



Universitatea
Ștefan cel Mare
Suceava

Facultatea de Inginerie
Electrică și Știința
Calculatoarelor

TEZĂ DE DOCTORAT

DOMENIUL CALCULATOARE ȘI TEHNOLOGIA INFORMAȚIEI

Contribuții privind integrarea tehnologiilor din
spectrul realității extinse în campusul universitar
inteligent incluziv

REZUMAT

CONDUCĂTOR ȘI TIINȚIFIC:

Prof. univ. dr. Corneliu Octavian TURCU

DOCTORAND:

Marian-Vlăduț TOMA

Suceava, 2025



Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Capital Uman 2014-2020

Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul

***DECIDE - Dezvoltare prin educație
antreprenorială și cercetare inovativă
doctorală și postdoctorală***

Cod proiect: SMIS 2014+: 125031

Nr. contract de finanțare: 45649/20.06.2019

Cod contract: POCU/380/6/13/125031

Axa prioritară 6 - Educație și competențe

Beneficiar: Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava

Cuprins

1	Introducere	9
1.1	Motivația și relevanța temei	9
1.2	Obiective	10
1.3	Structura lucrării	10
1.4	Contribuții	11
1.5	Diseminarea rezultatelor	13
2	Tehnologii de realitate extinsă (RE) și relevanța lor educațională	14
2.1	Realitatea extinsă	14
2.2	Realitatea augmentată	14
2.3	Realitatea virtuală	15
2.4	Realitatea mixtă	15
2.5	Considerații privind aplicabilitatea RA, RV și RM în educația incluzivă	16
2.6	Integrarea realității augmentate în practicile educaționale universitare: oportunități, beneficii și provocări	16
2.7	Aplicarea realității augmentate în sprijinul persoanelor cu TSA: între intervenții timpurii și potențialul universitar	17
3	Aplicații mobile RE pentru sprijin educațional și terapeutic în TSA: lecții din intervențiile timpurii	18
3.1	Metodologia de cercetare	18
3.1.1	Strategia de căutare	19
3.1.2	Surse de informații	19
3.1.3	Criterii de eligibilitate și selecție tematică	19
3.1.4	Procesul de selecție	20
3.2	Constatări inițiale	20
3.3	Contribuții recente în perioada 2022–2025	20
3.4	Analiza critică a rezultatelor și implicații pentru cercetări viitoare	21
3.4.1	Principalele direcții de cercetare	21
3.5	Tendințe emergente și propuneri conceptuale pentru integrarea realității augmentate în sprijinul persoanelor cu TSA	22
3.5.1	Implicarea inteligenței artificiale în soluțiile RA pentru TSA	22
3.5.2	Propunere de cadru conceptual pentru integrarea RA în educația incluzivă universitară	22
3.6	Concluzii parțiale	24
4	Fundamente și direcții de proiectare pentru orientarea asistată de realitate augmentată în campusul inteligent	25
5	Smart Campus: concepte și soluții de orientare	26
5.1	Conceptul de Smart Campus în contextul digitalizării educației	26

5.2	Poziționarea orientării spațiale ca funcție strategică în Smart Campus	26
5.3	Integrarea într-un sistem unificat de navigație RA indoor–outdoor	26
6	Navigația în spațiile interioare (indoor): soluții RA și lacune în literatură.....	28
6.1	Contextul tehnologic și educațional al navigației indoor.....	28
6.2	Sisteme RA pentru navigația interioară: tehnologii, abordări și limitări	28
7	Proiectarea și testarea unei aplicații RA pentru navigația în campus.	30
7.1	Tehnologii și platforme	30
7.2	Dezvoltarea aplicației.....	30
7.3	Cartografierea și adăugarea de POI-uri.....	31
7.4	Fluxul de lucru și interfața de navigație RA în interior	32
7.5	Testarea aplicației în interior.....	35
7.5.1	Metodologie	35
7.5.2	Profilul participanților și durata studiului	36
7.5.3	Configurația experimentală și procedura de testare.....	36
7.5.4	Ipoteze de cercetare.....	36
7.5.5	Rezultate	37
7.5.6	Concluzii parțiale	40
7.6	Navigația RA în medii exterioare: particularități	41
7.6.1	Fundamentele conceptuale ale scenariului exterior	41
7.6.2	Provocări specifice ale navigației outdoor.....	41
7.6.3	Propuneri de optimizare și rezultate experimentale.....	42
7.7	Testarea și validarea aplicației în scenariul outdoor	45
7.7.1	Obiective și metodologie de testare	45
7.7.2	Scenariul de testare și configurația experimentală.....	45
7.7.3	Ipoteze de cercetare.....	47
7.7.4	Rezultate	48
7.7.5	Concluzii parțiale	52
7.8	Testare exploratorie cu subgrupul cu TSA.....	52
7.8.1	Metodologie	52
7.8.2	Rezultate	53
8	Concluzii generale	56
	Referințe bibliografice.....	58

Listă de figuri

Figura 2.1-1. Conceptul de realitate extinsă	14
Figura 2.4-1. Diferențele între RV, RA și RM	15
Figura 3.5-1. Reprezentare vizuală a ecosistemului educațional propus.....	24
Figura 7.2-1. Diagrama de secvență a aplicației.....	31
Figura 7.3-1. Exemplu de hartă cu trasee și puncte de interes (POI) marcate	32
Figura 7.4-1. Inițializarea scenariul indoor	34
Figura 7.4-2. Scenariul indoor – traseul propus.	35
Figura 7.5-1. Analiza relației dintre percepțiile utilizatorilor cu privire la ușurința de utilizare a aplicației și familiaritatea lor cu mediile interioare.	37
Figura 7.5-2. Analiza cluster a familiarității cu clădirile campusului și a utilității percepute a aplicației de navigație în interior	38
Figura 7.5-3. Relația dintre caracterul intuitiv al modulului de navigație interioară și SUS	39
Figura 7.5-4. Relația conceptuală dintre utilitatea percepută și intenția comportamentală de reutilizare, bazată pe TAM.	40
Figura 7.7-1. Scenariul outdoor - Interfața și inițializarea traseului.....	46
Figura 7.7-2. Scenariul outdoor - interacțiunea cu utilizatorul.	47
Figura 7.7-3. Intuitivitatea medie percepută a aplicației RA în scenariile de navigație în interior și exterior.....	48
Figura 7.7-4. Scorurile medii ale utilității percepute în scenariile de navigație în interior și în exterior	49
Figura 7.8-1. Scoruri NASA-TLX pentru scenariul indoor și outdoor.....	55

Listă de tabele

Tabelul 6.2-1. Analiză comparativă a sistemelor RA pentru navigația în spații interioare	29
Tabelul 7.5-1. Statistici descriptive pentru familiaritatea cu navigație și utilitatea percepută.	38
Tabelul 7.6-1. Îmbunătățirea fiabilității ancorelor vizuale – comparație V0 vs. V1	43
Tabelul 7.6-2. Corectare adaptivă a poziționării etichetelor – versiunea standard vs. versiunea extinsă.....	44
Tabelul 7.8-1. Subgrup TSA - Rezultate individuale.....	53
Tabelul 7.8-2. Sinteză rezultate (mediană și îmbunătățire %).	54
Tabelul 7.8-3. Scoruri NASA-TLX (valoare mediană și Raw TLX).	54

Listă de abrevieri

- **AR** – Realitate Augmentată
- **ARCore** – Augmented Reality Core (platforma Google pentru dezvoltarea de aplicații AR)
- **ARKit** – Augmented Reality Kit (platforma Apple pentru dezvoltarea de aplicații AR)
- **ASD** – Autism Spectrum Disorder
- **BLE** – Bluetooth Low Energy
- **CC** – Criterii de Calitate
- **GNSS** – Global Navigation Satellite System
- **GPS** – Global Positioning System
- **HCI** – Human–Computer Interaction
- **HMD** – Head-Mounted Display

- **IA** – Inteligență Artificială
- **IC** – Întrebări de Cercetare
- **IEEE** – Institute of Electrical and Electronics Engineers
- **IMU** – Inertial Measurement Unit
- **MR** – Mixed Reality
- **POI** – Point of Interest
- **PRISMA** – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
- **QR** – Quick Response (cod de tip matrice 2D)
- **RA** – Realitatea Augmentată
- **RE** – Realitatea Extinsă
- **RM** – Realitatea Mixtă
- **RV** – Realitatea Virtuală
- **SLAM** – Simultaneous Localization and Mapping
- **SUS** – System Usability Scale
- **TSA** – Tulburări din Spectrul Autist
- **UI** – User Interface
- **UTAUT** – Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
- **VPS** – Visual Positioning System
- **XR** – Extended Reality

1 Introducere

Digitalizarea accelerată a proceselor educaționale și administrative a condus la dezvoltarea conceptului de campus inteligent (Smart Campus), înțeles ca un ecosistem tehnologic integrat orientat spre eficiență, sustenabilitate și îmbunătățirea experienței tuturor utilizatorilor [1], [2]. În acest context, orientarea spațială devine o funcție critică: campusurile extinse, cu clădiri dispersate și infrastructuri eterogene, generează probleme în ceea ce privește accesul și participarea la activități academice atunci când nu există mecanisme coerente de ghidare [3]. Problema orientării nu este doar una logistică, ci și una de echitate: o infrastructură de navigație neuniformă afectează disproporționat grupurile vulnerabile, limitând accesul efectiv la resursele educaționale și administrative.

Partea teoretică a lucrării debutează cu analiza tehnologiilor din spectrul realității extinse (RE) și a relevanței acestora pentru educație și incluziune. În continuare, este prezentată o revizuire sistematică a literaturii (SLR) asupra aplicațiilor RA destinate persoanelor cu TSA, din care au fost extrase principii translaționale – predictibilitate a pașilor, feedback discret, consistență a interfeței și controlul încărcării cognitive – precum și delimitarea tehnologiilor predominante. Aceste elemente au fundamentat formularea cadrului conceptual privind ecosistemul tehnologic al unui campus universitar și au susținut definirea orientării spațiale ca funcție strategică în arhitectura digitală a unui campus inteligent.

Partea practică a lucrării constă în proiectarea, implementarea și validarea unei aplicații de navigație RA integrată, capabilă să funcționeze unitar atât în interior cât și în exterior. Evaluarea a fost realizată într-un campus real, mai întâi pe populație generală, iar ulterior a fost completată de o testare exploratorie cu un subgrup restrâns de studenți cu TSA, menită să verifice fezabilitatea utilizării aplicației în contexte de incluziune educațională.

1.1 Motivația și relevanța temei

Asigurarea mobilității și a accesului echitabil în campusurile universitare influențează direct funcționarea proceselor educaționale și organizaționale [6]. În absența unui sistem de ghidare coerent, utilizatorii—în special studenții din anii de început, vizitatorii, persoanele cu dizabilități motorii sau senzoriale și studenții cu particularități neurocognitive—întâmpină dificultăți reale de orientare, care se traduc în întârzieri, ocoluri, stres și, în ultimă instanță, în limitarea participării la activități academice [3],[10],[12]-[14]. Sistemele existente sunt, în mare măsură, fragmentate: se bazează fie pe GPS în exterior, fie pe infrastructuri costisitoare sau instabile în interior, fără continuitate indoor–outdoor și fără capacități consecvente de personalizare a interacțiunii pentru nevoi diverse [7][8].

Literatura de specialitate arată că realitatea augmentată (RA), utilizată în contexte educaționale, poate crește accesul contextual la informație și implicarea utilizatorilor, oferind în același timp posibilitatea ajustării feedbackului vizual și auditiv pentru a evita supraîncărcarea perceptivă [9],[13],[14]. În acest context, teza de față propune și validează, într-un campus real, o soluție de navigație RA unificată care urmărește să îmbine personalizarea cu consistența între medii, reducând barierele de acces și consolidând caracterul incluziv al infrastructurii digitale universitare [9], [10], [12]-[15].

1.2 Obiective

Obiectiv general

Proiectarea, implementarea și validarea unui sistem de navigație asistată de RA destinat campusurilor universitare, capabilrobus să funcționeze unitar în spații interioare și exterioare, fără infrastructuri dedicate, integrând principii de accesibilitate și incluziune.

Obiective specifice.

O1. Realizarea unei revizuii sistematice a literaturii privind RE/RA pentru sprijin educațional la persoane cu TSA și extragerea principiilor translaționale (predictibilitate, feedback discret, consistență, controlul încărcării cognitive) relevante pentru orientarea în mediul universitar; clarificarea ariei de aplicabilitate prin validarea inițială pe populație generală și printr-o testare exploratorie pe un subgrup restrâns de studenți cu TSA, cu deschidere către scenarii de incluziune extinse.

O2. Formularea unui cadru conceptual și a unui set de cerințe de proiectare și criterii de acceptare, cu trasabilitate de la evidențe la soluția propusă, care poziționează orientarea ca funcție strategică a campusului inteligent și ghidează arhitectura tehnică și interacțiunea.

O3. Proiectarea unei arhitecturi software modulare pentru un sistem de navigație RA unificat, incluzând mecanisme de poziționare și aliniere/re-aliniere (vizual-inerțiale, VPS/ancore/markeri) și un model de date pentru cartografiere și puncte de interes.

O4. Dezvoltarea prototipului mobil (iOS/Android) și proiectarea interfeței utilizator și a fluxurilor de interacțiune în conformitate cu principiile de accesibilitate: HUD (Heads up Display) cu încărcare vizuală controlată, personalizare a ritmului și a interacțiunii (vizuale/audio/haptice) și consistență a elementelor UI între interior și exterior.

O5. Validarea experimentală a sistemului într-un campus real, pe populație generală, completată de o testare pilot cu un subgrup de studenți cu TSA, printr-o metodologie standardizată (instrumente consacrate pentru percepție, utilizabilitate și încărcare cognitivă), cu respectarea cerințelor etice.

O6. Efectuarea unei analize comparative a utilizării indoor și outdoor și discutarea implicațiilor pentru incluziune și scalare instituțională, incluzând limitări, validitate și direcții viitoare de adaptare pentru utilizatori cu profiluri neurocognitive diverse, cu accent pe extinderea rezultatelor pilot obținute la studenți cu TSA.

1.3 Structura lucrării

Lucrarea este organizată în 8 capitole, completate de anexe și bibliografie, urmărind un parcurs progresiv de la fundamente teoretice și conceptuale până la dezvoltarea și validarea unei soluții aplicative:

- Capitolul 1 – *Introducere* prezintă contextul și motivația cercetării, obiectivele generale și specifice, precum și relevanța temei din perspectiva incluziunii și a transformării digitale a mediului universitar.
- Capitolul 2 – *Tehnologiile din spectrul realității extinse* descrie componentele fundamentale ale realității augmentate, virtuale și mixte, subliniind aplicabilitatea acestora în educație și în sprijinul persoanelor cu nevoi speciale.

- Capitolul 3 – Revizuirea sistematică a literaturii analizează în detaliu utilizarea RE/RA în sprijin educațional și terapeutic pentru persoane cu tulburări din spectrul autist (TSA), sintetizând principii relevante pentru designul soluțiilor incluzive.
- Capitolul 4 – *Fundamente și direcții de proiectare pentru orientarea asistată de RA în Smart Campus* formulează cadrul conceptual translațional care leagă rezultatele SLR de nevoia instituțională de orientare predictibilă și scalabilă în campusurile universitare.
- Capitolul 5 – *Smart Campus: concepte și rolul strategic al orientării* definește arhitectura și funcțiile unui campus inteligent și argumentează integrarea orientării spațiale ca infrastructură digitală esențială.
- Capitolul 6 – *Navigația indoor asistată de RA* examinează soluțiile existente, provocările specifice și cerințele de proiectare pentru medii interioare, oferind baza pentru dezvoltarea ulterioară a aplicației.
- Capitolul 7 – *Sistemul de navigație RA unificat: dezvoltare și evaluare* detaliază proiectarea și implementarea aplicației propuse, precum și metodologia experimentală de testare în scenarii indoor și outdoor, urmată de analiza rezultatelor.
- Capitolul 8 – *Concluzii generale* sintetizează principalele constatări ale cercetării, relevanța lor teoretică și aplicativă, precum și direcțiile viitoare de cercetare. Totodată, capitolul evidențiază contribuțiile originale ale tezei pe patru paliere – teoretice, metodologice, tehnice și empirice – și inventariază rezultatele diseminate sub forma publicațiilor și a comunicărilor științifice derivate din activitatea de cercetare.
- Lucrarea se încheie cu Anexe și Referințe Bibliografice.

1.4 Contribuții

Contribuțiile acestei teze se circumscriu unor direcții complementare – teoretice, metodologice, tehnice și empirice – și reflectă atât rezultatele analizei critice a literaturii de specialitate, cât și dezvoltarea și validarea unui sistem operațional de orientare bazat pe realitate augmentată (RA) în contextul campusului universitar inteligent.

Contribuții teoretice

- Elaborarea unei sinteze actualizate asupra potențialului tehnologiilor din spectrul realității extinse (RE) în educația incluzivă, cu accent pe utilizarea RA în sprijinul persoanelor cu tulburări din spectrul autist (TSA). Această analiză a permis identificarea direcțiilor dominante din literatura recentă, a lacunelor de cercetare și a fundamentat delimitarea unui set de principii generale de proiectare.
- Argumentarea rațională a poziționării RA ca tehnologie predominantă în raport cu alte forme de RE (realitate virtuală, realitate mixtă), prin prisma compatibilității pedagogice, a accesibilității instituționale și a scalabilității tehnice.
- Poziționarea orientării spațiale ca **funcție strategică** în cadrul infrastructurii digitale universitare, cu rol transversal în susținerea proceselor educaționale, administrative și sociale dintr-un campus inteligent.

Contribuții de sinteză și cadru conceptual

- Aplicarea unei revizuii sistematice a literaturii (SLR) conform standardelor internaționale (PRISMA), cu etape documentate transparent de căutare, selecție și analiză a surselor.
- Integrarea unei actualizări a SLR-ului, realizată prin extinderea căutărilor și includerea studiilor recente, menținând coerența metodologică și comparabilitatea rezultatelor.
- Transpunerea constatărilor SLR în construcția unui cadru conceptual aplicabil mediului universitar, în care principiile desprinse din literatura privind intervențiile dedicate persoanelor cu TSA au fost adaptate la nevoile și particularitățile contextului academic.

Contribuții tehnice

- Dezvoltarea unei arhitecturi hibride de navigație RA indoor–outdoor, bazată pe ancore vizuale pentru inițializare și reinițializare și pe tehnici vizual-inerțiale (SLAM, VPS) pentru urmărirea poziției, eliminând dependența de infrastructuri suplimentare (GPS, balize BLE).
- Implementarea unei aplicații mobile multiplatformă (Android/iOS), construită folosind Unity3D și SDK-uri consacrate (ARKit/ARCore, ARway), capabilă să ofere o experiență unitară de orientare în interiorul și exteriorul campusului.
- Introducerea unor soluții tehnice specifice pentru provocările mediilor exterioare, precum metode de stabilizare a ancorelor vizuale în condiții de variabilitate ambientală, alinierea contextuală a conținutului RA și mecanisme de evitare a obstacolelor dinamice.
- Integrarea conceptuală a sistemului în ecosistemul digital universitar, asigurând premise pentru interoperabilitate cu alte servicii și aplicații instituționale.

Contribuții empirice

- Realizarea unei evaluări experimentale cu un eșantion extins de utilizatori ($N = 256$), desfășurată într-un campus universitar real și structurată pe scenarii interioare și exterioare.
- Utilizarea unor instrumente validate (SUS și TAM) pentru evaluarea percepției utilizatorilor asupra aplicației, confirmând consecvența experienței între medii și transferabilitatea modelelor de interacțiune.
- Generarea unor date empirice relevante pentru literatura de specialitate, în care studiile privind navigația asistată de RA în medii educaționale reale sunt încă rare și fragmentare.
- Identificarea unor limitări metodologice – precum restricționarea testării la un singur campus, variabilitatea hardware a dispozitivelor și lipsa unor metrici obiective suplimentare – care constituie premise pentru cercetări viitoare.
- Realizarea unei testări exploratorii cu un subgrup de studenți cu TSA ($N = 3$), care a evidențiat reducerea timpilor de navigație, a deviațiilor și a încărcării cognitive (NASA-TLX), confirmând aplicabilitatea principiilor de design universal și relevanța soluției pentru educația incluzivă.

1.5 Diseminarea rezultatelor

Rezultatele activității de cercetare au fost diseminate la nivel național și internațional, în reviste de specialitate și la manifestări științifice, după cum urmează:

Articole publicate în reviste indexate WoS:

1. MV. Toma, CE. Turcu, CO. Turcu, S. Vlad, DE. Tiliute and P. Pascu, „Extended Reality–Based Mobile App Solutions for the Therapy of Children With Autism Spectrum Disorders: Systematic Literature Review,” *JMIR Serious Games*, vol. 12, p. e49906, 2024. [Online]. Disponibil: <https://games.jmir.org/2024/1/e49906>. DOI: 10.2196/49906. **Q1, FI 4.1**. WOS:001174667700001.
2. Toma Marian-Vladut, Turcu Corneliu Octavian and Pascu Paul, “Evaluating User Acceptance and Usability of AR-Based Indoor Navigation in a University Setting: An Empirical Study” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, 16(4), 2025. <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2025.0160406>. **Q3, FI 0.9**. WOS:001503390800001.
3. Toma Marian-Vladut, Pascu Paul and Turcu Corneliu Octavian, “Cross-Context Evaluation of an Indoor–Outdoor AR Navigation System in a University Campus Environment” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, 16(7), 2025. <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2025.0160703>. **Q3, FI 0.9**. WOS: 001591593800001.

Articole prezentate la conferințe indexate WoS, IEEE și SCOPUS:

4. R. Bejinaru and M. V. Toma, „AR Technology Potential for Facilitating Access to Advanced Education for Students with ASD,” *Proc. Int. Conf. Bus. Excell.*, vol. 18, no. 1, pp. 1848–1856, 2024. [Online]. Disponibil: Sciendo. <https://sciendo.com/article/10.2478/picbe-2024-0155>. WOS:001262084900050.
5. M. -V. Toma and C. E. Turcu, "Towards Education 4.0: Enhancing Traditional Textbooks with Augmented Reality and Quick Response codes," 2022 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2022, pp. 144-149, doi: 10.1109/DAS54948.2022.9786073. Indexat IEEE și SCOPUS.

Articole prezentate la conferințe (altele decât WoS, IEEE sau SCOPUS):

6. Augmenting the university campus: digital approach, Vlad Toma, Ștefan cel Mare University of Suceava, Romania. VI International Congress Society of Ambient Intelligence 2023 (ISC SAI 2023).
7. Marian-Vlăduț Toma, Ruxandra Bejinaru, „Embracing diversity: augmented reality application for inclusive university campus navigation”, *strategica 2023 – Managing Business Transformations during Uncertain Times*, 2023. DOI: 10.25019/STR/2023.043
8. Toma Marian-Vladut, ”Mapping research trends and implementing augmented reality for smart campus navigation ”, *NEO Entrepreneurship Conference*, 2025.

Articole publicate în reviste indexate BDI:

9. Toma Marian-Vladut, „IoT potential in Industry 4.0 and Education 4.0 context”, *The Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, Issue 2, (Vol. 15) / 2021 <https://doi.org/10.4316/JACSM.202102005>. BDI
10. Toma Marian-Vladut, ”Robotic Process Automation In Higher Education: A Case Study On University Daily Sheets, *The Journal Of Applied Computer Science & Mathematics*, Issue 2, (Vol. 17) / 2023, 2066-3129, ISSN:2066-3129, <https://doi.org/10.4316/JACSM.202302003>. BDI.

2 Tehnologii de realitate extinsă (RE) și relevanța lor educațională

Adoptarea tehnologiilor din spectrul realității extinse (RE) în domeniul educației a cunoscut o creștere semnificativă în ultimii ani, datorită capacității lor de a crea medii de învățare dinamice, adaptabile și captivante [16]. Unul dintre principalele avantaje ale RE este imersiunea, care permite cursanților să interacționeze direct cu conținutul educațional, cu integrare vizuală și senzorială în timp real. Această caracteristică favorizează nu doar asimilarea rapidă a cunoștințelor, ci și dezvoltarea gândirii critice și a abilităților de rezolvare a problemelor complexe [17].

Tehnologiile RE susțin și dezvoltarea abilităților cognitive superioare, cum ar fi gândirea abstractă, analiza critică și sinteza informațiilor. De exemplu, utilizarea simulărilor RV în domenii tehnice și științifice permite experimentarea unor scenarii complexe, imposibil de reprodus în medii tradiționale, cum ar fi simulările de fenomene chimice la scară moleculară sau reconstituirea evenimentelor istorice [18]. Acest tip de învățare bazat pe experiențe sprijină nu doar înțelegerea teoretică, ci și aplicarea practică a cunoștințelor dobândite.

RE facilitează, de asemenea, personalizarea învățării prin adaptarea conținutului în funcție de nevoile specifice ale fiecărui cursant. Această adaptabilitate este esențială pentru studenții cu dizabilități, care pot beneficia de medii de învățare accesibile și personalizate, contribuind astfel la incluziunea lor educațională și socială [19]. De exemplu, prin RV, studenții cu deficiențe de mobilitate pot participa la simulări de laborator sau la excursii virtuale, experiențe care altfel le-ar fi inaccesibile [20].

2.1 Realitatea extinsă

După cum se poate observa, tehnologia informației a cunoscut o evoluție accelerată în ultimii ani. Conform studiului realizat de Abad-Segura și colab. [27], progresele tehnologice rapide au cauzat o schimbare semnificativă și pozitivă în modul în care oamenii privesc viața modernă. Termenul relativ nou RE se referă la întregul spectru de la RA la RV, inclusiv realitatea mixtă (RM); așa cum este ilustrat în Figura 2.1-1 [28]).

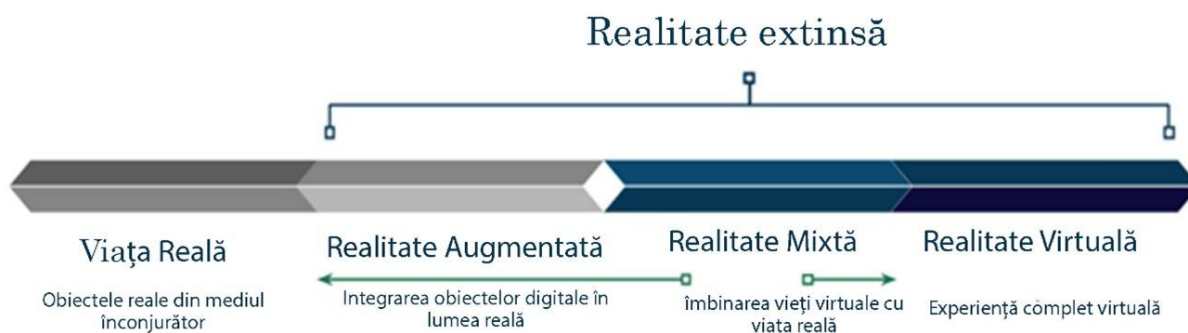


Figura 2.1-1. Conceptul de realitate extinsă [28]

2.2 Realitatea augmentată

În ultimii ani, realitatea augmentată (RA) a devenit una dintre cele mai promițătoare tehnologii emergente [29], datorită capacității sale de a îmbogăți percepția utilizatorilor asupra

mediului real prin suprapunerea de informații digitale interactive. Potrivit lui Azuma [25], realitatea augmentată poate fi definită prin trei caracteristici esențiale: integrarea în timp real a obiectelor virtuale în mediul real, interacțiunea directă cu acestea și alinierea spațială coerentă între componentele digitale și cele fizice.

2.3 Realitatea virtuală

Așa cum este descris în studiul lui Azuma [25], RV este un mediu generat computerizat care simulează scenarii din viața reală, creând o experiență imersivă și interactivă. RV presupune plasarea utilizatorului într-un mediu complet virtual, generat artificial, care creează iluzia de prezență în acel spațiu. Această tehnologie necesită echipamente specializate, cum ar fi căștile sau ochelarii RV, pentru a permite utilizatorilor să vadă și să interacționeze cu mediul virtual. Principiile de funcționare ale RV se bazează pe integrarea armonioasă a componentelor hardware și software, menite să ofere o experiență imersivă și interactivă.

2.4 Realitatea mixtă

Realitatea mixtă (RM) ocupă un loc intermediar între realitatea augmentată și realitatea virtuală, integrând elemente din ambele pentru a crea un mediu interactiv în care obiectele reale și virtuale pot coexista și interacționa în timp real [28],[51]. Poate fi dificil să se definească cu precizie limitele RM, deoarece acestea depind de dispozitivele și echipamentele utilizate, precum și de măsura în care RV sau RA sunt încorporate în produsul final. Un model care descrie integrarea obiectelor digitale din lumea fizică în lumea virtuală este prezentat în studiul lui Milgram și Kishino [54], care a prezentat, de asemenea, o taxonomie pentru RM, afirmând că aceasta poate fi definită ca o parte a domeniului interfeței om-calculator, care integrează elemente RV și RA pentru a crea un mediu în care obiectele virtuale și reale coexistă și interacționează.

Figura 2.4-1 oferă o sinteză vizuală clară a diferențelor funcționale și conceptuale dintre RA, RV și RM, subliniind specificitatea fiecărui tip de interacțiune în cadrul RE..

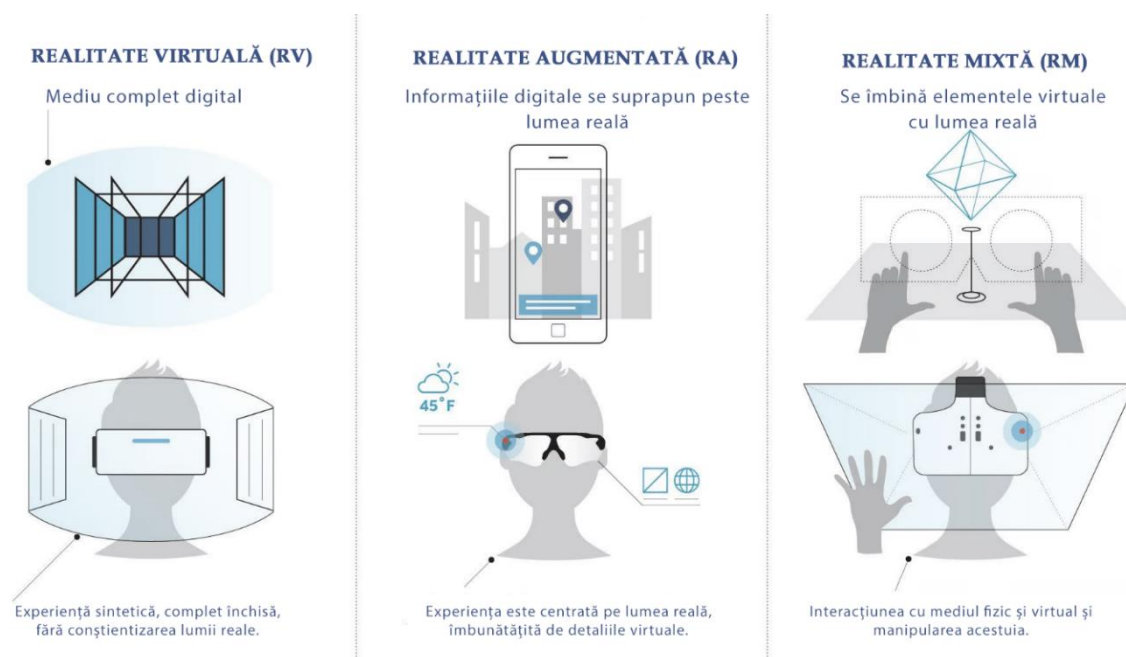


Figura 2.4-1. Diferențele între RV, RA și RM [67].

2.5 Considerații privind aplicabilitatea RA, RV și RM în educația incluzivă

Analiza celor trei tehnologii din spectrul realității extinse – realitatea augmentată (RA), realitatea virtuală (RV) și realitatea mixtă (RM) – a evidențiat avantajele și provocările fiecărei abordări în contextul educației și al incluziunii academice. Deși fiecare dintre aceste tehnologii oferă beneficii semnificative în facilitarea accesului la educație și în crearea unor experiențe de învățare interactive, alegerea de a pune accentul pe realitatea augmentată în secțiunile următoare derivă din mai mulți factori esențiali.

În primul rând, realitatea augmentată se remarcă prin flexibilitatea și accesibilitatea superioară comparativ cu realitatea virtuală și realitatea mixtă. În timp ce RV necesită echipamente dedicate, cum ar fi căști specializate, iar RM implică infrastructuri tehnice avansate, RA poate fi implementată pe dispozitive mobile uzuale, precum smartphone-uri și tablete, ceea ce o face mai ușor de adoptat în mediile educaționale și terapeutice. Această accesibilitate este esențială mai ales în contextul educației incluzive, unde resursele disponibile pot varia semnificativ în funcție de instituție și de specificul grupului țintă.

În al doilea rând, RA prezintă un echilibru optim între imersiune și menținerea contactului cu realitatea fizică, aspect deosebit de important în cazul studenților cu nevoi educaționale speciale, inclusiv cei cu tulburări din spectrul autist (TSA). Spre deosebire de RV, care poate crea un mediu complet izolat și uneori copleșitor pentru utilizatori, RA permite o interacțiune contextualizată, în care elementele virtuale completează mediul real fără a-l înlocui. Această caracteristică facilitează integrarea graduală a noilor tehnologii în procesul educațional și terapeutic, reducând riscurile asociate suprastimulării senzoriale.

În plus, studii recente ca [130][149] confirmă aplicabilitatea RA atât în educația superioară, cât și în intervențiile pentru TSA, evidențiind rezultate promițătoare în ceea ce privește îmbunătățirea atenției, motivației și capacității de interacțiune socială. Această tendință justifică aprofundarea analizei utilizării RA în învățământul superior și în programele educaționale destinate persoanelor cu nevoi speciale, așa cum este detaliat în secțiunile 2.6 și 2.7.

Prin urmare, concentrarea pe realitatea augmentată în capitolele următoare nu exclude importanța celorlalte tehnologii din spectrul realității extinse, ci reflectă avantajele sale practice, accesibilitatea ridicată și aplicabilitatea directă în domeniile analizate, oferind soluții fezabile pentru transformarea educației într-un proces mai incluziv și eficient.

2.6 Integrarea realității augmentate în practicile educaționale universitare: oportunități, beneficii și provocări

Realitatea Augmentată (RA) a suferit progrese semnificative în ultimii ani, oferind oportunități noi și stimulatoare de învățare în învățământul superior. Experimentele și aplicațiile sale timpurii în educație au fost inițiate în anii 1990 și începutul anilor 2000, în primul rând în domenii precum arhitectura, medicină și inginerie [69]. Cu toate acestea, implementarea RA în învățământul superior a fost restricționată de costurile ridicate și tehnologia limitată disponibilă la acea vreme.

În ceea ce privește accesibilitatea, RA contribuie la crearea unui mediu educațional mai echitabil, oferind resurse personalizate pentru studenții cu cerințe educaționale speciale. De exemplu, Sarkar [89] a observat că aplicațiile RA pot fi deosebit de benefice pentru studenții cu dizabilități intelectuale, oferind experiențe de învățare adaptate care sporesc implicarea și înțelegerea [89]. În contextul învățământului superior, promovarea incluziunii devine crucială,

având în vedere angajamentul instituțiilor de a sprijini studenți provenind din medii variate și cu nevoi diferite.

2.7 Aplicarea realității augmentate în sprijinul persoanelor cu TSA: între intervenții timpurii și potențialul universitar

În ultimii ani, un număr considerabil de studii au investigat potențialul tehnologiei RA de a sprijini educația persoanelor cu tulburări de spectru autist (TSA). Totuși, cercetările dedicate aplicării RA în mediul universitar, adaptate specificului studenților cu TSA, sunt în continuare puține, ceea ce indică un domeniu emergent, aflat în dezvoltare, justificat de profilul cognitiv distinct al acestor studenți și de provocările ridicate de integrarea tehnologică în învățământul superior [97].

Având în vedere că studenții cu autism întâmpină frecvent dificultăți de comunicare și interacțiune socială, RA oferă un mediu controlat și structurat în care pot explora și învăța în propriul ritm, fără a se simți copleșiți de stimuli din lumea reală [96]. Studii recente au arătat că integrarea RA în intervenții educaționale pentru persoanele cu TSA poate îmbunătăți semnificativ **atenția, abilitățile de comunicare și interacțiunea socială**, oferind feedback în timp real și contexte de învățare adaptate nevoilor individuale [98][99][100].

Astfel, utilizarea RA în sprijinul persoanelor cu TSA rămâne un domeniu în curs de explorare, cu implicații importante pentru dezvoltarea unor practici educaționale incluzive în universități. Dincolo de funcțiile strict educaționale și terapeutice, aceste tehnologii pot contribui la crearea unor medii academice mai accesibile și mai prietenoase pentru studenții cu nevoi speciale. În contextul emergent al conceptului de campus inteligent (*Smart Campus*), integrarea RA în infrastructura universitară deschide oportunități pentru sprijinirea navigației, orientării spațiale și participării active la viața academică. Această perspectivă face trecerea naturală de la cercetările teoretice și intervențiile timpurii la proiectarea unor soluții aplicative concrete, precum aplicația de navigație asistată de RA prezentată în capitolul 7.

3 Aplicații mobile RE pentru sprijin educațional și terapeutic în TSA: lecții din intervențiile timpurii

Acest capitol se concentrează asupra aplicațiilor mobile RE utilizate în terapia copiilor cu tulburări din spectrul autist (TSA), având ca punct de plecare faptul că aceste soluții urmăresc dezvoltarea de competențe cognitive, sociale și emoționale – esențiale în orice proces educațional, indiferent de vârstă sau context. Deși sunt implementate în scop terapeutic, aceste aplicații funcționează de facto ca instrumente educaționale adaptate [90][91]. În contextul TSA, distincția dintre educație și terapie devine adesea artificială. Intervențiile timpurii — chiar dacă sunt încadrate ca terapeutice — urmăresc dezvoltarea competențelor cognitive, sociale, adaptive și vocaționale necesare integrării în medii educaționale formale, cum ar fi școlile și, în final, universitățile [97],[104]-[106].

Eficiența crescută a intervențiilor în copilărie este documentată extensiv în literatura de specialitate, fiind asociată cu plasticitatea neurocognitivă ridicată specifică acestei etape [107]. În consecință, cele mai multe aplicații RE dezvoltate până în prezent se adresează copiilor, această perioadă reprezentând o fereastră critică pentru dezvoltarea de abilități esențiale pentru învățare și autonomie socială [108]. Această fereastră critică de intervenție justifică inclusiv concentrarea cercetării științifice pe această etapă, pentru a formula bune practici ce pot fi adaptate ulterior altor niveluri educaționale.

Prin urmare, deși instrumentele analizate sunt prezentate drept soluții terapeutice, ele au un caracter educațional pronunțat. Contribuind la formarea de competențe-cheie pentru viața academică și socială, aceste aplicații pot constitui modele valoroase pentru dezvoltarea de soluții digitale adaptate învățământului superior.

3.1 Metodologia de cercetare

Potrivit lui Kitchenham [119], o revizuire sistematică a literaturii este o metodă de identificare, evaluare și interpretare a tuturor cercetărilor disponibile relevante pentru un domeniu de studiu, precum și de răspuns la întrebări de cercetare specifice (IC). Am efectuat această cercetare în conformitate cu orientările PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [120] și recomandările sugerate de Kitchenham [119].

Pentru a acoperi în mod riguros evoluția recentă a literaturii, revizuirea sistematică a fost structurată în două etape: o primă etapă (2012–2022), prezentată în acest capitol, și o actualizare (2022–2025), tratată în subcapitolul 3.3. Structura metodologică, întrebările de cercetare și criteriile de selecție rămân neschimbate, asigurând comparabilitate între cele două etape ale studiului.

Pentru a efectua această analiză a literaturii științifice, au fost interogate mai multe baze de date științifice importante și au fost filtrate publicațiile care conțineau informații relevante pentru analiza propusă. Am definit întrebări de cercetare și am oferit răspunsuri la fiecare dintre acestea, atingând astfel obiectivul propus.

3.1.1 Strategia de căutare

În conformitate cu metodologia avută în vedere, au fost formulate următoarele 6 întrebări de cercetare. Aceste întrebări iau în considerare aspecte relevante pentru înțelegerea conceptelor importante pentru acest studiu:

1. Care este distribuția în timp a lucrărilor științifice? (IC 1)
2. Ce categorie de persoane sunt vizate în studii? (IC 2)
3. Ce tehnologii complementare sunt utilizate împreună cu cele din spectrul RE pentru a dezvolta aplicații pentru terapia TSA? (IC 3)
4. În studiile efectuate, ce competențe au fost vizate pentru a fi îmbunătățite? (IC 4)
5. Care sunt scopurile pentru care au fost utilizate soluțiile propuse? (IC 5)
6. Care sunt rezultatele obținute utilizând soluțiile propuse? (IC 6)

În urma analizei acestor cuvinte cheie, procesul de interogare a fost extins prin includerea următorilor termeni: Autis*, VR, AR, MR, XR, Mobile app*, Smartphone app*, Child*, Infan*, Toddler*, Preschool*, Kid* și Juvenile. În lista menționată mai sus, un asterisc reprezintă orice număr de caractere de la sfârșitul șirului curent (de exemplu, Preschool* se referă la Preschool, Preschooler și Preschoolers). Utilizarea caracterului wildcard * a permis o acoperire extinsă a variantelor terminologice din literatura de specialitate.

3.1.2 Surse de informații

În funcție de opțiunile de căutare disponibile în fiecare bază de date luată în considerare, au fost definite șiruri de căutare specifice pentru interogarea bazelor de date. Aceste șiruri de interogare au fost definite utilizând funcții de căutare avansate și operatori adecvați. În funcție de platformă, procesul de căutare a inclus următorii termeni: Autis*, VR, AR, MR, XR, Mobile app*, Smartphone app*, Child*, Infan*, Toddler*, Preschool*, Kid* și Juvenile. În lista menționată mai sus, un asterisc reprezintă orice număr de caractere de la sfârșitul șirului curent (de exemplu, Preschool* se referă la Preschool, Preschooler și Preschoolers). Utilizarea caracterului wildcard * a permis o acoperire extinsă a variantelor terminologice din literatura de specialitate. Căutarea publicațiilor Web of Science și Scopus a fost efectuată prin titlu, rezumat și cuvinte-cheie, iar IEEE Xplore Digital Library, ScienceDirect și ACM Digital Library au fost căutate utilizând o căutare generală.

Interogările au fost executate inițial la 18 decembrie 2022.

3.1.3 Criterii de eligibilitate și selecție tematică

Înainte de centralizarea rezultatelor pentru analiză, acestea au fost rafinate în funcție de criteriile de includere și excludere. Criteriile de includere au fost următoarele:

1. Articole publicate în limba engleză;
2. Articole publicate după 2012.

Criteriile de excludere au fost următoarele:

1. Capitole de carte;
2. Tabele de conținut pe hârtie;
3. Articole publicate în alte limbi decât engleză;

4. Rezultate pe teme de medicină, chimie sau neuroștiințe.

Rezultatele returnate din cele cinci baze de date (N=219) au fost prelucrate conform criteriilor, rezultând 179 de articole eligibile pentru screening inițial.

3.1.4 Procesul de selecție

În timpul procesului de selecție, au fost luate în considerare indicațiile PRISMA [120]. Software-ul de gestionare a referințelor Zotero (Corporation for Digital Scholarship) a fost utilizat pentru a efectua etapele specificate. În primul pas, au fost importate 179 de publicații rezultate din căutarea în cele 5 baze de date luate în considerare, după care au fost eliminate publicațiile duplicate (n=20, 11,2%) și unele lucrări de conferință (n=4, 2,2%). Pentru etapa următoare, au fost luate în considerare 86,6% (155/179) din publicații. După revizuirea titlurilor și a rezumatelor, un total de 41,9% (65/155) din publicații au fost excluse deoarece nu abordau subiectul propus, concentrându-se fie pe o altă afecțiune, fie pe alte tehnologii.

În ciuda calității ridicate a publicațiilor, evidențiată de indexarea acestora în baze de date internaționale de prestigiu, analiza a inclus o revizuire a textului integral (acolo unde a fost disponibil) a restului de 58,1% (90/155) din publicații, iar criteriile de evaluare a calității au fost aplicate pentru a asigura relevanța acestora pentru întrebările de cercetare luate în considerare. Articolele care nu au avut acces la textul integral au fost excluse. Criteriile de calitate au fost aplicate la 78 de publicații (Exemplu în figura 3.1-1).

Ulterior, au fost evaluate numai publicațiile cu un scor de ≥ 7 , deoarece acestea abordau în mod adecvat întrebările preliminare. În final, pentru acest studiu, au fost luate în considerare un număr de 28 de publicații.

3.2 Constatări inițiale

Analiza a evidențiat o tendință de creștere a publicațiilor începând cu 2015, atingând punctul maxim în 2019 și fiind urmată de un declin în 2020, posibil din cauza pandemiei. Majoritatea lucrărilor (17/28, 61%) au fost prezentate la conferințe și s-au axat în mare parte pe soluții RA (22/28, 79%) pentru dispozitive mobile pentru a ajuta copiii cu TSA în îmbunătățirea abilităților de bază și a aspectelor fundamentale ale vieții. În special, Unity 3D și Vuforia au apărut ca platforme de dezvoltare populare. Deși un procent substanțial de publicații (13/28, 47%) nu au furnizat detalii cu privire la copiii participanți, majoritatea participanților identificați aveau vârste cuprinse între 3 și 13 ani. Dezvoltate pentru a fi utilizate atât de terapeuți, cât și de părinți la domiciliu sau în centre medicale specializate, aceste soluții au prezentat rezultate preliminare încurajatoare, dar subliniază necesitatea unor teste suplimentare, mai ample, în special deoarece o parte semnificativă (9/28, 32%) au fost testate doar de dezvoltatori.

3.3 Contribuții recente în perioada 2022–2025

Întrucât între timp au fost publicate lucrări noi, unele dintre ele cu potențial semnificativ de a aduce completări sau perspective emergente asupra temei cercetate, se impune o actualizare a cadrului de referință. Totuși, este esențial de subliniat că această secțiune nu reprezintă o refacere sau o revizuire integrală a studiului anterior, ci o **extensie temporală** menită să **complementeze** rezultatele obținute inițial. În acest sens, nu se urmărește aplicarea identică a metodologiei de SLR deja publicate, ci o integrare strategică a unor contribuții științifice recente, relevante pentru întrebările de cercetare formulate inițial.

Demersul de față continuă analiza sistematică a literaturii, extinzând perioada de acoperire până în martie 2025. Astfel, pe lângă lucrările identificate și analizate anterior (până în decembrie 2022), au fost incluse și 9 articole relevante publicate între decembrie 2022 și martie 2025, selecționate din aceleași baze de date academice consacrate (Web of Science, Scopus, IEEE Xplore etc.). Toate aceste surse au fost integrate unitar în analiza și sinteza finală, răspunzând întregului set de întrebări de cercetare formulate pentru perioada 2012–2025.

3.4 Analiza critică a rezultatelor și implicații pentru cercetări viitoare

3.4.1 Principalele direcții de cercetare

Analiza celor 37 de publicații științifice incluse în cadrul revizuirii sistematice extinse – incluzând cele 28 de studii analizate inițial și cele 9 articole suplimentare publicate în perioada decembrie 2022 – martie 2025 – evidențiază o serie de direcții prioritare privind utilizarea realității augmentate (RA) și a altor tehnologii emergente în sprijinul copiilor cu tulburări din spectrul autist (TSA). Aceste direcții sunt prezentate tematic, însoțite de frecvența apariției și exemple relevante din literatura revizuită.

Un subiect notabil este dezvoltarea abilităților lingvistice și cognitive, abordat în 5 studii (13%) [123], [125], [138], [201], [224]. Acestea propun aplicații mobile bazate pe RA pentru facilitarea învățării vocabularului și recunoașterea obiectelor, utilizând tehnici precum învățarea profundă și recunoașterea vizuală automată, adesea în contexte gamificate.

Comunicarea funcțională și interacțiunile sociale constituie o altă direcție frecvent explorată (6 studii, 16%) [124], [134], [148], [201], [222], [225]. Soluțiile dezvoltate includ aplicații bazate pe ochelari inteligenți, scenarii conversaționale augmentate și avatururi interactive menite să sprijine exprimarea și înțelegerea limbajului verbal și nonverbal.

Recunoașterea emoțiilor și autoreglarea afectivă reprezintă o temă emergentă, prezentă în 4 studii (11%) [219], [221], [223], [224], care utilizează tehnologii RA combinate cu inteligență artificială pentru a oferi feedback afectiv personalizat în funcție de expresiile faciale și comportamentul utilizatorului.

În aceeași linie, empatia și comportamentele prosociale sunt vizate în 2 studii (5%) [200], [220], prin abordări narrative augmentate și co-reglare digitală în scenarii cu conținut socio-emoțional. Aceste soluții contribuie la dezvoltarea capacității de a recunoaște emoțiile altora și de a răspunde adecvat în contexte sociale simulate.

Autonomia personală și exersarea rutinei zilnice rămân direcții importante, abordate în 3 studii (8%) [126], [133], [141], prin aplicații care ghidează activități precum igiena personală sau adaptarea la medii necunoscute. Deși această temă nu a fost extinsă în actualizare, relevanța sa practică este constantă.

O direcție importantă în literatura recentă o reprezintă personalizarea și adaptabilitatea intervențiilor, ilustrată în 3 studii (8%) [200], [221], [222] care folosesc algoritmi de inteligență artificială pentru a calibra conținutul și nivelul de dificultate al sarcinilor în funcție de progresul utilizatorului. Această tendință reflectă o evoluție semnificativă față de soluțiile standardizate analizate anterior.

Implicarea părinților în intervenție este o dimensiune recent accentuată, prezentă în 3 studii (8%) [200], [221], [224], care oferă funcționalități de co-joc, coaching parental sau configurare de activități în funcție de profilul copilului. Aceasta sugerează o extindere ecologică a intervenției în mediul familial.

De asemenea, două studii (5%) [219], [224] explorează utilizarea feedback-ului multisenzorial (vizual, auditiv, tactil) pentru a susține implicarea și autoreglarea emoțională. Aceste abordări indică o maturizare a interfețelor digitale și o orientare spre experiențe mai naturale și adaptative.

Nu în ultimul rând, o analiză comparativă a literaturii relevă o scădere a interesului pentru realitatea virtuală (RV), prezentă în 6 studii din analiza inițială (16%) [129], [133], [141], [143], [147], dar complet absentă în lucrările recente. Aceasta poate fi explicată prin creșterea accesibilității RA și compatibilitatea mai bună a acestora cu dispozitivele mobile uzuale și intervențiile de zi cu zi.

Prin urmare, revizuirea actualizată a literaturii confirmă direcțiile deja conturate în etapa inițială, dar și conturează tendințe emergente relevante, cum ar fi convergența RA cu AI, integrarea feedback-ului multisenzorial și implicarea părinților în intervenție. Acestea reflectă o trecere de la soluții statice la ecosisteme adaptive și colaborative, cu un potențial semnificativ pentru terapii digitale scalabile și personalizate.

3.5 Tendințe emergente și propuneri conceptuale pentru integrarea realității augmentate în sprijinul persoanelor cu TSA

3.5.1 Implicarea inteligenței artificiale în soluțiile RA pentru TSA

Actualizarea revizuirii sistematice a literaturii a evidențiat o tendință emergentă cu potențial transformator: integrarea IA în aplicațiile RA destinate intervențiilor terapeutice și educaționale pentru copiii cu (TSA). Această convergență tehnologică oferă oportunități noi pentru personalizarea intervențiilor, optimizarea răspunsului în timp real și susținerea unei învățări adaptive, centrate pe utilizator.

În mai multe studii recente [200], [221], [222], IA este utilizată pentru a ajusta dinamic conținutul aplicațiilor RA în funcție de comportamentul utilizatorului, expresiile faciale sau nivelul de performanță observat în timp real. Spre exemplu, anumite aplicații includ avataruri interactive cu capacități de recunoaștere facială, care reacționează afectiv la emoțiile utilizatorului și oferă feedback corespunzător, contribuind astfel la îmbunătățirea autoreglării emoționale și a empatiei. Alte soluții integrează module de coaching parental asistate de IA, care sugerează adaptări ale activităților în funcție de progresul copilului și istoricul interacțiunilor. Aplicațiile se bazează frecvent pe rețele neuronale convoluționale (Convolutional Neural Networks - CNN) pentru recunoașterea facială, modele de procesare a limbajului natural (Natural language processing - NLP) pentru interacțiuni verbale și sisteme de învățare automată supervizată pentru personalizarea progresivă a conținutului.

3.5.2 Propunere de cadru conceptual pentru integrarea RA în educația incluzivă universitară

Deși revizuirea sistematică realizată în cadrul acestei cercetări s-a concentrat asupra aplicațiilor de realitate extinsă destinate copiilor cu tulburări din spectrul autist, selecția s-a axat în mod deliberat pe componentele de realitate augmentată, ca subdomeniu cu aplicabilitate crescută în educație. Această alegere este justificată atât de tendințele recente din literatura de specialitate, cât și de caracteristicile tehnice și pedagogice ale RA, care o diferențiază de alte forme de RE (precum realitatea virtuală sau mixtă). Spre deosebire de realitatea virtuală, care presupune un grad ridicat de imersiune și izolarea completă de mediul fizic, RA permite suprapunerea de informații vizuale sau audio peste lumea reală, ceea ce o face mai potrivită pentru contextul educației universitare și pentru nevoile specifice ale studenților

neurodivergenți. În plus, RA poate fi implementată eficient pe dispozitive mobile – telefoane inteligente sau tablete – ceea ce reduce semnificativ barierele logistice și financiare ale implementării. Dispozitivele mobile sunt deja integrate în viața studenților și în infrastructura instituțională, oferind astfel o platformă accesibilă și scalabilă pentru dezvoltarea de aplicații educaționale augmentate.

Pe baza literaturii analizate în revizuirea sistematică și a surselor de specialitate [97], [202]-[204], propunem un cadru conceptual integrat RA + IA pentru studenții cu TSA în mediul universitar. Cadrul s-a format în urma analizei tematice a cercetărilor existente privind intervențiile timpurii, corelate cu provocările identificate la studenții universitari.

Dimensiunile identificare sunt:

- **Didactică** – utilizarea RA pentru crearea de conținut contextualizat și feedback imediat, adaptat stilului de învățare al studenților cu TSA [97], [202].
- **Digitală** – integrarea platformelor universitare (LMS), algoritmi de IA pentru personalizare și folosirea dispozitivelor mobile, soluții larg recunoscute în cercetare [202], [204].
- **Dezvoltare personală** – avataruri interactive și simulări sociale ca metode pentru îmbunătățirea autoreglării emoționale, atenuarea anxietății și dezvoltarea abilităților sociale, esențiale în rândul studenților cu TSA [203].
- **Organizațională** – incluziunea tehnologică și formarea cadrelor didactice privind utilizarea RA/IA pentru studenții neurodivergenți, recomandată de literatura de specialitate [202], [204]

Figura 3.5-1 descrie arhitectura unui ecosistem educațional augmentat centrat pe o aplicație mobilă, menit să sprijine studenții cu TSA. Acesta include trei subsisteme interconectate — modul RA, avatar interactiv, motor AI — selectate și concepute pe baza unei analize riguroase a literaturii științifice și a cerințelor identificate în studii recent derulate:

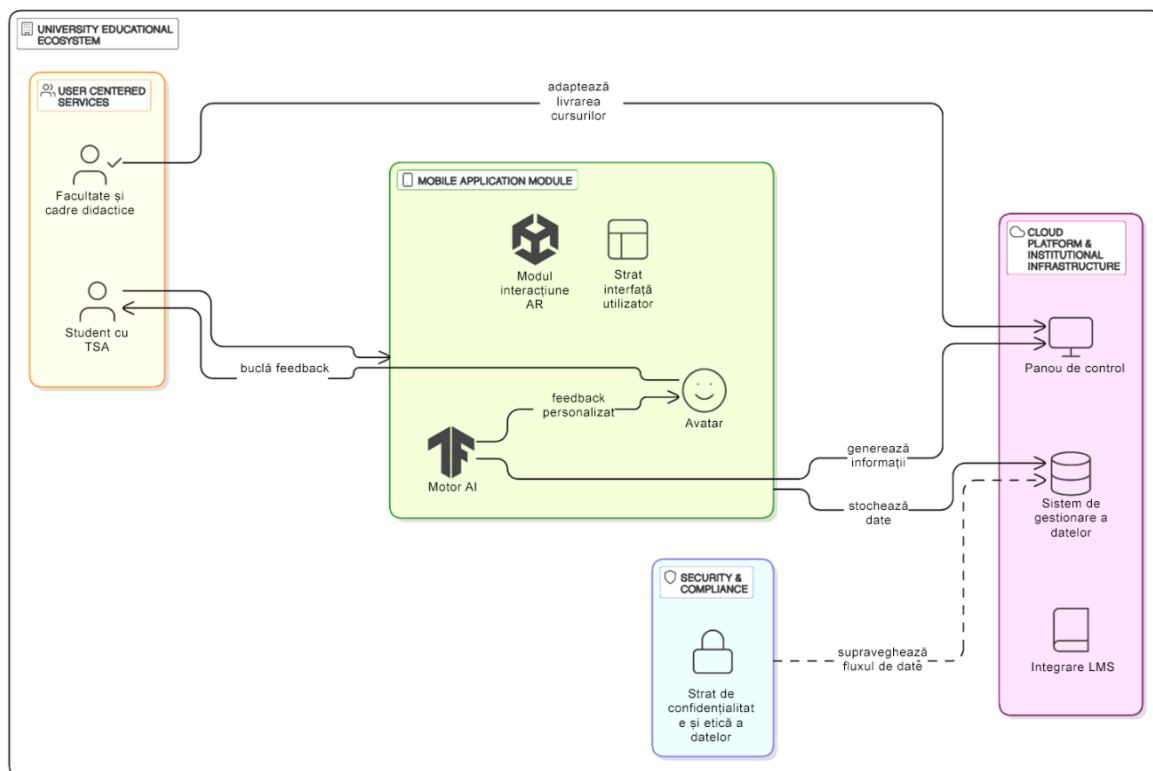


Figura 3.5-1. Reprezentare vizuală a ecosistemului educațional propus.

Pentru a ilustra aplicabilitatea modelului, să considerăm un student cu TSA care urmează un curs de comunicare profesională. În cadrul unei sesiuni, acesta accesează aplicația mobilă RA prin intermediul platformei universității. Modulul RA proiectează în mediul său un scenariu social simulativ – de exemplu, un interviu de angajare. Avatarul empatic îi adresează întrebări și reacționează la răspunsurile verbale și nonverbale ale studentului. Dacă AI-ul detectează semne de anxietate sau dificultate (pauze lungi, evitarea privirii, ton scăzut al vocii), sistemul ajustează ritmul conversației, introduce indicii vizuale suplimentare și reduce nivelul de stimulare auditivă. După sesiune, profesorul primește un raport care evidențiază zonele de progres și recomandări pentru dezvoltarea unor activități complementare în cadrul cursului.

Această abordare este fundamentată în paradigma „inteligenței hibride uman-AI”, recunoscută în literatura de specialitate. Lucrarea [212] demonstrează, în evaluarea platformei Lumilo (smart glasses), că elevii obțin performanțe semnificativ superioare atunci când AI-ul funcționează ca un asistent al profesorului, în comparație cu scenarii complet automatizate sau tradiționale. În plus, un raport al World Economic Forum [212] subliniază că profesorii rămân centrul procesului educațional, iar AI este văzut ca instrument de augmentare, nu ca substitut al rolului uman în clasă.

3.6 Concluzii parțiale

Acest capitol a investigat rolul realității extinse (RE) în sprijinirea educației incluzive, cu un accent specific asupra persoanelor cu tulburări din spectrul autist (TSA). Analiza a avut ca obiectiv identificarea și evaluarea aplicațiilor RE relevante pentru acest context.

Revizuirea sistematică a literaturii, centrată pe intervenții RE pentru copiii cu TSA, a evidențiat o varietate de direcții de cercetare: aplicații mobile pentru dezvoltarea limbajului și

a vocabularului, suport pentru abilități de viață independentă, utilizarea dispozitivelor portabile pentru sprijinirea interacțiunii sociale, precum și scenarii bazate pe avataruri interactive, menite să încurajeze autoreglarea emoțională și participarea activă. Ulterior, actualizarea literaturii cu surse recente a confirmat tendința predominantă de utilizare a realității augmentate în defavoarea altor forme de RE, datorită accesibilității tehnice, costurilor mai reduse și potențialului său de integrare contextuală. Această constatare a justificat alegerea RA ca tehnologie principală pentru formularea propunerii aplicabile în educația universitară.

Concluziile parțiale rezultate din SLR și din actualizarea acestuia au relevat că RA este eficientă în dezvoltarea autoreglării, creșterea implicării afective și susținerea participării active în contexte educaționale adaptate. În același timp, cercetarea a identificat limite metodologice semnificative – inclusiv diversitatea instrumentelor de evaluare, durata scurtă a intervențiilor și lipsa validării în contexte educaționale complexe, cum este mediul academic.

4 Fundamente și direcții de proiectare pentru orientarea asistată de realitate augmentată în campusul inteligent

Prezentul capitol explică trecerea de la sinteza teoretică—revizuirea sistematică a literaturii privind aplicațiile RE/RA pentru sprijin educațional la persoane cu TSA—la demersul aplicativ focalizat pe proiectarea și evaluarea unui sistem de orientare asistată de realitate augmentată (RA) într-un campus inteligent (Smart Campus). Demersul este translațional: din literatura analizată reținem regularități de proiectare (succesiune previzibilă a pașilor, feedback oportun și discret, consistență a interfeței, controlul încărcării cognitive), pe care le transferăm către o problemă instituțională bine definită: orientarea pietonală în campusul universitar. Alegerea RA este susținută atât de proprietățile sale tehnice (suprapunere de indicii spațiali situați peste lumea reală, menținând contactul cu mediul), cât și de adecvarea pedagogică evidențiată în literatura de specialitate, inclusiv în contexte universitare [11]-[13].

Din perspectiva incluziunii în învățământul superior, rezultatele revizuirii sistematice indică faptul că intervențiile RE/RA orientate spre TSA converg către principii de design care reduc incertitudinea și susțin autoreglarea (pași expliți, semnalizare clară, feedback adaptiv). Deși o parte semnificativă a studiilor vizează copii/adolescenți, principiile extrase din ele sunt transferabile către scenarii universitare, cu utilitate pentru utilizatori neurodivergenți și, în general, pentru studenți. În plus, literatura subliniază necesitatea consolidării bazei empirice în segmentul universitar, ceea ce justifică extrapolarea prudentă și fundamentarea unui cadru conceptual specific mediului academic [16][24][27].

Într-un campus inteligent, orientarea spațială reprezintă o funcție transversală: fără un mecanism coerent de ghidare, expansiunea fizică și diversitatea fluxurilor de activitate produc fricțiuni (oculuri, întârzieri, congestionări). Starea curentă e adesea fragmentată—GPS în exterior, soluții ad-hoc în interior—și nu asigură continuitatea experienței. Literatura de specialitate argumentează integrarea într-un sistem unificat indoor-outdoor, cu politici explicite de aliniere și re-aliniere vizuală, pentru a obține consistență între contexte și o experiență predictibilă [2],[3],[10],[229].

Din punct de vedere metodologic și etic, prototipul propus a fost implementat și evaluat inițial pe populația cu dezvoltare cognitivă tipică, pentru a verifica stabilitatea tehnică și lizibilitatea interfeței pe eșantioane adecvate. Ulterior, a fost realizată și o testare exploratorie cu un subgrup restrâns de studenți cu TSA, menită să verifice fezabilitatea utilizării aplicației în contexte de incluziune educațională.

5 Smart Campus: concepte și soluții de orientare

5.1 Conceptul de Smart Campus în contextul digitalizării educației

Transformările accelerate generate de digitalizare în toate domeniile vieții sociale și economice au avut un impact semnificativ asupra mediului academic. În acest context, conceptul de *Smart Campus* a evoluat ca o soluție sistematică pentru modernizarea instituțiilor de învățământ superior, prin integrarea tehnologiilor emergente în procesele educaționale, administrative și operaționale [1].

O componentă fundamentală a conceptului de *Smart Campus* este orientarea către student, considerat utilizatorul central al ecosistemului. Această orientare se reflectă nu doar în digitalizarea cursurilor și a proceselor administrative, ci și în experiența cotidiană a studenților în spațiul fizic al campusului: de la localizarea rapidă a sălilor de curs, până la accesul în timp real la program, evaluări, notificări și resurse educaționale [5].

Prin urmare, conceptul de *Smart Campus* reflectă o tranziție de la universitatea tradițională, statică, fragmentată și analogică, către o universitate dinamică, conectată și centrată pe utilizator, în care tehnologia este integrată ca un mijloc de optimizare a experienței academice și a funcționării instituționale. Această tranziție facilitează abordarea unor probleme critice precum **mobilitatea internă, accesibilitatea, siguranța și orientarea spațială**, care vor fi analizate în secțiunile următoare.

5.2 Poziționarea orientării spațiale ca funcție strategică în Smart Campus

Orientarea spațială influențează în mod direct timpul de reacție al utilizatorului, predictibilitatea deplasării, percepția asupra organizării instituționale și, în mod indirect, productivitatea individuală. În lipsa unor mecanisme eficiente de localizare și ghidare, activitățile academice suferă perturbări, întârzierile se acumulează, iar nivelul de stres crește semnificativ, în special în rândul noilor studenți sau al vizitatorilor temporari [244]. Aceste disfuncționalități nu sunt doar inconveniente logistice, ci se transformă în factori de risc pentru coerența operațională a întregului ecosistem universitar.

Mai mult, orientarea spațială eficientă contribuie la obiectivele instituționale de sustenabilitate și incluziune. Rutele optimizate pot reduce fluxurile aglomerate, contribuind la scăderea consumului de energie pentru climatizare sau iluminat. În paralel, accesul egal la informațiile de localizare, furnizat prin interfețe adaptate diferitelor tipuri de utilizatori, susține integrarea persoanelor cu dizabilități și reduce barierele de acces în mediul academic [246].

5.3 Integrarea într-un sistem unificat de navigație RA indoor–outdoor

Într-un Smart Campus modern, caracterizat printr-o infrastructură digitală interconectată și orientată spre utilizator, mobilitatea eficientă și accesibilitatea între diferite spații – de la săli de clasă la clădiri administrative și zone exterioare – reprezintă un obiectiv fundamental [239], [241]. Utilizatorii nu interacționează doar cu spații închise sau deschise în mod izolat, ci se deplasează frecvent între acestea, într-un flux continuu de activități academice și sociale. Prin urmare, o soluție de navigație care operează doar în interior sau doar în exterior nu poate răspunde în mod eficient cerințelor reale de utilizare într-un astfel de ecosistem educațional complex.

Pornind de la această premiză, sistemul de navigație dezvoltat în cadrul acestui studiu a fost conceput, de la bun început, ca o aplicație unificată pentru orientarea în medii interioare și exterioare. Obiectivul nu a fost doar de a extinde funcționalitatea aplicației existente, ci de a implementa o arhitectură comună care să asigure continuitatea experienței utilizatorului între scenarii spațiale diferite – cu beneficii directe în ceea ce privește reducerea poverii cognitive, creșterea încrederii în sistem și adoptarea pe scară largă a soluției [248].

Această abordare integrată susține viziunea unui campus inteligent incluziv, în care barierele fizice sau perceptuale (de exemplu, lipsa reperelor, complexitatea traseelor sau accesibilitatea redusă) pot fi reduse cu ajutorul realității augmentate [235],[242]. În plus, lipsa dependenței de infrastructuri dedicate (cum ar fi GPS sau BLE) și utilizarea unei tehnologii vizual-inerțiale comune (VPS/SLAM) permit o tranziție lină a utilizatorului între zonele din interiorul și exteriorul campusului, fără discontinuități semnificative în logica de interacțiune sau în comportamentul aplicației [245],[246].

Având în vedere obiectivul construirii unui sistem coerent de navigație RA pentru campusuri universitare, este esențială analiza componentelor care îl alcătuiesc. În capitolul următor, accentul se va pune pe navigația în spațiile interioare, atât din perspectiva tehnologiilor existente, cât și a provocărilor și limitărilor semnalate în literatura de specialitate.

6 Navigația în spațiile interioare (indoor): soluții RA și lacune în literatură

6.1 Contextul tehnologic și educațional al navigației indoor

Navigația în spații interioare constituie o provocare persistentă în instituții complexe, precum universitățile, caracterizate de distribuții arhitecturale extinse și configurații dinamice. Soluțiile convenționale de orientare — semnalizare statică, hărți tipărite sau panouri direcționale — se dovedesc adesea inadecvate în astfel de contexte, în special atunci când utilizatorii nu sunt familiarizați cu spațiul [249],[250].

Realitatea augmentată (RA) oferă o alternativă tehnologică promițătoare, permițând suprapunerea de conținut digital — săgeți direcționale, etichete, instrucțiuni — direct în câmpul vizual al utilizatorului prin intermediul dispozitivelor mobile [251]. În timp ce soluțiile de navigație outdoor (în spații deschise, publice) se bazează predominant pe GPS, aplicabilitatea acestuia în interior este limitată. În consecință, sistemele RA indoor integrează tehnologii precum SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), VPS (Visual Positioning System) sau BLE (Bluetooth Low Energy) pentru a furniza poziționare contextuală și feedback în timp real [252].

Majoritatea aplicațiilor RA dezvoltate în acest domeniu sunt prototipuri orientate spre demonstrații tehnice sau evaluări de utilizabilitate în medii controlate. Lipsa validării în contexte operaționale limitează transferabilitatea și adoptarea acestor soluții [256]. În plus, multe dintre ele au fost concepute pentru utilizare comercială, nu educațională, și nu integrează componente de poziționare în timp real adaptate specificului universitar.

În acest context, este justificată dezvoltarea unor soluții mobile de navigație RA fără infrastructură suplimentară, compatibile cu dispozitivele personale ale utilizatorilor și adaptabile arhitecturilor universitare complexe. Aceste sisteme pot sprijini nu doar orientarea fizică, ci și accesul eficient la informații, resurse și servicii, contribuind astfel la o experiență academică mai coerentă.

Navigația în interiorul clădirilor din campusuri trebuie tratată ca o funcție strategică în cadrul transformării digitale a instituțiilor de învățământ superior.

6.2 Sisteme RA pentru navigația interioară: tehnologii, abordări și limitări

Pe măsură ce spațiile interioare devin tot mai multifuncționale și dinamice, navigație eficientă în medii publice sau semi-publice (aeroporturi, spitale, campusuri universitare) devine o necesitate strategică. În mod particular, în context academic, orientarea eficientă contribuie la incluziune, la reducerea timpilor de căutare și la îmbunătățirea experienței utilizatorilor [271],[272].

Mai multe lucrări recente pun accent pe accesibilitate și design incluziv [275],[276], în timp ce altele evaluează sisteme de mare precizie, relevante pentru orientarea în spații complexe [277],[278]. Studiile empirice validate în contexte reale rămân însă limitate. Meta-analizele recente confirmă beneficiile RA asupra percepției spațiale și asupra eficienței sarcinilor în medii necunoscute, dar subliniază totodată lipsa aplicațiilor scalabile care să nu necesite infrastructură suplimentară [279],[280]. Tabelul 6.2-1 prezintă o analiză comparativă a unor sisteme RA testate pentru navigația în spații interioare.

Tabelul 6.2-1. Analiză comparativă a sistemelor RA pentru navigația în spații interioare

Studiu	Mediu țintă	Tehnologii	Participanți	Rezultate cheie	Limitări
Rossi și colab. [281]	Clădire birouri	Markere vizuale, ARKit	30	Timp de orientare redus cu 35%	Necesită plasare precisă a markerelor
Nguyen & Park [282]	Centru comercial	BLE, suprapuneri RA	25	Precizie 82%	Interferențe în zone aglomerate
Gupta și colab. [283]	Spital	Amprentare WiFi, SLAM	35	Rată succes 78%	Costuri computaționale ridicate
Mishra și colab. [275]	Simulare interior	Sonar, RA audio	20	90% evitarea obstacolelor	Latență audio
Jain & Singh [276]	Biblioteca	Feedback tactil, RA	15	85% satisfacție utilizatori cu mobilitate redusă	Baterie scăzută
Chen și colab. [277]	Campus universitar	ARCore, odometrie	50	Suport multi-etaj, 81% ușurință utilizare	Curbă de învățare
Ahn și colab. [278]	Instituție medicală	LIDAR, semantic mapping	40	Sarcină cognitivă redusă	Suport limitat pe mobil
Yamamoto și colab. [284]	Clădire universitate	BLE, RA 3D	50	Eficiență ridicată	Rază limitată BLE
Watanabe și colab. [285]	Biblioteca universitară	Vision + semantic labeling	33	80% acuratețe identificare camere	Probleme de iluminare

O analiză a datelor agregate din aceste studii evidențiază mai multe tendințe. Tehnologii precum BLE, SLAM și ancorele virtuale în cloud domină peisajul implementărilor, dar sunt adesea asociate cu costuri de instalare, întreținere și limitări de infrastructură. Sistemele testate în campusuri sunt încă relativ puține, iar dintre acestea, majoritatea utilizează infrastructură fizică suplimentară sau sunt adaptate doar parțial nevoilor din învățământul superior [286].

Ținând cont de acestea, cercetarea de față propune o aplicație RA de orientare interioară care să funcționeze fără infrastructură suplimentară, utilizând localizarea vizuală (VPS/SLAM), ancore spațiale persistente și coduri QR (quick response) pentru inițializarea poziționării. Platforma este compatibilă nativ cu ARKit și ARCore, este dezvoltată în Unity 3D și integrează feedback vizual și audio pentru ghidarea utilizatorilor. Obiectivul este de a oferi o soluție scalabilă, centrată pe utilizator, adaptată mediului universitar – atât din punct de vedere al arhitecturii clădirii, cât și al profilului divers al utilizatorilor.

Această poziționare metodologică, construită pe baza literaturii existente și a lacunelor identificate, va fi detaliată în capitolele următoare, care documentează studiul de caz privind implementarea aplicației și evaluarea sa empirică într-un campus universitar real.

7 Proiectarea și testarea unei aplicații RA pentru navigația în campus.

În continuarea viziunii unui sistem unificat de navigație RA pentru Smart Campus, această secțiune detaliază implementarea și utilizarea aplicației cu accent pe mediile interioare, care au constituit cadrul principal pentru dezvoltarea inițială și definirea fluxurilor de interacțiune.

Proiectarea sistemului de navigație bazat pe RA a fost modelată atât de constrângerile tehnologice, cât și de obiectivele centrate pe utilizator, în special în mediul academic. Realitatea augmentată, deși asociată în mod obișnuit cu suprapunerile vizuale, oferă o paradigmă de interacțiune mai largă care poate integra orientarea spațială, informații contextuale și asistență în timp real pentru utilizator. Disponibilitatea tot mai mare a platformelor RA mobile – cum ar fi ARCore, ARKit și SDK-uri comerciale precum Vuforia – a făcut posibilă dezvoltarea de aplicații RA utilizând smartphone-uri cu camere încorporate și senzori de mișcare [290].

Implementarea actuală utilizează SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) bazat pe markeri, combinat cu VPS (Visual Positioning Services), utilizând camerele dispozitivului, măsurătorile inerțiale și ancorele vizuale pentru a estima poziția utilizatorului. Această abordare nu necesită infrastructură suplimentară în afara markerilor reprezentați de coduri QR și este compatibilă cu majoritatea smartphone-urilor moderne care acceptă ARKit (iOS) sau ARCore (Android).

7.1 Tehnologii și platforme

Aplicația de navigație în campus bazată pe RA a fost dezvoltată utilizând Unity 3D, împreună cu ARway SDK, care oferă un mediu pentru construirea și implementarea experiențelor RA imersive. Decizia de a utiliza Unity 3D a fost fundamentată de mai multe criterii-cheie: compatibilitate între platforme, suport ridicat pentru dezvoltarea RA/RV, documentație extinsă și integrare facilă cu ARKit (iOS) și ARCore (Android) prin intermediul AR Foundation [298],[299].

Unity 3D este un motor de jocuri și simulări adoptat pe scară largă, cunoscut pentru capacitățile sale avansate de randare, interfața intuitivă și suportul pentru peste 20 de platforme, inclusiv Android, iOS, Windows și dispozitive RA/TV precum HoloLens și Oculus. Unity utilizează C# ca limbaj de scripting, oferind o integrare stabilă cu API-uri și SDK-uri externe [300].

SDK-ul ARway a fost integrat pentru a gestiona funcționalitățile RA: poziționare, vizualizarea traseului și urmărirea utilizatorului. ARway permite navigație RA fără infrastructură suplimentară (balize sau LiDAR), prin utilizarea SLAM și VPS – ceea ce îl face potrivit pentru medii interioare precum campusurile universitare [303].

7.2 Dezvoltarea aplicației

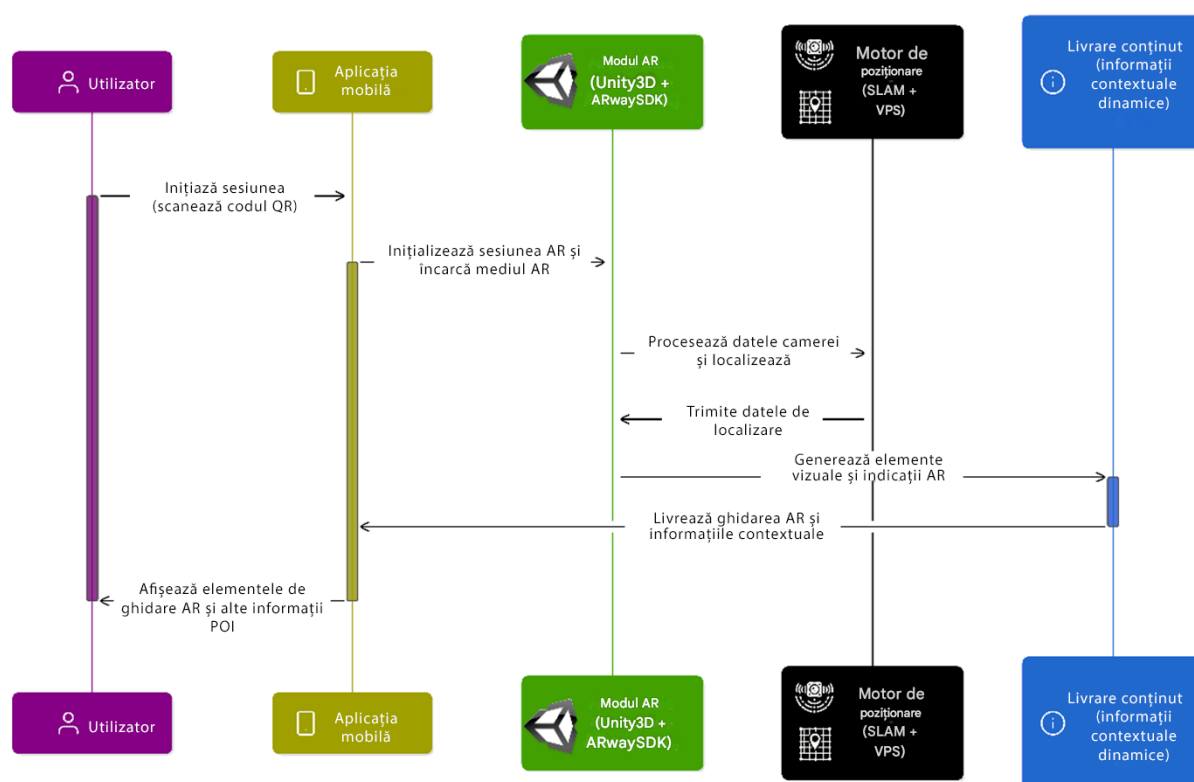
Dezvoltarea sistemului de navigație în campus cu realitate augmentată propus s-a axat pe crearea unei experiențe intuitive, precise și accesibile de orientare în principal în interior, având în același timp în vedere și utilizarea în exterior pentru un sistem unificat, adaptată nevoilor studenților și vizitatorilor.

Localizarea este realizată prin combinarea urmăririi vizuale bazate pe senzorul optic al dispozitivului cu datele senzorilor inerțiali (giroscop și accelerometru). Componenta SLAM

cartografiază și urmărește poziția utilizatorului în timp real, în timp ce VPS completează experiența prin corelarea reperelor fizice cu ancorele spațiale predefinite. Atunci când apar ocluzii sau deviații ale semnalului, sistemul se recalibrează automat folosind cea mai apropiată ancoră vizibilă, menținând alinierea precisă. Sistemul oferă o precizie până la sub un metru, în funcție de iluminatul ambiental și de complexitatea arhitecturală.

Soluția este adaptată la aspectul specific al Universității "Ștefan cel Mare" din Suceava, care deservește peste 11.000 de studenți (potențiali utilizatori ai aplicației). Aplicația se adresează nu numai studenților înscriși, ci și vizitatorilor campusului, cum ar fi viitorii studenți, invitații la diverse evenimente și participanții la conferințe.

Figura 7.2-1 prezintă arhitectura sistemului, inclusiv interfața mobilă, motorul de redare RA, motorul de localizare (SLAM + VPS) și modulul de livrare a conținutului. Acest design modular susține scalabilitatea, implementarea eficientă și integrarea viitoare cu servicii



suplimentare din campus.

Figura 7.2-1. Diagrama de secvență a aplicației. Sursă: Elaborarea proprie a autorului.

7.3 Cartografierea și adăugarea de POI-uri

Configurația spațială a sistemului de navigație RA a fost construită pe baza planurilor arhitecturale ale clădirilor țintă. Procesul de cartografiere a început cu alinierea digitală a acestor planuri în cadrul platformei ARway Studio. Un marker QR principal a fost poziționat fizic într-o locație proeminentă – de obicei o intrare sau un hol – și înregistrat geospațial ca ancoră de pornire pe harta digitală. Această ancoră servește drept referință de localizare inițială în timpul sesiunilor de navigație.

Ancorele ulterioare au fost distribuite în puncte distincte din punct de vedere vizual din clădire, cum ar fi intersecțiile holurilor, scările sau ușile. Aceste ancore sunt utilizate de motorul SLAM pentru a calibra mișcarea utilizatorului și a actualiza poziționarea în timp real. Imaginile

furnizate de senzorul optic al dispozitivului, împreună cu datele inerțiale de la giroscop și accelerometru, permit o urmărire precisă în timpul navigării, chiar și în medii cu lumină mai slabă.

Punctele de interes (POI) au fost definite de-a lungul traseelor disponibile. Fiecare POI a fost configurat cu metadate și conținut digital, inclusiv:

- pini informativi pentru locații cheie (de exemplu, săli de clasă, laboratoare, birouri ale facultăților, lifturi);
- adnotări textuale (de exemplu, mesaje de avertizare în apropierea scărilor);
- conținut multimedia: imagini, videoclipuri scurte sau ghiduri audio;
- indicii vizuale 3D pentru o orientare mai clară sau pentru identitatea vizuală instituțională.

Figura 7.3-1 ilustrează un exemplu de hartă configurată din faza de implementare, evidențiind suprapunerea căilor navigabile și a punctelor de interes adnotate, inclusiv traseele accesibile, ancorele și codurile QR. Această reprezentare vizuală arată modul în care planurile arhitecturale au fost îmbogățite cu indicii de navigație contextuali și informații de orientare în timp real.

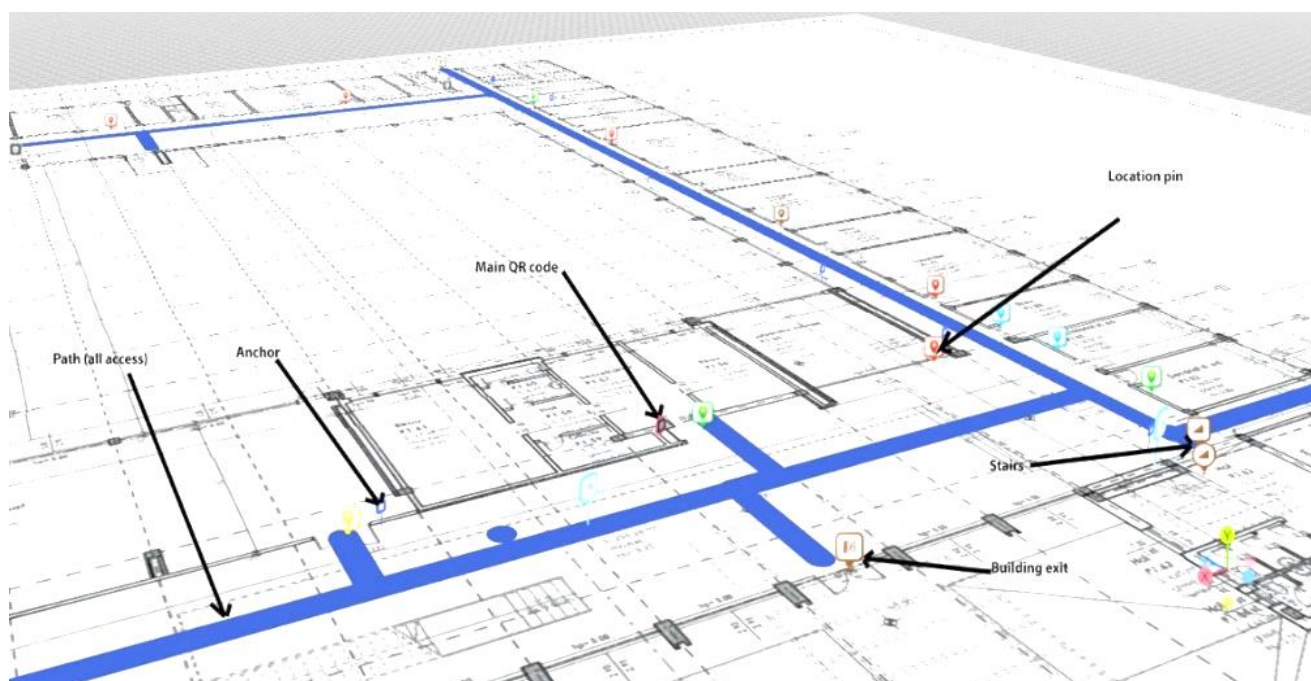


Figura 7.3-1. Exemplu de hartă cu trasee și puncte de interes (POI) marcate. Sursă: Elaborarea proprie a autorului.

7.4 Fluxul de lucru și interfața de navigație RA în interior

Prezenta secțiune oferă o prezentare vizuală și funcțională a aplicației de navigație cu realitate augmentată într-un scenariu real de campus universitar. Printr-o secvență de capturi de ecran și o analiză descriptivă, interfața și experiența de navigație sunt ilustrate din perspectiva utilizatorului tipic, oferind o privire practică asupra comportamentului operațional și a gradului de utilizabilitate al aplicației.

Fluxul standard de interacțiune cu utilizatorul include următorii pași:

- **Lansarea aplicației:** Utilizatorul deschide aplicația de navigație RA pe propriul dispozitiv mobil (iOS sau Android).
- **Scanarea codului QR:** La intrarea într-o clădire sau într-o zonă de interes, utilizatorul scanează un marker QR tipărit sau pe suport digital, amplasat strategic.
- **Inițializarea hărții:** Harta digitală corespunzătoare și sesiunea RA sunt încărcate automat, poziția utilizatorului fiind calibrată în funcție de coordonatele markerului.
- **Selectarea destinației:** Utilizatorul explorează un director de locații clasificate după categorii (ex. săli de curs, birouri administrative) sau folosește funcția de căutare pentru o destinație specifică (ex. sala A110).
- **Vizualizarea datelor contextuale:** Aplicația afișează detalii utile, cum ar fi funcția spațiului, distanța estimată, durata de parcurs, date de contact și, unde este cazul, orarul activităților.
- **Previzualizarea traseului:** Este generată o vedere 2D a traseului, permițând confirmarea destinației și alegerea unei opțiuni de rută accesibilă, dacă este necesar.
- **Inițierea ghidării RA:** După confirmare, începe navigație RA în timp real, cu suprapunerea de săgeți direcționale, distanțe și etichete POI peste imaginile captate de senzorul optic al dispozitivului.
- **Recalibrare dinamică:** Tehnologiile SLAM și VPS permit ajustarea automată a poziției în timpul deplasării. În caz de pierdere a poziției, aplicația solicită scanarea unui marker QR (sau imagine) din apropiere.
- **Confirmarea sosirii:** La destinație, aplicația semnalează sosirea și oferă opțiuni suplimentare, precum navigație către o nouă locație sau accesul la informații despre punctele de interes din apropiere.

Figura 7.4-1 și Figura 7.4-2 prezintă capturi de ecran relevante realizate în timpul unei sesiuni de testare desfășurate în clădirea A a Universității "Ștefan cel Mare" din Suceava. Testele au implicat navigație interioară pe două etaje, utilizând inițierea bazată pe marker QR și ghidajul RA în holuri și intersecții variate.

Capturile de ecran provin de pe un smartphone cu Android 15 și reflectă experiența tipică a utilizatorului. Imaginile selectate surprind întregul parcurs, de la scanarea codului QR și selectarea unei destinații (ex. sala A110), până la afișarea instrucțiunilor de navigație RA în timp real, direct în mediul înconjurător. Pe măsură ce utilizatorul se deplasează, aplicația actualizează dinamic suprapunerile cu săgeți, distanțe și etichete POI relevante.

Aplicația a fost proiectată ca soluție exclusiv mobilă, nefiind necesară utilizarea ochelarilor RA sau a altor echipamente portabile. Compatibilitatea cu dispozitive comerciale care suportă ARKit (iOS) și ARCore (Android) asigură accesibilitate extinsă și scalabilitate, fără a depinde de hardware dedicat.

Călătoria utilizatorului începe prin scanarea unui cod QR amplasat strategic la punctele de acces. Acest cod inițiază sesiunea RA pentru utilizatorii care dețin deja aplicația, sau îi redirecționează către magazinul de aplicații pentru descărcare. Ulterior, codul încarcă automat harta ARway asociată cu planul clădirii și alocă poziția curentă. Figura 7.4-1 ilustrează acest proces.

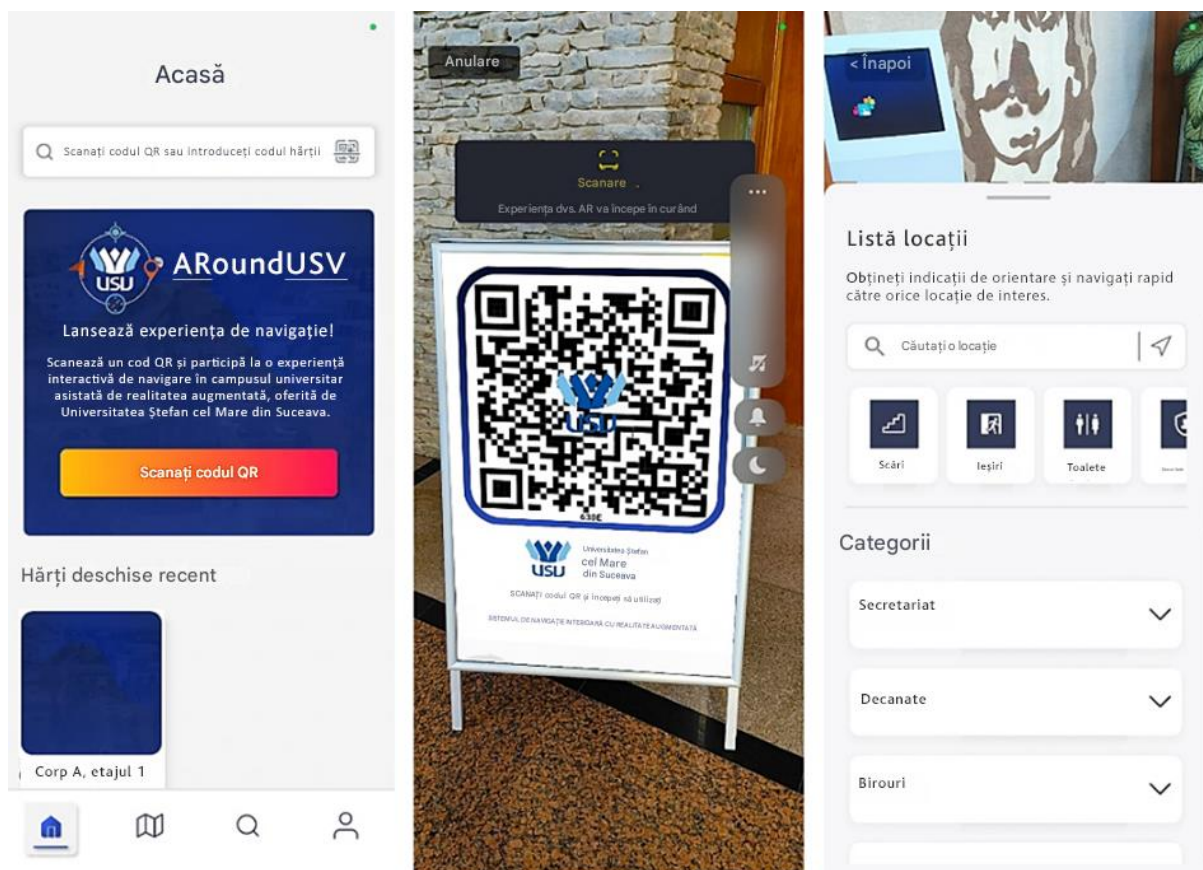


Figura 7.4-1. Inițializarea scenariului indoor

- (a) Interfața principală a aplicației; (b) Scanarea codului QR; (c) Selectarea categoriei.

Interfața permite navigație prin categorii prestabilite – săli de clasă, birouri, amfiteatre, biblioteci și unități administrative. La alegerea unei destinații (ex. sala A110), aplicația furnizează informații detaliate: tipul locației, distanța estimată, durata traseului, fișiere media opționale, date de contact și eventual orarul cursurilor (Figura 7.4-2.a). Acest nivel de detaliu susține orientarea, dar și învățarea exploratorie și accesul informat.

Ulterior, aplicația afișează o hartă 2D pentru previzualizare și inițiază ghidarea RA în timp real (Figura 7.4-2.b). Pe traseu, sunt afișate săgeți animate, distanțe și etichete POI care se ajustează dinamic în funcție de poziția utilizatorului (Figura 7.4-2.c). Acolo unde este cazul, pot fi selectate rute alternative accesibile pentru scaune rulante.

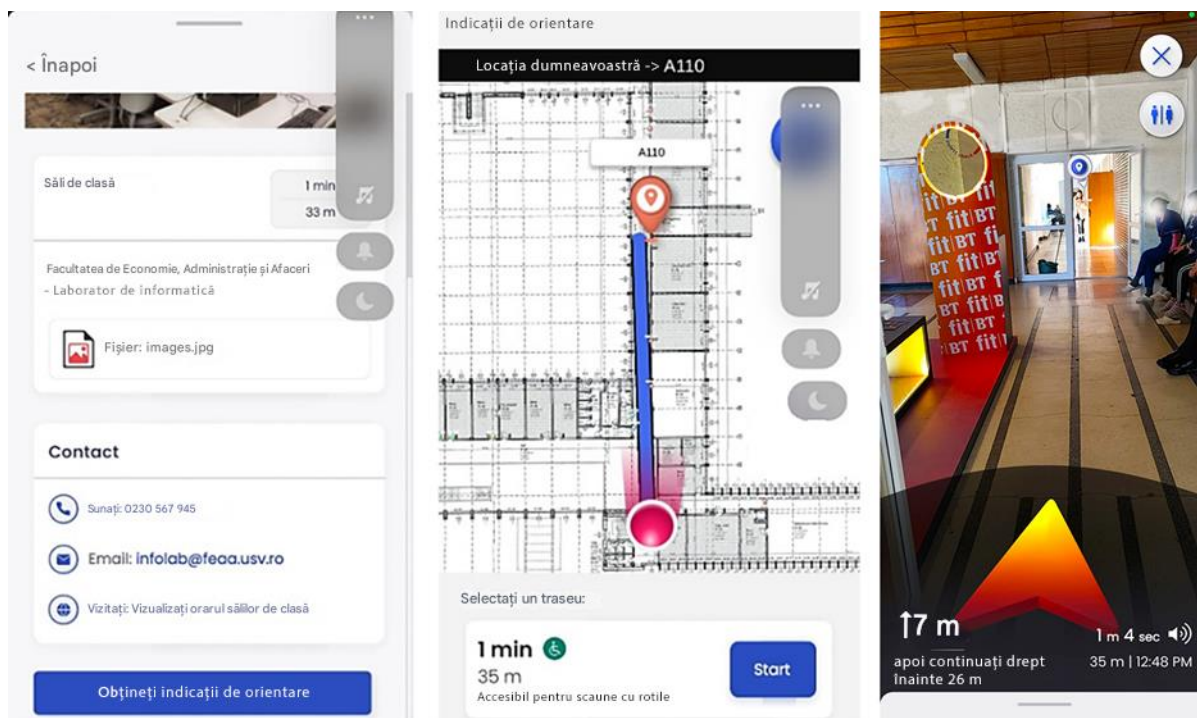


Figura 7.4-2. Scenariul indoor – traseul propus.

- (a) Detalii despre locație; (b) Calea către locație; (c) Indicii vizuale augmentate

Exemplele prezentate reflectă mediul interior, dar fluxul de lucru și principiul de funcționare este asemănător și în cazul scenariului de navigație outdoor, care este prezentat în subcapitolele 7.6 și 7.7.

7.5 Testarea aplicației în interior

7.5.1 Metodologie

Pentru a structura procesul de evaluare, au fost adoptate două cadre teoretice consacrate: System Usability Scale (SUS) și Technology Acceptance Model (TAM).

Investigația empirică a navigației în interior a fost efectuată într-un cadru real - o clădire din campusul universitar - unde 256 de studenți au participat la testarea aplicației în condiții autentice de utilizare. Răspunsurile acestora au fost colectate imediat după finalizarea sarcinii de navigație.

Pe lângă testările realizate pe un eșantion extins de studenți tipici, am inclus și o testare exploratorie cu un subgrup de studenți TSA, prezentată în subcapitolul 7.8.

Întrucât sistemul de navigație RA a fost conceput încă de la început pentru a funcționa atât în interiorul clădirilor, cât și în spațiile exterioare ale campusului universitar, scenariul experimental a fost structurat astfel încât să reflecte această abordare unificată. Fiecare participant a parcurs două sarcini distincte de navigație utilizând aceeași aplicație: una în interior și una în exterior. Ordinea acestor sarcini a fost contrabalansată pentru a controla posibilele efecte de învățare. Evaluarea a fost proiectată ca un studiu comparativ integrat, în cadrul căruia participanții au completat un chestionar post-task unic, ce a inclus itemi specifici pentru ambele contexte – interior și exterior. Prin urmare, testarea scenariului indoor nu a fost realizată în mod izolat, ci în paralel cu scenariul outdoor, utilizând același eșantion și aceleași

instrumente validate (TAM și SUS), pentru a permite comparații directe și metodologic riguroase între cele două condiții experimentale.

În cele ce urmează, ne vom concentra asupra scenariului de testare indoor, urmând ca partea dedicată navigației în spațiul exterior al campusului să fie prezentată în subcapitolul 7.7.

7.5.2 Profilul participanților și durata studiului

Evaluarea empirică a aplicației de navigație RA a implicat 256 de studenți participanți de la Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava, România. Majoritatea au fost înscriși în primul (70,7%) și al doilea an (26,2%) de studiu universitar, reprezentând utilizatori tipici care sunt mai puțin familiarizați cu infrastructura campusului și mai susceptibili de a beneficia de sprijin pentru orientare. Restul participanților (3,1%) proveneau din alte niveluri academice, inclusiv din ultimii ani de licență și din programe de masterat.

7.5.3 Configurația experimentală și procedura de testare

Pentru a asigura coerența și controlul în toate sesiunile de testare, fiecărui participant i s-a cerut să urmeze același traseu de navigație predefinit în cadrul clădirii universitare selectate. Locația țintă a fost aleasă în mod intenționat dintre cele accesate mai rar, pentru a minimiza probabilitatea ca participanții - în special studenții din primul an - să fie deja familiarizați cu spațiul. Această alegere de proiectare a permis o evaluare mai precisă și imparțială a eficacității aplicației în sprijinirea orientării în interior.

După finalizarea sarcinii, participanții au completat un chestionar structurat în Google Forms care a inclus elemente atât din Scala de utilizabilitate a sistemului (SUS), cât și din Modelul de acceptare a tehnologiei (TAM), vizând dimensiuni cheie precum intuitivitatea, utilitatea, receptivitatea sistemului și intenția comportamentală de a reutiliza aplicația. Chestionarul este disponibilă în Anexa A . Nu a fost oferită asistență în timpul executării sarcinii , pentru a simula utilizarea independentă și realistă a aplicației.

7.5.4 Ipoteze de cercetare

Ipotezele formulate pentru acest studiu sunt următoarele:

- **Ipoteza 1:** Există o corelație pozitivă semnificativă din punct de vedere statistic între percepția utilizatorilor cu privire la intuitivitatea aplicației și scorurile lor pe scara de utilizabilitate a sistemului (SUS).
- **Ipoteza 2:** Aplicațiile de navigație interioară sunt percepute ca fiind mult mai utile de către utilizatorii care întâmpină dificultăți în orientarea tradițională.
- **Ipoteza 3:** O interfață intuitivă și un timp de răspuns rapid al aplicației îmbunătățesc percepția capacității sale de utilizare.
- **Ipoteza 4:** Percepția utilității aplicației influențează intenția de a o utiliza în mod regulat.

Studiul a fost aprobat de comitetul de etică instituțională al Universității Ștefan cel Mare din Suceava. Toți participanții au fost informați cu privire la scopul cercetării și drepturile lor înainte de participare. Consimțământul informat a fost obținut de la toate persoanele, iar procedurile de colectare a datelor au aderat la liniile directoare instituționale privind confidențialitatea și conduita etică în cercetare. În timpul studiului, nu au fost colectate sau stocate informații de identificare personală.

Pentru a valida aceste ipoteze și a evalua eficacitatea sistemului, rezultatele testării empirice sunt analizate și interpretate în secțiunea următoare.

7.5.5 Rezultate

Ipoteza 1: Există o corelație pozitivă semnificativă din punct de vedere statistic între percepția utilizatorilor cu privire la intuitivitatea aplicației și scorurile lor pe scara de utilizabilitate a sistemului (SUS).

Această ipoteză a investigat corelația dintre percepția de intuitivitate a aplicației de către utilizatori și evaluările generale ale acestora privind utilizabilitatea, conform cadrului SUS. Conceptul de intuitivitate reprezintă o componentă esențială atât în proiectarea centrată pe utilizator, cât și în modelul de acceptare a tehnologiei (TAM), care afirmă că ușurința în utilizare are un impact direct asupra ratei de adoptare a tehnologiei.

Pentru a testa acest lucru, a fost efectuată o analiză de corelație între două elemente: *"Aplicația mi s-a părut ușor de utilizat"* (variabilă independentă, predictor, care măsoară intuitivitatea) și scorul final al SUS (scalat la 100, variabilă dependentă). Statisticile descriptive arată un scor SUS mediu ridicat ($M = 89.02$, $SD = 14.10$) și o percepție favorabilă a ușurinței de utilizare ($M = 3,99$, $SD = 0,95$).

S-a constatat o corelație pozitivă moderată spre puternică, semnificativă din punct de vedere statistic, între cele două variabile (Pearson's $r = 0,633$, Spearman's $\rho = 0,635$; $p < 0,001$).

Figura 7.5-1 surprinde distribuția datelor și ilustrează că utilizatorii care au perceput aplicația ca fiind mai ușor de utilizat au obținut constant scoruri SUS mai mari.

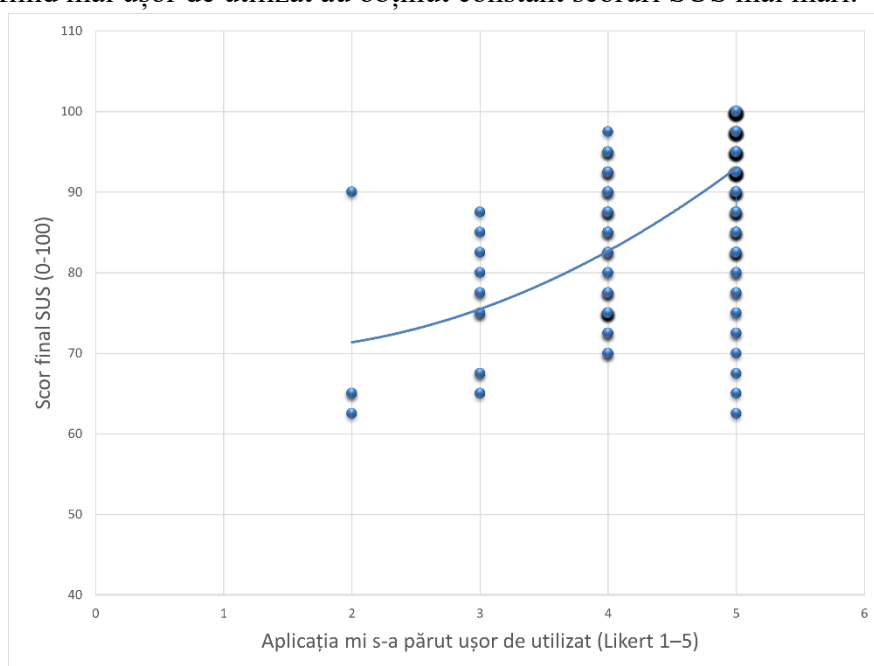


Figura 7.5-1. Analiza relației dintre percepțiile utilizatorilor cu privire la ușurința de utilizare a aplicației și familiaritatea lor cu mediile interioare.

Rezultatele susțin ipoteza, evidențiind că intuitivitatea percepută reprezintă un predictor esențial al scorurilor de utilizabilitate. Nivelul mediu ridicat al scorului SUS (≈ 89) plasează aplicația în zona „excelentă” a utilizabilității, conform criteriilor consacrate. Alinierea între percepția intuitivității, scorurile ridicate și stabilitatea coeficienților de corelație confirmă importanța designului interfeței pentru îmbunătățirea experienței utilizatorilor în scenarii indoor.

Ipoteza 2: Aplicațiile de navigație interioară sunt percepute ca fiind mult mai utile de către utilizatorii care întâmpină dificultăți în orientarea tradițională.

Această ipoteză a explorat dacă participanții cu o familiaritate mai redusă în navigație prin clădirile campusului ar evalua aplicația RA ca fiind mai utilă.

Pentru a evalua această relație, a fost efectuată o analiză de corelație utilizând două elemente autoevaluate pe scara Likert:

- *"Cât de bine cunoașteți clădirile / sălile din campus (interior)?"* (măsurarea familiarității spațiale, variabilă dependentă);
- *"Cred că această aplicație îmbunătățește semnificativ capacitatea mea de a naviga în interiorul clădirilor din campus".* (utilitate percepută, variabilă dependentă).

Statisticile descriptive pentru ambele elemente sunt prezentate în Tabelul 7.5-1, indicând o familiaritate moderată cu clădirile campusului și o percepție în general ridicată a utilității aplicației.

Tabelul 7.5-1. Statistici descriptive pentru familiaritatea cu navigație și utilitatea percepută (N=256).

Variabilă	Media	Deviație Std.
Familiaritate cu clădirile campusului	3.195	0.9037
Îmbunătățirea percepută în navigație în interior	4.059	0.8168

Analizele de corelație Pearson și Spearman au evidențiat o relație inversă puternică și semnificativă din punct de vedere statistic ($r = -0,866$, $\rho = -0,886$; $p < 0,001$). Acest lucru sugerează că utilizatorii care erau mai puțin familiarizați cu mediul campusului au evaluat aplicația ca fiind semnificativ mai utilă.

Figura 7.5-2 ilustrează clar faptul că persoanele cu scoruri mici în ceea ce privește familiaritatea au raportat constant **scoruri ridicate** privind utilitatea percepută a aplicației. Graficul confirmă vizual relația invers proporțională dintre cele două variabile.

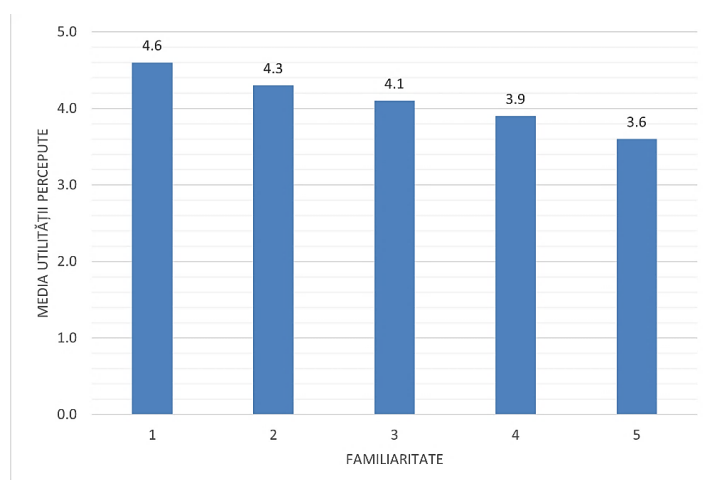


Figura 7.5-2. Analiza cluster a familiarității cu clădirile campusului și a utilității percepute a aplicației de navigație în interior

Rezultatele susțin ipoteza conform căreia aplicațiile de navigație interioară sunt percepute ca mai utile de către utilizatorii cu un nivel scăzut de familiaritate spațială. Totuși, scorurile ridicate la toate nivelurile de familiaritate arată că aplicația este percepută ca fiind utilă și de către utilizatorii care cunosc deja campusul.

Ipoteza 3: O interfață intuitivă și un timp de răspuns rapid al aplicației îmbunătățesc percepția capacității sale de utilizare.

Această ipoteză a investigat dacă intuitivitatea interfeței și capacitatea de răspuns a conținutului RA influențează gradul de utilizare perceput, măsurat prin Scala de utilizabilitate a sistemului (SUS).

Participanții au evaluat două afirmații pe o scară Likert în cinci puncte:

- "Cât de intuitiv vi s-a părut modul de navigație în interior?" (variabilă independentă);
- "Cât de repede a fost încărcat și afișat conținutul RA (VPS, SLAM) în interior?" (variabilă independentă);

A fost efectuată o regresie liniară multiplă pentru a determina modul în care acești doi predictori au afectat scorul SUS (variabilă dependentă). Modelul de regresie a fost semnificativ din punct de vedere statistic, $F(2, 253) = 40,22$, $p < 0,001$, reprezentând aproximativ 24,1% din variația capacității de utilizare percepute ($R^2 = 0,241$).

Ambii predictori au contribuit semnificativ la model. Viteza de răspuns a conținutului RA a avut un efect mai puternic ($\beta = 0.333$, $p < 0.001$) în comparație cu intuitivitatea ($\beta = 0.230$, $p < 0.001$), sugerând că capacitatea de răspuns joacă un rol ușor mai mare în modelarea scenariilor de utilizare.

După cum este ilustrat în Figura 7.5-3, scorurile SUS mai mari au fost asociate cu evaluări mai favorabile atât ale intuitivității interfeței, cât și ale capacității de reacție RA. Aceste rezultate susțin ipoteza și subliniază importanța optimizării atât a clarității designului, cât și a vitezei de performanță în sistemele mobile de navigație RA.

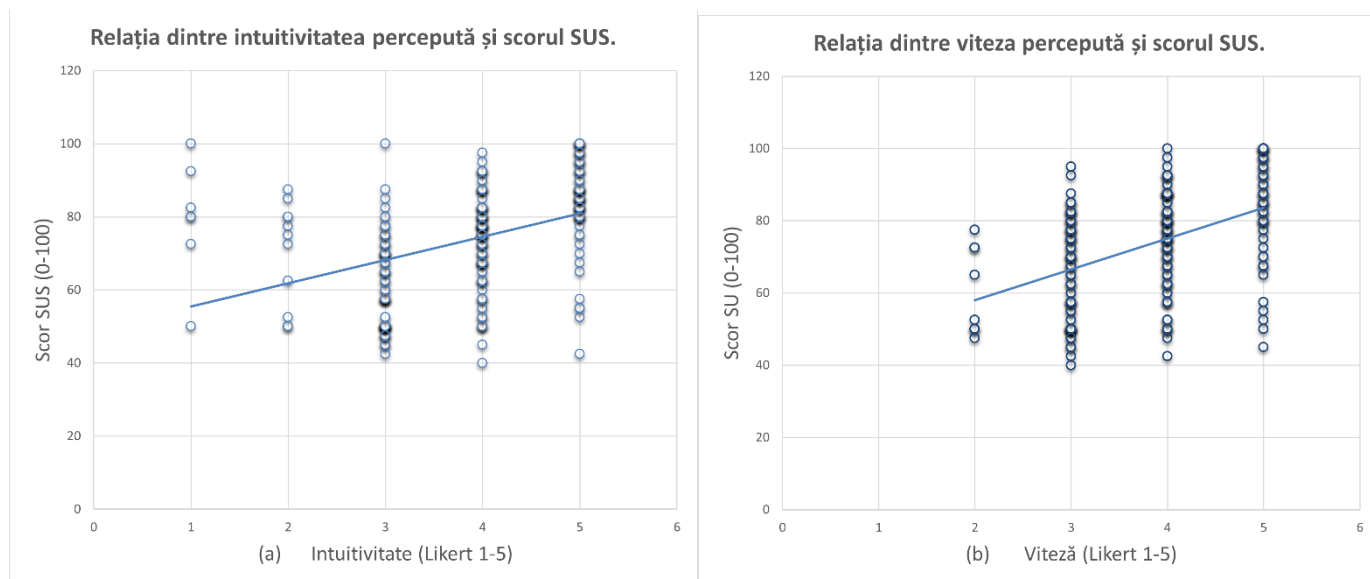


Figura 7.5-3. (a) Relația dintre caracterul intuitiv al modulului de navigație interioară și SUS;
(b) Relația dintre caracterul intuitiv al modulului de navigație interioară și SUS

Ipoteza 4: Percepția utilității aplicației influențează intenția de a o utiliza în mod regulat.

Această ipoteză a investigat legătura dintre utilitatea percepută a aplicației și intenția declarată a participanților de a o folosi în mod repetat.

Participanții au răspuns la două afirmații pe scara Likert:

- *"Cred că această aplicație îmbunătățește semnificativ capacitatea mea de a naviga în interiorul clădirilor campusului".* (utilitate percepută, variabilă independentă);
- *"Aș fi dispus să folosesc această aplicație în mod regulat pentru navigație în interiorul campusului"* (intenția de reutilizare, variabilă dependentă).

Statisticile descriptive pentru ambele variabile arată ratinguri constant ridicate atât pentru utilitatea percepută ($M = 4,059$), cât și pentru intenția de reutilizare ($M = 4,027$).

S-a constatat o corelație pozitivă puternică și semnificativă din punct de vedere statistic între cele două elemente (Pearson's $r = 0,761$, Spearman's $\rho = 0,780$; $p < 0,001$).

Aceste constatări confirmă ipoteza și se aliniază cu afirmația principală a TAM conform căreia utilitatea prezice în mod direct comportamentul de utilizare. După cum se vizualizează în Figura 7.5-4, participanții care au fost foarte de acord cu utilitatea aplicației au exprimat, de asemenea, o dorință mai mare de a o utiliza în mod regulat.

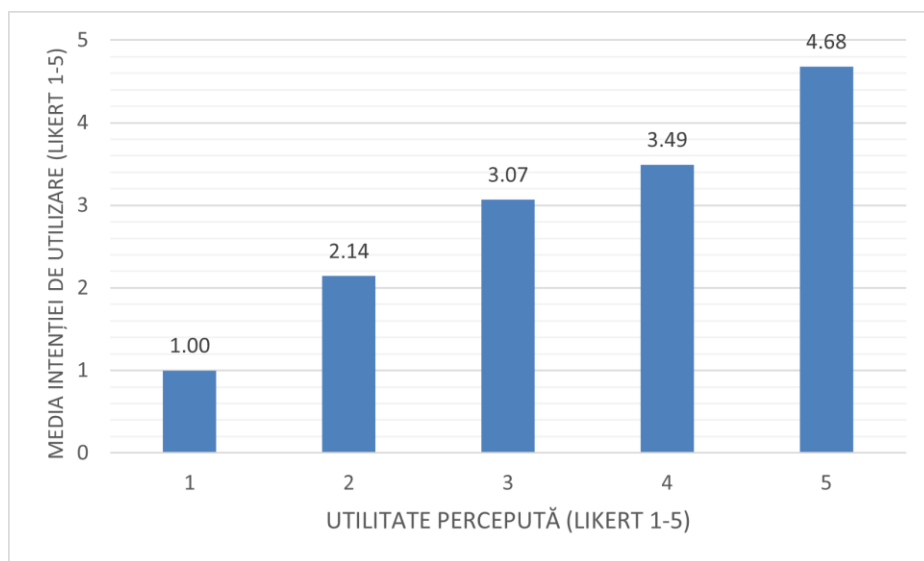


Figura 7.5-4. Relația conceptuală dintre utilitatea percepută și intenția comportamentală de reutilizare, bazată pe TAM.

7.5.6 Concluzii parțiale

Această secțiune a prezentat dezvoltarea și evaluarea unui sistem de navigație mobil de realitate augmentată (RA) proiectat pentru utilizare în interior într-un mediu academic. Construită folosind Unity și ARway SDK, aplicația permite ghidarea în interior fără infrastructură prin indicii vizuale și auditive, ancorate prin coduri QR și localizare spațială. Constatări principale:

- Evaluarea empirică la scară largă care a implicat 256 de participanți a demonstrat eficacitatea aplicației și acceptarea puternică a utilizatorului. Rezultatele oferă un sprijin solid pentru toate cele patru ipoteze de cercetare:

- Utilizatorii care au perceput aplicația ca fiind intuitivă și receptivă au raportat scoruri SUS semnificativ mai mari;
- Cei cu cunoștințe prealabile limitate despre interioarele campusurilor au evaluat sistemul ca fiind mai util;
- S-a constatat o corelație puternică între utilitatea percepută și intenția de a reutiliza aplicația.

Aceste constatări, susținute de corelații semnificative din punct de vedere statistic și de modele de regresie, confirmă importanța intuitivității interfeței, a capacității de reacție la performanță și a relevanței contextuale în modelarea utilizabilității și adoptării RA.

7.6 Navigația RA în medii exterioare: particularități

Spre deosebire de mediile interioare, scenariile de utilizare outdoor ridică provocări specifice, asociate cu variația condițiilor de iluminare, lipsa repere vizuale stabile sau dinamica crescută a spațiului deschis. Pentru a răspunde acestor constrângeri, dezvoltarea sistemului a vizat o serie de optimizări tehnice punctuale, dintre care cele mai relevante sunt legate de îmbunătățirea fiabilității ancorelor vizuale, poziționarea coerentă a etichetelor RA în câmpul vizual al utilizatorului și evitarea obstacolelor în timpul navigației pietonale.

7.6.1 Fundamentele conceptuale ale scenariului exterior

În această secțiune sunt prezentate considerațiile tehnice și metodologice specifice implementării aplicației în medii outdoor, ca parte integrantă a arhitecturii generale, și nu ca o extensie separată. Deși componentele de bază (logica de interfață, motorul RA, sistemul de ancore vizuale) sunt comune, mediile deschise presupun provocări distincte, care necesită adaptări semnificative – de la lipsa reperelor stabile și variațiile de lumină naturală, la interferențele de localizare și dinamica pietonală.

Aplicațiile mobile de navigație outdoor se bazează în general pe tehnologii GPS integrate în hărți 2D, precum Google Maps sau Apple Maps. Deși eficiente în spații largi, aceste soluții nu sunt optimizate pentru navigație pietonală în medii semi-structurate precum campusurile universitare. Ambiguitățile de poziționare cauzate de lipsa adreselor exacte, intrările multiple și vegetația abundentă pot conduce la erori de orientare considerabile [310],[311]. Mai mult, efectele de tip „canion urban” reduc precizia GNSS (Global Navigation Satellite System) în prezența clădirilor înalte, generând abateri de peste 8 metri [312].

Pentru a depăși aceste limite, literatura recentă recomandă utilizarea tehnologiilor vizuale, precum VPS (Visual Positioning System), care oferă o localizare contextuală bazată pe recunoașterea mediului [313]. Deși utilizate în aplicații comerciale (ex. Google Live View), aceste tehnologii sunt puțin exploatate în contexte educaționale și academice [314].

7.6.2 Provocări specifice ale navigației outdoor

Deși mediul exterior oferă, în general, un spațiu mai deschis pentru implementarea soluțiilor de navigație, acesta introduce un set distinct de provocări tehnice, metodologice și de experiență a utilizatorului, mai ales în contextul navigației pietonale asistate prin realitate augmentată (RA). În acest context, am identificat următoarele provocări:

- **Lipsa ancorelor structurale și instabilitatea scenelor vizuale**
- **Variabilitatea iluminării și condițiile meteo**
- **Dinamica spațiului și obstrucții temporare**
- **Alinierea între harta digitală și mediul real**

- Consumul energetic și cerințele hardware
- Lipsa standardelor pentru plasarea ancorelor în exterior

7.6.3 Propuneri de optimizare și rezultate experimentale

Provocările prezentate anterior au fost identificate nu doar prin analiză conceptuală, ci și în urma testelor preliminare realizate în mediul exterior al campusului. Aceste observații empirice au permis o înțelegere practică a limitărilor aplicației în scenarii reale, contribuind la conturarea direcțiilor de optimizare. În continuare, sunt prezentate cele trei probleme majore recurente care au afectat experiența de utilizare a aplicației și soluțiile tehnice propuse pentru remedierea acestora, implementate ulterior în versiunea finală a aplicației.

7.6.3.1 Îmbunătățirea fiabilității ancorelor vizuale în medii outdoor

Navigația RA în spații exterioare semi-structurate, cum sunt campusurile universitare, este semnificativ influențată de calitatea și consistența ancorelor vizuale utilizate în cadrul sistemelor de poziționare VPS (Visual Positioning Systems). Spre deosebire de mediile indoor, unde se pot controla markerii vizuali (ex: coduri QR), mediul exterior este imprevizibil: vegetația, reflexiile solare, mobilitatea obiectelor și prezența utilizatorilor generează scene vizuale dinamice care pot compromite precizia localizării.

Pentru a răspunde acestor dificultăți, am dezvoltat și integrat în SDK-ul ARway o componentă software pentru selecția avansată a trăsăturilor vizuale stabile, destinată exclusiv fazei de cartografiere prealabilă a campusului. Scopul acestei componente este identificarea acelor trăsături care sunt persistente în timp, bine delimitate vizual și detectabile din unghiuri multiple, cu un grad ridicat de diferențiere — acestea fiind esențiale pentru o localizare fiabilă la rularea aplicației în regim outdoor.

Arhitectură funcțională – overview

Soluția dezvoltată constă în trei componente software:

1. FeatureTracker.cs – monitorizează stabilitatea trăsăturilor detectate de algoritmul ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF —algoritm de detecție și descriere de trăsături vizuale) [326].
2. AnchorManagerExtended.cs – extrage și salvează doar trăsăturile robuste ca ancore.
3. VPSInitializer.cs – la rulare, activează VPS doar în jurul ancorelor filtrate.

Rezultate experimentale – comparație V0 vs. V1

Testele au fost efectuate în zona centrală a campusului universitar pe 3 trasee pietonale distincte, fiecare de aproximativ 120–180 metri, incluzând atât zone larg deschise, cât și pasaje înguste între clădiri.

Pentru fiecare traseu, am rulat:

- **V0** – versiunea originală a SDK-ului ARway, fără filtrare de trăsături;
- **V1** – versiunea extinsă, cu selecție de trăsături stabile în etapa de cartografiere.

Fiecare traseu a fost parcurs de 5 ori per versiune, pe timp de zi (între orele 11:00–16:00), în condiții meteo variabile (soare parțial, nori).

Testele au fost efectuate pe un dispozitiv Samsung Galaxy S21, Android 13, cu ARCore activ.

Metodologia:

- Timp inițializare VPS: măsurat de la lansarea aplicației până la apariția direcțiilor RA corect aliniate;
- Rată relocalizare greșită: procentul cazurilor în care VPS-ul a stabilit o poziție greșită care a necesitat reinițializare manuală;
- Deplasare medie față de traseu: eroarea laterală în metri între poziția estimată și traseul real;
- FPS mediu: obținut din statistica internă Unity/ARway la fiecare sesiune.

Tabelul 7.6-1 prezintă rezultatele experimentale.

Tabelul 7.6-1. Îmbunătățirea fiabilității ancorelor vizuale – comparație V0 vs. V1

Indicator	V0 – fără filtrare	V1 – cu filtrare	Îmbunătățire
Timp mediu inițializare VPS (sec)	6.8	4.1	- 39.7%
Rată relocalizare greșită (%)	17.5	9.2	- 47.4%
Deplasare medie față de traseu (m)	1.6	0.9	- 43.7%
FPS mediu în runtime	28.3	29.1	+2.8%

Versiunea propusă a redus semnificativ erorile de localizare fără impact negativ asupra performanței grafice sau a latenței. Timpul de inițializare a fost redus, iar stabilitatea în scenarii cu iluminare variabilă a crescut vizibil. În plus, nu s-au observat penalizări semnificative asupra frecvenței de cadre sau comportamentului runtime.

7.6.3.2 Alinierea și poziționarea etichetelor RA în câmpul vizual

Navigația RA în medii exterioare semi-structurate, cum sunt campusurile universitare, este semnificativ influențată de calitatea și consistența plasării etichetelor vizuale asociate punctelor de interes. În lipsa unei poziționări spațiale corecte, etichetele RA pot apărea decalate față de obiectul real, suprapuse necorespunzător sau instabile în timpul deplasării, afectând grav experiența de utilizare [328],[329].

Pentru a răspunde acestei provocări, am dezvoltat o metodă de corectare adaptivă a poziționării etichetelor RA în funcție de distanță, orientarea utilizatorului și câmpul vizual al camerei, metodă care a fost integrată în SDK-ul ARway prin adăugarea a trei scripturi suplimentare în cadrul unui modul propriu *ARwayExtensions*. Aceste scripturi nu modifică fișierele originale ale SDK-ului, ci se atașează la GameObject-uri existente (etichetă, cameră RA) în cadrul proiectului Unity, respectând astfel principiile de extensibilitate modulară recomandate pentru dezvoltarea RA [330].

Arhitectura soluției propuse

Soluția este compusă din:

- LabelPlacerExtended.cs: gestionează plasarea inițială a etichetei în funcție de poziția ancorei și distanța față de utilizator.
- LabelStabilizer.cs: menține orientarea etichetei spre utilizator în timp real.
- CameraFOVHelper.cs: verifică dacă eticheta se află în câmpul vizual al camerei și o repoziționează în caz contrar.

Fișierele sunt plasate într-un folder nou: Assets/Scripts/ARwayExtensions/.

Metodologie experimentală

Pentru evaluarea soluției propuse, au fost definite următoarele metrici cantitative:

- Eroarea medie de decalaj (în metri): distanța între marginea clădirii și marginea etichetei proiectate în câmpul vizual.
- Procentul de timp în care eticheta a fost integral vizibilă în timpul deplasării.
- Timpul mediu de re poziționare: intervalul de adaptare după o schimbare bruscă de direcție sau poziție.

Testele au fost realizate pe trei trasee pietonale cu geometrii diferite (curbe, intersecții, obiecte verticale), în condiții de lumină naturală variabilă. Fiecare versiune a fost testată prin rulări repetate în aceleași condiții. Rezultatele optimizării sunt prezentate în Tabelul 7.6-2.

Tabelul 7.6-2. Corectare adaptivă a poziționării etichetelor – versiunea standard vs. versiunea extinsă.

Indicator	V0 – fără corecții	V1 – cu corecții	Îmbunătățire (%)
Eroare medie poziționare etichetă (m)	1.35	0.72	-46.7%
Etichetă vizibilă >80% din traseu (%)	58.2	87.6	+50.5%
Timp mediu re poziționare (sec)	1.15	0.47	-59.1%
Rata de suprapunere cu alte obiecte (%)	21.7	7.9	-63.6%

Valorile sunt obținute ca medii din 15 rulări pentru fiecare versiune, utilizând aceeași hartă și aceleași condiții de iluminare. Integrarea modulelor de reglare adaptivă a etichetelor RA în SDK-ul ARway a permis o poziționare mult mai precisă și lizibilă a conținutului augmentat, fără a afecta performanța sistemului sau experiența în timp real. Randarea contextuală a etichetelor a redus semnificativ decalajele percepute și a îmbunătățit coerența navigației vizuale în mișcare.

7.6.3.3 Evitarea dinamică a obstacolelor în timpul navigației RA pietonale

Navigația RA pietonală în medii exterioare presupune existența unor traiectorii prestabilite între puncte de interes, însă, în practică, utilizatorii se pot confrunta cu obstacole temporare precum mobilier urban, grupuri de persoane sau vehicule parcate. Sistemele de navigație RA tradiționale nu sunt proiectate să reacționeze în timp real la astfel de interferențe, ceea ce poate duce la confuzie sau la eșecul ghidării [332].

Pentru a răspunde acestor provocări, am integrat în SDK-ul ARway un mecanism de detecție a obstacolelor bazat pe raycasting, capabil să ajusteze direcția de deplasare propusă utilizatorului printr-o mică deviație laterală automat calculată. Soluția este complet integrabilă în motorul Unity și nu necesită modificarea componentelor existente ale SDK-ului, fiind implementată sub forma unui script atașabil la camera utilizatorului (ARCamera).

Arhitectura soluției

Soluția propusă este implementată într-un singur script, ca extensie (ObstacleAwarePathing.cs).

Acest script se atașează GameObject-ului ce conține camera RA (ARCamera) și monitorizează direcția de mers a utilizatorului, verificând dacă în fața acestuia există un obstacol în raza de 3 metri.

Integrarea în SDK-ul ARway

Integrarea s-a realizat fără modificarea componentelor originale ale SDK-ului ARway. Scriptul `ObstacleAwarePathing.cs` este adăugat ca comportament suplimentar la obiectul `ARCamera`. Interfața `NavigationEngine.UpdateHeading()` poate fi implementată pentru a transmite noua direcție fie către un indicator vizual RA, fie pentru a repoziționa o săgeată de direcționare temporară. Această separare logică asigură compatibilitatea și reutilizarea codului în orice aplicație Unity care folosește ARway sau sisteme similare de VPS.

Evaluare calitativă

Funcționalitatea a fost testată în scenarii reale de navigație în campus, cum ar fi parcare. Sistemul a demonstrat capacitatea de a reacționa în timp real la obstacole neașteptate și de a propune o alternativă de orientare care a menținut utilizatorii pe traseul principal, fără coliziuni. Deși nu s-au cuantificat metrici numerici în această etapă, s-a observat o îmbunătățire a clarității direcției oferite și a continuității navigării, în special în zonele cu trafic pietonal crescut.

7.7 Testarea și validarea aplicației în scenariul outdoor

7.7.1 Obiective și metodologie de testare

Extinderea funcționalității aplicației mobile de orientare în realitate augmentată (RA) către mediul exterior al campusului universitar a impus validarea empirică a performanței acesteia într-un nou context spațial. Obiectivul principal al acestei etape a fost de a evalua utilizabilitatea, precizia și acceptabilitatea sistemului de navigație RA în scenarii outdoor, păstrând continuitatea funcțională și metodologică față de implementarea anterioară în interior.

Pentru a menține coerența între cele două contexte (indoor și outdoor), s-a adoptat o metodologie exploratorie centrată pe utilizator, similară celei utilizate în studiul anterior. Aplicația RA, dezvoltată inițial pentru orientarea în spații interioare, a fost adaptată pentru navigație în exteriorul campusului fără a se baza pe infrastructură suplimentară (precum GPS sau balize BLE), ci utilizând aceleași principii de poziționare vizuală (SLAM, VPS) și ancorare spațială în cloud.

Acest lucru a urmărit nu doar evaluarea performanței tehnice a sistemului în exterior, ci și validarea continuității experienței utilizatorului între cele două contexte. Rezultatele obținute permit o analiză comparativă relevantă și susțin ideea unui sistem de navigație unificat pentru campusurile universitare inteligente. Chestionarul cu întrebările specifice acestui scenariu este disponibil în Anexa B.

7.7.2 Scenariul de testare și configurația experimentală

În urma analizei provocărilor specifice navigației outdoor, prezentate în secțiunea 7.6.2, aplicația mobilă de orientare în realitate augmentată (RA) a fost extinsă și optimizată prin implementarea celor trei soluții tehnice dedicate. Aceste soluții au vizat îmbunătățirea stabilității poziționării vizuale, alinierea și poziționarea conținutului digital în câmpul vizual și evitarea dinamică spații deschise. Versiunea rezultată, astfel optimizată, a fost utilizată în cadrul testării experimentale descrise în continuare, având ca obiectiv validarea performanței aplicației în scenariul outdoor, în condiții reale de utilizare.

Inițializarea navigării se realizează prin scanarea unui cod QR amplasat pe elementele de semnalistică ale campusului, cum ar fi panoul oficial de la intrarea principală (Figura 7.7-1.a). Codul QR funcționează ca o ancoră de poziționare inițială, sincronizând coordonatele

sistemului digital cu cele ale mediului fizic, pentru a permite o suprapunere spațială precisă a conținutului RA. După inițializare, aplicația afișează o interfață de selecție a destinației, oferind utilizatorului posibilitatea de a alege un punct de interes — de exemplu, observatorul astronomic al universității.

La selectarea unei destinații, aplicația afișează o previzualizare detaliată, incluzând o imagine reprezentativă, date de contact și opțiunea „Get Directions” (Figura 7.7-1.b). Activarea acesteia generează o reprezentare contextuală a traseului, cu informații despre distanța estimată și durata de parcurgere pietonală (Figura 7.7-1.c). De asemenea, aplicația indică dacă traseul selectat este adaptat pentru utilizatorii cu mobilitate redusă, susținând astfel principiile de accesibilitate digitală.

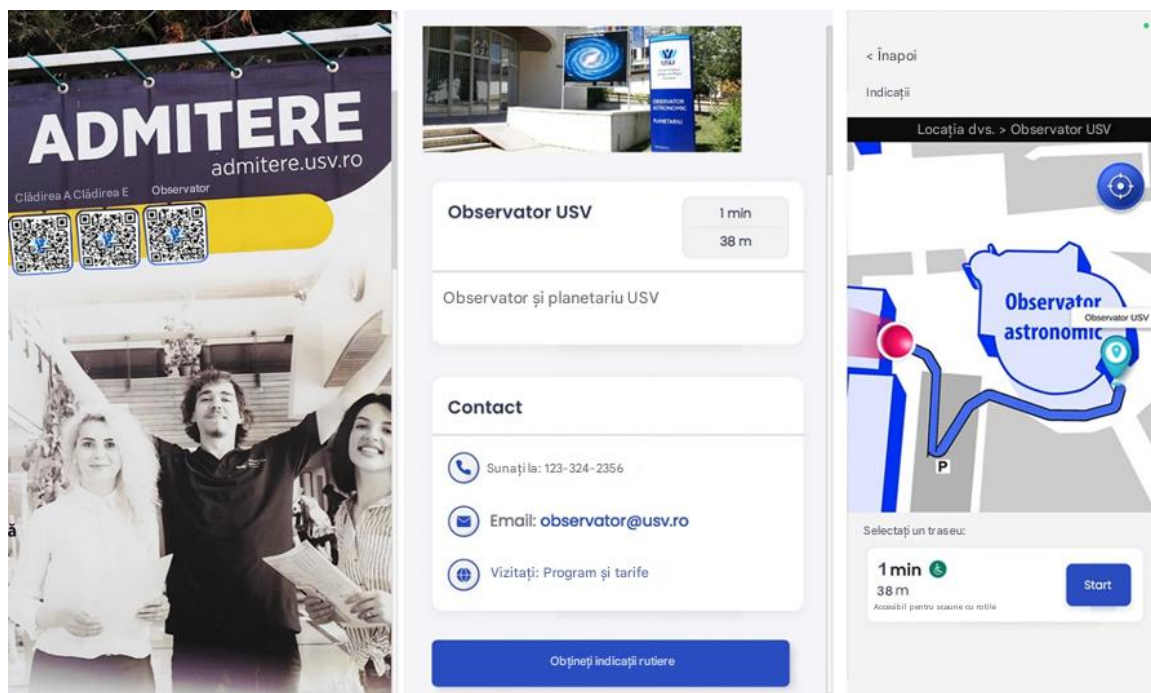


Figura 7.7-1. Scenariul outdoor - Interfața și inițializarea traseului

a) scanarea codului QR

b) detaliile locației

c) traseul locației

După lansarea sesiunii de navigație, traseul este reprezentat printr-o succesiune de săgeți 3D ancorate spațial, suprapuse în timp real peste fluxul video captat de camera dispozitivului. Aceste elemente vizuale se actualizează dinamic pe măsură ce utilizatorul se deplasează, oferind o orientare spațială precisă și în timp real (Figura 7.7-2.a). Pentru a asigura redundanța informațională, aplicația oferă simultan instrucțiuni textuale și indicații audio opționale (Figura 7.7-2.b). Interfața grafică a fost concepută minimalist, cu accent pe claritate vizuală, zone tactile optimizate pentru interacțiune mobilă și iconografie unificată.

Faza de finalizare a traseului este susținută prin afișarea unor etichete și marcaje RA persistente, care semnalează apropierea de destinația aleasă și confirmă sosirea în punctul țintă (Figura 7.7-2.c). Similar versiunii indoor, sistemul nu necesită conectivitate GNSS sau infrastructură BLE — întreaga experiență de navigație fiind susținută prin tehnici de urmărire vizuală (camera-based tracking) și ancorare spațială persistentă. Această abordare asigură o scalabilitate ridicată și permite implementarea sistemului fără intervenții asupra infrastructurii fizice existente.

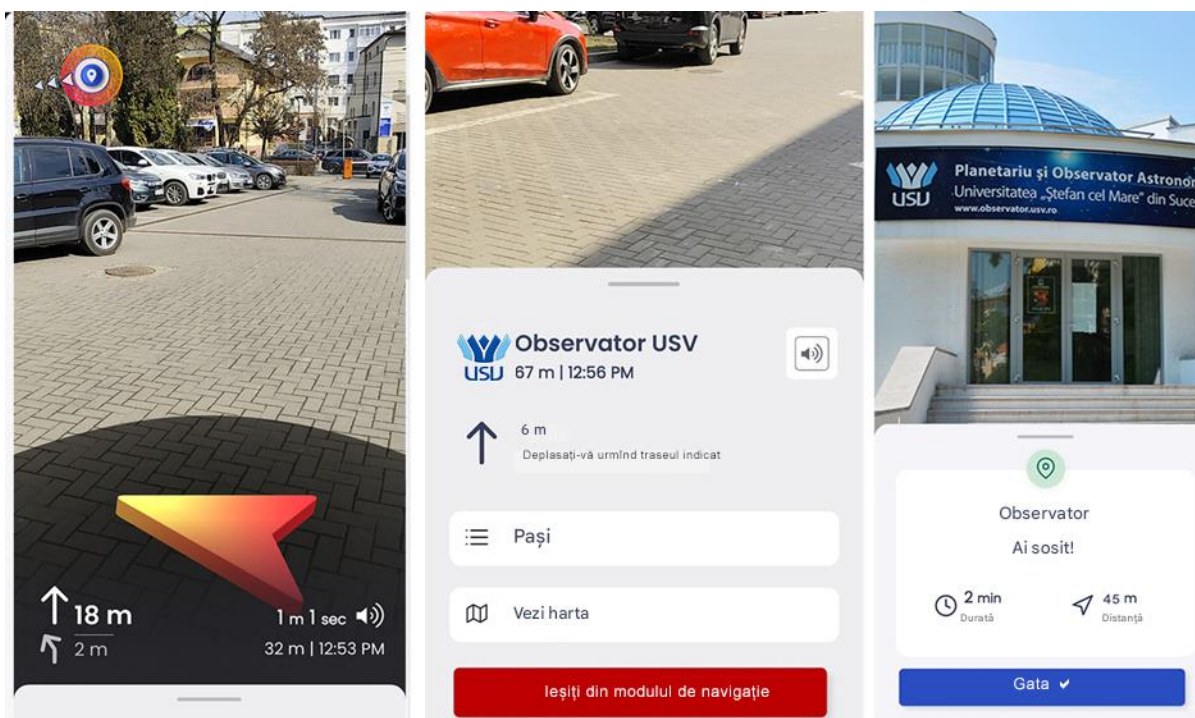


Figura 7.7-2. Scenariul outdoor - interacțiunea cu utilizatorul.

a) indicii vizuale

b) detalii suplimentare

c) confirmarea sosirii

Studiul experimental a fost realizat cu participarea celor 256 de studenți care au fost implicați anterior în testarea scenariului de navigație indoor, într-un design centrat pe utilizator (within-subjects). Fiecare participant a parcurs două sarcini de navigație: una desfășurată în interiorul clădirii și una în spațiile exterioare ale campusului. Ordinea scenariilor a fost contrabalansată pentru a elimina eventualele efecte de învățare. Participanții au utilizat propriile dispozitive mobile compatibile cu platformele ARCore (pentru Android) sau ARKit (pentru iOS), reflectând astfel condițiile reale de utilizare.

Instrumentele de evaluare utilizate au fost **Scala de Utilizabilitate a Sistemului (SUS)** și **Modelul de Acceptare a Tehnologiei (TAM)**, aceleași ca în scenariul indoor, dar adaptate pentru contextul de testare exterior. Itemii au fost ajustați pentru a reflecta specificul mediului outdoor — precum vizibilitatea elementelor RA în lumină naturală, orientarea între clădiri sau percepția asupra experienței de utilizare în spații deschise. Această abordare a permis comparabilitatea rezultatelor între cele două scenarii și a susținut validitatea metodologică a studiului.

7.7.3 Ipoteze de cercetare

Pentru evaluarea comparativă a aplicației de navigație RA în scenariile interior–exterior, studiul a formulat următoarele ipoteze:

- **Ipoteza 1:** Nu există diferențe semnificative statistic în ceea ce privește ușurința de utilizare percepută între mediul interior și cel exterior.
- **Ipoteza 2:** Utilitatea percepută este mai ridicată în contextul interior, ca urmare a configurației spațiale mai complexe.
- **Ipoteza 3:** Receptivitatea sistemului prezice semnificativ scorurile SUS, atât în scenariul indoor, cât și în cel outdoor.

- **Ipoteza 4:** Nu se înregistrează diferențe semnificative între mediul interior și cel exterior în ceea ce privește scorurile SUS.
- **Ipoteza 5:** Intenția comportamentală de reutilizare este asociată pozitiv cu utilitatea percepută a aplicației.
- **Ipoteza6:** Factorii specifici mediului exterior (de exemplu, condițiile de iluminare, textura și complexitatea fundalului vizual) pot influența percepția receptivității sistemului.

7.7.4 Rezultate

Ipoteza 1: Nu există diferențe semnificative din punct de vedere statistic între percepția utilizatorilor privind intuitivitatea aplicației în scenariile de navigație în interior și exterior.

Această ipoteză a avut ca obiectiv investigarea măsurii în care utilizatorii percep aplicația de navigație în realitate augmentată ca fiind la fel de intuitivă în contexte universitare interioare și exterioare.

Pentru a testa această ipoteză, s-a aplicat un test t pentru eșantioane perechi, comparând următorii doi itemi din chestionar:

- „Cât de intuitiv vi s-a părut modul de navigație în interior?”
- „Cât de intuitiv vi s-a părut modul de navigație în aer liber?”

Ambii itemi au fost evaluați pe o scală Likert în 5 puncte (1 = deloc intuitiv, 5 = foarte intuitiv). Statisticile descriptive pentru cele două condiții indică medii identice ($M = 3.83$) și deviații standard comparabile ($SD = 0.97$ pentru interior, $SD = 1.00$ pentru exterior), ceea ce sugerează o percepție uniformă asupra intuitivității aplicației în ambele contexte.

Rezultatele testului t nu au evidențiat diferențe semnificative statistic între cele două contexte de utilizare: $t(255) = -0.066$, $p = 0.947$. Diferența medie a fost practic nulă (-0.004), consolidând concluzia că utilizatorii percep aplicația ca fiind la fel de intuitivă în ambele scenarii.

Figura 7.7-3 ilustrează această simetrie, prezentând scorurile medii ale intuitivității în scenariile indoor și outdoor.

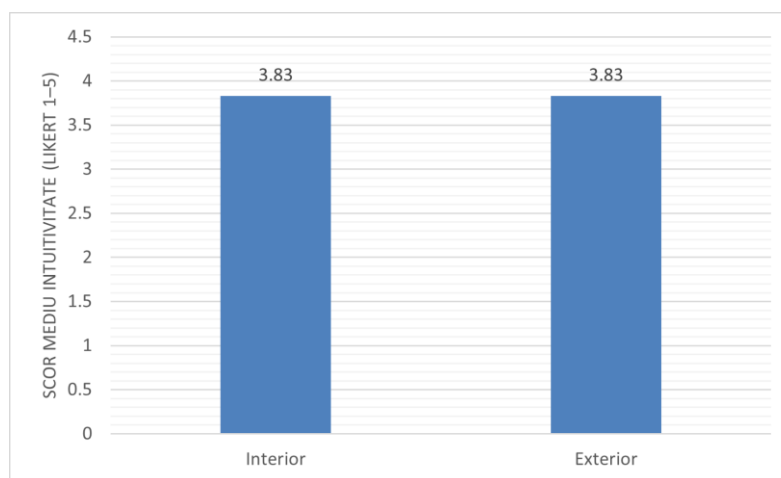


Figura 7.7-3. Intuitivitatea medie percepută a aplicației RA în scenariile de navigație în interior și exterior. Barele de eroare nu sunt afișate, având în vedere variația minimă. Nu s-au înregistrat diferențe semnificative între condiții ($p = 0.947$).

Ipoteza 2: Aplicația este percepută ca fiind mai utilă în navigație în interior decât în exterior

A doua ipoteză a investigat dacă utilizatorii percep aplicația de navigație cu realitate augmentată (RA) ca fiind mai utilă în medii interioare (de exemplu, coridoare, săli de curs) decât în medii exterioare (de exemplu, spațiile dintre clădirile campusului). Această presupunere se bazează pe ideea că mediile interioare ridică provocări mai mari în ceea ce privește orientarea spațială, din cauza ocluziunilor frecvente, absenței reperelor vizuale și a unei structuri arhitecturale mai complexe — aspecte pe care tehnologia RA este concepută să le atenueze.

Pentru a testa această ipoteză, a fost aplicat un test t pentru eșantioane perechi, evaluând următorii doi itemi din chestionar:

- „Cred că această aplicație îmi îmbunătățește semnificativ capacitatea de a mă orienta în interiorul clădirilor din campus.”
- „Cred că această aplicație îmbunătățește semnificativ capacitatea mea de a mă orienta în spațiile exterioare ale campusului.”

Ambele afirmații au fost evaluate pe o scală Likert cu 5 trepte (1 = total dezacord, 5 = total acord). Statisticile descriptive asociate celor două scenarii indică o medie ușor mai ridicată pentru scenariul interior ($M = 4.20$, $SD=0.91$) față de cel exterior ($M = 4.11$, $SD=0.94$), diferență însoțită de deviații standard apropiate.

Rezultatele testului t nu au evidențiat o diferență semnificativă din punct de vedere statistic: $t(255) = 1.704$, $p = 0.090$. Diferența medie de $+0.086$ indică o ușoară tendință în favoarea mediului interior, dar insuficientă pentru a confirma ipoteza la pragul convențional de semnificație ($\alpha = 0.05$).

Figura 7.7-4 prezintă distribuția scorurilor de utilitate percepută în cele două scenarii (interior și exterior). Înălțimea aproape identică a coloanelor confirmă observația statistică, sugerând o evaluare comparabilă a eficienței aplicației în ambele medii.

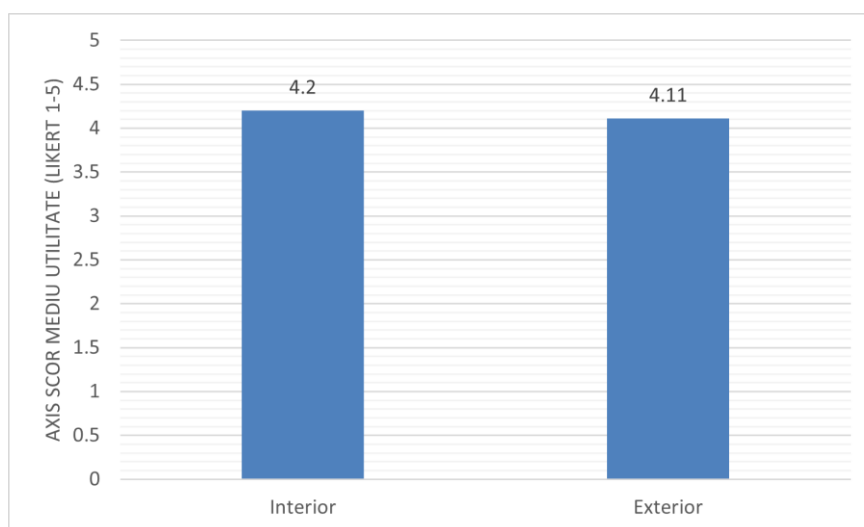


Figura 7.7-4. Scorurile medii ale utilității percepute în scenariile de navigație în interior (1) și în exterior (2). Diferențele vizuale minime reflectă variații statistice nesemnificative între cele două condiții.

Ipoteza 3 (H3): Experiența de navigație este percepută ca fiind mai atractivă în medii interioare decât în medii exterioare

Această ipoteză a explorat dacă utilizatorii consideră experiența de navigație RA mai captivantă în spații interioare (de exemplu, holuri, coridoare) comparativ cu cele exterioare (de exemplu, alei și zone deschise din campus). Premisa ipotezei pornește de la faptul că mediile interioare, datorită geometriei structurate și a reperelor fixe, pot oferi un context mai imersiv pentru realitatea augmentată, spre deosebire de mediile exterioare, unde deschiderea vizuală largă și iluminatul variabil pot reduce senzația de imersiune.

Pentru a evalua această ipoteză, au fost utilizate două itemuri paralele în chestionar:

- „*Cât de captivantă sau stimulantă vi s-a părut experiența de navigație în interior?*”
- „*Cât de captivantă sau stimulantă vi s-a părut experiența de navigație în aer liber?*”

Participanții au răspuns pe o scală Likert de 5 puncte (1 = deloc, 5 = foarte mult). Rezultatele descriptive indică medii aproape identice pentru ambele condiții: interior ($M = 4.02$, $SD = 0.92$) și exterior ($M = 4.04$, $SD = 0.95$), sugerând o percepție similară a atractivității aplicației în cele două contexte.

Testul t pentru eșantioane perechi nu a evidențiat o diferență semnificativă din punct de vedere statistic: $t(255) = -0.409$, $p = 0.683$. Diferența medie a fost neglijabilă (-0.020), ceea ce indică absența unei diferențe practice între cele două condiții de utilizare.

Aceste rezultate infirmă ipoteza conform căreia utilizatorii ar găsi navigație în interior semnificativ mai atractivă. Similaritatea scorurilor poate fi atribuită unui design coerent al aplicației și al interfeței, care oferă o experiență echilibrată în ambele medii. De asemenea, noutatea tehnologiei RA în sine ar putea contribui la percepția pozitivă generalizată, indiferent de contextul spațial.

Ipoteza 4: Aplicația se încarcă mai rapid și mai fluent în medii interioare decât în medii exterioare

Această ipoteză a investigat percepția utilizatorilor asupra performanței aplicației RA în funcție de mediu, cu accent pe viteza de încărcare a conținutului și fluiditatea afișării. Premisa de bază este că mediile interioare oferă condiții mai stabile (conectivitate Wi-Fi, iluminare constantă, suprafețe uniforme), ceea ce ar putea facilita funcționarea mai eficientă a tehnologiilor VPS (Visual Positioning System) și SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Pentru a testa ipoteza, au fost comparate scorurile oferite de participanți pentru următoarele două itemuri:

- „*Cât de rapid a fost încărcarea și afișarea conținutului RA (VPS, SLAM) în interior?*”
- „*Cât de rapid a fost încărcarea și afișarea conținutului RA (VPS, SLAM) în exterior?*”

Ambele întrebări au utilizat o scală Likert în 5 puncte (1 = foarte lent, 5 = foarte rapid). Rezultatele descriptive arată o medie ușor mai mare pentru contextul interior ($M = 3.81$, $SD = 0.83$), comparativ cu cel exterior ($M = 3.71$, $SD = 0.88$), sugerând o percepție favorabilă pentru performanța aplicației în interior.

Testul t pentru eșantioane perechi a evidențiat o diferență semnificativă statistic între cele două condiții: $t(255) = 2.167$, $p = 0.031$, confirmând astfel ipoteza H4.

Aceste rezultate indică faptul că utilizatorii percep aplicația ca fiind mai responsivă în medii interioare. Posibile explicații includ:

- iluminare artificială mai previzibilă;
- geometrie spațială structurată, favorabilă detecției și trackingului;
- acces mai fiabil la rețele Wi-Fi comparativ cu datele mobile utilizate în exterior.

Ipoteza 5: Este mai probabil ca utilizatorii să își exprime intenția de a utiliza în mod regulat aplicația pentru navigație în interior decât pentru navigație în exterior

Această ipoteză a vizat explorarea diferențelor în intenția comportamentală a utilizatorilor de a utiliza constant aplicația de navigație RA în funcție de contextul spațial — interior (de exemplu, holuri, săli de clasă) versus exterior (de exemplu, între clădirile campusului).

Pentru testare, au fost formulate doi itemi paraleli:

- „Aș fi dispus să folosesc în mod regulat această aplicație pentru navigație interioară în campus.”
- „Aș fi dispus să folosesc în mod regulat această aplicație pentru navigație în aer liber între clădirile campusului.”

Ambii au fost evaluați pe o scală Likert în 5 puncte (1 = total dezacord, 5 = total acord). Rezultatele descriptive indică scoruri aproape identice în cele două condiții: interior ($M = 3.93$, $SD = 1.03$), exterior ($M = 3.93$, $SD = 1.00$), sugerând o percepție echilibrată.

Testul t pe eșantioane perechi a confirmat absența unei diferențe semnificative statistice: $t(255) = 0.079$, $p = 0.937$. Diferența medie (+0.004) este neglijabilă, sugerând o intenție de utilizare similară în ambele contexte.

Aceste rezultate infirmă ipoteza inițială, dar oferă un mesaj pozitiv: utilizatorii par deschiși să folosească aplicația în mod constant, indiferent de mediul în care operează. Această echivalență poate reflecta încrederea dobândită în interfața aplicației, precum și consistența funcțională și vizuală a experienței oferite.

Ipoteza 6: Utilizatorii percep precizia și stabilitatea localizării aplicației ca fiind semnificativ mai mari în scenariile de interior decât în scenariile de exterior

Această ipoteză a investigat percepția utilizatorilor asupra fiabilității localizării — o componentă esențială a funcționării sistemelor de navigație în realitate augmentată (RA). Se presupune că mediile interioare, prin geometria lor mai structurată, iluminarea constantă și conexiunile wireless mai stabile, ar putea favoriza performanța acestor tehnologii în comparație cu mediile exterioare.

Pentru a testa această ipoteză, participanții au evaluat următoarele două afirmații:

- „Cum ați evalua stabilitatea și precizia funcției de localizare în navigație în interior (clădiri, holuri)?”
- „Cum ați evalua stabilitatea și precizia funcției de localizare în navigație în exterior?”

Răspunsurile au fost exprimate pe o scală Likert în 5 puncte (1 = foarte scăzută, 5 = foarte ridicată). Rezultatele descriptive indică o ușoară preferință pentru mediul interior ($M = 3.68$, $SD = 0.86$) față de cel exterior ($M = 3.63$, $SD = 0.88$), dar diferența este marginală.

Testul t pe eșantioane perechi nu a evidențiat o diferență semnificativă statistic între cele două condiții: $t(255) = 1.080$, $p = 0.281$, cu o diferență medie de doar +0.051.

Deși ipoteza nu a fost confirmată din punct de vedere statistic, rezultatele sugerează că utilizatorii percep o calitate a localizării comparabilă în ambele tipuri de medii, cu o ușoară tendință favorabilă spațiilor interioare. Acest rezultat poate reflecta avansul recent al SDK-urilor de localizare vizuală (precum ARway sau ARCore/ARKit), care oferă performanțe sporite în medii diverse.

7.7.5 Concluzii parțiale

Pe baza analizelor statistice aplicate asupra răspunsurilor utilizatorilor, nu au fost identificate diferențe semnificative între cele două scenarii (interior și exterior) în ceea ce privește: intuitivitatea percepută (H1), utilitatea percepută (H2), gradul de implicare (H3), intenția comportamentală de reutilizare a aplicației (H5), precum și acuratețea localizării percepute (H6). Singura diferență semnificativă din punct de vedere statistic a fost observată în cazul vitezei percepute de redare a conținutului RA (H4), unde mediile interioare au fost evaluate superior — cel mai probabil datorită condițiilor mai stabile de iluminare și conectivitate.

Dincolo de aceste aspecte tehnice, se evidențiază și relevanța dimensiunii incluzive. Deși testarea s-a realizat pe un eșantion larg de studenți fără nevoi speciale, principiile de proiectare preluate din literatura privind sprijinul persoanelor cu TSA (predictibilitate, consistență, personalizare) au ghidat arhitectura sistemului și se reflectă în experiența utilizatorului. În plus, aplicația oferă deja funcționalități de rutare adaptată pentru persoane cu mobilitate redusă, ceea ce confirmă potențialul său de extindere către scenarii de educație incluzivă.

În ansamblu, această investigație validează aplicabilitatea sistemului într-un cadru hibrid interior–exterior și, în același timp, demonstrează că designul său este scalabil și pregătit pentru a răspunde diversității profilurilor cognitive și locomotorii ale utilizatorilor din mediul universitar.

7.8 Testare exploratorie cu subgrupul cu TSA

În concordanță cu obiectivele de incluziune și cu principiile designului universal, am considerat oportună extinderea testării și către un subgrup pilot de studenți care se identifică ca având tulburări din spectrul autist (TSA). Scopul acestui demers a fost de a evalua, într-un cadru exploratoriu, în ce măsură aplicația de realitate augmentată dezvoltată poate fi utilizată eficient și de către această categorie de utilizatori, fără adaptări suplimentare de interfață.

Dat fiind caracterul pilot al studiului, eșantionul a fost redus ($N=3$), iar rezultatele sunt raportate descriptiv, cu scopul de a evidenția tendințe și de a sublinia potențialul de aplicabilitate al soluției propuse în contexte educaționale inclusive.

7.8.1 Metodologie

Subgrupul TSA a fost format din trei participanți cu vârste cuprinse între 18 și 22 de ani, toți fiind diagnosticați cu forme ușoare de tulburare din spectrul autist (TSA), cu un nivel de autonomie funcțională compatibil cu statutul de student. Participarea s-a realizat pe bază de consimțământ informat, iar pe durata testării fiecare participant a fost însoțit de o persoană de sprijin din partea organizației cu care colaborează, pentru a asigura confortul și siguranța.

Fiecare participant a parcurs atât scenariul indoor, cât și scenariul outdoor. Pentru fiecare traseu s-au aplicat două condiții succesive: (1) *Baseline*, în care parcurgerea s-a făcut fără

utilizarea aplicației, și (2) *Cu aplicația*, în care participanții au beneficiat de ghidarea cu RA. Ordinea condițiilor a fost contrabalansată pentru a limita efectele de învățare, iar traseele utilizate au fost echivalente ca lungime și complexitate.

Măsurile obiective colectate au inclus timpul total de parcurgere (minute și secunde), numărul de deviații (părăsirea traseului corect sau oprirea mai lungă de cinci secunde pentru reorientare) și succesul final (dacă a ajuns la destinație fără asistență externă). În plus, participanții au raportat nivelul de dificultate perceput după fiecare condiție, folosind o scală Likert de la 1 (foarte ușor) la 5 (foarte dificil).

Pentru a evalua încărcarea cognitivă, după fiecare condiție participanții au completat și chestionarul NASA-TLX (Task Load Index), care include șase dimensiuni (cerință mentală, cerință fizică, cerință temporală, performanță percepută, efort și frustrare), fiecare evaluată pe o scală de la 0 la 100 (vezi Anexa C). În plus, a fost calculat și un scor global Raw TLX, reprezentând media celor șase dimensiuni.

În final, după condiția „Cu aplicația”, participanții au completat chestionarele System SUS și TAM, pentru a evalua percepția asupra utilizabilității și acceptabilității soluției. Rezultatele sunt raportate descriptiv, separat de lotul general.

7.8.2 Rezultate

Rezultatele obținute pentru cei trei participanți sunt prezentate în Tabelul 7.8-1, separat pentru scenariile indoor și outdoor și pentru fiecare dintre cele două condiții experimentale (*Baseline* și *Cu aplicația*). Se observă o reducere clară a timpului de parcurgere și a numărului de deviații atunci când aplicația a fost utilizată, atât în interior, cât și în exterior. De asemenea, nivelul de dificultate perceput a scăzut în mod constant, ceea ce sugerează o experiență mai puțin solicitantă pentru participanți.

Sinteza prezentată în Tabelul 7.8-2 evidențiază că în scenariul indoor timpul median de parcurgere a scăzut de la aproximativ 7 minute la 3:55 minute (−45%), iar în scenariul outdoor de la 10:40 minute la 6:50 minute (−36%). Numărul de deviații a scăzut de la o valoare mediană de 2 (indoor) și 2–3 (outdoor) la 0, respectiv 1. În paralel, dificultatea percepută s-a redus cu 50% indoor și cu 40% outdoor.

Tabelul 7.8-1. Subgrup TSA - Rezultate individuale.

Participant	Scenariu	Condiție	Timp (min:s)	Deviații	Succes	Dificultate (1–5)	SUS	TAM-U	TAM-IU
P1	Indoor	Baseline	8:20	2	Da	4	–	–	–
	Indoor	Cu aplicația	4:30	0	Da	2	78	4.3	4.5
	Outdoor	Baseline	11:50	3	Da	5	–	–	–
	Outdoor	Cu aplicația	7:20	1	Da	3	75	4.1	4.4
P2	Indoor	Baseline	7:10	2	Da	4	–	–	–
	Indoor	Cu aplicația	3:55	0	Da	2	81	4.5	4.6
	Outdoor	Baseline	10:40	2	Da	5	–	–	–
	Outdoor	Cu aplicația	6:50	1	Da	3	77	4.2	4.5
P3	Indoor	Baseline	6:40	1	Da	4	–	–	–
	Indoor	Cu aplicația	3:20	0	Da	2	80	4.4	4.7
	Outdoor	Baseline	10:15	2	Da	4	–	–	–

	Outdoor	Cu aplicația	6:25	1	Da	2	79	4.3	4.6
--	---------	--------------	------	---	----	---	----	-----	-----

Tabelul 7.8-2. Sinteza rezultate (mediană și îmbunătățire %).

Indicator	Indoor Baseline	Indoor „Cu aplicația”	Δ / %	Outdoor Baseline	Outdoor „Cu aplicația”	Δ / %
Timp (min)	7:10	3:55	-45%	10:40	6:50	-36%
Deviații (#)	2	0	-100%	2-3	1	-60-70%
Dificultate (1-5)	4	2	-50%	5	3	-40%
SUS (puncte)	—	80	—	—	77	—
TAM – Utilitate (1-5)	—	4.4	—	—	4.2	—
TAM – Intenție (1-5)	—	4.6	—	—	4.5	—

Rezultatele obținute prin chestionarul NASA-TLX, prezentate în Tabelul 7.8-3, confirmă aceste tendințe. Dimensiunile asociate cerinței mentale și temporale, precum și efortului și frustrării, au înregistrat scăderi semnificative atunci când aplicația a fost utilizată (de exemplu, cerința mentală de la 70 la 40 indoor și de la 75 la 45 outdoor). În același timp, performanța percepută a crescut (de la 60 la 80 indoor și de la 55 la 78 outdoor). Calculul scorului global Raw TLX arată o reducere de la 59.2 la 40.8 în scenariul indoor (-31%) și de la 62.5 la 44.7 în scenariul outdoor (-28%), confirmând o diminuare consistentă a încărcării cognitive generale. Aceste date sunt reprezentate vizual în Figura 7.8-1.

Tabelul 7.8-3. Scoruri NASA-TLX (valoare mediană și Raw TLX).

Dimensiune	Indoor Baseline	Indoor „Cu aplicația”	Outdoor Baseline	Outdoor „Cu aplicația”
Cerință mentală	70	40	75	45
Cerință fizică	20	15	25	20
Cerință temporală	65	35	70	40
Performanță	60	80	55	78
Efort	75	45	80	50
Frustrare	65	30	70	35
Raw TLX	59.2	40.8	62.5	44.7

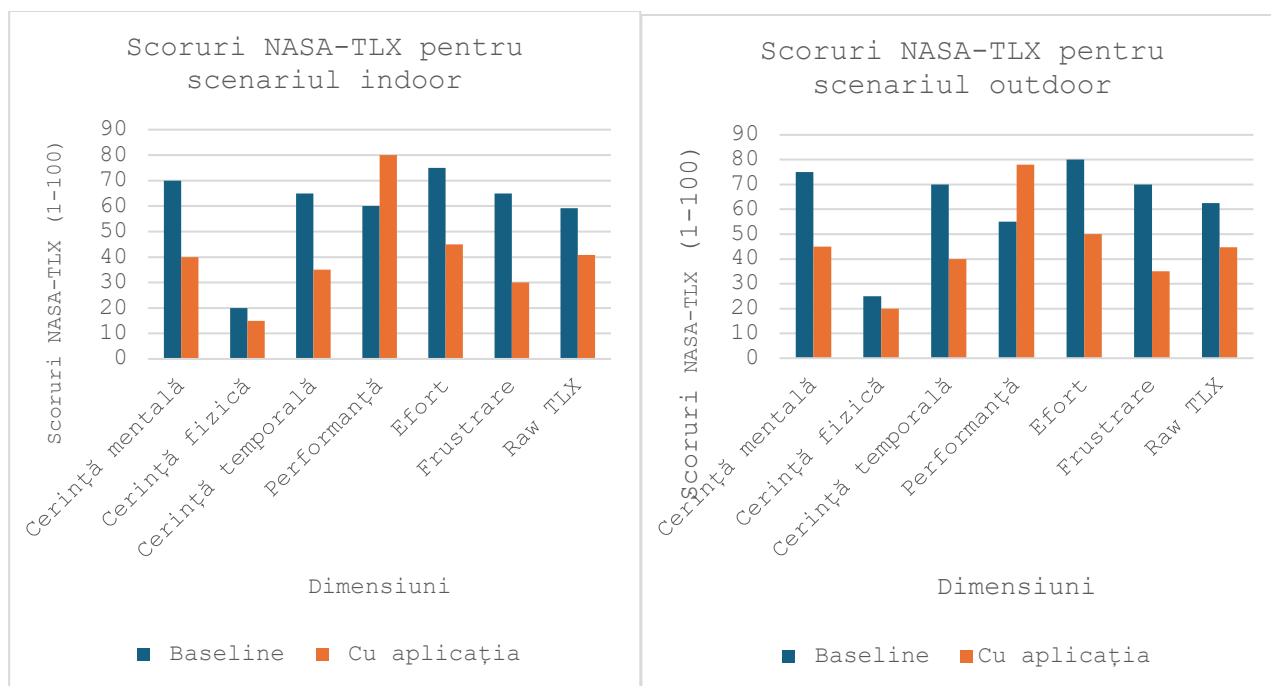


Figura 7.8-1. Scoruri NASA-TLX pentru scenariul indoor și outdoor.

În ceea ce privește evaluarea utilizabilității și a acceptabilității, scorurile SUS au fost cuprinse între 77 și 81 de puncte, ceea ce corespunde unei percepții bune a utilizabilității. Rezultatele TAM au indicat atât o utilitate percepută ridicată (valoare mediană 4.2–4.4), cât și o intenție fermă de utilizare (valoare mediană 4.5–4.6). Aceste date sugerează că aplicația nu doar îmbunătățește performanța obiectivă, ci și este percepută pozitiv de utilizatori.

În ansamblu, rezultatele arată că aplicația sprijină orientarea studenților TSA prin reducerea timpilor și a erorilor, scăderea dificultății percepute și a încărcării cognitive, precum și printr-un nivel ridicat de acceptare și intenție de utilizare.

8 Concluzii generale

Cercetarea de față a urmărit investigarea și demonstrarea potențialului tehnologiilor din spectrul realității extinse, cu accent pe realitatea augmentată (RA), în sprijinul educației incluzive și al digitalizării infrastructurilor universitare. Cercetarea a urmat o traiectorie translațională, pornind de la analiza sistematică a literaturii privind utilizarea RA în sprijinul persoanelor cu tulburări din spectrul autist (TSA) și extinzând aceste principii către proiectarea și evaluarea unui sistem aplicativ de orientare spațială într-un campus inteligent.

Revizuirea sistematică (SLR) a confirmat valoarea educațională și terapeutică a intervențiilor bazate pe RA, subliniind capacitatea acestora de a structura pași de învățare clari, de a reduce incertitudinea și de a furniza feedback adaptiv. Deși majoritatea studiilor se concentrează asupra copiilor, principiile de proiectare identificate – predictibilitate, consistență, personalizare – se dovedesc transferabile și în mediul universitar, oferind o bază solidă pentru dezvoltarea de soluții educaționale incluzive.

Pe acest fundament, teza a propus și a implementat un sistem unificat de navigație RA, capabil să funcționeze atât în medii interioare, cât și exterioare, fără infrastructuri suplimentare. Proiectarea a urmărit consecvența interfeței, adaptabilitatea la contexte variate și posibilitatea de personalizare a feedbackului vizual și auditiv. Evaluarea experimentală, desfășurată pe un eșantion extins, a evidențiat coerența experienței utilizatorilor în scenarii indoor și outdoor, confirmând validitatea arhitecturii propuse și transferabilitatea modelelor de interacțiune între contexte.

Un element suplimentar în ceea ce privește relevanța este faptul că principiile de design desprinse din literatura privind sprijinul persoanelor cu nevoi speciale nu doar facilitează incluziunea, ci generează și beneficii generalizabile pentru întreaga populație de utilizatori. Această constatare este în acord cu rezultatele recente din literatura de specialitate, care arată că scenariile educaționale bazate pe RA, dezvoltate într-o manieră incluzivă, sporesc implicarea tuturor studenților, indiferent de profil [334], și că tehnologiile educaționale incluzive elimină barierele de acces fără a compromite experiența utilizatorilor tipici [335]. În același sens, analizele de sinteză privind utilizarea RA în învățământul superior confirmă relevanța și consistența acestor soluții pentru o gamă diversă de utilizatori [336]. Astfel, deși testarea a fost realizată pe studenți tipici, arhitectura aplicației – care deja oferă funcționalități de rutare adaptată pentru persoane cu mobilitate redusă – demonstrează potențialul de extindere către scenarii de educație incluzivă și către populații neurodivergente.

Astfel, teza aduce o contribuție dublă: (1) în plan teoretic, prin consolidarea cadrului conceptual al utilizării RA în educație incluzivă și prin transferul principiilor din terapia TSA către designul unor soluții scalabile pentru mediul universitar; (2) în plan aplicativ, prin dezvoltarea și validarea unei aplicații de navigație RA testate în condiții reale, integrată conceptual în ecosistemul Smart Campus.

În plus, un studiu pilot realizat pe un subgrup restrâns de studenți cu TSA a confirmat că aplicația propusă este percepută ca utilă și accesibilă și de către utilizatori neurodivergenți, reducând încărcarea cognitivă și dificultatea navigației. Acest rezultat întărește relevanța designului universal și oferă o dovadă preliminară de aplicabilitate incluzivă a soluției propuse.

Rezultatele obținute confirmă că RA reprezintă o tehnologie matură pentru orientarea predictibilă și scalabilă în campusuri universitare, capabilă să îmbine cerințele de accesibilitate cu cele de eficiență instituțională. În același timp, cercetarea atrage atenția asupra limitărilor

actuale – testarea într-un singur campus, variabilitatea dispozitivelor mobile, lipsa unor măsurători obiective detaliate – și deschide perspective pentru rafinarea și extinderea soluției.

Direcții viitoare de cercetare

În continuarea acestei lucrări, pot fi identificate mai multe direcții de cercetare relevante:

- Extinderea evaluării către populații neurodivergente (inclusiv persoane cu TSA), pe baza rezultatelor pilot deja obținute, în colaborare cu specialiști și beneficiari direcți, pentru a adapta și valida aplicația în contexte complexe.
- Integrarea inteligenței artificiale pentru personalizarea în timp real a experienței de navigație, în funcție de profilul utilizatorului, preferințe și nivel de confort.
- Colectarea de date obiective (timp de navigație, erori, trasee) și analiza comportamentelor de utilizare pe termen lung, pentru a completa evaluările subiective.
- Scalarea soluției către alte campusuri universitare și testarea interoperabilității cu sisteme digitale existente (orar, acces, siguranță).
- Explorarea utilizării multimodale a feedbackului (vizual, auditiv, haptic), cu accent pe adaptabilitatea la diferite profiluri cognitive și senzoriale.
- Studii comparative între RA și alte tehnologii emergente (realitate mixtă, RV, interfețe bazate pe senzori) în ceea ce privește eficiența și acceptabilitatea în educația incluzivă și în orientarea spațială.

Implicarea în proiecte de cercetare

Această teză a fost susținută de următoarele proiecte de cercetare:

1. „Centru pentru transferul de cunoștințe către întreprinderi din domeniul ICT—CENTRIC, Autism ASSISTant - Asistent virtual pentru dezvoltarea abilităților cognitive ale copiilor cu patologie de spectru autist”, Contract de finanțare nr. 5/AXA 1/1.2.3/G/13.06.2018 Contract subsidiar nr. 22080/05.10.2022/Autism ASSISTant/ASSIST.
2. Program al Academiei Oamenilor de Științe din România, AOSR-TEAMS II EDIȚIA 2023-2024, TRANSFORMARE DIGITALĂ ÎN ȘTIINȚE, participare cu proiectul intitulat „Facilitarea accesului la educație prin realitate augmentată și stimularea învățării dinamice în afaceri prin microînvățare”.
3. Proiect POCU, “Sprijin pentru doctoranzi și cercetători post-doctorat”, “DECIDE - Dezvoltare prin educație antreprenorială și cercetare inovativă doctorală și postdoctorală”, cofinanțat din Programul Operațional Capital Uman 2014-2020, contract nr. 45649/20.06.2019, POCU/380/6/13, Cod SMIS 2014+: 125031.

Referințe bibliografice

- [1]. D. W. Sutherland and L. C. Markham, "The Role of Digital Technologies in Smart Campus Design," *Education and Information Technologies*, vol. 27, no. 1, 2022.
- [2]. M. Peres et al., "Smart Campus Framework: A Survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54623–54640, 2022.
- [3]. F. N. Correia and R. Oliveira, "From Smart Cities to Smart Campuses: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 21, no. 18, 2021.
- [4]. Z. Li et al., "IoT-Enabled Smart Campus: A Systematic Review of Architecture and Applications," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2022.
- [5]. L. García et al., "Smart Services for Higher Education: Student-Centric Campus Solutions," *Computers*, vol. 10, no. 3, 2021.
- [6]. A. Giffinger et al., "Smart Cities – Ranking of European Medium-Sized Cities," Centre of Regional Science, Vienna, 2007.
- [7]. N. Chourabi et al., "Understanding Smart Cities: An Integrative Framework," 45th Hawaii International Conference on System Sciences, 2012.
- [8]. Perera, C., Liu, C. H., & Jayawardena, S. (2015). The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 3(4), 585–598.
- [9]. M. Zubair et al., "Digital Infrastructure and Smart Learning Ecosystems," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 16, no. 2, 2023.
- [10]. J. Chen et al., "Smart Campus: An Overview of Current Trends, Architectures and Future Directions," *Computers & Education: Artificial Intelligence*, vol. 4, 2023.
- [11]. C. Dede, "Immersive Interfaces for Engagement and Learning," *Science*, vol. 323, no. 5910, pp. 66-69, 2009.
- [12]. M. Billinghurst, A. Clark, and G. Lee, "A Survey of Augmented Reality," *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, vol. 8, no. 2-3, pp. 73-272, 2015.
- [13]. R. T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355-385, 1997.
- [14]. S. Merchant, E. T. Goetz, L. Cifuentes, W. Keeney-Kennicutt, and T. J. Davis, "Effectiveness of Virtual Reality-Based Instruction on Students' Learning Outcomes in K-12 and Higher Education: A Meta-Analysis," *Computers & Education*, vol. 70, pp. 29-40, 2014.
- [15]. J. Slater and M. Wilbur, "A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no. 6, pp. 603-616, 1997.
- [16]. R. Roberts, J. Stacey, S. Jenner et al., "Are Extended Reality Interventions Effective in Helping Autistic Children to Enhance Their Social Skills? A Systematic Review," **Review Journal of Autism and Developmental Disorders**, vol. 10, pp. 729–748, Dec. 2023, doi:10.1007/s40489-022-00320-y. C. P. Dede, "The Role of Immersive Virtual Environments in Education: A Research Agenda," *Journal of the Learning Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 1-15, 2012.
- [17]. A. Craig, W. Sherman, and J. Will, *Developing Virtual Reality Applications: Foundations of Effective Design*, Morgan Kaufmann, 2009.
- [18]. J. M. Carroll, *Human-Computer Interaction: Brief Intro*, Addison-Wesley, 2014.
- [19]. L. Freina and M. Ott, "A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State of the Art and Perspectives," *eLearning & Software for Education*, vol. 1, no. 133, pp. 10-15, 2015.

- [20]. B. Dalgarno and M. J. W. Lee, "What Are the Learning Affordances of 3-D Virtual Environments?" *British Journal of Educational Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 10-32, 2010.
- [21]. D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola Jr, and I. Poupyrev, *3D User Interfaces: Theory and Practice*, Addison-Wesley, 2004.
- [22]. E. Mikropoulos and A. Natsis, "Educational Virtual Environments: A Ten-Year Review of Empirical Research (1999–2009)," *Computers & Education*, vol. 56, no. 3, pp. 769-780, 2011.
- [23]. Linton, J. D. (2018). DNA of the Triple Helix: Introduction to the Special Issue. *Technovation*, 21, 76-77: 1–2.
- [24]. Kapetanaki, A., Krouska, A., Troussas, C., Sgouropoulou, C. (2022). Exploiting Augmented Reality Technology in Special Education: A Systematic Review. *Computers*, 11, 143.
- [25]. Carmigniani, J., & Furht, B. (2011). Augmented reality: An overview. In *Handbook of Augmented Reality* (pp. 3–46). Springer.
- [26]. Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., & Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 51(1), pp. 341-377.
- [27]. Abad-Segura E, González-Zamar MD, Luque-de la Rosa AL, Morales Cevallos MB. Sustainability of educational technologies: an approach to augmented reality research. *Sustainability*. May 16, 2020;12(10):4091. [doi:10.3390/su12104091]
- [28]. El-Jarn H, Southern G. Can co-creation in extended reality technologies facilitate the design process? *J Work Appl Manag*. Jul 03, 2020;12(2):191-205. [doi: 10.1108/jwam-04-2020-0022]
- [29]. A. B. Craig, *Understanding Augmented Reality: Concepts and Applications*, 2nd ed., Morgan Kaufmann, 2021.
- [30]. Wagner D, Schmalstieg D. First steps towards handheld augmented reality. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers*, 2003. Presented at: Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003; October 21-23, 2003, 2003; White Plains, NY. [doi: 10.1109/iswc.2003.1241402]
- [31]. Pokémon GO home page. Pokémon GO. URL: <https://pokemongolive.com> [accessed 2024-02-09]
- [32]. Investment in augmented and virtual reality (AR/VR) technology worldwide in 2024, by use case. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1098345/worldwide-ar-vr-investment-use-case/> [accessed 2024-02-09]
- [33]. H. Kato and M. Billinghurst, "Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system," in *Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, San Francisco, CA, USA, 1999, pp. 85-94.
- [34]. D. Schmalstieg and T. Hollerer, *Augmented Reality: Principles and Practice*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2016.
- [35]. P. Zhou, X. Wang, and M. F. Zhou, "A review of markerless augmented reality: From technology to application," *Artificial Intelligence Review*, vol. 54, no. 4, pp. 2821-2854, 2021.
- [36]. T. Sharples, S. Cobb, A. Moody, and J. Wilson, "Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE): Comparison of Head Mounted Display (HMD), Desktop and Projection Display Systems," *Displays*, vol. 29, no. 2, pp. 58-69, 2008.
- [37]. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778.

- [38]. Butt, A. L., Kardong-Edgren, S., Ellertson, A., & Falk, S. (2018). Using game-based virtual reality with haptics for skill acquisition. *Clinical Simulation in Nursing*, 16, 25–3
- [39]. Ellessawy, M., Mabrouk, M., Heilmann, T., Weigel, M., & Zidan, M. (2021). Evaluation of Laparoscopy Virtual Reality Training on the Improvement of Trainees' Surgical Skills. *Medicina*, 57(2), 113.
- [40]. Khan, R., Plahouras, J., Johnston, B. C., Scaffidi, M. A., Grover, S. C., & Walsh, C. M. (2019). Virtual reality simulation training in endoscopy: A Cochrane review and meta-analysis. *Endoscopy*, 51(7), 653–664.
- [41]. Ma, M., Fallavollita, P., Seelbach, I., Von Der Heide, A. M., Euler, E., Waschke, J., & Navab, N. (2016). Personalized augmented reality for anatomy education. *Clinical Anatomy*, 29(4), 446–453. <https://doi.org/10.1002/ca.22675>.
- [42]. Du, H., Wang, C., Sun, L., & Wang, Z. (2023). Effects of haptic feedback-based virtual reality training on orthopaedic surgical performance: A randomized controlled trial. *Biomedical Engineering Online*, 22(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12938-023-01138-3>.
- [43]. Coles, T. R., Meglan, D., & John, N. W. (2011). The role of haptics in medical training simulators: A survey of the state of the art. *IEEE Transactions on Haptics*, 4(1), 51–66.
- [44]. Wallace, R., Couluris, G., & Allyn, C. (2023). Evaluating the Efficacy of Virtual Reality (VR) Training Devices for Pilot Training. *Journal of Aviation Technology and Engineering*, 12(2), 1–12. <https://doi.org/10.5703/1288284317600>.
- [45]. Wallace, R., & Couluris, G. (2021). Effectiveness of Virtual Reality Simulations for Civilian, Ab Initio Pilot Training. *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 31(1), 27–39. <https://doi.org/10.15394/jaaer.2021.1933>.
- [46]. Rebenitsch, L., & Quinby, E. (2023). Cybersickness in Virtual Reality: A Comprehensive Review. *Computers in Human Behavior Reports*, 9, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2022.100276>.
- [47]. Sadowski, J., Wolaniuk, S., Klaudel, T., Sikorski, M., & Wąsik, M. (2024). A review of the latest information on the implementation of virtual reality for medical applications... *Health and Technology*, 15, 29–40. <https://doi.org/10.1007/s12553-024-00935-7>.
- [48]. Madary, M., & Metzinger, T. K. (2016). Real virtuality: A code of ethical conduct. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 3. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00003>.
- [49]. Zhao, Q. (2011). 10 scientific problems in virtual reality. *Communications of the ACM*, 54(6), 119–120. <https://doi.org/10.1145/1953122.1953146>.
- [50]. Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 74. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074>.
- [51]. Bursali H, Yilmaz RM. Effect of augmented reality applications on secondary school students' reading comprehension and learning permanency. *Comput Hum Behav*. Jun 2019;95:126-135. [doi: 10.1016/j.chb.2019.01.035]
- [52]. J. Jerald, *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*, ACM and Morgan & Claypool, 2015.
- [53]. M. Slater and M. Wilbur, "A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1997.
- [54]. P. Milgram and F. Kishino, "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays," *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E77-D, no. 12, pp. 1321-1329, 1994.
- [55]. J. J. LaViola, E. Kruijff, R. P. McMahan, D. A. Bowman and I. Poupyrev, *3D User Interfaces: Theory and Practice*, Addison-Wesley Professional, 2017.

- [56]. Richard E, Billaudeau V, Richard P, Gaudin G. Augmented reality for rehabilitation of cognitive disabled children: a preliminary study. In: Proceeding of the 2007 Virtual Rehabilitation. Presented at: 2007 Virtual Rehabilitation; September 27-29, 2007, 2007; Venice, Italy. [doi: 10.1109/ICVR.2007.4362148].
- [57]. Klein, G., & Murray, D. (2007). Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. In Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (pp. 1-10).
- [58]. C. Moro, P. Štromberga, A. Raikos and A. Stirling, "The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy," *Anatomical Sciences Education*, vol. 10, nr. 6, pp. 549-559, 2017.
- [59]. J. Fite-Georgel, "Is there a reality in industrial augmented reality?," 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Basel, 2011, pp. 201-210.
- [60]. Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, D. (2022). Mixed Reality (MR) applications in manufacturing: A systematic review. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108223. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108223>.
- [61]. Speicher, M., Hall, B. D., & Nebeling, M. (2019). What is Mixed Reality? In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1–15). ACM. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>.
- [62]. Moro, C., Štromberga, Z., & Stirling, A. (2021). Virtual and augmented reality enhancements to medical and science student physiology and anatomy learning. *Advances in Physiology Education*, 45(2), 223–229. <https://doi.org/10.1152/advan.00138.2020>.
- [63]. Kim, J., Kim, H., Lee, J., & Kim, D. (2023). Challenges and prospects of mixed reality in education: A focus on HoloLens. *Education and Information Technologies*, 28, 4523–4541. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11376-7>
- [64]. Fujiuchi K, Riggie J. Academic library collections in the age of extended reality (XR). *Collect Manag.* Feb 04, 2019;44(2-4):296-303. [doi: 10.1080/01462679.2019.1566109]
- [65]. Eishita FZ, Stanley KG. The impact on player experience in augmented reality outdoor games of different noise models. *Entertain Comput.* Aug 2018;27:137-149. [doi: 10.1016/j.entcom.2018.04.006]
- [66]. Çöltekin A, Lochhead I, Madden M, Christophe S, Devaux A, Pettit C, et al. Extended reality in spatial sciences: a review of research challenges and future directions. *ISPRS Int J Geo Inf.* Jul 15, 2020;9(7):439. [doi: 10.3390/ijgi9070439].
- [67]. Online: <https://www.toptal.com/designers/ui/augmented-reality-vs-virtual-reality-vs-mixed-reality>. Accesat la 10.03.2024.
- [68]. Lee, W., & Tuceryan, M. (2004). A volumetric description of medical visualizations for a mixed-reality system. *Medical Imaging 2004: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display*, 5367, 208-218.
- [69]. Botden, S. M., Jakimowicz, J. J., & Goossens, R. H. (2007). Augmented reality in minimally invasive laparoscopic surgery: a review. *Surgical Endoscopy*, 21(6), pp. 844-852.
- [70]. Santos, M. E. C., Chen, A., Taketomi, T., Yamamoto, G., Miyazaki, J., & Kato, H. (2014). Augmented reality learning experiences: Survey of prototype design and evaluation. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 7(1), pp. 38-56.
- [71]. Ibanez, M. B., Di Serio, Á., & Delgado-Kloos, C. (2014). Gamification for engaging computer science students in learning activities: A case study. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 7(3), pp. 291-301.

- [72]. Dunleavy, M., & Dede, C. (2014). Augmented reality teaching and learning. In *Handbook of research on educational communications and technology*, pp.735-745. Springer, New York, NY.
- [73]. I. Riyanti, J. Copriady, & R. Linda, "Student needs analysis for the development of augmented reality integrated e-modules about particles in science learning", *Unnes Science Education Journal*, vol. 11, no. 2, p. 115-122, 2022. <https://doi.org/10.15294/usej.v11i2.58309>
- [74]. S. Kibat, A. Ngelambong, & N. Scott, "The potential of augmented reality in education: a scoping review", *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, vol. 13, no. 5, 2023. <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v13-i5/17072>
- [75]. M. Sahrim, N. Soad, & L. Asbulah, "Augmented reality technology in learning arabic vocabulary from the perception of university students", *International Journal of Interactive Mobile Technologies (Ijim)*, vol. 17, no. 21, p. 79-96, 2023. <https://doi.org/10.3991/ijim.v17i21.41277>
- [76]. O. Elmira, B. Rauan, B. Dinara, & B. Prevalla, "The effect of augmented reality technology on the performance of university students", *International Journal of Emerging Technologies in Learning (Ijet)*, vol. 17, no. 19, p. 33-45, 2022. <https://doi.org/10.3991/ijet.v17i19.32179>
- [77]. D. Özerbaş, "The effect of marker-based augmented reality (mbar) applications on academic achievement and permanence", *Universal Journal of Educational Research*, vol. 7, no. 9, p. 1926-1932, 2019. <https://doi.org/10.13189/ujer.2019.070911>
- [78]. Z. Karadavut and O. Çimen, "The effect of augmented reality applications on the academic success of 11th grade students in the circulatory system", *European Journal of Education Studies*, vol. 8, no. 12, 2021. <https://doi.org/10.46827/ejes.v8i12.4030>
- [79]. A. Mireles-Medina, C. García, & M. Olguín, "Planning and allocation of digital learning objects with augmented reality to higher education students according to the fark model", *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 2, p. 53, 2018. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2018.02.005>
- [80]. L. Muharlisiani, N. Kurniasih, L. Istiqomah, R. Safriyani, N. Abid, Y. Ramadhani et al., "Designing an augmented reality strategy: elearning/ extensive reading", *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 2.13, p. 410, 2018. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.16933>
- [81]. K. Assem, A. Turagulovna, M. Sharifullina, M. Bayakhmetovna, A. Rakhmetolinovna, & O. Kaiyrbekovich, "Psychological and pedagogical innovative technologies for teaching english to university students", *Cypriot Journal of Educational Sciences*, vol. 17, no. 6, p. 1914-1924, 2022. <https://doi.org/10.18844/cjes.v17i6.7543>
- [82]. P. Wannapiroon, P. Nilsook, N. Kaewrattanapat, N. Wannapiroon, & W. Supa, "Augmented reality interactive learning model, using the imagineering process for the smart classroom", *Tem Journal*, p. 1404-1417, 2021. <https://doi.org/10.18421/tem103-51>
- [83]. H. Permana and D. Nugroho, "Monopoly-based augmented reality game design as a practice media in learning the physics of magnetism concepts", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2596, no. 1, p. 012081, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2596/1/012081>
- [84]. H. Pujiastuti, S. Hidayat, A. Hendrayana, & R. Haryadi, "Creation of mathematics learning media based on augmented reality to enhance geometry teaching and learning", *E3s Web of Conferences*, vol. 482, p. 05012, 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448205012>
- [85]. K. Aji and R. Purbojo, "Learning through augmented reality: the indonesia open university experience", *Jurnal Teknologi Pendidikan Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pembelajaran*, vol. 8, no. 3, p. 678, 2023. <https://doi.org/10.33394/jtp.v8i3.7800>

- [86]. M. Nugroho, I. Yulandari, & A. Cahyono, "Project-based learning through augmented reality-assisted math trails at blenduk church to promote mathematical literacy", *Jurnal Elemen*, vol. 10, no. 2, p. 363-377, 2024. <https://doi.org/10.29408/jel.v10i2.25333>
- [87]. H. Faridi, N. Tuli, A. Mantri, G. Singh, & S. Gargish, "A framework utilizing augmented reality to improve critical thinking ability and learning gain of the students in physics", *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 29, no. 1, p. 258-273, 2020. <https://doi.org/10.1002/cae.22342>
- [88]. L. Lismaya, A. Priyanto, & P. Ayu, "Application of augmented reality through a scientific approach to students' critical thinking ability", *Indonesian Journal of Learning and Instruction*, vol. 5, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.25134/ijli.v5i1.5874>
- [89]. R. Sarkar, "Empowering learning: augmented reality applications for students with intellectual disabilities", *International Journal of Intellectual Disability*, vol. 5, no. 1, p. 01-05, 2024. <https://doi.org/10.22271/27103889.2024.v5.i1a.37>
- [90]. G. Koutromanos and C. Mavetsaki, „Pre-service teachers’ intention to use augmented reality in science education: A study based on the TAM model,” *Education Sciences*, vol. 13, nr. 8, pp. 795, aug. 2023, doi: 10.3390/educsci13080795.
- [91]. Almeida, P., & de Souza, R. (2020). Augmented reality applied to education: A systematic review of the literature. *Computers & Education*, 153, 103898.
- [92]. X. Lian and M. S. Sunar, „Mobile augmented reality for autism spectrum disorder interventions: A systematic review,” *Applied Sciences*, vol. 11, nr. 10, pp. 4550, mai 2021, doi: 10.3390/app11104550.
- [93]. A. Theodoropoulos and G. Lepouras, „Augmented reality in programming education: A systematic review,” *International Journal of Child-Computer Interaction*, vol. 30, pp. 100335, dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijcci.2021.100335.
- [94]. J. López-Belmonte, A. Moreno-Guerrero, J. Marín-Marín and G. Lampropoulos, „Gender impact on augmented and virtual reality use in students with ASD,” *Education and Knowledge Society*, vol. 23, nr. 1, pp. e28418, 2022, doi: 10.14201/eks.28418.
- [95]. Kandalaft, M., Didehbani, N., Krawczyk, D., Allen, T., & Chapman, B. (2013). Virtual reality social cognition training for young adults with high-functioning autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(1), pp. 34-44.
- [96]. Lahiri, U., Bekele, E., Dohrmann, E., Warren, Z., & Sarkar, N. (2013). Design of a virtual reality based adaptive response technology for children with autism. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22(1), pp. 55-67.
- [97]. K. Wang, S. J. Julier, and Y. Cho, “Attention-Based Applications in Extended Reality to Support Autistic Users: A Systematic Review,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 15574–15593, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3147726.
- [98]. Cheng, Y., & Tsai, C. C. (2013). Affordances of augmented reality in science learning: Suggestions for future research. *Journal of Science Education and Technology*, 22(4), 449–462.
- [99]. Wainer, A. L., Ingersoll, B. R., & Hopwood, C. J. (2017). The structure and nature of the broader autism phenotype in a non-clinical sample. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 29(2), pp. 177-186.
- [100]. Parsons, S., Cobb, S., & Patel, H. (2013). Virtual environments for social skills training for students with ASD: A review of the research. In M. A. Williams White, S. W. Keonig, & L. A. Scahill (Eds.), *Social Skills Training for Children with Autism*. Springer.

- [101]. Chang, G., Morreale, P., & Medicherla, P. (2010). Applications of augmented reality systems in education. In *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference*, pp. 1380-1385.
- [102]. Radu, I. (2014). Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(6), pp. 1533-1543.
- [103]. M. Cai, G. Akcayir, and C. D. Epp, "Exploring Augmented Reality Games in Accessible Learning: A Systematic Review," *arXiv preprint arXiv:2111.08214*, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2111.08214>
- [104]. S. L. Odom et al., "Technology-Aided Interventions and Instruction for Adolescents with Autism Spectrum Disorder," *J. Autism Dev. Disord.*, vol. 45, pp. 3805–3819, 2015, doi:10.1007/s10803-014-2320-6.
- [105]. A. Carnett, S. Gardiner, M. Kirkpatrick et al., "Systematic Review of Virtual Reality in Behavioral Interventions for Individuals with Autism," *J. Autism Dev. Disord.* (date given review), 2022.
- [106]. Yang X, Wu J, Ma Y, Yu J, Cao H, Zeng A, Fu R, Tang Y, Ren Z. Effectiveness of Virtual Reality Technology Interventions in Improving the Social Skills of Children and Adolescents With Autism: Systematic Review. *J Med Internet Res.* 2025 Feb 5;27:e60845. doi: 10.2196/60845. PMID: 39907288; PMCID: PMC11840372.
- [107]. G. Dawson et al., "Early behavioral intervention is associated with normalized brain activity in young children with autism," *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, vol. 51, no. 11, pp. 1150–1159, 2012. doi: 10.1016/j.jaac.2012.08.018.
- [108]. N. Heasman and A. Gillespie, "Neurodivergent voices: Bending the digital classroom toward inclusion," *Learning, Media and Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 287–301, 2019. doi: 10.1080/17439884.2019.1626823.
- [109]. V. Bauer, T. Bouchara, and P. Bourdot, "eXtended Reality for Autism Interventions: The importance of Mediation and Sensory-Based Approaches," *arXiv preprint arXiv:2106.15983*, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2106.15983>
- [110]. C. Yu et al., "HSVRS: A Virtual Reality System of the Hide-and-Seek Game to Enhance Gaze Fixation Ability for Autistic Children," *arXiv preprint arXiv:2310.13482*, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2310.13482>
- [111]. Gambrill E. The Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders as a major form of dehumanization in the modern world. *Res Soc Work Pract.* Sep 08, 2013;24(1):13-36. [doi: 10.1177/1049731513499411]
- [112]. Hyman SL, Levy SE, Myers SM, Council on Children With Disabilities, Section on Developmental and Behavioral Pediatrics. Identification, evaluation, and management of children with autism spectrum disorder. *Pediatrics.* Jan 2020;145(1):e20193447. [FREE Full text] [doi: 10.1542/peds.2019-3447] [Medline: 31843864]
- [113]. Autism. World Health Organization. Nov 15, 2023. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/autism-spectrum-disorders> [accessed 2024-02-09]
- [114]. Rice CE, Rosanoff M, Dawson G, Durkin MS, Croen LA, Singer A, et al. Evaluating changes in the prevalence of the autism spectrum disorders (ASDs). *Public Health Rev.* 2012;34(2):1-22. [FREE Full text] [doi: 10.1007/BF03391685] [Medline: 26236074]
- [115]. Vahia VN. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders 5: a quick glance. *Indian J Psychiatry.* Jul 2013;55(3):220-223. [FREE Full text] [doi: 10.4103/0019-5545.117131] [Medline: 24082241]

- [116]. Munson J, Pasqual P. Using technology in autism research: the promise and the perils. *Computer*. Jun 2012;45(6):89-91.[doi: 10.1109/mc.2012.220]
- [117]. Knapp M, Romeo R, Beecham J. The economic consequences of autism in the UK. *Foundation for People With Learning Disabilities*. Nov 2007. URL: https://www.learningdisabilities.org.uk/file/2127/download?token=1kQCeb5s&__cf_chl__tk=OAY.wBxg5_KGHTftsLyp1Sn8sYw3ulK4LlemFc.1d1o-1707157072-0-gaNycGzNEHs [accessed 2024-02-09]
- [118]. Meadan H, Ostrosky MM, Triplett B, Michna A, Fetting A. Using visual supports with young children with autism spectrum disorder. *Teach Except Child*. Jul 01, 2011;43(6):28-35. [doi: 10.1177/004005991104300603]
- [119]. Kitchenham B. Procedures for performing systematic reviews. *Keele University*. Jul 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/228756057_Procedures_for_Performing_Systematic_Reviews [accessed 2024-02-09]
- [120]. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. Mar 29, 2021;372:n71. [FREE Full text] [doi: 10.1136/bmj.n71] [Medline: 33782057]
- [121]. Paradis S, Roussel J, Bosson JL, Kern JB. Use of smartphone health apps among patients aged 18 to 69 years in primary care: population-based cross-sectional survey. *JMIR Form Res*. Jun 16, 2022;6(6):e34882. [FREE Full text] [doi:10.2196/34882] [Medline: 35708744]
- [122]. Number of smartphones sold to end users worldwide from 2007 to 2022. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/263437/global-smartphone-sales-to-end-users-since-2007/> [accessed 2023-12-23]
- [123]. Hashim HU, Yunus MM, Norman H. 'AReal-Vocab': an augmented reality English vocabulary mobile application to cater to mild autism children in response towards sustainable education for children with disabilities. *Sustainability*. Apr 18, 2022;14(8):4831. [doi: 10.3390/su14084831]
- [124]. Machado E, Carrillo I, Saldana D, Chen F, Chen L. An assistive augmented reality-based smartglasses solution for individuals with autism spectrum disorder. In: *Proceedings of the 2019 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCom/CyberSciTech)*. Presented at: DASC/PiCom/CBDCom/CyberSciTech; August 5-8, 2019, 2019; Fukuoka, Japan. [doi:10.1109/dasc/picom/cbdcom/cyberscitech.2019.00052]
- [125]. Tang TY, Xu J, Winoto P. An augmented reality-based word-learning mobile application for children with autism to support learning anywhere and anytime: object recognition based on deep learning. In: *Proceedings of the 13th International Conference, UAHCI 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCII 2019*. Presented at: 13th International Conference, UAHCI 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCII 2019; July 26-31, 2019, 2019; Orlando, FL. [doi: 10.1007/978-3-030-23563-5_16]
- [126]. Selvarani AG, T NS. An interactive number learning augmented reality application for autistic preschool children. In: *Proceedings of the 2022 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. Presented at: ICCCI 2022; January 25-27, 2022, 2022; Coimbatore, India. [doi: 10.1109/iccci54379.2022.9740948]

- [127]. Abou El-Seoud S, Halabi O, Geroimenko V. Assisting individuals with autism and cognitive disorders: an augmented reality-based framework. *Int J Online Biomed Eng.* Feb 27, 2019;15(04):28-39. [doi: 10.3991/ijoe.v15i04.9835]
- [128]. Vullamparthi AJ, Nelaturu SC, Mallaya DD, Chandrasekhar S. Assistive learning for children with autism using augmented reality. In: *Proceedings of the IEEE Fifth International Conference on Technology for Education (t4e 2013)*. Presented at: t4e 2013; December 18-20, 2013, 2013; Kharagpur, India. [doi: 10.1109/t4e.2013.18]
- [129]. Singh K, Shrivastava A, Achary K, Dey A, Sharma O. Augmented reality-based procedural task training application for less privileged children and autistic individuals. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*. Presented at: VRCAI '19; November 14-16, 2019, 2019; Brisbane, Australia. [doi: 10.1145/3359997.3365703]
- [130]. Chen CH, Lee IJ, Lin LY. Serious games for people with mental disorders: state of the art of practices to maintain engagement and accessibility. *Comput Hum Behav.* Feb 2016;55:477-485. [FREE Full text] [doi: 10.1016/j.chb.2015.09.033]
- [131]. Tang TY, Xu J, Winoto P. Automatic object recognition in a light-weight augmented reality-based vocabulary learning application for children with autism. In: *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Innovation in Artificial Intelligence*. Presented at: ICI AI '19; March 15-18, 2019, 2019; Suzhou, China. [doi: 10.1145/3319921.3319945]
- [132]. Giraud T, Ravenet B, Dang CT, Nadel J, Prigent E, Poli G, et al. "Can you help me move this over there?": training children with ASD to joint action through tangible interaction and virtual agent. In: *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. Presented at: TEI '21; February 14-17, 2021, 2021; Salzburg, Austria. [doi: 10.1145/3430524.3440646]
- [133]. Zheng ZK, Sarkar N, Swanson A, Weitlauf A, Warren Z, Sarkar N. CheerBrush: a novel interactive augmented reality coaching system for toothbrushing skills in children with autism spectrum disorder. *ACM Trans Access Comput.* Oct 15, 2021;14(4):1-20. [doi: 10.1145/3481642]
- [134]. Pradibta H, Wijaya ID. Designing AR daily prayers for children with ASD. In: *Proceedings of the International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*. Presented at: iSemantic; October 07-08, 2017, 2017; Semarang, Indonesia. [doi: 10.1109/isemantic.2017.8251851]
- [135]. Nubia RM, Fabian GR, Wilson RA, Wilmer PB. Development of a mobile application in augmented reality to improve the communication field of autistic children at a Neurorehabilitar Clinic. In: *Proceedings of the Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)*. Presented at: WEA 2015; October 28-30, 2015, 2015; Bogota, Colombia. [doi: 10.1109/wea.2015.7370154]
- [136]. Sait M, Alattas A, Omar A, Almalki S, Sharf S, Alsaggaf E. Employing virtual reality techniques in environment adaptation for autistic children. *Procedia Comput Sci.* 2019;163:338-344. [doi: 10.1016/j.procs.2019.12.116]
- [137]. Wan G, Deng F, Jiang Z, Song S, Hu D, Chen L, et al. FECTS: a facial emotion cognition and training system for Chinese children with autism spectrum disorder. *Comput Intell Neurosci.* 2022;2022:9213526. [FREE Full text] [doi: 10.1155/2022/9213526] [Medline: 35528364]
- [138]. V K, Mohan A, S DP. Immersive learning aid for children with autism (ASD) using object recognition. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC)*. Presented at: ICPSC; May 13-14, 2021, 2021; Coimbatore, India. [doi: 10.1109/icspc51351.2021.9451646]

- [139]. Silva SD, Neto FM, de Lima RM, de Macêdo FT, Santo JR, Silva WL. Knowledgemon hunter: a serious game with geolocation to support learning of children with autism and learning difficulties. In: 19th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). Presented at: SVR; November 01-04, 2017, 2017; Curitiba, Brazil. [doi: 10.1109/svr.2017.45]
- [140]. Kalantarian H, Jedoui K, Washington P, Tariq Q, Dunlap K, Schwartz J, et al. Labeling images with facial emotion and the potential for pediatric healthcare. *Artif Intell Med*. Jul 2019;98:77-86. [FREE Full text] [doi:10.1016/j.artmed.2019.06.004] [Medline: 31521254]
- [141]. Escobedo L, Nguyen DH, Boyd L, Hirano S, Rangel A, Garcia-Rosas D, et al. MOSOCO: a mobile assistive tool to support children with autism practicing social skills in real-life situations. In: Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Presented at: CHI '12; May 5-10, 2012, 2012; Austin, Texas. [doi: 10.1145/2207676.2208649]
- [142]. Xia M, Chen N, Tang Y, Zhu Z. ParaShop: a mobile AR app in assisting people with ASD in shopping. In: Proceedings of the IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC). Presented at: MIT URTC; October 9-11, 2020, 2020; Cambridge, MA. [doi: 10.1109/urtc51696.2020.9668867]
- [143]. Amado ML, Ruiz LC, Andrade-Arenas L. Prototype of an augmented reality application for cognitive improvement in children with autism using the DesingScrum methodology. *Adv Sci Technol Eng Syst J*. Jan 2021;6(1):587-596. [doi:10.25046/aj060163]
- [144]. Voss C, Washington P, Haber N, Kline A, Daniels J, Fazel A, et al. Superpower glass: delivering unobtrusive real-time social cues in wearable systems. In: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct. Presented at: UbiComp '16; September 12-16, 2016, 2016; Heidelberg, Germany. [doi: 10.1145/2968219.2968310]
- [145]. Washington P, Voss C, Kline A, Haber N, Daniels J, Fazel A, et al. SuperpowerGlass: a wearable aid for the at-home therapy of children with autism. *Proc ACM Interact Mob Wearable Ubiquitous Technol*. Sep 11, 2017;1(3):1-22. [doi:10.1145/3130977]
- [146]. Gulati R, Handa K. Towards development of a virtual reality game for children with autism spectrum disorder. In: Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV). Presented at: ICICV; February 04-06, 2021, 2021; Tirunelveli, India. [doi: 10.1109/icicv50876.2021.9388374]
- [147]. Escobedo L, Tentori M, Quintana E, Favela J, Garcia-Rosas D. Using augmented reality to help children with autism stay focused. *IEEE Pervasive Comput*. Jan 2014;13(1):38-46. [doi: 10.1109/mprv.2014.19]
- [148]. Bouaziz R, Alhejaili M, Al-Saedi R, Mihdhar A, Alsarrani J. Using marker based augmented reality to teach autistic eating skills. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR). Presented at: AIVR 2020; December 14-18, 2020, 2020; Utrecht, The Netherlands. [doi: 10.1109/aivr50618.2020.00050]
- [149]. Wang K, Zhang B, Cho Y. Using mobile augmented reality to improve attention in adults with autism spectrum disorder. In: Proceedings of the Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Presented at: CHI '20; April 25-30, 2020, 2020; Honolulu, HI. [doi: 10.1145/3334480.3383090]
- [150]. Gelsomini M, Garzotto F, Montesano D, Occhiuto D. Wildcard: a wearable virtual reality storytelling tool for children with intellectual developmental disability.

- In: Proceedings of the 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Presented at: EMBC'16; August 16-20, 2016, 2016; Orlando, FL. [doi:10.1109/embc.2016.7591896]
- [151]. Khowaja, K., & Salim, S. S. (2015). A systematic review of strategies and computer-based intervention for reading comprehension difficulties in autism. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 9, 80–100.
- [152]. Valencia, K., Rusu, C., Quiñones, D., & Jamet, E. (2019). The impact of technology on people with autism spectrum disorder: A systematic literature review. *Sensors*, 19(20), 4485.
- [153]. Gea M, Alaman X, Rodriguez P, Martinez V. Towards smart and inclusive society: building 3D immersive museum by children with cognitive disabilities. In: Proceedings of the 8th International Conference on Education and New Learning Technologies. Presented at: EDULEARN16 Proceedings; July 4-6, 2016, 2016; Barcelona, Spain.
- [154]. Baragash RS, Al-Samarraie H, Alzahrani AI, Alfarraj O. Augmented reality in special education: a meta-analysis of single-subject design studies. *Eur J Special Needs Educ.* Dec 20, 2019;35(3):382-397. [FREE Full text] [doi:10.1080/08856257.2019.1703548]
- [155]. Glaser N, Newbutt N, Palmer H, Schmidt M. Video-based virtual reality technology for autistic users: an emerging technology report. *Tech Know Learn.* Mar 26, 2022;28(2):925-935. [doi: 10.1007/s10758-022-09594-x]
- [156]. Pradipta H, Wijaya ID, Ronilaya F, Nurhasan U. The evaluation on a mobile augmented reality application as therapy media. In: Proceedings of the 3rd Annual Applied Science and Engineering Conference. Presented at: AASEC 2018; April 18, 2018, 2018; Bandung, Indonesia.
- [157]. Hashim HU, Yunus MM, Norman H. Augmented reality mobile application for children with autism : stakeholders' acceptance and thoughts. *Arab World Engl J.* Dec 2021;12(4):132-141. [FREE Full text] [doi: 10.24093/awej/vol12no4.9]
- [158]. Johnston D, Egermann H, Kearney G. Innovative computer technology in music-based interventions for individuals with autism moving beyond traditional interactive music therapy techniques. *Cogent Psychol.* Dec 11, 2018;5(1):1554773. [doi: 10.1080/23311908.2018.1554773]
- [159]. Putnam C, Hanschke C, Todd J, Gemmell J, Kollia M. Interactive technologies designed for children with autism: reports of use and desires from parents, teachers, and therapists. *ACM Trans Access Comput.* Sep 12, 2019;12(3):1-37. [doi:10.1145/3342285]
- [160]. Mukherjee D, Bhavnani S, Lockwood Estrin G, Rao V, Dasgupta J, Irfan H, et al. Digital tools for direct assessment of autism risk during early childhood: a systematic review. *Autism.* Jan 2024;28(1):6-31. [FREE Full text] [doi:10.1177/13623613221133176] [Medline: 36336996]
- [161]. Valentine AZ, Brown BJ, Groom MJ, Young E, Hollis C, Hall CL. A systematic review evaluating the implementation of technologies to assess, monitor and treat neurodevelopmental disorders: a map of the current evidence. *Clin Psychol Rev.* Aug 2020;80:101870. [FREE Full text] [doi: 10.1016/j.cpr.2020.101870] [Medline: 32712216]
- [162]. Khowaja K, Al-Thani D, Banire B, Salim SS, Shah A. Use of augmented reality for social communication skills in children and adolescents with autism spectrum disorder (ASD): a systematic review. In: Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS). Presented

- at: ICETAS; December 20-21, 2019, 2019; Kuala Lumpur, Malaysia. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9117290/authors#authors>
- [163]. Almurashi HA, Bouaziz R. Augmented reality and autism spectrum disorder rehabilitation: scoping review. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR). Presented at: AIVR 2020; December 14-18, 2020, 2020; Utrecht, Netherlands. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9319123/authors#authors>
- [164]. Farzana W, Sarker F, Chau T, Mamun KA. Technological evolvement in AAC modalities to foster communications of verbally challenged ASD children: a systematic review. IEEE Access. Jan 28, 2021;1-1. [doi:10.1109/ACCESS.2021.3055195]
- [165]. Junaidi AR, Irvan M, Yuwono J, Dewantoro DA, Alamsyah Y, Mulyawati NW. Usability testing of developed virtual reality environment to enhance communication skills for children with low functioning autism spectrum disorder. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Information Technology and Education (ICIT&E). Presented at: ICIT&E 2022; January 22, 2022, 2022; Malang, Indonesia. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9759890/authors#authors>
- [166]. Adamu AS, Abdullahi SE. A review of autism diagnosis/screening expert system and mobile application. In: Proceedings of the IEEE 2nd International Conference on Cyberspac (CYBER NIGERIA). Presented at: CYBER NIGERIA; February 23-25, 2021, 2021; Abuja, Nigeria. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9428833>
- [167]. Nahavandi D, Alizadehsani R, Khosravi A, Acharya UR. Application of artificial intelligence in wearable devices: opportunities and challenges. Comput Methods Programs Biomed. Jan 2022;213:106541. [doi: 10.1016/j.cmpb.2021.106541] [Medline: 34837860]
- [168]. Teófilo MR, Lourenço AA, Postal J, Silva YM, Lucena VFJ. The raising role of virtual reality in accessibility systems. Proc Comput Sci. 2019;160:671-677. [doi: 10.1016/j.procs.2019.11.029]
- [169]. Wattanasoontorn V, Boada I, García RJ, Sbert M. Serious games for health. Entertain Comput. Dec 2013;4(4):231-247. [doi: 10.1016/j.entcom.2013.09.002]
- [170]. Purnama Y, Herman FA, Hartono J, Nielsen; Suryani D, Sanjaya G. Educational software as assistive technologies for children with autism spectrum disorder. Proc Comput Sci. Feb 2021;179:6-16. [doi: 10.1016/j.procs.2020.12.002]
- [171]. de Albuquerque AP, Kelner J. Toy user interfaces: systematic and industrial mapping. J Syst Archit. Aug 2019;97:77-106. [doi: 10.1016/j.sysarc.2018.12.001]
- [172]. Du Y, Salen Tekinbas K. Bridging the gap in mobile interaction design for children with disabilities: perspectives from a pediatric speech language pathologist. Int J Child Comput Interact. Jun 2020;23-24:100152. [doi: 10.1016/j.ijcci.2019.100152]
- [173]. Zhu L, Cao Q, Cai Y. Development of augmented reality serious games with a vibrotactile feedback jacket. Virtual Real Intell Hardw. Oct 2020;2(5):454-470. [doi: 10.1016/j.vrih.2020.05.005]
- [174]. Cholewa N, Wołk K, Wołk R. Precise eye-tracking technology in medical communicator prototype. Proc Comput Sci. 2018;138:264-271. [doi: 10.1016/j.procs.2018.10.038]
- [175]. Benton L, Johnson H. Widening participation in technology design: a review of the involvement of children with special educational needs and disabilities. Int J Child Comput Interact. Jan 2015;3-4:23-40. [doi: 10.1016/j.ijcci.2015.07.001]
- [176]. Niknejad N, Ismail WB, Mardani A, Liao H, Ghani I. A comprehensive overview of smart wearables: the state of the art literature, recent advances, and future

- challenges. *Eng Appl Artif Intell.* Apr 2020;90:103529. [doi:10.1016/j.engappai.2020.103529]
- [177]. Theodoropoulos A, Lepouras G. Augmented Reality and programming education: a systematic review. *Int J Child Comput Interact.* Dec 2021;30:100335. [doi: 10.1016/j.ijcci.2021.100335]
- [178]. Hassan A, Pinkwart N, Shafi M. Serious games to improve social and emotional intelligence in children with autism. *Entertain Comput.* May 2021;38:100417. [doi: 10.1016/j.entcom.2021.100417]
- [179]. Shohieb SM, Doenyas C, Elhady AM. Dynamic difficulty adjustment technique-based mobile vocabulary learning game for children with autism spectrum disorder. *Entertain Comput.* May 2022;42:100495. [doi: 10.1016/j.entcom.2022.100495]
- [180]. Soysa AI, Mahmud AA. Assessing tablet applications focused on social interactions: what functionalities do Sri Lankan practitioners want for children with ASD? In: *Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction.* Presented at: OzCHI '18; December 4-7, 2018, 2018; Melbourne, Australia.
- [181]. Abdullah MH, Brereton MF. Mycalendar: supporting children on the autism spectrum to learn language and appropriate behaviour. In: *Proceedings of the 29th Australian Conference on Computer-Human Interaction.* Presented at: OzCHI '17; November 28-December 1, 2017, 2017; Brisbane, Australia.
- [182]. Sharmin M, Hossain MM, Saha A, Das M, Maxwell M, Ahmed S. From research to practice: informing the design of autism support smart technology. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.* Presented at: CHI '18; April 21-26, 2018, 2018; Montreal, QC.
- [183]. Garcia-Garcia JM, Cabañero MD, Penichet VM, Lozano MD. EmoTEA: teaching children with autism spectrum disorder to identify and express emotions. In: *Proceedings of the XX International Conference on Human Computer Interaction.* Presented at: Interacción '19; June 25-28, 2019, 2019; Donostia, Spain.
- [184]. Miri P, Arora M, Malhotra A, Flory R, Hu S, Lowber A, et al. FAR: end-to-end vibrotactile distributed system designed to facilitate affect regulation in children diagnosed with autism spectrum disorder through slow breathing. In: *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.* Presented at: CHI '22; April 29-May 5, 2022, 2022; New Orleans, LA.
- [185]. Li B, Atyabi A, Kim M, Barney E, Ahn AY, Luo Y, et al. Social influences on executive functioning in autism: design of a mobile gaming platform. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.* Presented at: CHI '18; April 21-26, 2018, 2018; Montreal, QC.
- [186]. Alessandrini A, Loux V, Serra GF, Murray C. Designing ReduCat: audio-augmented paper drawings tangible interface in educational intervention for high-functioning autistic children. In: *Proceedings of the The 15th International Conference on Interaction Design and Children.* Presented at: IDC '16; June 21-24, 2016, 2016; Manchester, UK.
- [187]. Motti VG. Designing emerging technologies for and with neurodiverse users. In: *Proceedings of the 37th ACM International Conference on the Design of Communication.* Presented at: SIGDOC '19; October 4-6, 2019, 2019; Portland, Oregon.
- [188]. Da Branco K, Pinheiro VM, Damian AL, Marques AB. Investigating the first user experience and accessibility of educational applications for autistic children. In: *Proceedings of the 19th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems.* Presented at: IHC '20; October 26-30, 2020, 2020; Diamantina, Brazil.

- [189]. Cordeiro RF, Ferreira WS, Aguiar YP, Saraiva JA, Tardif C, Galy E. The Brazilian challenge to accessibility and digital inclusion for people with autistic spectrum disorders. In: Proceedings of the 17th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems. Presented at: IHC '18; October 22-26, 2018, 2018; Belém, Brazil.
- [190]. Hachisu T, Bourreau B, Suzuki K. EnhancedTouchX: smart bracelets for augmenting interpersonal touch interactions. In: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Presented at: CHI '19; May 4-9, 2019, 2019; Glasgow, Scotland.
- [191]. Duval J, Bertran FA, Chen S, Chu M, Subramonian D, Wang A, et al. Chasing play on TikTok from populations with disabilities to inspire playful and inclusive technology design. In: Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Presented at: CHI '21; May 8-13, 2021, 2021; Yokohama, Japan.
- [192]. Mohd CK, Shahbodin F, Jano Z, Azni AH. Visual perception games for autistic learners: design and development. In: Proceedings of the 2019 Asia Pacific Information Technology Conference. Presented at: APIT '19; January 25-27, 2019, 2019; Jeju Island, Republic of Korea.
- [193]. Yaneva V, Temnikova I, Mitkov R. Accessible texts for autism: an eye-tracking study. In: Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility. Presented at: ASSETS '15; October 26-28, 2015, 2015; Lisbon, Portugal.
- [194]. Venuprasad P, Dobhal T, Paul A, Nguyen TN, Gilman A, Cosman P, et al. Characterizing joint attention behavior during real world interactions using automated object and gaze detection. In: Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications. Presented at: ETRA '19; June 25-28, 2019, 2019; Denver, CO.
- [195]. Bozgeyikli L, Bozgeyikli E, Raij A, Alqasemi R, Katkoori S, Dubey R. Vocational rehabilitation of individuals with autism spectrum disorder with virtual reality. *ACM Trans Access Comput.* Apr 06, 2017;10(2):1-25. [doi: 10.1145/3046786]
- [196]. Spiel K, Frauenberger C, Keyes O, Fitzpatrick G. Agency of autistic children in technology research—a critical literature review. *ACM Trans Comput Hum Interact.* Nov 02, 2019;26(6):1-40. [doi: 10.1145/3344919]
- [197]. Romero MR, Macas E, Harari I, Diaz J. Is it possible to improve the learning of children with ASD through augmented reality mobile applications? In: Proceedings of the Applied Technologies. Presented at: ICAT 2019; December 3-5, 2019, 2019; Quito, Ecuador.
- [198]. Mazumdar A, Chatterjee B, Banerjee M, Bhati IH. Mobile application based modified screening and assessment tools for children with autism. *Int J Interact Mob Technol.* Aug 2019;13(08):159. [doi: 10.3991/ijim.v13i08.10563]
- [199]. Signore A, Balasi P, Yuan T. You talk! – YOU vs AUTISM. In: Proceedings of the Computers Helping People with Special Needs. Presented at: ICCHP 2014; July 9-11, 2014, 2014; Paris, France.
- [200]. A. N. Jameel Al-Tamimi, I. H. B. Idris, S. Mustapha, M. N. Mohammed, H. S. S. Aljibori, and M. Alfiras, “EMooly: Supporting Autistic Children in Collaborative Social-Emotional Learning with Caregiver Participation through Interactive AI-infused and AR Activities,” in *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 8, no. 1, 2024.
- [201]. I. H. B. Idris, A. N. J. Al-Tamimi, S. Mustapha, M. N. Mohammed, H. S. S. Aljibori, and M. Alfiras, “Enhancing Children’s Communication Skills Through an

- Interactive AR Board Game,” in Proc. IEEE Int. Conf. Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), 2023, pp. 1–7.
- [202]. E. Voultsiou and L. Moussiades, “A systematic review of AI, VR, and LLM applications in special education: Opportunities, challenges, and future directions,” *Education and Information Technologies*, Apr. 2025, doi:10.1007/s10639-025-13550-4.
- [203]. C. Flegenhimer and K. S. Scherf, “College as a Developmental Context for Emerging Adulthood in Autism: A Systematic Review of What We Know and Where We Go from Here,” *J. Autism Dev. Disord.*, vol. 52, no. 5, pp. 2075–2097, 2022, doi:10.1007/s10803-021-04946-w.
- [204]. S. M. Wolpe, “Promoting Success in College: A Scoping Review of Autistic Students’ Postsecondary Education Experiences,” *Review Journal of Autism and Developmental Disorders*, vol. 11, no. 1, pp. 1–20, Apr. 2024, doi:10.1007/s40489-024-00448-z.
- [205]. Engstrom, E. (2019). Improving Daily Living Skills in College Students with Autism Spectrum Disorder Using a Peer-Mediated Daily Living Checklist Intervention. UC Santa Barbara. ProQuest ID: Engstrom_ucsb_0035D_14438. Merritt ID: ark:/13030/m5bk6k9p. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/6h81r4th>.
- [206]. Y. Lyu et al., “Eggly: Designing Mobile Augmented Reality Neurofeedback Training Games for Children with Autism Spectrum Disorder,” *arXiv preprint arXiv:2503.04984*, 2025.
- [207]. D. Pressel, W. Liu, M. Johnston, M. Chen, A. Loukina, R. Gangadharaiah, B. Min, “Lightweight Transformers for Conversational AI,” in **Proc. NAACL-Industry**, 2022.
- [208]. A. Banerjee, P. Washington, C. Mutlu, A. Kline, D. P. Wall, “Training and Profiling a Pediatric Emotion Recognition Classifier on Mobile Devices,” **arXiv preprint**, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2108.11754>
- [209]. Y. Liao, Y. Gao, F. Wang, L. Zhang, Z. Xu, et al., “Emotion recognition with multiple physiological parameters based on ensemble learning,” **Scientific Reports**, vol. 15, art. no. 19869, 2025, doi:10.1038/s41598-025-19869-0.
- [210]. S. Kourtesis et al., “Virtual Reality Training of Social Skills in Autism Spectrum Disorder: An Examination of Acceptability, Usability, User Experience, Social Skills, and Executive Functions,” *arXiv:2304.07498 [Cs.TECH]*, Apr. 2023.
- [211]. M. Sailer et al., “The End is the Beginning is the End: The Closed-Loop Learning Analytics Framework,” *Computers in Human Behavior*, vol. 158, 2024, doi:10.1016/j.chb.2024.108305.
- [212]. Holstein, K., & Aleven, V. (2022). Designing for Human–AI Complementarity in K-12 Education. *AI Magazine*, 43(2), 239–248. <https://doi.org/10.1002/aaai.12058>.
- [213]. World Economic Forum, “The future of learning: AI in Education,” 2024.
- [214]. O. Adako, O. Adeusi, and P. Alaba, “Integrating AI tools for enhanced autism education: a comprehensive review,” *Int. J. Dev. Disabil.*, 2024, doi:10.1080/20473869.2024.2392983.
- [215]. B. Paneru and B. Paneru, “The Nexus of AR/VR, LLMs, UI/UX in Enhancing Learning & Social Interaction for Children,” *arXiv:2409.18162*, Sep. 2024.
- [216]. E. Mendes, C. Wohlin, K. Felizardo, and M. Kalinowski, “When to Update Systematic Literature Reviews in Software Engineering,” *arXiv:2004.06183*, Apr. 2020.
- [217]. C. Wohlin, E. Mendes, K. R. Felizardo, and M. Kalinowski, “Guidelines for the Search Strategy to Update Systematic Literature Reviews in Software Engineering,”

- Information and Software Technology, vol. 127, p. 106366, Nov. 2020, doi:10.1016/j.infsof.2020.106366.
- [218]. B. M. Napoleão, F. Petrillo, and S. Hallé, "Continuous Systematic Literature Review: An Approach for Open Science," arXiv:2108.12922, Aug. 2021.
 - [219]. M. Chawla, S. N. Panda, V. Khullar, K. D. Garg, and M. Angurala, "A Tablet-Based Multimodal Serious Game for Emotion Recognition in Children with ASD," *Entertainment Computing*, vol. 50, p. 100661, 2024.
 - [220]. K. D. Garg, V. Khullar, and M. Chawla, "Augmented Storytelling Intervention to Improve Empathy and Social Skills in Children with ASD," *Int. J. Human-Computer Studies*, vol. 179, p. 103456, 2024.
 - [221]. S. N. Panda, M. Chawla, K. D. Garg, and M. Angurala, "Caregiver-Assisted AI-Based Emotion Coaching App for Children with Autism," *J. Autism Dev. Disord.*, vol. 54, no. 2, pp. 212–229, 2024.
 - [222]. V. Khullar, S. N. Panda, and K. D. Garg, "Personalized Emotional Avatars to Enhance Social Skills in ASD Populations," in *Proc. Int. Conf. Affective Computing and Intelligent Interaction*, 2023.
 - [223]. H. M. Ahmed, T. Bojiah, and J. Alfiras, "AI-Powered Feedback System for Improving Facial Emotion Recognition in ASD Learners," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 11532–11547, 2024.
 - [224]. T. Bojiah, M. Chawla, K. Garg, and S. N. Panda, "Multisensory Feedback in Digital Games to Support Social Learning in Neurodivergent Children," *Computers & Education*, vol. 201, p. 104698, 2024.
 - [225]. M. Angurala, S. N. Panda, V. Khullar, and K. D. Garg, "Mobile-Based AR Emotion Training for Adolescents with Autism," *Computers in Human Behavior Reports*, vol. 8, p. 100234, 2024.
 - [226]. S. Ahmed et al., "Designing IoT Architectures for Campus-Level Implementation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 1, 2022.
 - [227]. D. Fidalgo-Blanco et al., "Student-Centric Smart Campus Services Based on Data Analytics," *Education Sciences*, vol. 12, no. 2, 2022.
 - [228]. H. Luo et al., "Energy-Efficient Smart Buildings for University Campuses," *Sustainable Cities and Society*, vol. 60, 2020.
 - [229]. A. Ghiani et al., "Indoor Wayfinding: A Challenge for Smart Campus Environments," *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, vol. 12, 2020.
 - [230]. M. Kulik et al., "AR Navigation in Higher Education: Campus Mapping and Orientation," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 147, 2021.
 - [231]. D. Wang et al., "Smart Campus Mobility: Architecture and Evaluation," *Sensors*, vol. 21, no. 6, 2021.
 - [232]. K. M. Varnhagen et al., "Wayfinding and Spatial Anxiety in University Students," *Journal of Environmental Psychology*, vol. 45, 2020.
 - [233]. L. Guo et al., "Indoor Navigation in Complex Educational Environments," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 24356–24367, 2020.
 - [234]. B. Ramprasad and T. K. Rajan, "Signage Consistency and Campus Orientation Efficiency," *Design Studies*, vol. 34, no. 1, 2019.
 - [235]. P. Sánchez-Gordón and S. Luján-Mora, "Accessibility Considerations for Smart Campus Navigation Systems," *Universal Access in the Information Society*, vol. 19, 2020.
 - [236]. F. Alsaeed et al., "Mobile Wayfinding Applications in Higher Education: A Usability Study," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 36, no. 5, 2020.

- [237]. M. Ardito et al., "Augmented Reality and Location-Aware Computing in Smart Campus Navigation," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 13, 2022.
- [238]. N. Persson and J. Petersson, "Designing Inclusive Wayfinding Systems in Higher Education," *ACM Transactions on Accessible Computing*, vol. 14, no. 3, 2021.
- [239]. K. Rantos et al., "Data-Driven Decision Making in Smart Campus Infrastructures," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 9, no. 4, 2021.
- [240]. S. Tavakoli et al., "Integrated Digital Frameworks for Smart Campus Services," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, 2021.
- [241]. H. Gharavi and J. Hu, "Indoor Positioning and Analytics for Smart Campus Environments," *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 3, 2022.
- [242]. L. C. Gouveia et al., "Design Principles for Scalable Smart Campus Architectures," *Future Internet*, vol. 15, no. 2, 2023.
- [243]. B. Mavroudi et al., "Design and Evaluation of Spatial Services in Higher Education Campuses," *Journal of Location Based Services*, vol. 15, no. 1, 2021.
- [244]. E. Khosravi et al., "Impact of Navigation Technology on Student Orientation and Anxiety," *Education and Information Technologies*, vol. 27, no. 5, 2022.
- [245]. Y. Liu et al., "Adaptive Wayfinding Systems in Smart Educational Infrastructures," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 15, no. 3, 2023.
- [246]. S. Dahiya and K. R. Singh, "Spatial Accessibility and Inclusion in Smart Campuses," *Universal Access in the Information Society*, vol. 21, no. 4, 2022.
- [247]. D. H. Lee et al., "Interoperability Models for Smart Campus Navigation Services," *Future Generation Computer Systems*, vol. 125, 2021.
- [248]. M. Vasquez and H. R. Taylor, "From Navigation to Analytics: Leveraging Wayfinding Data in Higher Education," *Smart Learning Environments*, vol. 9, no. 2, 2022.
- [249]. A. Smith et al., "Challenges in Indoor Navigation: A Review," *Indoor Positioning Journal*, vol. 9, no. 2, 2021.
- [250]. L. Roberts and J. Kim, "Wayfinding Complexity in Higher Education Buildings," *Journal of Educational Technology*, vol. 18, no. 3, 2020.
- [251]. J. Zhang et al., "Augmented Reality for Indoor Navigation: Opportunities and Pitfalls," *IEEE Access*, vol. 10, 2022.
- [252]. T. Nguyen et al., "SLAM and VPS for Indoor Positioning Systems," *Sensors*, vol. 21, no. 11, 2021.
- [253]. C. Lin et al., "Smart Campus Architectures Inspired by Smart Cities," *Sustainable Cities and Society*, vol. 57, 2020.
- [254]. M. Andersson and P. Zhou, "Evaluating Indoor Orientation Challenges During Student Enrollment Events," *Campus Technology Review*, vol. 13, no. 4, 2021.
- [255]. D. Lee and A. Vargas, "Inclusive Navigation Design in Higher Education Facilities," *Universal Access in the Information Society*, vol. 20, no. 1, 2021.
- [256]. S. Patel et al., "Infrastructure Constraints in Mobile AR Navigation Systems for Education," *IJACSA*, vol. 13, no. 2, 2024.
- [257]. J. Zhang et al., "Augmented Reality for Indoor Navigation: Opportunities and Pitfalls," *IEEE Access*, vol. 10, 2022.
- [258]. T. Nguyen et al., "SLAM and VPS for Indoor Positioning Systems," *Sensors*, vol. 21, no. 11, 2021.
- [259]. R. Kumar and F. Lemos, "Indoor Mapping for Complex Educational Buildings," *International Journal of Spatial Information Science*, vol. 5, no. 3, 2020.

- [260]. A. García et al., "Positioning Accuracy Requirements in Indoor Educational Navigation," *Advanced Human-Centric Computing*, vol. 14, no. 2, 2021.
- [261]. D. Lee and A. Vargas, "Inclusive Navigation Design in Higher Education Facilities," *Universal Access in the Information Society*, vol. 20, no. 1, 2021.
- [262]. S. Patel et al., "Infrastructure Constraints in Mobile AR Navigation Systems for Education," *IJACSA*, vol. 13, no. 2, 2024.
- [263]. R. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, 1997.
- [264]. M. Billingham et al., "Real-Time AR Navigation in Complex Indoor Spaces," *ACM Transactions on CHI*, vol. 27, no. 3, 2020.
- [265]. J. Zhang et al., "Augmented Reality for Indoor Navigation: Opportunities and Pitfalls," *IEEE Access*, vol. 10, 2022.
- [266]. A. Sadeghi and H. Hakkarainen, "Accessible AR Wayfinding for Inclusive Smart Campuses," *Universal Access in the Information Society*, vol. 19, 2020.
- [267]. ARCore Developer Documentation, "Fundamentals of Environment Understanding," [Online], Available: <https://developers.google.com/ar>
- [268]. J. I. Rubio-Sandoval et al., "An Indoor Navigation Methodology for Mobile Devices by Integrating Augmented Reality and Semantic Web," *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5435, 2021. [Online]. Disponibil: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5435>
- [269]. Z. Qiu, A. Mostafavi, and S. Kalantari, "Use of Augmented Reality in Human Wayfinding: A Systematic Review," *arXiv preprint arXiv:2311.11923*, 2023.
- [270]. J. Huang, T. Wang, and S. Li, "Urban AR navigation with GPS and computer vision," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 5, pp. 1234–1245, May 2021.
- [271]. D. R. Montello, "Navigation," in *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking*, M. Gattis, Ed. Cambridge Univ. Press, 2005, pp. 257–294.
- [272]. J. Lave and E. Wenger, *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*, Cambridge Univ. Press, 1991.
- [273]. F. Zulfiqar et al., "Augmented Reality and Its Applications in Education: A Systematic Survey," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 143252–143266, 2023.
- [274]. Z. Qiu et al., "NavMarkAR: A Landmark-based Augmented Reality (AR) Wayfinding System for Enhancing Spatial Learning of Older Adults," *arXiv preprint arXiv:2311.12220*, 2023.
- [275]. R. Mishra et al., "AR navigation for visually impaired with sonar," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 7890–7902, 2023.
- [276]. S. Jain and R. Singh, "Tactile AR navigation for mobility-impaired users," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 123–134, 2022.
- [277]. L. Chen et al., "ARCore-based indoor navigation in a university campus," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 11532–11545, 2024.
- [278]. H. Ahn et al., "SLAM and semantic AR for indoor medical navigation," *IEEE Trans. Med. Robot.*, vol. 1, no. 2, pp. 45–58, 2025.
- [279]. L. Cheng and J. Tsai, "The Impact of Augmented Reality on Learning Effectiveness: A Meta-Analysis," *British Journal of Educational Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 620–638, 2021.
- [280]. J. Bacca et al., "Augmented Reality Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications," *Educational Technology & Society*, vol. 17, no. 4, pp. 133–149, 2021.
- [281]. A. Rossi et al., "Indoor AR navigation using ARKit," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 5678–5690, 2022.
- [282]. T. Nguyen and J. Park, "Indoor mall navigation with Bluetooth and AR," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 6, pp. 4321–4330, Mar. 2022.

- [283]. P. Gupta et al., "Indoor AR navigation with WiFi and SLAM," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 45, no. 4, pp. 2345–2357, Apr. 2023.
- [284]. K. Yamamoto et al., "BLE-enabled AR navigation for university buildings," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 11234–11248, 2021.
- [285]. Y. Watanabe et al., "Indoor AR with semantic room labeling in libraries," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 29, no. 5, pp. 1550–1562, 2023.
- [286]. A. Fernandez et al., "Cloud-based AR navigation with GPS emulation on large campuses," *Sensors*, vol. 24, no. 9, pp. 3501–3514, 2024.
- [287]. Q. Zhao et al., "UWB-enhanced AR headset navigation for events," *Sensors*, vol. 24, no. 3, pp. 1021–1034, 2024.
- [288]. H. Lee et al., "AR glasses for airport indoor navigation using 5G signals," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 70, no. 2, pp. 101–110, 2023.
- [289]. Dong, B. et al., "Framework and Development Trends of Smart Campus," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 25, no. 5, pp. 647–663, 2020. <https://doi.org/10.26599/TST.2019.9010023>.
- [290]. Siriwardhana, Y.; Porambage, P.; Liyanage, M.; Ylianttila, M. A survey on mobile augmented reality with 5G mobile edge computing: Architectures, applications, and technical aspects. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2021, 23(2), 1160–1192. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3061981>.
- [291]. Balakrishnan, S.; Hameed, M.S.S.; Venkatesan, K.; Aswin, G. Interaction of Spatial Computing in Augmented Reality. In *Proceedings of the 2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore, India, 19–20 March 2021; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021; pp. 1900–1904. <https://doi.org/10.1109/ICACCS51430.2021.9441862>.
- [292]. Faragher, R., & Harle, R. (2014). An analysis of the accuracy of Bluetooth Low Energy for indoor positioning applications. *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014)*.
- [293]. Torres-Sospedra, J., et al. Comprehensive analysis of indoor positioning technologies. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2015, 17(3), 1374–1394. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2371233>.
- [294]. Zafari, F., et al. (2019). A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568–2599.
- [295]. Hess, W., et al. (2016). Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- [296]. Lynen, S., et al. (2015). Get out of my lab: Large-scale, real-time visual-inertial localization. *Robotics: Science and Systems (RSS)*.
- [297]. Kuutti, S., et al. (2018). A survey of the state-of-the-art localization techniques and their potentials for autonomous vehicle applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 829–846.
- [298]. Unity Technologies. (2023). Unity Manual: Platform Development. <https://docs.unity3d.com/Manual/PlatformDependentCompilation.html>
- [299]. Unity Technologies. (2022). AR Foundation Overview. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation>
- [300]. Stratis, G. et al. (2022). "Cross-platform development in Unity 3D for XR applications." *Journal of Computer Applications*, 45(2), 132–145.
- [301]. Zhan, Y., et al. (2021). "Comparison of AR Development Frameworks: Performance and Usability." *IEEE Access*, 9, 121345–121360.

- [302]. Karami, A., & Hamid, S. (2023). "Designing Mobile AR Apps Using Unity and Marker-based Systems." *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 17(4), 77–91.
- [303]. ARway Corporation. (2023). ARway Developer Documentation. <https://www.arway.ai/docs>
- [304]. Rahman, F.; Islam, S.; Ahmed, T. (2023). "Toward an Integrated Smart Campus with Edge-Enabled AR." *IEEE Access*, 11, 4085–4101.
- [305]. Tseng, T.-C.; Lin, J.; Hsu, K.C. (2022). "Integrating AR and IoT into Smart Campus Applications." *IEEE Internet Things J.*, 9(17), 15506–15518.
- [306]. ARway Corporation. (2023). ARway Studio User Guide. <https://studio.arway.ai/docs>
- [307]. Quezada-Gaibor, D. et al. (2022). "Hybrid Indoor Positioning System for Campus Navigation." *Sensors*, 22(7), 2635.
- [308]. Chagnon-Lessard, S.; Yacine, N.; Trépanier, M. (2021). "Toward Smart Campuses: A Survey of Enabling Technologies." *IEEE Access*, 9, 165710–165731.
- [309]. Huang, R.; Spector, J.; Yang, N. (2019). *Educational Technology Development and Smart Learning*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6908-7>
- [310]. Zandbergen, P. (2021). "A comparison of consumer-grade GPS accuracy in urban environments," *Journal of Spatial Science*, 66(1), 57–73.
- [311]. Luo, Y., et al. (2022). "AR Navigation in Complex Outdoor Environments: A Review," *Sensors*, 22(14), 5149.
- [312]. Wang, L., et al. (2023). "Characterizing GNSS Accuracy in Semi-Structured Urban Spaces," *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- [313]. Krogus, M., et al. (2020). "Visual Positioning System for Mobile AR," *ACM SIGGRAPH Posters*.
- [314]. Google Developers. (2024). "ARCore Geospatial API (VPS)," <https://developers.google.com/ar/vps>.
- [315]. Deng, R., & He, J. (2021). "Modular Architectures for Cross-Environment AR Navigation Systems," *IEEE Access*, 9, 106532–106548.
- [316]. Tran, D. & Lee, Y. (2022). "Reusability of AR Navigation Components in Mixed Indoor-Outdoor Contexts," *Springer Personal and Ubiquitous Computing*.
- [317]. Billinghurst, M., et al. (2023). "Augmented Reality Research: 10-Year Survey and Future Directions," *Foundations and Trends in HCI*, 16(2), 75–165.
- [318]. Müller, M., et al. (2022). "Robust Visual SLAM in Outdoor Environments with Changing Illumination," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4), 11220–11227.
- [319]. Li, Q., et al. (2023). "Real-Time Object-aware Visual Localization for Augmented Reality Navigation," *ACM Transactions on Graphics*, 42(2).
- [320]. Tateno, K., et al. (2019). "Illumination Robust Feature Detection for Outdoor AR," *ISMAR Adjunct Proceedings*.
- [321]. Google ARCore Documentation (2024). "Environmental conditions for reliable AR tracking."
- [322]. Lin, Z., et al. (2021). "Dynamic Path Replanning for Outdoor Pedestrian Navigation with Augmented Reality," *Sensors*, 21(18), 6121.
- [323]. Sucar, L. E., et al. (2020). "Geo-AR: Geospatially Accurate Augmented Reality for Outdoor Navigation," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 50(3), 247–256.
- [324]. Kapsalis, A., et al. (2023). "Energy Consumption Modeling for AR Applications in Mobile Devices," *IEEE Access*, 11, 77612–77624.
- [325]. Zhang, W., et al. (2020). "Marker Placement Strategies for Long-Term Outdoor AR Localization," *Springer UbiComp Adjunct*.

- [326]. Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. (2011). ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In Proceedings of ICCV.
- [327]. Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International journal of computer vision.
- [328]. Wang, X. et al., “Improving label placement for AR pedestrian navigation”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021.
- [329]. Kato, H., Billinghurst, M., “Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System”, Proc. IEEE/ACM ISAR, 2019.
- [330]. Lukosch, S. et al., “Design Guidelines for User-Centered Mobile AR Interfaces”, MDPI Sensors, 2020.
- [331]. Rahman, M.M. et al., “Adaptive Label Placement in Augmented Reality Environments”, ACM IUI, 2022.
- [332]. Jankowski, J., & Hachet, M. (2015). A survey of interaction techniques for interactive 3D environments. Eurographics.
- [333]. Li, Y., & Zhang, F. (2019). Path planning and obstacle avoidance algorithms for mobile robots: A review. International Journal of Advanced Robotic Systems.
- [334]. J. Quintero, S. Baldiris, and J. Cerón, “CooperAR: supporting the design and implementation of augmented inclusive educational scenarios,” *Frontiers in Education*, vol. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2025.1571104/full>
- [335]. C. R. Navas-Bonilla, “Inclusive education through technology: a systematic review,” *Frontiers in Education*, vol. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2025.1527851/full>
- [336]. G. Li, Z. Wang, X. Zhang, and Y. Zhao, “Augmented Reality in Higher Education: A Systematic Review and Meta-Analysis (2000–2023),” *Education Sciences*, vol. 15, no. 6, p. 678, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7102/15/6/678>