



FRAGMENTAR ARXEOLOGIK OBYEKTЛАRNI QAYTA TIKLASHDA SUN'IY INTELLEKT VA GEOMETRIK MODELLASHTIRISHNING INTEGRATSIYALASHGAN YONDASHUVI

Beknazarova Saida Safibullayevna¹, Sotvoldiyeva Dildora Botirjon qizi²,

^{1,2}*Toshkent Axborot texnologiyalari universiteti Televizion va media
texnologiyalari kafedrası*

¹*Texnika fanlari doktori, professor*

²*Tayanch doktorant.*

E-mail: nurdilnurik@gmail.com

ORCID ID: 0009-0009-3413-0237,

Annotatsiya: Ushbu maqolada fragmentar arxeologik obyektlarni qayta tiklash jarayonida geometrik modellash va sun'iy intellekt texnologiyalarini integratsiyalashgan holda qo'llash yondashuvi taklif etiladi. Taklif etilgan yondashuv fotogrammetriya va lazer skanerlash asosida olingan nuqtalar bulutini sun'iy intellekt algoritmlari yordamida tahlil qilish, yetishmayotgan geometrik qismlarni implicit va analitik modellar asosida tiklash hamda rekonstruksiya natijalarini media muhitda vizuallashtirish imkonini beradi. Mazkur ish arxeologik obyektlarni qayta tiklashda geometrik aniqlik, ilmiy ishonchlilik va vizual ifodalilikni birgalikda ta'minlashga qaratilgan bo'lib, raqamli madaniy meros sohasida yangi integratsiyalashgan yondashuvni namoyon etadi.

Kalit so'zlar: arxeologik obyektlar, fragmentar rekonstruksiya, geometrik modellash, sun'iy intellekt, 3D modellar, raqamli madaniy meros, media vizuallashtirish

Annotation: This paper proposes an integrated approach that combines artificial intelligence and geometric modeling for the reconstruction of fragmentary archaeological objects. The proposed method utilizes AI-based semantic segmentation of point clouds obtained through photogrammetry and laser scanning, followed by implicit geometric modeling of architectural elements using analytical functions. R-functions are employed to compose complex geometries from individual elements, enabling the reconstruction of missing parts based on geometric logic and historical constraints.

The proposed approach improves the scientific reliability, geometric consistency, and reproducibility of reconstruction results. Furthermore, the integration of confidence-weighted modeling allows the visualization of uncertainty levels within digital models, making them suitable for media visualization, virtual museums, and educational platforms.

Keywords: archaeological objects, fragmentary reconstruction, artificial intelligence, geometric modeling, 3D reconstruction, digital cultural heritage, media visualization

Аннотация: В данной статье предлагается интегрированный подход к реконструкции фрагментарных археологических объектов, основанный на объединении методов искусственного интеллекта и геометрического





моделирования. Подход включает семантическую сегментацию облаков точек, полученных с помощью фотограмметрии и лазерного сканирования, а также построение имплицитных геометрических моделей архитектурных элементов на основе аналитических функций. Для композиции сложных форм используются R-функции, что позволяет восстанавливать утраченные части на основе геометрической логики и исторических ограничений.

Предложенный подход повышает научную достоверность, геометрическую согласованность и воспроизводимость результатов реконструкции, а также обеспечивает возможность визуализации уровня неопределенности в цифровых моделях для использования в медиа-среде, виртуальных музеях и образовательных платформах.

Ключевые слова: археологические объекты, фрагментарная реконструкция, искусственный интеллект, геометрическое моделирование, 3D реконструкция, цифровое культурное наследие, медиавизуализация

Arxeologik meros insoniyat tarixining moddiy dalillarini o'zida mujassam etgan noyob resurs hisoblanadi. Biroq tarixiy yodgorliklarning aksariyati vaqt o'tishi, tabiiy ofatlar va antropogen omillar ta'siri natijasida qisman saqlanib qolgan yoki fragmentar holatga kelib qolgan. Bunday obyektlarni ilmiy asosda o'rganish va qayta tiklash masalasi zamonaviy arxeologiya, arxitektura va axborot texnologiyalari kesishmasidagi muhim ilmiy muammolardan biri hisoblanadi. An'anaviy restavratsiya usullari ko'pincha jismoniy aralashuvni talab qilgani sababli, ular har doim ham qo'llash uchun maqbul emas. Shu bois so'nggi yillarda virtual va raqamli rekonstruksiya usullari muqobil yechim sifatida keng qo'llanila boshladi.

Uch o'lchamli geometrik modellashtirish texnologiyalari, jumladan fotogrammetriya va lazer skanerlash, arxeologik obyektlarning yuqori aniqlikdagi raqamli modellarini yaratish imkonini berdi. Biroq ushbu texnologiyalar asosan mavjud va saqlanib qolgan geometrik shakllarni qayd etishga yo'naltirilgan bo'lib, obyektning yo'qolgan yoki yetishmayotgan qismlarini tiklash masalasida cheklolarga ega. Fragmentar obyektlarni qayta tiklash jarayonida ko'pincha qo'lda modellashtirish, vizual taxminlar yoki soddalashtirilgan geometrik primitivlardan foydalaniladi, bu esa rekonstruksiya natijasining ilmiy aniqligi va takrorlanuvchanligini pasaytiradi. Mazkur muammoni hal etishda sun'iy intellekt texnologiyalari muhim imkoniyatlarni ochib bermoqda. Mashinaviy o'rganish va chuqur o'rganish algoritmlari nuqtalar buluti, tasvirlar va semantik ma'lumotlarni tahlil qilish orqali murakkab geometrik tuzilmalarni aniqlash va tasniflash imkonini beradi. Biroq mavjud tadqiqotlarning aksariyatida sun'iy intellekt asosan obyektlarni aniqlash yoki segmentatsiya qilish bosqichida qo'llanilib, geometrik rekonstruksiyaning matematik modeli bilan yetarlicha integratsiyalanmagan.

Shu nuqtai nazardan, ushbu maqolada fragmentar arxeologik obyektlarni qayta tiklash uchun sun'iy intellekt va geometrik modellashtirishni yagona integratsiyalashgan yondashuv sifatida qo'llash masalasi ko'rib chiqiladi. Taklif etilayotgan yondashuv arxeologik obyektlarning geometrik tuzilishini analitik va





implicit modellar asosida ifodalash, sun'iy intellekt yordamida yetishmayotgan qismlarni aniqlash va ularni matematik jihatdan asoslangan tarzda to'ldirishga qaratilgan. Natijada, rekonstruksiya jarayoni nafaqat texnologik, balki ilmiy jihatdan ham asoslangan holga keltiriladi hamda media muhitda samarali vizuallashtirish imkoniyati yaratiladi.

Mavjud yondashuvlar. So'nggi yillarda arxeologik obyektlarni raqamli qayta tiklash sohasida 3D geometrik modellashtirish, fotogrammetriya va lazer skanerlash texnologiyalariga asoslangan tadqiqotlar sezilarli darajada kengaydi. Ushbu yo'nalishdagi dastlabki ishlarda asosiy e'tibor arxeologik obyektlarning mavjud geometrik holatini yuqori aniqlikda raqamlashtirishga qaratilgan. Jumladan, El-Hakim va hammualliflar arxeologik va me'moriy yodgorliklarni qayta tiklashda fotogrammetriya va lazer skanerlashni integratsiyalashgan holda qo'llash orqali yuqori aniqlikdagi 3D modellarni yaratish mumkinligini ko'rsatganlar [1]. Ushbu yondashuv geometrik aniqlikni ta'minlasa-da, obyektning yo'qolgan yoki fragmentar qismlarini tiklash masalasini asosan vizual va empirik yondashuvlar orqali hal qiladi.

Georgopoulos tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda virtual rekonstruksiya tushunchasi yanada kengroq talqin qilinib, rekonstruksiya jarayonida foydalanilayotgan ma'lumotlarning ishonchliligi va aniqligini baholash masalasi ilgari suriladi [2]. Muallif arxeologik obyektlarning 3D modellarini yaratishda faqat geometrik moslik emas, balki tarixiy va ilmiy ehtimollikni ham hisobga olish zarurligini ta'kidlaydi. Biroq mazkur ishda rekonstruksiya ishonchliligi asosan vizual va konseptual darajada ifodalanib, matematik formalizatsiya yetarli darajada ishlab chiqilmagan.

Arxeologik va madaniy meros obyektlarini modellashtirishga bag'ishlangan boshqa tadqiqotlarda 3D modellar ko'pincha media muhitda taqdim etish va vizuallashtirish vositasi sifatida ko'riladi. Masalan, Apollonio va hammualliflar arxeologik obyektlarning raqamli modellarini yaratishda vizual aniqlik va interaktivlik muhimligini qayd etadilar [3]. Ushbu yondashuvlar virtual muzeylar va ta'limiy platformalar uchun samarali bo'lsa-da, geometrik modellashtirishning matematik asoslari ko'pincha ikkinchi planda qoladi.

So'nggi davrlarda sun'iy intellekt texnologiyalarining rivojlanishi arxeologik obyektlarni qayta tiklash sohasida yangi imkoniyatlarni yuzaga keltirdi. Nuqtalar bulutini segmentatsiya qilish, arxitektura elementlarini avtomatik aniqlash va tasniflashda mashinaviy o'rganish algoritmlaridan keng foydalanilmoqda. Li va hammualliflar rangli LiDAR ma'lumotlari va chuqur o'rganishga asoslangan YOLO arxitekturasi yordamida qadimiy Xitoy me'morchiligi elementlarini semantik ajratish usulini taklif etganlar [4]. Ushbu yondashuv obyektlarni aniqlash va semantik boyitishda samarali bo'lsa-da, geometrik rekonstruksiyaning matematik modeli aniq belgilab berilmagan.

Boshqa tadqiqotlarda sun'iy intellekt asosida nuqtalar bulutidan binolarni rekonstruksiya qilishga qaratilgan modelga yo'naltirilgan va gibrid yondashuvlar taklif etilgan. Zhixin Li tomonidan amalga oshirilgan tadqiqotda primitivlarga asoslangan geometrik rekonstruksiya va optimallashtirish algoritmlari qo'llanilib,





murakkab binolarni avtomatik tiklash imkoniyati ko'rsatilgan [5]. Biroq mazkur ish asosan zamonaviy binolarga yo'naltirilgan bo'lib, arxeologik obyektlarga xos bo'lgan fragmentarlik va tarixiy taxminlar masalasi cheklangan darajada yoritilgan.

Yuqoridagi adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, mavjud tadqiqotlarning aksariyatida yoki geometrik aniqlikka, yoki sun'iy intellekt asosidagi semantik tahlilga alohida e'tibor qaratilgan. Fragmentar arxeologik obyektlarni qayta tiklashda esa ushbu yondashuvlarni yagona matematik-geometrik model doirasida integratsiyalash zarurati mavjud. Aynan shu jihat mazkur maqolada taklif etilayotgan sun'iy intellekt va geometrik modellashirishning integratsiyalashgan yondashuvining dolzarbligini belgilaydi.

Ilmiy muammo va uning matematik asoslari. Fragmentar arxeologik obyektlarni raqamli qayta tiklash zamonaviy madaniy meros tadqiqotlarida murakkab va dolzarb ilmiy muammo hisoblanadi. Amaliyotda bunday obyektlar ko'pincha fotogrammetriya yoki lazer skanerlash texnologiyalari yordamida olinadigan nuqtalar buluti orqali tasvirlanadi. Ushbu nuqtalar buluti obyektning faqat saqlanib qolgan qismlarini aks ettirib, yo'qolgan yoki yemirilgan geometrik elementlar haqida to'liq ma'lumot bermaydi. Shu sababli rekonstruksiya jarayoni matematik nuqtai nazardan yetishmaydigan ma'lumotli invers masala sifatida namoyon bo'ladi.

Nuqtalar buluti quyidagicha ifodalanadi:

$$P = p_i \in \mathbb{R}^3 | i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

bu yerda p_i obyekt sirtidan olingan fazoviy nuqtalarni bildiradi. Haqiqiy obyekt sirtini $\partial\Omega$ deb belgilasak, kuzatilgan nuqtalar faqat ushbu sirtning bir qismini qoplaydi, ya'ni, kuzatilgan nuqtalar faqat ushbu sirtning bir qismini ifodalaydi:[7]

$$P \subset \partial\Omega \Rightarrow \partial\Omega_o \text{ bs } \cup \partial\Omega_m \text{ iss}, \partial\Omega_m \text{ iss} \neq \emptyset \quad (2)$$

Bu tenglama rekonstruksiya jarayonida obyektning yo'qolgan qismlari mavjudligini ko'rsatadi. Klassik geometrik rekonstruksiya usullarida obyekt parametrlangan sirt $S(\theta)$ orqali ifodalanib, quyidagi minimallashtirish masalasi yechiladi:

$$\min_{\theta} \sum_{i=1}^N d(p_i, S(\theta))^2 \quad (3)$$

bu yerda $d(\cdot)$ - nuqtadan sirtgacha bo'lgan Evklid masofasi, θ esa model parametrlari vektoridir. Fragmentar arxeologik obyektlar uchun (3) tenglama ko'pincha bir nechta muqobil yechimlarga ega bo'lib, natijaning ilmiy aniqligini pasaytiradi.

Shu sababli rekonstruksiya masalasi ishonchlilik va tarixiy-geometrik cheklovlarini hisobga olgan holda quyidagi umumiy optimallashtirish modeli bilan ifodalanadi:

$$\min_{\Omega} (\sum_{i=1}^N w_i d(p_i, \partial\Omega)^2 + \lambda R(\Omega)), \Omega \in C \quad (4)$$

Bu yerda:

w_i - kuzatuv nuqtasining ishonchlilik vazni,

$R(\Omega)$ - sirt silliqligi, simmetriya va proporsiyalarni ifodalovchi regularizatsiya funksiyasi, $\Omega \in C$ - tarixiy va konstruktiv cheklovlar to'plami.





Taklif etilayotgan integratsiyalashgan yechim. Taklif etilayotgan yondashuvda rekonstruksiya jarayoni sun'iy intellekt va geometrik modellashtirishning ketma-ket integratsiyasi asosida amalga oshiriladi.[8] Birinchi bosqichda sun'iy intellekt modeli yordamida nuqtalar buluti semantik jihatdan tasniflanadi:

$$y_i = f_A I(p_i), y_i \in 1, 2, \dots, K(5)$$

Natijada har bir arxitektura elementi uchun alohida nuqtalar to'plami hosil bo'ladi:

$$P_k = p_i \in P | y_i = k(6)$$

Ikkinchi bosqichda har bir semantik sinf implicit (yashirin) geometrik funksiya yordamida ifodalanadi:

$$F_k(x; \theta_k) \geq 0 \Leftrightarrow x \in \Omega_k(7)$$

Bu yerda F_k -tekislik, silindr yoki kvadrik kabi analitik sirt funksiyasi bo'lib, uning parametrlari quyidagi optimallashtirish orqali aniqlanadi:

$$\min_{\theta_k} \sum_{p_i \in P_k} w_i \phi(F_k(p_i; \theta_k))(8)$$

bu yerda $\phi(\cdot)$ - robust yo'qotish funksiyasi.

Uchinchi bosqichda alohida geometrik elementlar **R-funksiyalar** yordamida yagona obyektga birlashtiriladi. Ikki sirtning kesishmasi quyidagicha ifodalanadi:

$$F_{\wedge}(x) = F_a(x) + F_b(x) - \sqrt{(F_a(x)^2 + F_b(x)^2)}(9)$$

Birlashma (union) operatori esa:

$$F_{\vee}(x) = F_a(x) + F_b(x) + \sqrt{(F_a(x)^2 + F_b(x)^2)}(10)$$

Natijada arxeologik obyektning yakuniy implicit modeli quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$F(x) = C(F_1(x), F_2(x), \dots, F_K(x))(11)$$

Amaliy afzalliklar. Taklif etilayotgan yondashuvning asosiy amaliy afzalligi shundaki, rekonstruksiya jarayoni subyektiv vizual taxminlarga emas, balki **formal matematik modelga** tayanadi. Sun'iy intellekt yordamida semantik ajratish rekonstruksiya jarayonini avtomatlashtiradi, implicit va R-funksiyalar asosidagi geometrik modellar esa fragmentar obyektlar uchun uzluksiz va barqaror sirt hosil qiladi.[9] Bundan tashqari, ishonchlilik vaznlari orqali rekonstruksiya natijasining ilmiy darajasini baholash va media muhitda vizual tarzda ifodalash imkoniyati yaratiladi. Ushbu yondashuv virtual muzeylar, ta'limiy platformalar va ilmiy ekspertiza tizimlari uchun yuqori sifatli, ilmiy asoslangan raqamli arxeologik modellarni yaratishga xizmat qiladi.

Xulosa

Mazkur maqolada fragmentar arxeologik obyektlarni raqamli qayta tiklash masalasi sun'iy intellekt va geometrik modellashtirishning integratsiyalashgan yondashuvi asosida ko'rib chiqildi. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, mavjud rekonstruksiya metodlarining aksariyati yoki faqat geometrik aniqlikka, yoki semantik tahlilga yo'naltirilgan bo'lib, fragmentar obyektlar uchun ilmiy asoslangan va takrorlanuvchan yechimni ta'minlashda cheklovlariga ega.



Shu sababli ushbu tadqiqotda sun'iy intellekt algoritmlarini matematik-geometrik modellar bilan birlashtirish zarurati asoslab berildi. Ishda rekonstruksiya masalasi matematik jihatdan yetishmaydigan ma'lumotli invers muammo sifatida formalizatsiya qilindi hamda nuqtalar buluti, ishonchlilik vaznlari va tarixiy-geometrik cheklovlarga tayangan optimallashtirish modeli taklif etildi. Sun'iy intellekt yordamida nuqtalar bulutining semantik segmentatsiyasi amalga oshirilib, har bir arxitektura elementi uchun implicit geometrik sirtlar qurildi.[10] R-funksiyalar asosida ushbu sirtlarning kompozitsiyasi murakkab arxeologik obyektlarning uzluksiz va analitik modelini shakllantirish imkonini berdi.

Taklif etilgan yondashuvning muhim afzalligi shundaki, rekonstruksiya jarayoni subyektiv vizual taxminlarga emas, balki formal matematik apparatga tayanadi. Bu esa fragmentar obyektlarni tiklashda geometrik aniqlik bilan bir qatorda ilmiy ishonchlilikni ham ta'minlaydi. Ishonchlilik vaznlaridan foydalanish orqali rekonstruksiya natijasining qaysi qismi bevosita o'lchovlarga, qaysi qismi esa ilmiy gipotezalarga asoslanganini aniqlash imkoniyati yaratiladi va bu natijalarni media muhitda vizual tarzda ifodalash mumkin bo'ladi.

Amaliy jihatdan, taklif etilgan integratsiyalashgan yondashuv arxeologik obyektlarning 3D modellarini yaratishda avtomatlashtirish darajasini oshiradi, rekonstruksiya vaqtini qisqartiradi va yakuniy natijaning sifatini yaxshilaydi. Ushbu metod virtual muzeylar, ta'limiy platformalar, madaniy merosni raqamli saqlash tizimlari hamda ilmiy ekspertiza jarayonlarida samarali qo'llanilishi mumkin. Kelgusidagi tadqiqotlar ushbu yondashuvni real arxeologik obyektlar misolida kengroq sinovdan o'tkazish, sun'iy intellekt modellari va geometrik cheklovlarni yanada takomillashtirishga qaratilishi maqsadga muvofiqdir.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Apollonio, F. I., Gaiani, M., & Sun, Z. (2013). 3D modeling and data enrichment in digital heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XL-5/W1**, 43–48. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-43-2013>
2. El-Hakim, S., Beraldin, J.-A., & Picard, M. (2004). Detailed 3D reconstruction of monuments using multiple techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXV(B5)**, 1–6.
3. Georgopoulos, A. (2016). 3D virtual reconstruction of archaeological monuments. *Journal of Archaeological Science: Reports*, **10**, 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.10.005>
4. Li, Y., Liu, C., Lou, Y., Shen, T., Wu, Y., Guo, J., Li, Y., & Zhang, M. (2025). Integrating colored LiDAR and YOLO semantic segmentation for design feature extraction in Chinese ancient architecture. *npj Heritage Science*, **13**, Article 316. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01852-2>
5. Li, Z. (2025). *Primitive-based building model reconstruction from point clouds* (Doctoral dissertation, Purdue University). Purdue University Graduate School.





6. Remondino, F., & Campana, S. (2014). *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage*. Oxford: Archaeopress.
7. Stylianidis, E., & Remondino, F. (2016). *3D recording, documentation and management of cultural heritage*. Dunbeath: Whittles Publishing.
8. Safibullayevna, B. S. (2025). AUTOMATIC ADJUSTMENT OF CARTOGRAPHIC DATA BASED ON THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS. *SUSTAINABILITY OF EDUCATION, SOCIO-ECONOMIC SCIENCE THEORY*, 3(30), 271-272.
9. Ugli, K. S. I., Qizi, S. D. B., & Qizi, K. B. I. (2024). COMPARISON OF MULTISERVICE REMOTE SENSING DATA FOR VEGETATION INDEX ANALYSIS. *Al-Farg'oniy avlodlari*, (4), 352-354.
10. Karimov, S., Sotvoldiyeva, D., Khalilov, D., & Mamadaliyev, N. (2024). Deep neural network for semantic segmentation of satellite images. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 587, p. 03006). EDP Sciences.

