ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME - 9

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 9

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

AR/VR TIZIMLARIDA YOPIQ MAKON UCHUN FAZOVIY LOKALIZATSIYA USULLARINING TAHLILI

Sayfiyev Eldor Erkinovich
Muhammad al-Xorazmiy nomidagi TATU Multimedia texnologiyalari kafedrasi katta o‘qituvchisi,
E-mail: eldor1075@mail.ru

Annotatsiya. Mazkur maqolada AR/VR tizimlarida yopiq makon uchun fazoviy lokalizatsiya usullarining nazariy va amaliy jihatlari tahlil qilinadi. Tadqiqotda markerli lokalizatsiya, markerlarsiz vizual belgilar asosida pozani baholash va SLAM yondashuvlari adabiy uy-muzeylar misolida ko‘rib chiqildi. Lokalizatsiya masalasi kamera, foydalanuvchi, real obyekt va raqamli sahna o‘rtasidagi koordinataviy moslikni ta’minlovchi asosiy hisoblash bosqichi sifatida izohlandi. Maqolada gomogen transformatsiya, kamera proyeksiyasi, homografiya, xususiyatlar to‘plami va SLAMning holat-kuzatuv modeli orqali fazoviy bog‘lashning matematik asoslari yoritildi. Shuningdek, markerli, markerlarsiz va VSLAM usullarining afzalliklari, cheklovlari hamda gibrid AR/VR vizualizatsiya tizimi uchun qo‘llanish imkoniyatlari qiyosiy baholandi.

Kalit so‘zlar: AR, VR, fazoviy lokalizatsiya, yopiq makon, markerli lokalizatsiya, markerlarsiz lokalizatsiya, SLAM, VSLAM, homografiya, kamera pozasi, adabiy uy-muzey.

Аннотация. В статье анализируются теоретические и практические аспекты пространственной локализации в AR/VR-системах для закрытых помещений. Рассмотрены маркерные методы, безмаркерная локализация на основе естественных визуальных признаков и SLAM-подходы применительно к литературным домам-музеям. Задача локализации объясняется как ключевой вычислительный этап, обеспечивающий координатное соответствие между камерой, пользователем, реальным объектом и цифровой сценой. Приведены математические основы пространственного совмещения на базе однородных преобразований, проективной модели камеры, гомографии, набора визуальных признаков и модели состояния-наблюдения SLAM. Выполнена сравнительная оценка преимуществ, ограничений и возможностей интеграции рассматриваемых методов в гибридную AR/VR-визуализацию.

Ключевые слова: AR, VR, пространственная локализация, закрытое помещение, маркерная локализация, безмаркерная локализация, SLAM, VSLAM, гомография, поза камеры, литературный дом-музей.

Abstract. This paper analyzes theoretical and practical aspects of spatial localization for indoor AR/VR systems. Marker-based localization, markerless pose estimation based on natural visual features, and SLAM approaches are considered in the context of literary house-museums. Localization is interpreted as

a key computational stage that provides coordinate consistency between a camera, a user, a real object, and a digital scene. The paper presents the mathematical foundations of spatial registration through homogeneous transformation, camera projection, homography, feature representation, and the state-observation model of SLAM. The advantages, limitations, and integration potential of these methods for hybrid AR/VR visualization are comparatively evaluated.

Keywords: AR, VR, spatial localization, indoor environment, marker-based localization, markerless localization, SLAM, VSLAM, homography, camera pose, literary house-museum.

KIRISH.

Zamonaviy AR/VR tizimlarida virtual obyektni real muhit bilan moslashtirish, foydalanuvchi harakatini kuzatish va eksponatga bog‘langan raqamli kontentni kerakli joyda ko‘rsatish uchun fazoviy lokalizatsiya muhim hisoblanadi. AR tizimi nafaqat 3D model yoki multimedia kontentni namoyish qiladi, balki ularni real sahna koordinatalari bilan bog‘laydi. Shu sababli kamera, foydalanuvchi, obyekt va raqamli sahna o‘rtasidagi fazoviy moslik aniqlanmasa, virtual obyekt real muhitda siljib yoki noto‘g‘ri joyda ko‘rinadi [1], [2].

Yopiq makon sharoitida lokalizatsiya masalasi ochiq hududga nisbatan murakkabroqdir. GPS signali muzey, kutubxona, tarixiy uy-muzey yoki ko‘rgazma zallarida yetarli darajada ishlamaydi. Natijada ichki navigatsiya, AR kontentni real obyektga bog‘lash va foydalanuvchi pozitsiyasini aniqlash uchun kamera asosidagi vizual kuzatish, markerli triggerlar, markerlarsiz tanib olish, inertial sensorlar va SLAM algoritmlaridan foydalanish talab etiladi [3], [4].

Adabiy uy-muzeylar uchun bu masala alohida ahamiyatga ega. Bunday makonlarda eksponat, interyer, devor bezagi, kitob muqovasi, portret va me’moriy detallar tarixiy kontekstga ega bo‘lib, ularga qo‘shimcha raqamli izoh, audio sharh, 3D rekonstruksiya yoki VR panorama bog‘lanishi mumkin. Biroq tarixiy muhitga texnik markerlarni ortiqcha joylashtirish estetik ko‘rinishga salbiy ta’sir qilishi mumkin. Shu sababli markerli, markerlarsiz va SLAM yondashuvlarini gibrid tarzda tanlash dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi [5], [6].

Mazkur maqolaning maqsadi AR/VR tizimlarida yopiq makon uchun fazoviy lokalizatsiya usullarini tahlil qilish, ularning matematik asoslarini umumlashtirish, adabiy uy-muzeylar sharoitidagi afzallik hamda cheklovlarini aniqlashdan iborat. Tadqiqot natijalari gibrid AR/VR vizualizatsiya tizimida eksponatga bog‘langan kontent, yopiq makon navigatsiyasi va real vaqtli fazoviy moslashtirishni tashkil etishda metodologik asos bo‘lib xizmat qiladi [7].

ADABIYOTLAR TAHLILI

AR tushunchasining nazariy asoslarida real va virtual obyektlarning bir muhitda birlashtirilishi, real vaqt rejimida interaktiv ishlashi va uch o‘lchamli

ISSN 3030-3907

fazoda ro‘yxatga olinishi asosiy mezon sifatida ko‘rsatiladi. Bu yondashuv AR tizimlarida lokalizatsiyani grafik ko‘rsatishdan oldingi zarur hisoblash bosqichi sifatida talqin qilish imkonini beradi [1]. Milgram va Kishino tomonidan taklif etilgan virtuality continuum modeli esa real va virtual muhitlar orasidagi uzluksiz o‘tishlarni tushuntirib, AR/VR tizimlarida fazoviy moslashtirishning konseptual chegaralarini belgilaydi [2].

Markerli lokalizatsiya AR tizimlarining dastlabki amaliy yo‘nalishlaridan biridir. Kato va Billinghurst tomonidan ishlab chiqilgan ARToolKit yondashuvi tayanch markerlarni tanib olish va ularning burchaklari asosida kamera pozasini hisoblashga imkon berdi [8]. Ushbu usul real vaqtli ishlashi, geometrik soddaligi va natijani izohlash osonligi bilan ajralib turadi. Biroq marker ko‘rinmay qolishi, yoritilishning pastligi yoki markerning tarixiy interyerga mos kelmasligi uning qo‘llanishini cheklaydi [9].

Markerlarsiz lokalizatsiya maxsus belgi o‘rniga real sahnadagi tabiiy vizual xususiyatlarga tayanadi. Lowe tomonidan taklif etilgan SIFT belgilarining masshtab va aylanishga nisbatan barqarorligi tasvirlarni moslashtirish masalalarida muhim ahamiyat kasb etdi [10]. Keyingi ishlarda SURF, ORB, BRISK kabi belgilar tezkor ishlash va real vaqtli ilovalar uchun qo‘llanila boshlandi [11], [12]. Madaniy meros obyektlarida bunday yondashuv portret, kitob, qo‘lyozma, vitrina va naqsh elementlarini tabiiy marker sifatida ishlatish imkonini beradi.

SLAM yondashuvlari yopiq makon lokalizatsiyasida alohida o‘rin tutadi. Davison va hammualliflar tomonidan taklif etilgan MonoSLAM bitta kamera asosida real vaqtli pozani baholash va xarita yaratish masalasini ko‘rsatdi [13]. Klein va Murray PTAM yondashuvida tracking va mapping jarayonlarini alohida oqimlarda tashkil etdi [14]. Mur-Artal va hammualliflarning ORB-SLAM tizimi esa real vaqtli feature tracking, qayta lokalizatsiya va loop closure imkoniyatlari bilan keng tarqaldi [15]. Bu adabiyotlar yopiq makonda AR navigatsiya uchun SLAMning nazariy va texnik poydevorini shakllantiradi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, yopiq makon uchun yagona universal lokalizatsiya usuli mavjud emas. Markerli usullar aniqlik va tezlik beradi, markerlarsiz usullar estetik jihatdan qulay, SLAM esa foydalanuvchi harakatini uzluksiz kuzatadi. Shu bilan birga, ularning har biri muhitga, yoritilishga, tekstura miqdoriga, hisoblash resurslariga va drift xatosiga sezgir. Shuning uchun adabiy uy-muzeylar uchun gibrid model, ya’ni markerli triggerlar, tabiiy vizual belgilar, inertial sensorlar va SLAM mexanizmlarini birlashtirish maqsadga muvofiqdir [16], [17].

METODOLOGIYA.

Tadqiqot metodologiyasi AR/VR tizimlarida yopiq makon uchun fazoviy lokalizatsiya jarayonini geometrik modellashtirish, vizual belgilarni ajratish va

ISSN 3030-3907

gibrid lokalizatsiya usullarini qiyosiy tahlil qilishga asoslandi. AR muhitida jahon koordinatalar tizimi, kamera koordinatalar tizimi va ekran koordinatalar tizimi o‘zaro bog‘langan bo‘ladi. Real obyektning jahon koordinatalaridagi nuqtasi P_w bilan belgilanganda, uning kamera koordinatalaridagi holati quyidagi gomogen transformatsiya orqali ifodalanadi [18]:

$$P_c = T_{cw} P_w, \qquad T_{cw} = [R \mid t] \quad (1)$$

Bu yerda P_c - nuqtaning kamera koordinatalaridagi holati; T_cw - jahon koordinatalaridan kamera koordinatalariga o‘tish matritsasi; $R \in SO(3)$ - aylanish matritsasi; $t \in R^3$ - siljish vektori. Ushbu ifoda AR tizimida virtual obyektni real kamera ko‘rinishiga moslashtirishning asosiy geometrik modelidir.

Nuqtaning kamera koordinatalaridan ekran koordinatalariga proyeksiyalanishi kamera ichki parametrlarini hisobga oluvchi kalibrlash matritsasi orqali aniqlanadi:

$$s\,p = K[R \mid t] P_w, \qquad p = (u, v, 1)^T \quad (2)$$

bu yerda K - kamera kalibrlash matritsasi; p - ekran tekisligidagi nuqta; u va v - piksel koordinatalari; s - masshtab koeffitsiyenti. Kamera kalibrlash matritsasining soddalashtirilgan ko‘rinishi quyidagicha yoziladi [18], [19]:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Mazkur modelda $f_x$va $f_y$fokus masofalarini, $c_x$va c_y asosiy nuqta koordinatalarini bildiradi. Agar K, R yoki t noto‘g‘ri baholansa, virtual obyekt real obyekt ustiga to‘g‘ri tushmaydi va fazoviy bog‘lash xatosi yuzaga keladi. Shu sababli lokalizatsiya algoritmining asosiy vazifasi kamera pozasini imkon qadar barqaror va real vaqt rejimida aniqlashdan iborat.

MARKERLI LOKALIZATSIYA.

Markerli lokalizatsiyada real sahnaga oldindan ma’lum shakl va o‘lchamga ega marker joylashtiriladi. Kamera marker burchaklarini aniqlaydi, marker tekisligi va ekran koordinatalari orasidagi bog‘lanish homografiya orqali topiladi. Marker koordinatalari va tasvir koordinatalari orasidagi proyektiv bog‘lanish quyidagicha yoziladi [8], [20]:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

bu yerda H - tekislik homografiyasi; X va Y - marker tekisligidagi koordinatalar; u va v - tasvirdagi piksel koordinatalari. Agar marker tekisligi $Z = 0$ deb qaralsa, homografiya kamera kalibrlash matritsasi va tashqi parametrlar

ISSN 3030-3907

bilan $H = K[r_1 \quad r_2 \quad t]$ko‘rinishida bog‘lanadi. Markerli usul eksponat yonidagi QR-kod, maxsus grafik trigger yoki dizaynga moslashtirilgan belgilar orqali AR kontentni chaqirishda qulaydir.



1-rasm. Markerli AR lokalizatsiya algoritmi

MARKERLARSIZ LOKALIZATSIYA.

Markerlarsiz lokalizatsiya maxsus markerlardan foydalanmasdan, real sahnadagi tabiiy vizual xususiyatlarni ajratish va moslashtirishga asoslanadi. Xususiyatlarga asoslangan yondashuvda tasvirdan ajratilgan belgilar to‘plami quyidagicha ifodalanadi [10], [12]:

$$F(I) = \{ f_i = (x_i, y_i, d_i) \mid i = 1, 2, \ldots, n \} \quad (5)$$

bu yerda F(I) - I tasvirdan ajratilgan belgilar to‘plami; x_i va y_i - i-belgining koordinatalari; d_i- descriptor vektori; n - belgilar soni.

Markerlarsiz usullar adabiy uy-muzeylarda portret, qo‘lyozma, kitob muqovasi, devor bezagi va me’moriy detalni tabiiy marker sifatida tanish imkonini beradi. Biroq past yoritilish, shisha vitrinalar, bir xil rangli devorlar va tashrif buyuruvchilar harakati ularning barqarorligiga ta’sir ko‘rsatadi.



2-rasm. Markerlarsiz lokalizatsiya jarayoni

SLAM VA VSLAM YONDASHUVI.

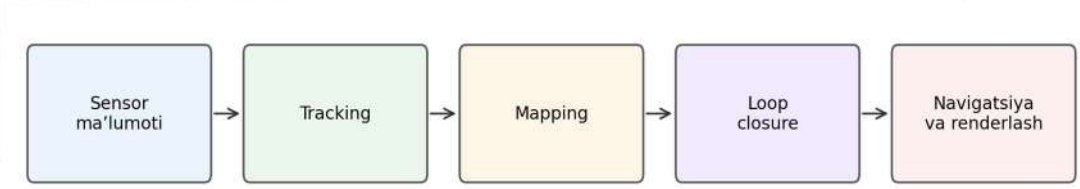
SLAM bir vaqtning o‘zida lokalizatsiya va xaritalash jarayonini bildiradi. Bu yondashuvda tizim foydalanuvchi harakatlanayotgan paytda kamera pozasini baholaydi va atrof-muhit xaritasini shakllantiradi. Ehtimollik nuqtayi nazaridan SLAM holat va kuzatuv modeli quyidagicha yoziladi [13], [15], [21]:

$$x_t = f(x_{t-1}, u_t) + w_t, \qquad z_t = h(x_t, m) + v_t \quad (6)$$

bu yerda x_t – t - vaqtdagi kamera yoki foydalanuvchi holati; u_t - harakat yoki inertial sensor ma’lumoti; z_t - kuzatuv; m - xarita; w_t va v_t - mos ravishda harakat hamda kuzatuv shovqinlari. Amaliy VSLAM tizimlarida tracking, mapping, relocalization va loop closure modullari muhim rol o‘ynaydi. Loop

ISSN 3030-3907

closure foydalanuvchi avval o‘tilgan joyga qaytganda to‘plangan drift xatosini kamaytiradi.



3-rasm. VSLAM asosida yopiq makon lokalizatsiyasi

GIBRID LOKALIZATSIYA MODELI.

Yopiq makon AR/VR tizimida markerli, markerlarsiz va SLAM usullarini alohida qo‘llash ko‘pincha yetarli emas. Amaliy tizimda markerlar aniq boshlang‘ich nuqta va eksponat identifikatsiyasini beradi, markerlarsiz belgilar tarixiy muhitni buzmasdan tanib olishga xizmat qiladi, SLAM esa foydalanuvchi harakatini uzluksiz kuzatadi. Shu sababli gibrid lokalizatsiya modeli turli manbalardan olingan pozitsion axborotni birlashtirishga asoslanadi [16], [17], [24]. Gibrid modelning umumiy ko‘rinishini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$L_h = \langle M_a, F_n, S_v, I_m, G_s, C \rangle \quad (7)$$

bu yerda M_a - markerli anchor nuqtalar to‘plami; F_n - tabiiy vizual belgilar; S_v - VSLAM xaritasi va kamera pozalari; I_m- inertial sensor ma’lumotlari; G_s- semantik xarita yoki xona-graf; C - kontentni fazoviy bog‘lash qoidalari. Bunday modelda har bir usulning kuchli tomoni saqlanadi: markerlar aniqlikni oshiradi, tabiiy belgilar estetik moslikni ta’minlaydi, SLAM esa harakat trayektoriyasini uzluksiz yangilaydi.

Amaliy algoritm quyidagi ketma-ketlikda tashkil etilishi mumkin: dastlab foydalanuvchi kamerasi sahnani oladi; tizim marker mavjudligini tekshiradi; marker topilsa, u anchor sifatida olinadi; marker topilmasa, tabiiy xususiyatlar ajratilib model bilan moslashtiriladi; parallel ravishda SLAM moduli joriy kamera pozasini yangilaydi; natija inertial sensor va semantik cheklovlar bilan tekshiriladi; yakunda AR kontent ekranga proyeksiyalanadi. Ushbu ketma-ketlik muzey sharoitida barqarorlik va foydalanuvchi uchun qulaylikni oshiradi [22], [23].

Gibrid lokalizatsiya ayniqsa adabiy uy-muzeylar uchun qulaydir, chunki bunday makonlarda ayrim eksponatlar marker orqali aniq chaqirilishi, ayrimlari tabiiy belgi sifatida tanilishi, zal bo‘ylab harakat esa SLAM orqali kuzatilishi mumkin. Natijada tizim bitta texnologiyaga bog‘lanib qolmaydi va yoritilish, occlusion, tashrif buyuruvchilar harakati yoki takroriy interyer elementlari kabi omillarga nisbatan barqarorroq ishlaydi.

MUHOKAMA VA NATIJALAR.

ISSN 3030-3907

Tahlil natijalari markerli lokalizatsiya yopiq makonda aniq boshlang‘ich registration va eksponatga bog‘langan kontentni chaqirish uchun qulay ekanini ko‘rsatadi. Marker burchaklari aniq topilganda kamera pozasini hisoblash soddalashadi, AR obyekt marker koordinatalariga barqaror bog‘lanadi. Shu sababli markerli yondashuv yozuvchi portreti, qo‘lyozma nusxasi, audio izoh yoki 3D rekonstruksiya elementini ishga tushirishda samarali ishlaydi [8], [20]. Biroq marker ko‘rinmay qolsa, yorug‘lik yetarli bo‘lmasa yoki marker tarixiy interyer bilan uyg‘unlashmasa, tizim sifati pasayadi.

Markerlarsiz lokalizatsiya estetik jihatdan qulay bo‘lib, tarixiy uy-muzey muhitiga qo‘shimcha texnik belgilar joylashtirmasdan AR kontentni ishlatish imkonini beradi. Bu yondashuvda real eksponatning o‘zi trigger vazifasini bajaradi. Masalan, portret kamera orqali tanilganda yozuvchi hayoti, asarlari yoki tarixiy fotosuratlari ochilishi mumkin. Biroq kam teksturali sirtlar, shisha vitrinalar, o‘xshash eksponatlar va past yoritilish noto‘g‘ri moslik ehtimolini oshiradi [10], [12].

SLAM yondashuvi foydalanuvchi harakatini uzluksiz kuzatish va yopiq makon xaritasini shakllantirish uchun eng muhim vositalardan biridir. U GPSsiz ichki navigatsiya, xona bo‘ylab AR yo‘nalish ko‘rsatkichlari va 3D raqamli egizak bilan bog‘langan interfeyslarni tashkil etishga xizmat qiladi. Shu bilan birga, SLAM drift xatosi, dinamik obyektlar, teksturasiz sahnalar va hisoblash resurslariga bog‘liq cheklovlarga ega. Muzey zallarida foydalanuvchi aylana trayektoriya bo‘ylab harakatlanishi mumkinligi sababli loop closure mexanizmi alohida ahamiyat kasb etadi [15], [21].

1-jadval

AR/VR tizimlarida yopiq makon lokalizatsiya usullarining qiyosiy tahlili

Usul	Asosiy g‘oya	Afzalligi	Cheklovi	Muzey sharoitidagi roli
Markerli lokalizatsiya	Maxsus marker yoki triggerni tanib olish	Tez, sodda, aniq boshlang‘ich nuqta beradi	Marker ko‘rinmasa ishlamaydi; dizayn bilan moslash zarur	Eksponat yonida kontent chaqirish va registration
Markerlarsiz lokalizatsiya	Tabiiy belgilar, tekstura va obyekt xususiyatlari	Maxsus marker talab qilmaydi; estetik jihatdan qulay	Past tekstura, yoritilish va occlusionga sezgir	Portret, kitob, vitrina va xona detallarini tanish

ISSN 3030-3907

	orqali pozani baholash			
VSLAM	Kamera harakati bilan xarita va pozani birgalikda baholash	GPSsiz ichki navigatsiya va uzluksiz tracking	Drift, dinamik obyektlar va hisoblash xarajati mavjud	Muzey zallari bo‘ylab AR navigatsiya
Gibrid lokalizatsiya	Marker, feature, IMU va SLAMni birlashtirish	Barqarorlik yuqori; turli sharoitga moslashadi	Integratsiya murakkab; kalibrlash talab qilinadi	Adabiy uy-muzeylar uchun eng maqbul yondashuv

Qiyosiy tahlil shuni ko‘rsatadiki, adabiy uy-muzeylar uchun eng maqbul yechim bitta lokalizatsiya usulini tanlash emas, balki ularni vazifaga qarab birlashtirishdir. Markerli triggerlar aniq eksponatni identifikatsiya qiladi, markerlarsiz tanib olish muhit estetikasini saqlaydi, SLAM esa foydalanuvchi harakatini uzluksiz kuzatadi. Gibrid modelda markerlar driftni tuzatish uchun anchor nuqta sifatida, tabiiy belgilar obyektni identifikatsiya qilish uchun, SLAM esa navigatsiya va xaritalash uchun xizmat qiladi [16], [17].

Natijada yopiq makonda AR/VR tizimini loyihalashda lokalizatsiya moduli mustaqil texnik qism emas, balki 3D model, semantik kontent, foydalanuvchi interfeysi va navigatsiya grafigi bilan integratsiyalashgan markaziy komponent sifatida qaralishi lozim. Bunday yondashuv tarixiy muhitga zarar yetkazmasdan, foydalanuvchiga ko‘rgazma bo‘ylab yo‘nalish berish, eksponat haqida kontekstual axborot chiqarish va VR panorama bilan AR rejim o‘rtasida uzluksiz o‘tishni ta’minlaydi.

Lokalizatsiya usullarini baholashda faqat aniqlik ko‘rsatkichi yetarli emas. AR/VR tizimida ishlash tezligi, qayta lokalizatsiya imkoniyati, foydalanuvchi qurilmasi resurslariga yuklama, muhit estetikasi va kontentni joylashtirish ishonchliligi ham hisobga olinadi.

ADABIY UY-MUZEY UCHUN AMALIY MODEL.

Adabiy uy-muzey uchun amaliy AR/VR tizimida lokalizatsiya uch darajada tashkil etilishi maqsadga muvofiq. Birinchi daraja - eksponat darajasi bo‘lib, unda alohida portret, qo‘lyozma, kitob, mebel yoki tarixiy buyum aniqlanadi. Ikkinchi daraja - xona darajasi bo‘lib, foydalanuvchining qaysi zal yoki xonada turgani

ISSN 3030-3907

belgilanadi. Uchinchi daraja - navigatsiya darajasi bo‘lib, foydalanuvchi keyingi nuqtaga, masalan, boshqa eksponat yoki VR panorama nuqtasiga yo‘naltiriladi.

Eksponat darajasida markerli va markerlarsiz usullar birgalikda ishlatilishi mumkin. Muhim va kam teksturali eksponatlar yonida estetik moslashtirilgan kichik marker qo‘llanadi. Portret, rasm, kitob muqovasi yoki naqsh kabi xususiyatlarga boy obyektlar esa tabiiy marker sifatida taniladi. Bu yondashuv tarixiy interyerga ortiqcha texnik belgilar kiritmasdan, kerakli joylarda yuqori aniqlikni saqlab qolishga yordam beradi.

Xona darajasida SLAM yoki oldindan yaratilgan 3D xarita asosiy rol o‘ynaydi. Foydalanuvchi kamerasi ketma-ket kadrlarni oladi, tizim xona ichidagi barqaror nuqtalarni kuzatadi va joriy pozani xarita bilan moslashtiradi. Agar foydalanuvchi ilgari o‘tilgan joyga qaytsa, loop closure jarayoni drift xatosini kamaytiradi. Bu holat muzey zallari aylana yo‘nalishda tashkil etilganida ayniqsa muhimdir.

Navigatsiya darajasida lokalizatsiya natijasi semantik graf bilan bog‘lanadi. Graf tugunlari xona, eksponat, eshik, VR panorama nuqtasi va audio izoh joylarini bildiradi; qirralar esa foydalanuvchi harakatlanishi mumkin bo‘lgan yo‘nalishlarni ifodalaydi. Joriy kamera pozasi shu grafdagi eng yaqin semantik tugun bilan bog‘langanda, tizim foydalanuvchiga qaysi yo‘nalishda yurish kerakligini yoki qaysi kontentni ochish kerakligini aniqlaydi.

Bunday modelning ilmiy-amaliy afzalligi shundaki, AR/VR tizimi faqat vizual effekt beruvchi ilova sifatida emas, balki fazoviy, semantik va navigatsion axborotni birlashtiruvchi interaktiv platforma sifatida ishlaydi. Shu sababli lokalizatsiya algoritmlari gibrid vizualizatsiya tizimining asosiy moduli bo‘lib, ular 3D model, panorama, multimedia kontent va foydalanuvchi interfeysini yagona muhitda bog‘laydi.

XULOSA.

AR/VR tizimlarida yopiq makon uchun fazoviy lokalizatsiya virtual obyektni real sahna bilan bog‘lashning asosiy sharti hisoblanadi. Kamera pozasi, kalibrlash matritsasi va proyektiv model noto‘g‘ri aniqlansa, raqamli kontent real obyektga mos kelmaydi.

Markerli lokalizatsiya tezkor va aniq ishlashi sabab eksponatga bog‘langan AR kontentni chaqirishda qulaydir. Biroq tarixiy uy-muzeylarda marker dizayni muhit estetikasi bilan moslashtirilishi, marker ko‘rinishining yo‘qolishiga qarshi qo‘shimcha mexanizmlar qo‘llanishi zarur.

Markerlarsiz lokalizatsiya madaniy meros obyektlarida tabiiy ko‘rinishni saqlab qoladi va real eksponatning o‘zini trigger sifatida ishlatish imkonini beradi. Shu bilan birga, past yoritilish, shisha vitrinalar va kam teksturali yuzalar bu usulning barqarorligini pasaytiradi.

ISSN 3030-3907

SLAM va VSLAM yondashuvlari yopiq makonda GPSsiz navigatsiya, foydalanuvchi trayektoriyasini kuzatish va xona xaritasini shakllantirish uchun muhimdir. Driftni kamaytirish uchun loop closure, markerli anchor nuqtalar, inertial sensorlar va oldindan tayyorlangan 3D xaritalardan foydalanish maqsadga muvofiq.

Adabiy uy-muzeylar uchun eng maqbul yechim markerli, markerlarsiz va SLAM yondashuvlarini gibrid lokalizatsiya modelida birlashtirishdir. Bu model AR kontentni aniq joylashtirish, VR panorama bilan integratsiya qilish, eksponatga bog‘langan multimedia axborotini chiqarish va foydalanuvchining yopiq makonda adashmasdan harakatlanishini ta’minlaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Azuma R. T. A survey of augmented reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1997, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385.
2. Milgram P., Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE Transactions on Information and Systems, 1994, Vol. E77-D, No. 12, pp. 1321–1329.
3. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-34372-9.
4. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.
5. Craig A. B. Understanding Augmented Reality: Concepts and Applications. Morgan Kaufmann, 2013.
6. Billinghurst M., Clark A., Lee G. A survey of augmented reality. Foundations and Trends in Human–Computer Interaction, 2015, Vol. 8, No. 2–3, pp. 73–272.
7. Carmigniani J., Furht B., Anisetti M., Ceravolo P., Damiani E., Ivkovic M. Augmented reality technologies, systems and applications. Multimedia Tools and Applications, 2011, Vol. 51, pp. 341–377.
8. Kato H., Billinghurst M. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. Proceedings of IWAR, 1999, pp. 85–94.
9. Fiala M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques. IEEE CVPR, 2005, pp. 590–596.
10. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 2004, Vol. 60, pp. 91–110.
11. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features. ECCV, 2006, pp. 404–417.
12. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. ICCV, 2011, pp. 2564–2571.
13. Davison A. J., Reid I. D., Molton N. D., Stasse O. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM. IEEE TPAMI, 2007, Vol. 29, No. 6, pp. 1052–1067.

ISSN 3030-3907

14. Klein G., Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. ISMAR, 2007, pp. 225–234.
15. Mur-Artal R., Montiel J. M. M., Tardós J. D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system. IEEE Transactions on Robotics, 2015, Vol. 31, No. 5, pp. 1147–1163.
16. Engel J., Schöps T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM. ECCV, 2014, pp. 834–849.
17. Newcombe R. A., Izadi S., Hilliges O., et al. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. ISMAR, 2011, pp. 127–136.
18. Mourikis A. I., Roumeliotis S. I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation. ICRA, 2007, pp. 3565–3572.
19. Nistér D. An efficient solution to the five-point relative pose problem. IEEE TPAMI, 2004, Vol. 26, No. 6, pp. 756–770.
20. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334.
21. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: Part I. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, Vol. 13, No. 2, pp. 99–110.
22. Bailey T., Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping: Part II. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, Vol. 13, No. 3, pp. 108–117.
23. Piasco N., Sidibé D., Demonceaux C., Gouet-Brunet V. A survey on visual-based localization: On the benefit of heterogeneous data. Pattern Recognition, 2018, Vol. 74, pp. 90–109.
24. Campos C., Elvira R., Rodríguez J. J. G., Montiel J. M. M., Tardós J. D. ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual–inertial, and multimap SLAM. IEEE Transactions on Robotics, 2021, Vol. 37, No. 6, pp. 1874–1890.
25. Taketomi T., Uchiyama H., Ikeda S. Visual SLAM algorithms: A survey from 2010 to 2016. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2017, Vol. 9, Article 16.

ISSN 3030-3907