

Testování vývojářské sady Vuforia pro rozšířenou realitu v navigačním procesu pro optimalizaci GPS technologie

Tomáš Macháč¹, Petr Hořejší¹, Michal Šimon¹

¹ Katedra průmyslového inženýrství a managementu – Západočeská univerzita v Plzni
Univerzitní 2762/22, 301 00 Plzeň 3

machact@fst.zcu.cz

tucnak@fst.zcu.cz

simon@fst.zcu.cz

Anotace: Jednou z významných oblastí pro aplikaci rozšířené reality se jeví oblast logistiky. Rozšířená realita nabízí řadu přístupů, jak lokalizovat hledaný cíl ve skladu. GPS technologie disponuje značnou nepřesností, a to v průměru až 5 metrů. Experimentální měření přináší zjištění, a to konkrétně ve vzdálenostním a úhlovém omezení této navigační aplikace založené na značkách. Otestováním vývojářské sady Vuforia změříme vzdálenosti a úhly pro detekci markerů, které se umístí podél uličky skladu a budou napomáhat dotrackovat virtuální artefakty ve venkovním prostředí. Tyto údaje definují omezení metody a její aplikovatelnost. Data slouží jako základ pro experimentální parametr, který se aplikuje do matematického vzorce. Vzorec stanovuje minimálně nutný rozměr markeru na základě šířky logistické cesty. Tento návrh lze uplatit zejména u pěší navigace ve skladu. Závěrem jsme definovaly limity, které jsou značně omezující, zejména v nutnosti rozměrných markerů. Řešení je proto vhodné hledat v hybridním přístupu.

1 Úvod

Rozšířenou realitu (AR) lze definovat jako technologii, pomocí níž se uživatel dostane do polysyntetického prostředí. Uživatel vidí skutečný svět s virtuálními objekty, které překrývají nebo doplňují reálný svět. Rozšířená realita tedy než nahrazuje, spíše reálný svět doplňuje [1] [2] [3].

Azuma [1] se zaměřuje na oblast, která v současné době ještě není podporována příslušným hardwarem, ale v blízké budoucnosti se očekává velký pokrok. A to na používání HMD (Head-mounted display) ve venkovním prostředí s přesností potřebnou pro AR. Uvádí příklady, jako jsou navigační mapy, vizualizace minulých a budoucích prostředí. Tyto příklady lze v dnešní době velmi snadno realizovat pomocí mobilního telefonu nebo tabletu.

Systémy rozšířené reality pro navigaci představují inovativní vizualizační paradigma pro navigační systémy, které přináší uživateli lepší interakci a znalost v navigaci [4].

Tyto systémy se mohou aplikovat do různých scénářů, jako je navigace ve vozidlech, navigace pro chodce, nebo navigace v interiérových prostorech.

Snahou je pomoci uživateli dosáhnout cíle co nejefektivněji tím, že se užívají virtuální objekty, které rozšiřují reálný svět o další navigační informace [5]. Například mapy od společnosti Google disponují AR platformou.

Zejména v průmyslu, kde čas strávený hledáním čehokoliv tzv. ztrátový čas, je jedním z hlavních druhů plýtvání. Dílčí průmyslové systémy využívají satelitní navigační technologie pro stanovení určité polohy a zobrazení cesty k cíli. Navigační pokyny se vykreslují turn-by-turn nebo jako 3D vykreslená cesta [6].

Yount et al. [7] popisují, že osobní navigační systémy, které jsou v konvenčním pojetí ve formě chytrého telefonu s GPS již obvyklým řešením. Bylo zjištěno, že oproti konvenčním osobním navigacím ve formě head-down displeje (HDD) přináší head-up displej (HUD) rychlejší odezvu a méně času stráveného sledováním HUD. Též AR HUD přináší snížení stresu uživatele při navigaci. Zároveň se nepotvrdilo, že AR HUD snižuje pozornost při navigování. Na základě provedených studií se předpokládá, že aplikace AR HUD v osobní dopravě, zejména té automobilové bude v budoucnu převládat.

Palinko et al. [8] vytvořili na základě předchozí studie textování umístěním LED matice na čelní sklo. Výsledek svědčí, že řidič věnuje více pozornosti provozu na silnici s užitím LED displeje než u tradičního užití navigace.

Delail et al. [9] navrhli obdobný systém jako Mulloni et al. [10], avšak systém pracuje na principu měření kroků pomocí mrtvého počítání (jedná se o metodu výpočtu, která se opírá o odhad aktuální trasy, rychlosti a polohy dříve známé). Jsou vytvořeny zájmové body a systém tyto body v okolí zobrazuje uživateli. Vyhledávání bodů je na základě polohy uživatele a zaznamenány v kameře pomocí kompasu, gyroskopu a akcelerometru.

Yount et al. [7] se ve své studii zaměřují na simulované jízdní scénáře použitím navigačního zařízení ve formě papírové mapy, elektronické mapy a AR systému. Porovnávali vliv jednotlivých forem na jízdní výkon a učení trasy. Bylo stanoveno, že AR navigace uživateli nepřináší žádné výhody pro učení trasy.

Chung et al. [11] zkoumali jednotlivé technologie rozšířené reality založené na počítačovém vidění a propojení interaktivního zážitku. Použity byly data o poloze od poskytovatelů služeb, jako je GPS. Byl vytvořen navigační systém na základě GPS, který umožňuje kontrolovat stávající trasu, též kontrolovat informace ze svého okolí.

Rao et al. [12] vytvořili komplexní navigační systém. Systém kombinuje geovizualizaci a mobilní IMU AR magnetometr s přístupem pro detekci geografických objektů, který pracuje na hlubokém učení. Prostorové vztahy v této metodě jsou silně závislé na přijímačích GPS a ostatních senzorech. Toto způsobuje velkou náchylnost na nepřesnost GPS, a tedy k posunu či zkreslení výstupu sensorů. Obdobnou aplikaci pro navigaci navrhli [13], zde se zaměřili na funkčnost aplikace a její rozhraní. Toto řešení dále rozvedli [14].

Panou et al. [15] vytvořili AR mobilní aplikaci pro zvýšení synergie návštěvníka a kulturních objektů tím, že navrhli vizualizaci historických informací k daným místům. Naráží se zde na chybnou registraci způsobnou nepřesností GPS a latencí odvozenou z dat senzorů. Tato nepřesnost zapříčiňuje nedostatečnou digitální iluzi a rozbíjí soužití s realitou. Wang et al. [16] zpracovali navigační systém založený na rozhraní Baidu Map API a vektorových mapách Arc GIS na konceptu POI. Takzvané informační body představují konkrétní místo, ke kterému probíhá navigace. Obdobné propojení Arc GIS s GPS, aplikovali [17] ve své studii. Snahou je spárovat virtuální objekty s jejich reálným protějškem, v tomto bodu se naráží na nepřesnost vycházející z GPS.

V AR navigaci bychom neměli opomenout výzkum, návrh i testování rozhraní, kterým se zabývají [18]. Přináší zajímavé poznatky v oblasti virtuální dopravní infrastruktury zaměřené na uživatele, návrhu mobilní AR a peší AR navigaci, která probíhá ve zkoumaných prototypových scénářích.

V rámci této studie se zaměříme na AR, která je založená na značkách. Zde si popíšeme jednotlivé články, které se tímto tématem zabírají.

Technologie rozšířené reality založená na značkách zpracovává obraz. Tato metoda registruje značky viditelné na kameře a na obrazu se vytvoří virtuální objekt, který k značce náleží. Objekt se zobrazí na definované poloze v osách x, y a z [19] [20]. Pro zpřesnění se aplikují uzlové trasové body, např. v podobě markerů, které se používají k popisu průchozí polohy. Güngör a Akbaş [21] s [12] v práci zmiňují, že metody založené na značkách mohou být nevhodné pro použití v nekontrolovaném prostředí.

Rozšířená realita založená na značkách ve venkovní navigaci je zajímavá tím, že se jedná o jedno z řešení, jak zpřesnit AR navigaci. Důvodem jsou data souřadnic, které přicházejí do smartphonu disponující GPS a bylo potvrzeno, že v otevřené oblasti dochází k odchylce od 2 do 10 metrů [22]. Rocha a Lopes [23] řadí mezi hlavní problémy určování venkovní polohy nepřesnost vlastní lokalizace GPS, zejména v hustě zastavěné oblasti. S odhadem vlastní polohy se častěji setkáme v podpoře řízení nebo u autonomního řízení robota. Přesto se toto řešení může uplatnit i u AR a stanovit přesnou polohu virtuálních objektů na základě značek. Základem je technologie SLAM. Karan et al. [24] otestovali metodu založenou na SLAM technologii a výpočtem dokázali stanovit absolutní umístění souřadnic markeru i vlastní polohy.

Tento článek se zabývá problematikou zpřesňování polohy GPS pro aplikaci rozšířené reality. Dle výše uvedeného lze konstatovat, že existuje mnoho technologií, které umožní GPS data zpřesňovat: RTK, RFID, Bluetooth nebo WiFi. Zde se budeme zabývat možností založenou na značkách, které budou umístěny přímo v terénu. Výhodou této metody je, že k samotnému zpřesnění není nutný dodatečný hardware. Potenciálně funkční navigace ke své realizaci potřebuje jen telefon, tablet nebo AR HMD bez přídavného hardwaru.

2 Metodika

V článku řešíme jeden z možných přístupů k problematice navigace v rozšířené realitě, která je založená na orientaci podle značek a využívá extended tracking.

Pilotním experimentálním měřením bude zjištění, na jaké omezení tato potenciální navigační aplikace založená na značkách naráží. Bude provedeno měření vzdálenosti a úhlů pro detekci markerů, které se umístí podél uličky skladu a budou napomáhat dotrakovat virtuální artefakty ve venkovním prostředí. Chceme nalézt do jaké vzdálenosti a úhlu lze marker detekovat. Infrastruktura aplikace bude postavená na softwaru Unity 3D (2020.3.22f1) a Vuforia Engine (10.9.3). Kombinace využití těchto technologií je dnes poměrně obvyklá pro vývoj AR aplikací. Zároveň budeme zkoumat, jak detekovanou vzdálenost ovlivňuje úhel pozorování. Využité vývojové softwary a jejich verze jsou tedy omezením provedené studie.

2.1 Proces a výstupy

Měření proběhne ve venkovním prostředí. Vyznačí se úhly vůči postavení markeru. Pod těmito úhly se provede měření. Ke každému úhlu se provede 20 měření. Proces probíhá tím, že se s mobilním telefonem přibližujeme v daném úhlu k markeru. V okamžiku, že se marker aktivuje, se změří vzdálenost mezi mobilním telefonem a markerem (v podobě QR kódu). Po změření vzdálenosti se aplikace resetuje, viz Obrázek 1.



Obrázek 1 – Princip detekce markeru

Tak, aby měření bylo prováděno s co nejmenší nepřesností, byla použita výtyčka, která je primárně určena pro přijímač GPS. Výhodou je, že součástí výtyčky je i krabicová libela, čímž lze měřit i přímo kolmo k povrchu. Na výtyčku se připevní telefonní mobil se středem kamery ve výšce 1800mm, tak aby byla zajištěná stejná výška vůči středu markeru.

Výstupem bude matematický aparát ve vztahu k experimentálnímu měření. Vzorec stanoví velikost markeru na základě šířky skladové uličky/cesty. Důvodem tvorby vzorce je zajištění, že v případě implementace AR navigace založené na značkách, dokáže Vuforia identifikovat značky. Nenastane situace, že je uživatel v prostoru tzv. v mrtvém místě. V tomto místě se nedokáže Vuforia zoptimalizovat a sladit virtuální artefakt s daty navigace. Výstupem jsou i úhlové limity, kterými je současná verze Vuforia omezená.

2.2 Podmínky měření

Měřící zařízení: **Xiaomi Redmi Note 11**

Technické parametry:

- Procesor: osmijádrový Qualcomm SM6225 Snapdragon 680 4G
- Paměť: 4 GB RAM
- Zadní fotoaparát: 4x (50 Mpx f/1,8, 8 Mpx, f/2,2, 2 Mpx f/2,4, 2 Mpx f/2,4
- Technologie: Bluetooth, GPS, NFC, Wi-Fi, 4G/LTE, Infraport, A-GPS,
- Galileo, GLONASS, Beidou, čtečka otisků prstů, snímač obličeje
- Operační systém: Android 11 + MIUI 13

Přesnost měření: **± 5mm**

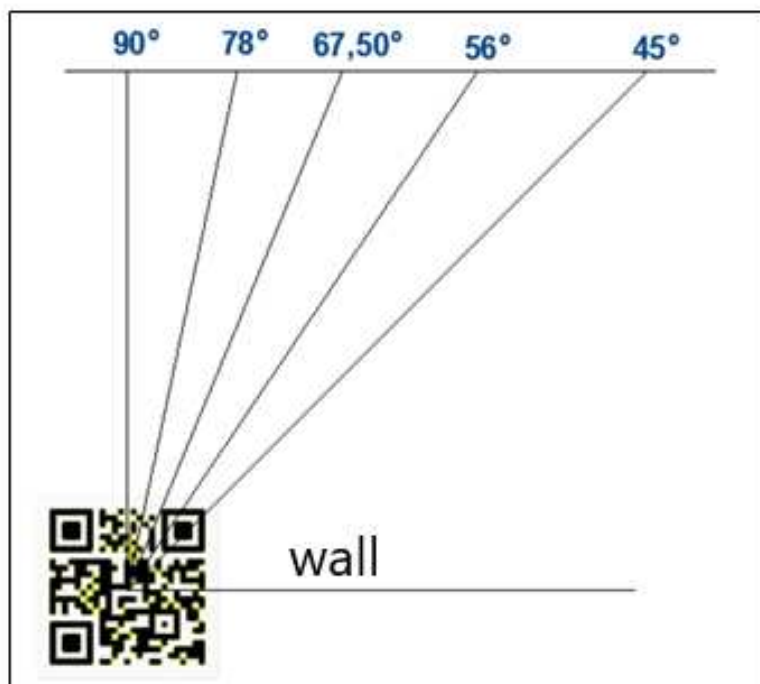
Forma značky: **QR kód**

2.3 Testování vzdálenosti dosahu

Měření probíhalo tak, že se umístil na zeď marker se středem ve výšce 1800mm. Následně se na zem vyznačily úhly, které se odstupňovaly 90°, 78°, 67,5°, 56°, 45°, viz Obrázek 2. V průběhu měření se zjistilo, že pod ostřejší úhel jak 45° nemá význam provádět měření, jelikož Unity a Vuforia nedokázala identifikovat marker. Tento údaj jsme nemohli předpokládat, jelikož se provádělo pilotní měření. Proto jsme se zaměřili na zjištění hodnot větší a rovno 45°. Vzdálenost porovnáváme v závislosti na velikosti markeru, proto se měření provedlo na čtyřech rozměrech markeru, viz Tabulka 1.

Tabulka 1 – Rozměry markeru

Rozměry markeru [mm]	
M1_1	173 x 173
M1_2	141 x 141
M1_3	113 x 113
M1_4	74 x 74



Obrázek 2 – Definované úhly pro detekci markeru

3 Výsledky

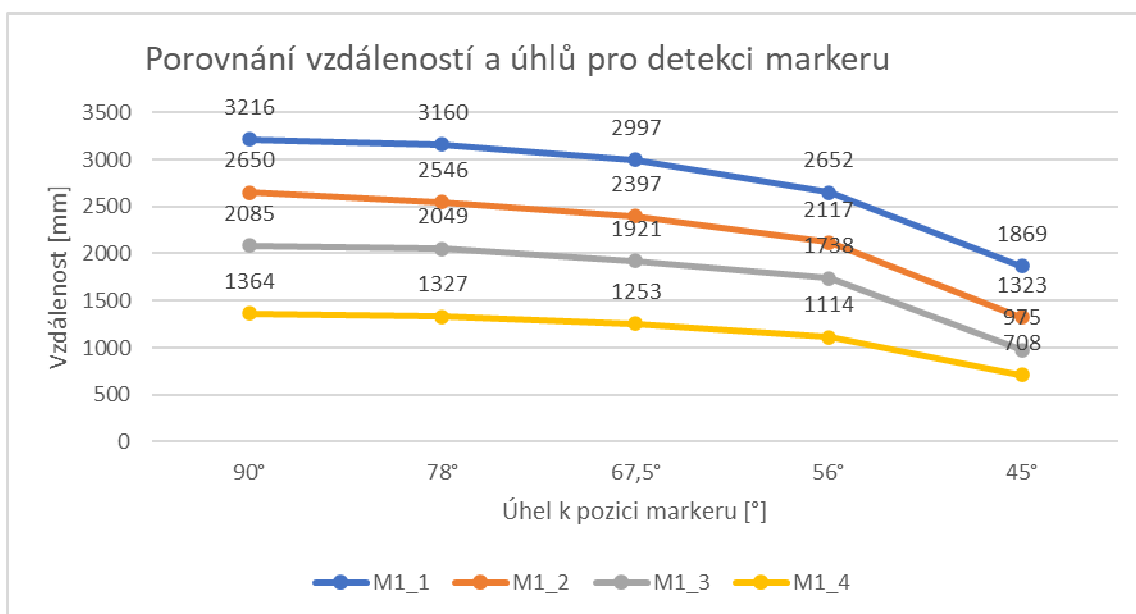
Měření proběhlo na čtyřech rozměrech markeru. Hodnoty jsou zprůměrované vzdálenosti, do kterých lze detekovat marker, viz Tabulka 2.

Tabulka 2 – Průměrná vzdálenost individuálních markerů v definovaném úhlu

	M1_1	M1_2	M1_3	M1_4
90°	3216	2650	2085	1364
78°	3160	2546	2049	1327
67,5°	2997	2397	1921	1253
56°	2652	2117	1738	1114
45°	1869	1323	975	708

Na Obrázek 3 je patrné, že pokud se marker zmenší dochází ke snížení vzdálenosti, kdy prototypovací software dokáže identifikovat marker. Nejzásadnější pokles nastává u úhlu 56° a pak výrazněji u úhlu 45°. U úhlu nižší jak 45° je podstatě nemožné marker identifikovat.

Dle oficiálního manuálu k Vuforia SDK [25] lze zachytit marker na maximální vzdálenosti 3700mm. Z měření vychází pevně daný poměr, jak musí být marker velký, abychom ho dokázali identifikovat za určitého úhlu. Výše uvedený zdroj také uvádí, že by mělo být možné detekovat marker do úhlu 30°, toto se však měřením vyvrátilo.



Obrázek 3 – Porovnání vzdáleností a úhlů pro detekci markeru

Z dat Obrázek 3 lze určit na jakou maximální vzdálenost dokážeme marker detekovat. Výstupem je jednoduchý matematický aparát s exaktním parametrem, který vychází z testování. Na základě tohoto vzorce (1) můžeme stanovit, jak velký marker je nezbytný v závislosti na šířce uličky.

Parametr o velikost 0,104222m je velikost rozměru markeru (rozměr se počítá šířka i výška markeru) na vzdálenost 1 metru. Tento údaj vychází z naměřených dat, kdy se vypočítala průměrná vzdálenost zobrazujícího virtuálního artefaktu vůči určité velikosti markeru.

$$\text{marker size [mm]} = \frac{x}{\cos(45^\circ)} \times 0.104222 \quad (1)$$

x ... šířka logistické cesty [mm]

4 Diskuze

Rozšířená realita ve spojení s venkovní navigací je bezesporu málo probádanou oblastí. Proto je nezbytné se touto oblastí zabývat, jelikož přináší velký potenciál. Přesto narážíme na limity, ať hardwarové či softwarové, což potvrdilo i naše pilotní měření. Výhodou uvedeného řešení je samotné využití markerů, jelikož definují přesnou polohu navigačních virtuálních objektů a není tudíž potřeba dalšího speciálního hardwaru. Zásadní nevýhodou je nutnost implementace poměrně husté sítě značek, dále hrozí zničení sloupku s markerem. Je také možné, že za zhoršených podmínek (sníh, déšť, vítr) nebude možné dekodovat marker, stejně tak uveďme riziko neidentifikace lesklých ploch markeru při slunném počasí. Je nutné zvýšit opatrnost při jízdě s nákladními vozy/osobními vozy v blízkosti markerů. Markery neřeší přesnou identifikaci konkrétního hledaného objektu, napomáhají zejména pro

zpřesnění samotné navigace. Pro tento prvek je potřebné doplnit o sadu nových markerů, které k tomuto účelu budou sloužit. Zejména obtížnější je detekce markeru pod ostřejším úhlem. Lze konstatovat, že význam dopřesnění navigačního systému je vhodný především u pěší navigace ve skladu.

Zde se zaměříme spíše na jiná alternativní řešení. Příkladem lze uvést RTK korekce, zde je velkou výhodou opravdu přesná lokalizace, a to v řádech několika centimetrů [26]. Nevýhodou je nezbytnost být zapsán v síti HxGN SmartNet ke službě Síťová RTK. Nejedná se tedy o bezplatné užívání. Alternativou je propojení s technologií SLAM. Přesto je převážně nejpoužívanější technologií aplikovanou v navigačních systémech právě GPS [11]–[14]. V těchto případech se pouze zmiňuje nepřesnost způsobená GPS, ale nehledá se řešení [12] [15].

5 Závěr

Oblast rozšířené reality ve spojení s navigací v logistice začíná být velmi žádaná a lukrativní oblast výzkumu, přesto je problematika dopřesnění AR navigace málo zkoumána. Ve velké většině případů se přichází s novým navigačním AR systémem, který je založený na GPS a doplněný o rozhraní či vývojářskou sadu třetích stran. V těchto článcích se na nepřesnost způsobenou GPS naráží, ale dále nerozvádí. Pouze v několika případech se objevuje jiný přístup na řešení nepřesnosti. Jeden velmi přínosný způsob je aplikace GNSS RTK korekce s velkou přesností, přesto se s tímto řešením v komplexním AR navigačním systému nesetkáváme. Všechny tyto navigační systémy se prozatím objevují pouze v pilotních projektech, kde dochází k ověřování funkčnosti systému.

V článku se snažíme objevit nový přístup, jak s touto nepřesností pracovat. A to formou značek, které by dokázaly nepřesnost GPS odladit a virtuální artefakty se na základě těchto značek centrovaly na střed vozovky. Na základě testování SDK Vuforia a softwaru Unity3D se stanovily vzdálenosti dosahu markeru a výsledkem je uvedený matematický aparát. Lze podotknout, že závěrem není pouze matematická závislost, nýbrž i série doporučení. Zejména v oblasti úhlů, ve kterých dokáže software Unity3D společně s Vuforií pracovat. Tím kritickým úhlem je 45 stupňů. Proto je v případě realizace návrhu nutné s tímto limitem počítat.

Závěrem lze konstatovat, že velikost markeru potřebná pro identifikaci je velikostně hraniční riziko, že bude docházet k rušení při orientaci i navigaci. Uvedme příklad, kde šířka silnice je 4500mm. Vychází nám po výpočtu minimální rozměr značky 332mm x 332mm. Též narážíme na velký počet nevýhod spojených s implementací systému. Zejména pro husté umístění značek a pokrytí oblasti pro navigaci. To je způsobené tím, že pod ostřejším úhlem je AR navigace nepoužitelná. Použitelnost tohoto návrhu je již součástí dalšího testování a ověření funkčnosti systému. V rámci dalšího výzkumu hodláme vyvinout funkční software pro outdoorovou navigaci ve skladu včetně

síťového řízení pro vyskladňování zakázky více uživateli najednou. Hodláme nad touto aplikací zkoumat její efektivnost.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen za podpory projektu SGS-2021-028 s názvem "Vývojové a tréninkové prostředky pro interakci člověka a kyber-fyzického výrobního systému" řešeného v rámci Interní grantové agentury Západočeské univerzity v Plzni.

Použitá literatura

- [1] R. T. Azuma, 'A Survey of Augmented Reality', *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, Aug. 1997, doi: 10.1162/pres.1997.6.4.355.
- [2] H. Shoaib and S. W. Jaffry, 'A survey of augmented reality', in *International Conference on Virtual and Augmented Reality (ICV AR 2015)*, 2015, p. 34.
- [3] R. Carey, T. Fields, A. van Dam, D. Venolia, and J. E. Gomez, 'Why is 3-D interaction so hard and what can we really do about it?', in *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, in SIGGRAPH'94. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Jun. 1994, pp. 492–493. doi: 10.1145/192161.192299.
- [4] W. Narzt *et al.*, 'Augmented reality navigation systems', *Univ Access Inf Soc*, vol. 4, no. 3, pp. 177–187, Mar. 2006, doi: 10.1007/s10209-005-0017-5.
- [5] P. Green, 'Crashes Induced By Driver Information Systems and What Can Be Done to Reduce Them', SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2000-01-C008, Nov. 2000. Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2000-01-c008/>
- [6] G. Bhorkar, 'A Survey of Augmented Reality Navigation', 2017, doi: 10.48550/ARXIV.1708.05006.
- [7] Z. F. Yount, S. J. Kass, and J. E. Arruda, 'Route learning with augmented reality navigation aids', *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 88, pp. 132–140, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.trf.2022.05.019.
- [8] O. Palinko *et al.*, 'Towards augmented reality navigation using affordable technology', in *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, in AutomotiveUI '13. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Oct. 2013, pp. 238–241. doi: 10.1145/2516540.2516569.

- [9] B. A. Delail, L. Weruaga, M. J. Zemerly, and J. W. P. Ng, 'Indoor localization and navigation using smartphones augmented reality and inertial tracking', in *2013 IEEE 20th International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS)*, Dec. 2013, pp. 929–932. doi: 10.1109/ICECS.2013.6815564.
- [10] A. Mulloni, H. Seichter, and D. Schmalstieg, 'Handheld augmented reality indoor navigation with activity-based instructions', in *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, in MobileHCI '11. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Aug. 2011, pp. 211–220. doi: 10.1145/2037373.2037406.
- [11] C. O. Chung, Y. He, and H. K. Jung, 'Augmented Reality Navigation System on Android', *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2016, doi: 10.11591/ijece.v6i1.pp406-412.
- [12] J. Rao, Y. Qiao, F. Ren, J. Wang, and Q. Du, 'A Mobile Outdoor Augmented Reality Method Combining Deep Learning Object Detection and Spatial Relationships for Geovisualization', *Sensors*, vol. 17, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2017, doi: 10.3390/s17091951.
- [13] C.-H. Lin, Y. Chung, B.-Y. Chou, H.-Y. Chen, and C.-Y. Tsai, 'A novel campus navigation APP with augmented reality and deep learning', in *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, Apr. 2018, pp. 1075–1077. doi: 10.1109/ICASI.2018.8394464.
- [14] F. Lu, H. Zhou, L. Guo, J. Chen, and L. Pei, 'An ARCore-Based Augmented Reality Campus Navigation System', *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11167515.
- [15] C. Panou, L. Ragia, D. Dimelli, and K. Mania, 'An Architecture for Mobile Outdoors Augmented Reality for Cultural Heritage', *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 7, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2018, doi: 10.3390/ijgi7120463.
- [16] Z. Wang, Q. Tang, and Z. Yang, 'AR Precision Navigation System Based on Baidu Map API', in *2020 IEEE 3rd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET)*, Aug. 2020, pp. 314–317. doi: 10.1109/CCET50901.2020.9213134.
- [17] J.-E. Kilimann, D. Heitkamp, and P. Lensing, 'An Augmented Reality Application for Mobile Visualization of GIS-Referenced Landscape Planning Projects', in *Proceedings of the 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, in VRCAI '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Nov. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1145/3359997.3365712.
- [18] F. Hub and M. Oehl, 'Design and Field Test of a Mobile Augmented Reality Human–Machine Interface for Virtual Stops in Shared Automated

- Mobility On-Demand', *Electronics*, vol. 11, no. 17, Art. no. 17, Jan. 2022, doi: 10.3390/electronics11172687.
- [19] C. Güngör and M. F. Akbaş, 'Arttırılmış Gerçeklikte İşaretçi-Tabanlı Takip Sistemleri Üzerine Bir Literatür Çalışması Ve Tasarlanan Çok-Katmanlı İşaretçi Modeli', *deufmd*, vol. 19, no. 56, pp. 599–619, Jan. 2017, doi: 10.21205/deufmd.2017195656.
- [20] R. Romli, A. F. Razali, N. H. Ghazali, N. A. Hanin, and S. Z. Ibrahim, 'Mobile Augmented Reality (AR) Marker-based for Indoor Library Navigation', *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 767, no. 1, p. 012062, Feb. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/767/1/012062.
- [21] S. Rocha and A. Lopes, 'Navigation Based Application with Augmented Reality and Accessibility', in *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, in CHI EA '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Apr. 2020, pp. 1–9. doi: 10.1145/3334480.3383004.
- [22] E. Karan, M. Morkoc, A. Şireci, and K. Fidanboyu, *Indoor and Outdoor Navigation Application Development with Augmented Reality Technology*. 2021, p. 220.
- [23] V. Kasapakis and D. Gavalas, 'Occlusion handling in outdoors augmented reality games', *Multimed Tools Appl*, vol. 76, no. 7, pp. 9829–9854, Apr. 2017, doi: 10.1007/s11042-016-3581-1.
- [24] R. Aoki, H. Tanaka, K. Izumi, and T. Tsujimura, 'Self-Position Estimation based on Road Sign using Augmented Reality Technology', in *2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics*, Sep. 2018, pp. 39–42. doi: 10.1109/MECATRONICS.2018.8495815.
- [25] 'Getting Started with Vuforia Engine in Unity | VuforiaLibrary'. <https://library.vuforia.com/getting-started/getting-started-vuforia-engine-unity> (accessed Feb. 13, 2023).
- [26] F. F. Ling, C. Elvezio, J. Bullock, S. Henderson, and S. Feiner, 'A Hybrid RTK GNSS and SLAM Outdoor Augmented Reality System', in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Osaka, Japan: IEEE, Mar. 2019, pp. 1044–1045. doi: 10.1109/VR.2019.8798315.