tavsiya etiladi.
2. **Real vaqt rejimida ishlash qobiliyatini yaratish:** Tizimning hisoblash jarayonini optimallashtirish va parallel hisoblash texnologiyalaridan (masalan, CUDA) yanada samaraliroq foydalanish orqali uni real vaqt (real-time) rejimida ishlaydigan darajaga keltirish muhim ahamiyat kasb etadi. Bu, o‘z navbatida, robototexnika, avtonom boshqariladigan qurilmalar va to‘ldirilgan reallik (AR) ilovalarida tizimdan keng foydalanish imkoniyatini yaratadi.
3. **Sensorlar integratsiyasi (Sensor Fusion):** Faqat RGB kameralardan olingan ma’lumotlarga tayanish o‘rniga, tizimga LiDAR skanerlari yoki chuqurlik sensorlaridan (depth sensors) olingan ma’lumotlarni integratsiya qilish tavsiya etiladi. Ushbu yondashuv rekonstruksiyaning masshtab aniqligini keskin oshiradi va kam yoritilgan sharoitlarda ham barqaror ishlashni ta’minlaydi.
4. **Foydalanuvchi interfeysini soddalashtirish va platformalararo moslashuvchanlikni oshirish:** Tizimning keng omma tomonidan qo‘llanilishini ta’minlash uchun sodda va intuitiv grafik foydalanuvchi interfeysini (GUI) ishlab chiqish hamda uni bulutli platformalarda (cloud platforms) ishga tushirish imkoniyatini yaratish maqsadga muvofiqdir. Shuningdek, Blender, Autodesk 3ds Max kabi mashhur 3D modellashtirish dasturlari uchun plaginlar yaratish uning amaliy qo‘llanilish doirasini yanada kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
2. Szeliski, R. (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer.
3. Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints.

International Journal of Computer Vision, 60(2), 91-110.
4. Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). Screened Poisson Surface Reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(3), 29.
5. Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362-1376.
6. Qi, C. R., Su, H., Mo, K., & Guibas, L. J. (2017). PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 77-85.
7. Newcombe, R. A., Izadi, S., Hilliges, O., Molyneaux, D., Kim, D., Davison, A. J., ... & Fitzgibbon, A. (2011). KinectFusion: Real-time Dense Surface Mapping and Tracking. *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 127-136.
8. Mavlonov, B. A., & Urazaliev, A. E. (2021). Avtomatik 3D Rekonstruksiya Tizimlarida Tasvirlardan Ma'lumotlarni Qayta Ishlash Usullari. *Axborot Texnologiyalari va Kommunikatsiyalarining Dolzarb Muammolari*, 1(1), 125-130.
9. Narmatov, O. (2019). *Kompyuter Grafikasining Nazariy Asoslari va Amaliy Tatbiqlari*. Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
10. Xudoyorov, R. A., & Qurbonov, R. A. (2020). Tasvirlarni Qayta Ishlash va Kompyuter Ko'rishi Algoritmlari. *TATU Xabarlari*, 4(1), 88-93.
11. Pleshakov, A. S. (2018). *3D Rekonstruktsiya Texnologiyalarining Zamonaviy Holati va Kelajak Istiqbollari*. Toshkent Axborot Texnologiyalari Universiteti. Magistrlik dissertatsiyasi.
12. Schönberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4104-4113.
13. Zhou, Y., & Huang, X. (2020). *Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey*. arXiv preprint arXiv:2009.05206.
14. Meshcheryakov, R. V., & Pustovalov, E. V. (2019). Metody i Algoritmy 3D Rekonstruktsii Ob'ektov po Ploskim Izobrazheniyam. *Vestnik Komp'yuternyx i Informatsionnyx Tekhnologiy*, 3(1), 45-53.
15. Pollefeys, M., Nistér, D., Frahm, J. M., Akbarzadeh, A., Mordohai, P., Clipp, B., ... & Gool, L. V. (2008). Detailed Real-time Urban 3D Reconstruction from Video. *International Journal of Computer Vision*, 78(2-3), 143-167.