SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

Ing. Kamil Kušnirák

Autoreferát dizertačnej práce

METÓDA NASADENIA 3D PRIESTOROVÝCH IDENTIFIKÁTOROV PRE AR-ASISTOVANÚ NAVIGÁCIU V SKLADOVEJ LOGISTIKE

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy

v študijnom odbore kybernetika

Miesto a dátum: Bratislava, 2026

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Kamil Kušnirák

Autoreferát dizertačnej práce

METÓDA NASADENIA 3D PRIESTOROVÝCH IDENTIFIKÁTOROV PRE AR-ASISTOVANÚ NAVIGÁCIU V SKLADOVEJ LOGISTIKE

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy

Miesto a dátum: Bratislava, 2026

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia

Na	Ústave automobilovej mechatroniky Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave (FEI STU BA)
Predkladateľ:	Ing. Kamil Kušnirák Ústav automobilovej mechatroniky FEI STU BA, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava
Školiteľ:	doc. Ing. Oto Haffner, PhD. Ústav automobilovej mechatroniky FEI STU BA, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava
Oponenti:	RNDr. Ján Lacko, PhD. Fakulta informatiky, Paneurópska vysoká škola Tematínska 10, 851 05 Bratislava
	Ing. Frederik Valocký, PhD. AI Forge s. r. o. Topoľová ulica 1155/14, 900 25 Chorvátsky Grob

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 10. 9. 2026 o 9:30

Na	Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava, v miestnosti D124

prof. Ing. Danica Rosinová, PhD.
predsedníčka odborovej komisie

SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program:	Mechatronické systémy
Autor:	Ing. Kamil Kušnirák
Dizertačná práca:	Metóda nasadenia 3D priestorových identifikátorov pre AR-asistovanú navigáciu v skladovej logistike
Vedúci záverečnej práce:	doc. Ing. Oto Haffner, PhD.
Miesto a rok predloženia práce:	Bratislava 2026

Dizertačná práca sa zaoberá návrhom a simulačným overením metódy nasadenia 3D priestorových identifikátorov na podporu relokalizácie autonómneho vozíka v skladovom prostredí. Jej cieľom je navrhnúť metódu nasadenia 3D priestorových identifikátorov a kvantifikovať prínos ich všesmerovej dostupnosti oproti jednostranným 2D plošným markerom pri AR-asistovanej navigácii autonómneho vozíka. Navrhnutá metóda bola overená úplným faktoriálnym experimentom v simulačnom prostredí Unity. V hlavnom experimente bolo vykonaných 10 800 behov. Priestorová referencia dosiahla 5,7-násobne vyššie pokrytie identifikátorov a o 30,3 percentuálneho bodu vyššiu mieru dokončenia navigačných misií. Ako dominantný parameter bol identifikovaný detekčný dosah. Robustnosť výsledkov bola overená na štvorcovom pôdoryse a pôdorysoch v tvare L a U, spolu v 32 400 behoch. Práca zároveň navrhuje postup analýzy nepokrytých miest založený na priestorovom vyhodnotení strát orientácie. Výsledky kvantifikujú navigačný prínos všesmerovej geometrickej dostupnosti za stanovených simulačných podmienok a vytvárajú základ na návrh a optimalizáciu vizuálnej relokalizačnej infraštruktúry pred jej fyzickou inštaláciou.

Kľúčové slová: 3D priestorový identifikátor, 2D plošný marker, rozšírená realita, skladová logistika, autonómny vozík, Unity, faktoriálny experiment, robustnosť

ABSTRACT

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study Programme:	Mechatronic Systems
Author:	Ing. Kamil Kušnirák
Thesis:	Deployment Method of 3D Spatial Identifiers for AR-Assisted Navigation in Warehouse Logistics
Supervisor:	doc. Ing. Oto Haffner, PhD.
Place and year of submission:	Bratislava 2026

This dissertation addresses the design and simulation-based validation of a method for deploying 3D spatial identifiers to support the relocalization of an autonomous vehicle in a warehouse environment. Its aim is to design a deployment method for 3D spatial identifiers and to quantify the benefit of their all-azimuth availability compared with single-sided 2D planar markers in AR-assisted navigation of an autonomous vehicle. The proposed method was verified by a full factorial experiment in the Unity simulation environment. The main experiment comprised 10,800 runs. The spatial reference achieved 5.7× higher identifier coverage and a 30.3 percentage-point higher mission completion rate. Detection range was identified as the dominant parameter. The robustness of the results was verified on a square floor plan and on L- and U-shaped floor plans, for a total of 32,400 runs. The work also proposes a blind-spot analysis procedure based on the spatial evaluation of orientation losses. The results quantify the navigation benefit of all-azimuth geometric availability under the stated simulation conditions and provide a basis for designing and optimizing a visual relocalization infrastructure prior

to its physical installation.

Keywords: 3D spatial identifier, 2D planar marker, augmented reality, warehouse logistics, autonomous vehicle, Unity, factorial experiment, robustness

Obsah

Úvod **6**

1 Súčasný stav problematiky **8**

2 Ciele dizertačnej práce **12**

3 Výsledky riešenia dizertačnej práce **14**

3.1 Simulačný a merací rámec 14

3.2 Skladová scéna a model detekcie 16

3.3 Hlavný výsledok: 3D priestorový identifikátor oproti 2D plošnému markeru 17

3.4 Faktoriálna analýza: dominantný parameter nasadenia . . 17

3.5 Priestorová analýza a metóda nasadenia 19

3.6 Robustnosť náskoku voči tvaru skladu 23

3.7 Doplnkové kontrolné experimenty 23

4 Diskusia **27**

Záver **29**

Publikačná činnosť autora **31**

Zoznam použitej literatúry **34**

Úvod

Digitalizácia výrobných a logistických procesov zvyšuje požiadavky na spoľahlivé prepojenie fyzických objektov s ich digitálnou identitou, polohou a stavom. Na identifikáciu entít sa v skladoch používajú najmä čiarové a dvojrozmerné kódy, rádiofrekvenčná identifikácia a ďalšie automatické identifikačné technológie, ktoré však v dynamických podmienkach narážajú na obmedzenia súvisiace s potrebou priamej viditeľnosti, orientáciou identifikačného prvku, dosahom a oklúziou. Predložená dizertačná práca sa zaoberá metódou nasadenia 3D priestorových identifikátorov ako alternatívy k jednostranným 2D plošným markerom pri AR-asistovanej navigácii autonómneho vozíka. Hlavným výsledkom práce je reprodukovateľná metóda nasadenia a jej experimentálne overenie úplným faktoriálnym simulačným experimentom, ktorý kvantifikuje navigačný prínos priestorovej referencie.

Ťažiskom práce je praktická časť: návrh plne automatizovaného simulačného a meracieho reťazca (Unity, NavMesh, Vuforia Engine, dávkové behy bez grafického rozhrania) a úplný faktoriálny experiment porovnávajúci dva režimy detekcie — 3D priestorový identifikátor a 2D plošný marker. Najvýznamnejším vedeckým prínosom je kvantifikované preukázanie, že všesmerová dostupnosť priestorovej referencie výrazne zvyšuje robustnosť navigácie (vyššie pokrytie a vyššia miera dokončenia misií), spolu s určením dominantného parametra nasadenia a s návrhom metódy analýzy nepokrytých miest, ktorá umožňuje rozmiestniť identifikátory ešte pred fyzickou inštaláciou. Práca zámerne nerieši návrh geometrie ani výrobu samotného identifikátora — tie sú predmetom súvisiaceho výskumu v rámci širšieho projektového rámca — a sústreďuje sa výhradne na metódu jeho nasadenia.

Autoreferát v skrátenej forme zhŕňa súčasný stav problematiky, ciele práce, dosiahnuté výsledky a diskusiu; podrobné odvodenia, kompletnú metodiku a úplné výsledky obsahuje samotná dizertačná práca.

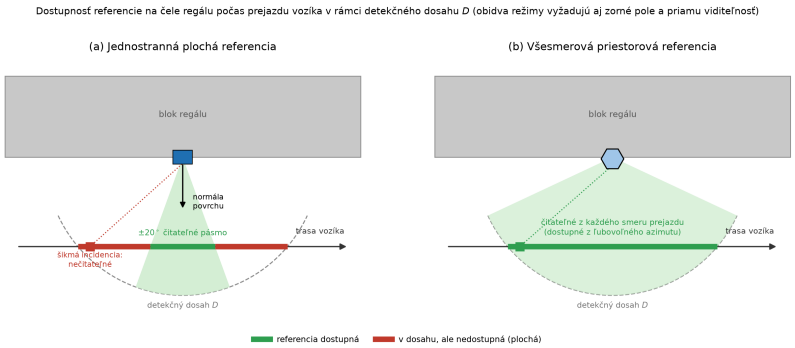
Záver zhŕňa prínosy práce a načrtáva možnosti ďalšieho výskumu a jeho význam pre odbor.

1 Súčasný stav problematiky

Digitalizácia intralogistiky vyžaduje spoľahlivé priradenie fyzického objektu k jeho digitálnej identite, polohe a stavu. Na automatickú identifikáciu a lokalizáciu entít sa v sklade používajú čiarové a dvojrozmerné kódy, rádiofrekvenčná identifikácia, optické rozpoznávanie znakov a strojové videnie; ich spoľahlivosť závisí od vzdialenosti, uhla pohľadu, osvetlenia a čiastočného zakrytia nosiča. Nasadenie autonómnych mobilných robotov navyše stojí a padá na spoľahlivej relokalizácii voči mape skladu, ktorá v repetitívnej geometrii regálových uličiek vyžaduje známe vizuálne orientačné body [5, 14]. Rozšírená a zmiešaná realita pritom prepájajú fyzické pracovisko s digitálnymi informáciami a ich praktická hodnota závisí od presnej registrácie obsahu, teda od geometrického zosúladenia virtuálnych prvkov s fyzickou scénou [1, 11]. Práve tu sa klasická identifikácia spája s geometrickou dostupnosťou vizuálnej referencie, ktorá je jadrom tejto práce.

Syntéza súčasného stavu vedie k trom pozorovaniam. *Po prvé*, jednostranný 2D plošný marker (napríklad QR, ArUco či AprilTag) má jedinú privilegovanú normálu, je čitateľný len z ohraničeného kužeľa smerov a trpí dvojznačnosťou odhadu pózy pri malých uhloch a väčších vzdialenostiach; priestorová, všesmerovo (all-azimuth) dostupná referencia tieto obmedzenia zmierňuje tým, že rozkladá pozorovacie smery do celého azimutu a ponúka viac kódovaných častí [4, 6, 8, 13]. *Po druhé*, hoci vlastnosti jednotlivých markerov – presnosť, dosah a odolnosť voči zakrytiu – sú v literatúre dobre preskúmané a rozmiestňovanie orientačných bodov sa rieši ako optimalizačná úloha, dôsledok rozdielu medzi jednostrannou a všesmerovou dostupnosťou pre spoľahlivosť lokalizácie a navigácie na úrovni celej úlohy sa kvantifikuje len zriedka [7, 9]. *Po tretie*, medzi hodnotením na úrovni obrazu a presnosti pózy na jednej strane a hodnotením celého systému v reálnej prevádzke na strane druhej chýba reprodukovateľné, kontrolované hodnotenie, ktoré by sys-

tematicky menilo geometrické parametre referencie a prostredia a izolovalo vplyv azimutálnej dostupnosti od ostatných faktorov [2, 3, 12]. Rozdiel v geometrickej dostupnosti oboch typov referencie ilustruje obr. 1.

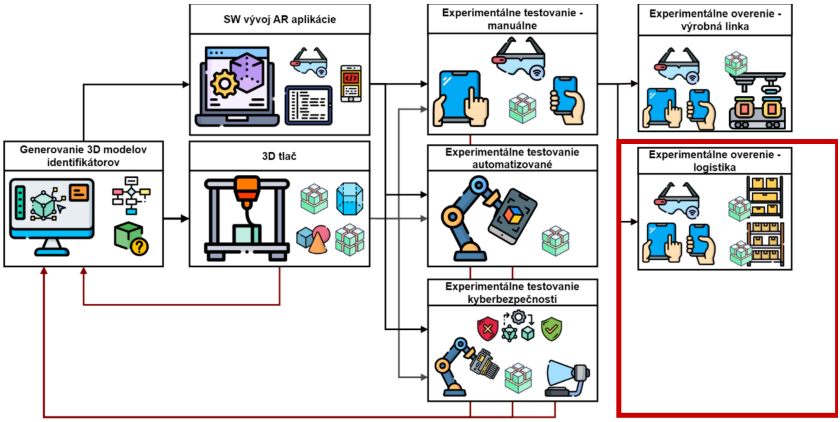


Obrázok 1: Rozdiel v geometrickej dostupnosti: jednostranný 2D plošný marker je čitateľný len z úzkeho kužeľa okolo svojej normály, kým 3D priestorový identifikátor poskytuje použiteľný odhad pózy z celého azimutu

Práca vzniká v rámci projektu APVV-23-0123, ktorý spája programatické generovanie a výrobu samotného 3D priestorového identifikátora s jeho overením v aplikačných doménach. Návrh a tvorba identifikátora (geometria, kódovanie, aditívna výroba) sú predmetom samostatného riešiteľského balíka; táto práca preberá identifikátor ako danú vizuálnu referenciu s vlastnosťou všesmerovej dostupnosti a sústreďuje sa na metódu jeho nasadenia v skladovom prostredí a na overenie jeho navigačného prínosu (obr. 2) [10].

Vyhodnotenie súčasného stavu problematiky

Zo syntézy vyplýva výskumná medzera. Vlastnosti plošných markerov aj metódy rozmiestňovania orientačných bodov sú preskúmané, chýba však **systematické, reprodukovateľné a kontrolované hodnotenie toho, ako sa rozdiel medzi jednostrannou a všesmerovou dostupnosťou re-**



Obr. 1 Ilustrácia vývojovo-experimentálnej platformy - softvérové a hardvérové komponenty a moduly a ich vzájomné prepojenie

Obrázok 2: Zaradenie práce do projektu APVV-23-0123: overenie 3D priestorového identifikátora v logistických skladoch, ktoré simulačne rieši táto práca, tvorí samostatný celok vecného plánu projektu

ferencie prejaví na úrovni celej navigačnej úlohy autonómneho vozíka v sklade. Smerová závislosť plošného markeru môže vytvárať nepokryté úseky trasy, v ktorých nie je dostupná vhodná referencia na obnovenie polohy (obr. 1); nie je však dostatočne kvantifikované, do akej miery priestorová referencia tento nedostatok odstraňuje a ktoré parametre nasadenia o tom rozhodujú. Prácu formulujeme technologicky neutrálne, ako model geometrickej dostupnosti referencie, čím sú jej závery prenosné medzi rôznymi implementáciami priestorových referencií. Túto medzeru zapĺňa predložená práca.

2 Ciele dizertačnej práce

V regálových uličkách mobilný robot často pozoruje referencie z bočných a priečnych smerov. Jednostranný 2D plošný marker s jednou privilegovanou normálou preto môže vytvárať nepokryté úseky, v ktorých navigácia stráca absolútnu referenciu. **Primárnym cieľom práce je navrhnúť reprodukovateľnú metódu nasadenia programaticky generovaných 3D priestorových identifikátorov v skladovom prostredí a kvantifikovať ich robustnosť pri AR-asistovanej navigácii autonómneho vozíka oproti konvenčnému 2D plošnému markeru.** Práca nerieši návrh geometrie ani výrobu identifikátora – tie sú predmetom súvisiaceho výskumu v rámci projektu – a preberá identifikátor ako danú vizuálnu referenciu s predpokladanou všesmerovou dostupnosťou.

Z primárneho cieľa vyplývajú čiastkové ciele:

1. **Simulačný a merací rámec** – navrhnúť plne automatizovaný, deterministický a reprodukovateľný reťazec pre dávkové simulačné behy autonómneho vozíka so zberom telemetrie bez skreslenia.

2. **Faktoriálny experiment** – porovnať režim 3D priestorového identifikátora s režimom 2D plošného markeru pri kontrolovanej zmene parametrov nasadenia (umiestnenie referencií, zorné pole, krok obnovy orientácie, detekčný dosah).

3. **Metriky dostupnosti a robustnosti** – definovať a merať pokrytie identifikátorov, mieru dokončenia navigačných misií a výskyt strát orientácie.

4. **Metóda nasadenia (analýza nepokrytých miest)** – vypracovať postup na exaktné mapovanie a rozmiestnenie identifikátorov v ľubovoľnej skladovej topológii ešte pred fyzickou inštaláciou.

5. **Overenie robustnosti** – preukázať platnosť záverov nezávisle od tvaru skladu a doplnkovými kontrolnými experimentmi.

Na overenie sme sformulovali štyri hypotézy:

H1 3D priestorový identifikátor dosahuje vyššie pokrytie identifikátorov než 2D plošný marker.

H2 3D priestorový identifikátor dosahuje vyššiu mieru dokončenia navigačných misií.

H3 Miera navigačného prínosu závisí od parametrov nasadenia, pričom dominantným je detekčný dosah.

H4 2D plošný marker zlyháva najmä v regálových uličkách pri bočnom pozorovaní, kým 3D identifikátor si tam pokrytie udrží.

3 Výsledky riešenia dizertačnej práce

Ťažiskom práce je návrh simulačnej metódy nasadenia a jej experimentálne overenie. Nasledujúce podkapitoly opisujú simulačný rámec a metodiku, skladovú scénu a model detekcie, hlavný výsledok porovnania, faktoriálnu analýzu, metódu nasadenia a overenie robustnosti.

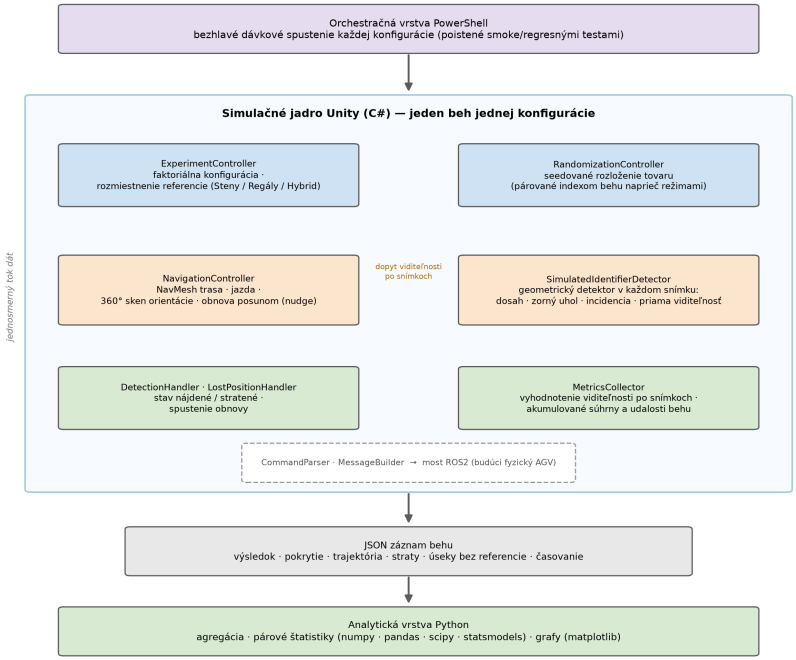
3.1 Simulačný a merací rámec

Rámec je postavený na hernom engine Unity 6 s navigačným systémom NavMesh a knižnicou Vuforia Engine na rozpoznávanie referencií. Autonómny vozík je reprezentovaný agentom `ARCamera`, ktorý sleduje navigačnú sieť medzi cieľmi a pri strate orientácie spúšťa mechanizmus obnovy (rotácia a opätovné vyhľadanie referencie). Celý experiment beží dávkovo, bez grafického rozhrania (headless), s deterministickým riadením náhodnosti, takže dva behy s rovnakým semienkom sú identické a výsledky sú plne reprodukovateľné. Architektúru rámca a jednosmerný tok dát od konfigurácie experimentu po zber telemetrie znázorňuje obr. 3.

Experiment má podobu úplného faktoriálneho návrhu so štyrmi faktormi (umiestnenie referencií, zorné pole kamery, krok obnovy orientácie a detekčný dosah), spolu 54 konfigurácií. Každá konfigurácia sa opakuje $n = 100$-krát, čo dáva 5 400 behov na jeden režim detekcie a **10 800 behov spolu**. Oba režimy – 3D priestorový identifikátor a 2D plošný marker – bežia v identickom rámci s rovnakými pozíciami referencií, rovnakou seedovanou postupnosťou a rovnakými trasami, takže k-ty beh 3D režimu je párovaný s k-tym behom 2D režimu. Jediným rozdielom medzi režimami je model čitateľnosti referencie, čím sa izoluje vplyv azimutálnej dostupnosti od ostatných faktorov. Skúmané faktory a ich úrovne zhŕňa tab. 1.

Tabuľka 1: Faktory úplného faktoriálneho experimentu a ich úrovne ($3 \times 3 \times 2 \times 3 = 54$ konfigurácií)

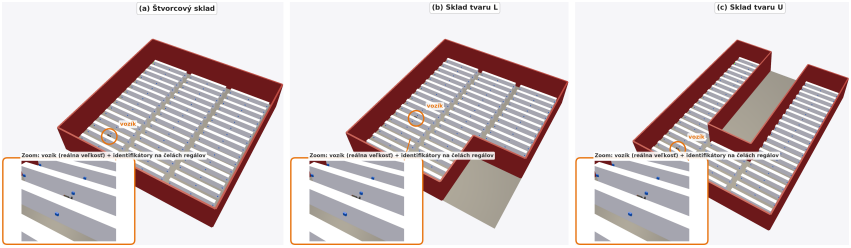
Faktor	**Význam**	**Úrovne**
A	Schéma rozmiestnenia identifikátorov	3 schémy
B	Zorné pole kamery (FOV)	60°, 90°, 120°
C	Krok obnovy orientácie	2 úrovne
D	Detekčný dosah	2, 4, 8 m



Obrázok 3: Architektúra simulačného a meracieho rámca a jednosmerný tok dát od konfigurácie experimentu po zber telemetrie

3.2 Skladová scéna a model detekcie

Základnou scénou je štvorcový sklad s regálmi a uličkami, v ktorom vozík prechádza medzi vstupom, regálovými pozíciami a výstupom; z rovnakých stavebných blokov rámec generuje aj scény so štvorcovým, L a U pôdorysom, ktoré slúžia na overenie robustnosti (obr. 4). Referencie sú rozmiestnené na čelách regálov a na obvodových stenách. Rozdiel medzi režimami je čisto v geometrii čitateľnosti: 2D plošný marker je detegovateľný len v rámci kužeľa okolo svojej normály (obmedzený polouhol čitateľnosti), zatiaľ čo 3D priestorový identifikátor je čitateľný z celého azimutu okolo zvislej osi. Tým rámec technologicky neutrálne modeluje geometrickú dostupnosť referencie, nie úplnú obrazovú výkonnosť konkrétneho fyzického identifikátora.



Obrázok 4: Simulačné scény skladu v prostredí Unity 6 pre tri pôdorysy: (a) štvorcový, (b) L a (c) U sklad; vo výreze je autonómny vozík v reálnej veľkosti a identifikátory na čelách regálov

Počas každého behu sa zaznamenáva telemetria: prvé detekcie jednotlivých referencií, počet a poloha strát orientácie, priebežné pokrytie a výsledok misie (dokončená/nedokončená). Z nej sa počítajú tri hlavné metriky – **pokrytie identifikátorov** (podiel referencií zachytených počas jazdy), **miera dokončenia misií** a **počet strát orientácie** – doplnené o priemerný počet videných identifikátorov na beh.

3.3 Hlavný výsledok: 3D priestorový identifikátor oproti 2D plošnému markeru

Z hľadiska celkovej úspešnosti dosiahol 3D priestorový identifikátor **5,7-násobne vyššie pokrytie identifikátorov** (41,6 % oproti 7,3 %), o **30 percentuálnych bodov vyššiu mieru dokončenia misií** (86,2 % oproti 55,9 %) a **6,1-násobne vyšší počet rozpoznaných identifikátorov na beh** (80,8 oproti 13,2). Rozdiel je štatisticky vysoko významný ($p < 0{,}001$) s mimoriadne veľkou vecnou významnosťou (Cohenovo $d \approx 2$), a to párovými aj nepárovými testami. Hlavné metriky zhŕňa tab. 2 a vizuálne ich porovnáva obr. 5. Hypotézy **H1** a **H2** sa tým potvrdili.

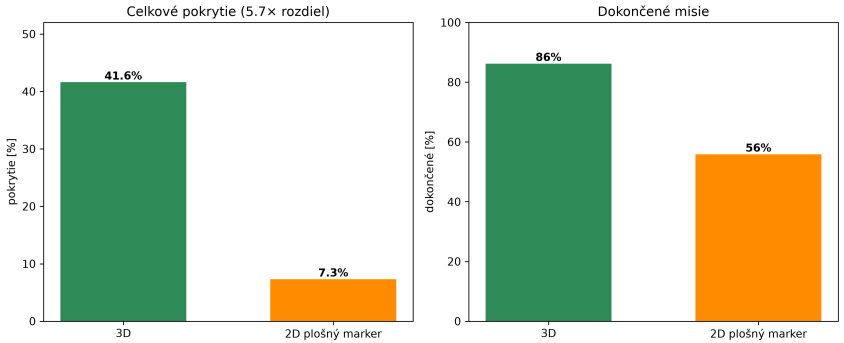
Tabuľka 2: Hlavné metriky: 3D priestorový identifikátor oproti 2D plošnému markeru ($n = 100$, 5 400 behov na režim)

Metrika	**3D**	**2D**	**Pomer**
Pokrytie identifikátorov	41,6 %	7,3 %	5,7×
Dokončené misie	86,2 %	55,9 %	+30 p. b.
Videné identifikátory / beh	80,8	13,2	6,1×

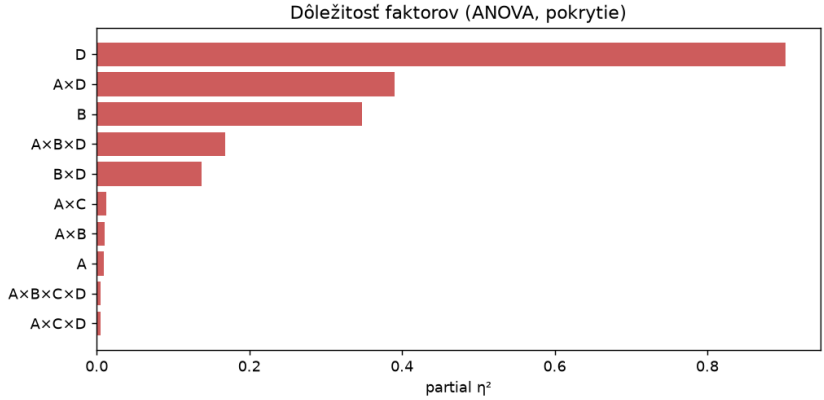
3.4 Faktoriálna analýza: dominantný parameter nasadenia

Úplný faktoriálny návrh umožnil kvantifikovať vplyv jednotlivých parametrov nasadenia faktoriálnou analýzou rozptylu (ANOVA). Ukázalo sa, že o robustnosti navigácie rozhoduje predovšetkým **detekčný dosah** (parciálne $\eta^2 \approx 0{,}90$; obr. 6), nasledovaný interakciou umiestnenia referencií s dosahom. Ostatné faktory (zorné pole, krok obnovy orientácie) mali menší vplyv. Tým sa potvrdila hypotéza **H3**.

Analýza závislosti pokrytia od detekčného dosahu (obr. 7) navyše ukázala kvalitatívne odlišné správanie oboch režimov: pokrytie 3D priestorového identifikátora s rastúcim dosahom strmo rastie, zatiaľ

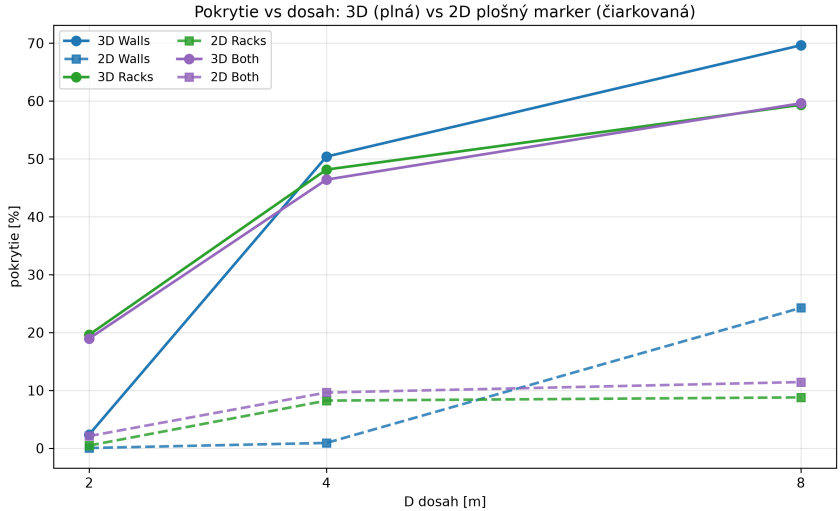


Obrázok 5: Súhrnné porovnanie 3D priestorového identifikátora a 2D plošného markeru v troch hlavných metrikách (pokrytie identifikátorov, podiel dokončených misií, priemerný počet videných identifikátorov), agregované cez 5 400 behov na režim



Obrázok 6: Dôležitosť faktorov (parciálne η^2) pre pokrytie identifikátorov: detekčný dosah je zďaleka najvplyvnejším parametrom nasadenia

čo 2D plošný marker zostáva nízky aj pri veľkom dosahu. V regálových uličkách, kde vozík vidí referencie prevažne z boku, plošný marker prakticky zlyháva – čím sa potvrdila hypotéza **H4**. Hlavné efekty jednotlivých faktorov s 95 % intervalmi spoľahlivosti zhŕňa obr. 8.

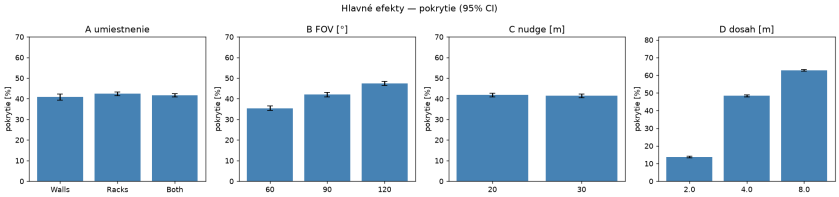


Obrázok 7: Priemerné pokrytie identifikátorov v závislosti od detekčného dosahu pre oba režimy; priestorový identifikátor profituje z dosahu výrazne strmšie

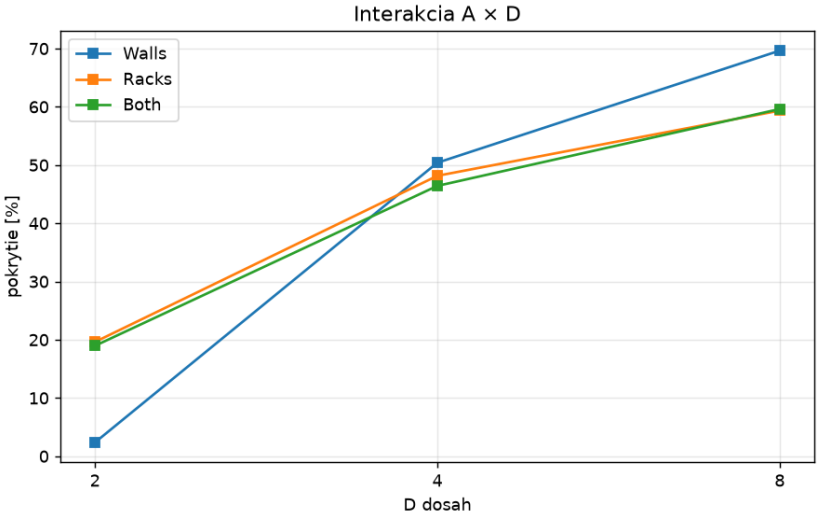
Významná je aj interakcia umiestnenia referencií s detekčným dosahom (obr. 9): vplyv dosahu závisí od toho, kde sú identifikátory rozmiestnené, čo je typický znak interakcie a zároveň praktický návod, že dosah a umiestnenie treba ladiť spoločne.

3.5 Priestorová analýza a metóda nasadenia

Nad rámec agregovaných metrík sme vyvinuli **metódu analýzy nepokrytých miest**. Zo záznamov o polohách strát orientácie sa zostaví tep-

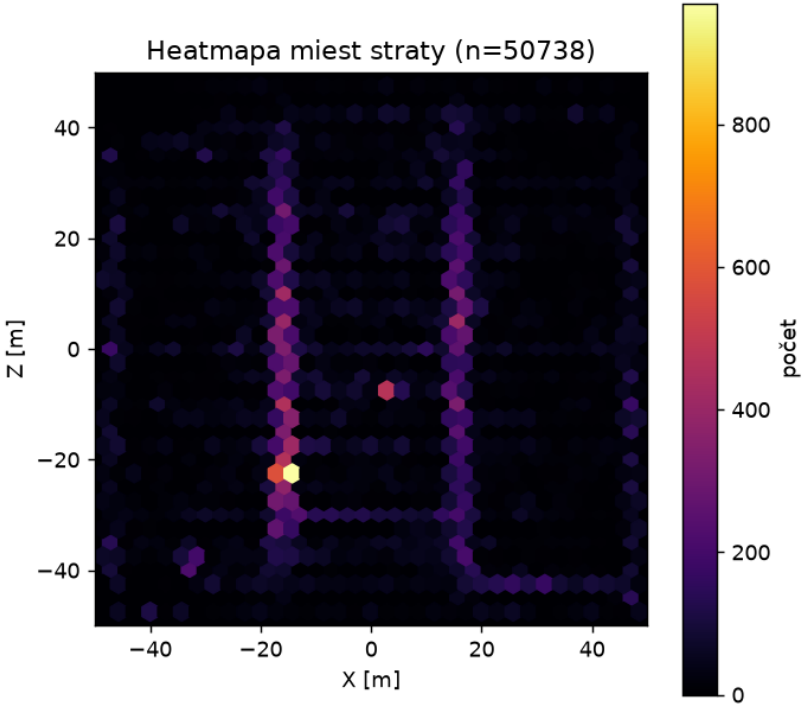


Obrázok 8: Hlavné efekty faktorov na pokrytie identifikátorov s 95 % intervalmi spoľahlivosti (režim 3D); dominancia detekčného dosahu je zreteľná



Obrázok 9: Interakcia umiestnenie × dosah (režim 3D): krivky pokrytia pre jednotlivé umiestnenia nie sú rovnobežné, vplyv dosahu teda závisí od umiestnenia identifikátorov

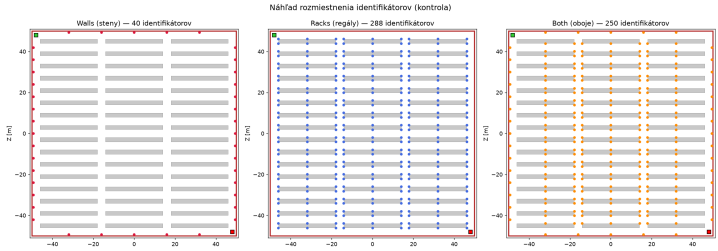
lotná mapa skladu, ktorá zvýrazní pásy a zóny, kde navigácia najčastejšie stráca absolútnu referenciu (obr. 10). Tieto zóny priamo určujú, kam treba doplniť, premiestniť alebo pootočiť identifikátory, prípadne upraviť parametre snímacieho systému.



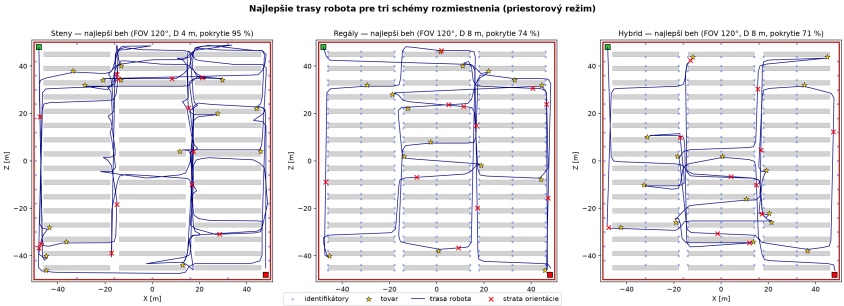
Obrázok 10: Teplotná mapa miest straty orientácie (nepokryté pásy) v sklade; teplejšie bunky označujú zóny, kde treba doplniť alebo premiestniť identifikátory

Postup je reprodukovateľný a prenositeľný na ľubovoľnú skladovú topológiu: pred fyzickou inštaláciou umožňuje simulačne analyzovať dostupnosť referencií, identifikovať nepokryté miesta a navrhnúť

vhodné rozmiestnenie relokalizačnej infraštruktúry (obr. 11). Tým sa napĺňa hlavný cieľ práce – metóda nasadenia, nie návrh samotného identifikátora. Príklady najlepších trás vozíka v režime 3D priestorového identifikátora s priebežným pokrytím referencií pozdĺž trasy ukazuje obr. 12.



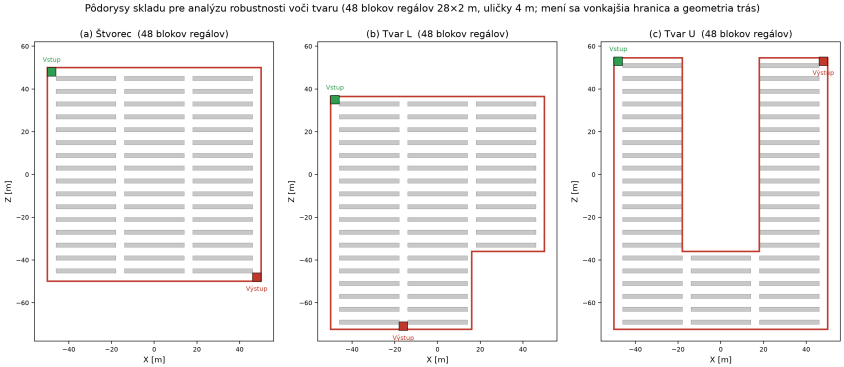
Obrázok 11: Schéma metódy nasadenia: z analýzy nepokrytých miest vyplýva úprava rozmiestnenia identifikátorov ešte pred inštaláciou



Obrázok 12: Príklady najlepších trás autonómneho vozíka v režime 3D priestorového identifikátora; farebne je vyznačené priebežné pokrytie referencií pozdĺž trasy

3.6 Robustnosť náskoku voči tvaru skladu

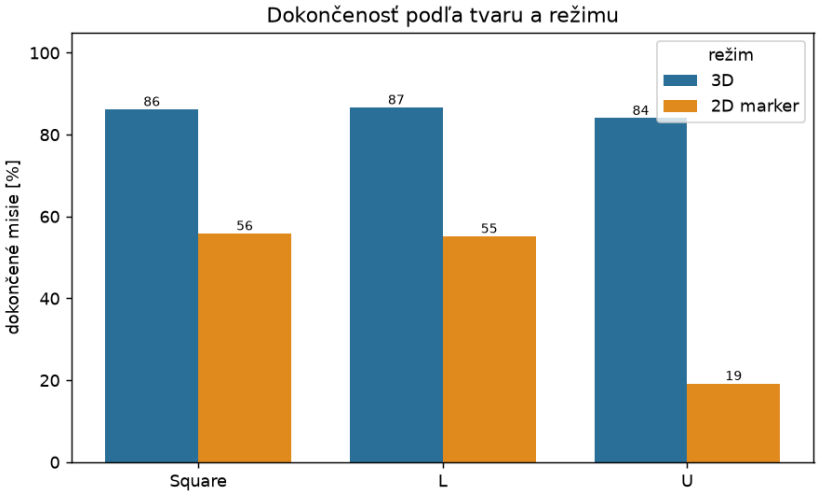
Aby sme overili, že zistený náskok nie je artefaktom jednej scény, zopakovali sme celý faktoriálny experiment na troch pôdorysoch skladu – štvorcovom, L a U (obr. 13). Spolu s pôvodným experimentom tak bolo vykonaných **32 400 behov**. Náskok 3D priestorového identifikátora zostal vo všetkých troch tvaroch v podstate rovnaký (pomer pokrytia 5,3–5,7×); interakcia režim × tvar bola zanedbateľná ($\eta^2 = 0{,}004$). V úzkom U-tvare, ktorý je pre navigáciu najnáročnejší, klesla dokončenosť 2D plošného markeru výrazne (na približne 19 %), kým 3D priestorový identifikátor si udržal vysokú úspešnosť (okolo 84 %; obr. 14) – náročnejšia geometria teda náskok priestorovej referencie ešte zväčšuje.



Obrázok 13: Tri pôdorysy skladu použité v analýze robustnosti: štvorec, L a U

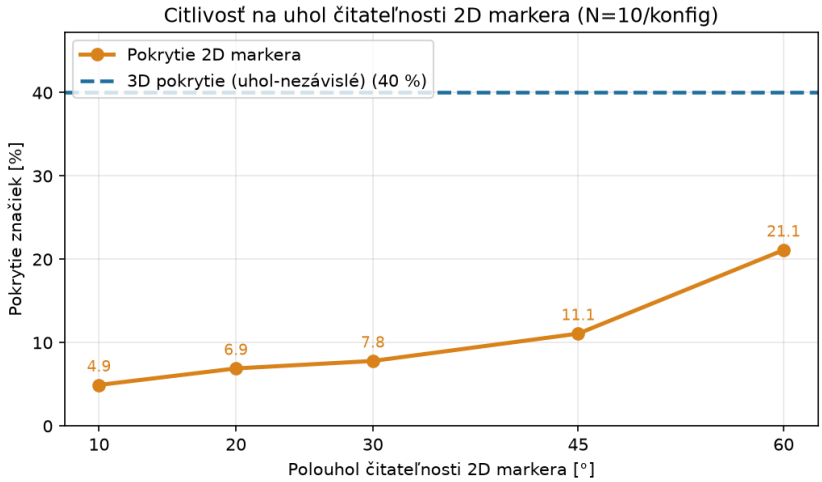
3.7 Doplnkové kontrolné experimenty

Závery sme podrobili trom doplnkovým kontrolám. **Citlivosť na uhol čitateľnosti** plošného markeru potvrdila, že náskok 3D identifikátora pretrváva naprieč celým rozsahom uvažovaných polouhlov čitateľnosti.



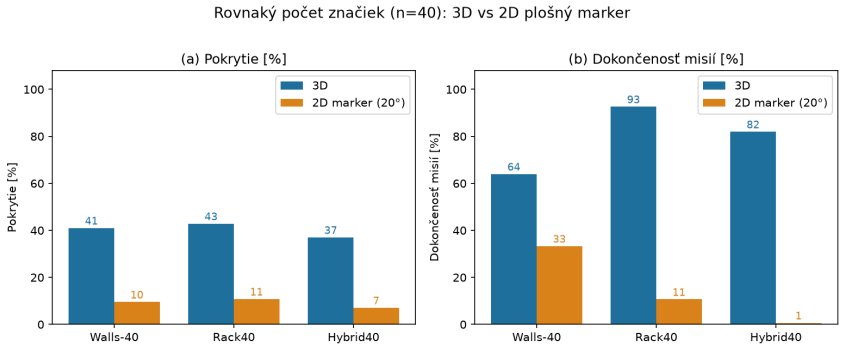
Obrázok 14: Miera dokončenia misií podľa tvaru skladu a režimu detekcie; náskok 3D priestorového identifikátora je nezávislý od tvaru a v náročnom U-tvare sa zväčšuje

Kontrola pri rovnakom počte identifikátorov (presne 40 referencií na obe schémy) vylúčila, že náskok vzniká len z väčšieho počtu referencií – 3D identifikátor dominoval aj pri identickom počte. **Prevádzkové metriky normalizované trasou a časom** (napr. straty orientácie na prejdený meter a na jednotku času) vyzneli takisto v prospech priestorového identifikátora. Všetky tri kontroly potvrdzujú stabilitu hlavného zistenia; ich výsledky ilustrujú obr. 15 a obr. 16.



Obrázok 15: Kontrola citlivosti na uhol čitateľnosti plošného markeru: náskok 3D priestorového identifikátora pretrváva naprieč celým rozsahom polouhlov čitateľnosti

Celkový stav overenia hypotéz zhŕňa tab. 3.



Obrázok 16: Kontrola pri rovnakom počte identifikátorov (presne 40 na obe schémy): 3D priestorový identifikátor dominuje aj pri identickom počte referencií

Tabuľka 3: Stav hypotéz po vyhodnotení faktoriálneho experimentu

Hyp.	**Znenie (skrátene)**	**Stav**
H1	3D dosahuje vyššie pokrytie identifikátorov	potvrdená
H2	3D dosahuje vyššiu mieru dokončenia misií	potvrdená
H3	dominantný parameter nasadenia je detekčný dosah	potvrdená
H4	2D zlyháva v uličkách pri bočnom pozorovaní	potvrdená

4 Diskusia

Navrhnutá metóda cieli na triedu skladových a intralogistických prevádzok, v ktorých autonómne vozíky navigujú v repetitívnej geometrii regálových uličiek s premenlivým obsahom – teda na typické prostredie konceptu Industry 4.0. Výsledky sú formulované technologicky neutrálne, ako model geometrickej dostupnosti referencie, a preto sú prenosné medzi rôznymi implementáciami priestorových referencií, nezávisle od konkrétnej realizácie identifikátora.

Metóda nasadenia má priamy praktický význam: umožňuje pred fyzickou inštaláciou analyzovať dostupnosť referencií, odhaliť nepokryté miesta a navrhnúť rozmiestnenie relokalizačnej infraštruktúry, čím znižuje riziko a náklady nasadenia. Rovnaký princíp všesmerovej referencie možno v budúcnosti uplatniť aj pri navigácii pracovníkov so zariadeniami rozšírenej reality.

Z prevádzkového hľadiska je podstatné, že náskok priestorovej referencie sa prejavuje najvýraznejšie práve v náročnej geometrii regálových uličiek, teda tam, kde plošný marker pozorovaný z boku najčastejšie zlyháva a kde vznikajú nákladné prestoje autonómnych vozíkov. Vyššie pokrytie a spoľahlivejšia relokalizácia sa tak priamo premietajú do vyššej miery dokončených misií a plynulejšej prevádzky. Keďže výsledky sú formulované ako model geometrickej dostupnosti, sú prenositeľné medzi rôznymi skladovými topológiami aj typmi priestorových referencií a poskytujú kvantitatívny podklad pre rozhodnutie o voľbe identifikačnej infraštruktúry v kontexte Industry 4.0 a 5.0.

Navrhované riešenie má aj svoje hranice. Experiment porovnáva geometrické modely dostupnosti, nie úplnú obrazovú výkonnosť fyzických identifikátorov: simulácia nemodeluje v plnom rozsahu zmeny osvetlenia, obrazový šum, pohybové rozmazanie, výrobnú presnosť ani chyby konkrétneho detekčného algoritmu. Výsledky preto vyjadrujú navigačný prínos všesmerovej dostupnosti za stanovených simulačných

podmienok a ich prenos do reálnej prevádzky si vyžaduje nadväzujúce fyzické overenie. Priestorové identifikátory pritom nemajú nahradiť odometriu, inerciálne snímače, laserové skenery ani vizuálny SLAM, ale dopĺňať ich ako absolútna vizuálna referencia pri inicializácii, korekcii driftu a obnove globálnej pózy.

Prezentované metódy sú zovšeobecniteľné pre ďalší výskum aj technickú prax. Ďalší vývoj zahŕňa fyzické overenie na reálnom vozíku a fyzických identifikátoroch, rozšírenie modelu detekcie o obrazové podmienky, automatickú optimalizáciu rozmiestnenia identifikátorov a integráciu metódy do nástrojov pre návrh skladových prevádzok.

Záver

Dizertačná práca navrhla a experimentálne overila reprodukovateľnú metódu nasadenia programaticky generovaných 3D priestorových identifikátorov v skladovom prostredí a kvantifikovala ich robustnosť oproti konvenčnému 2D plošnému markeru pri AR-asistovanej navigácii autonómneho vozíka.

Teoretická časť zhrnula inteligentnú logistiku, rozšírenú a zmiešanú realitu, metódy identifikácie, lokalizácie a relokalizácie, vlastnosti vizuálnych a priestorových referencií a možnosti ich rozmiestnenia; z analýzy vyplynula medzera – absencia systematického a reprodukovateľného hodnotenia prínosu všesmerovej dostupnosti na úrovni celej navigačnej úlohy. Praktická časť sformulovala ciele a hypotézy, navrhla plne automatizovaný simulačný a merací rámec (Unity, NavMesh, Vuforia, dávkové behy bez grafiky) a úplným faktoriálnym experimentom (10 800 behov, s replikou na troch tvaroch skladu spolu 32 400 behov) porovnala oba režimy detekcie. Záverečná časť diskutovala platnosť, obmedzenia a praktické využitie výsledkov.

Stanovené ciele boli splnené a všetky štyri hypotézy potvrdené. Hlavné prínosy dizertačnej práce možno zhrnúť nasledovne:

- Návrh reprodukovateľnej metódy nasadenia 3D priestorových identifikátorov na podporu relokalizácie a AR-asistovanej navigácie autonómneho vozíka v skladovom prostredí.
- Kvantifikácia navigačného prínosu všesmerovej geometrickej dostupnosti, pričom 3D priestorová referencia dosiahla oproti jednostrannému 2D plošnému markeru 5,7-násobne vyššie pokrytie identifikátorov a o 30,3 percentuálneho bodu vyššiu mieru dokončenia navigačných misií.
- Identifikácia rozhodujúcich parametrov nasadenia, najmä dominantného vplyvu detekčného dosahu a jeho interakcie s umiestne-

ním identifikátorov.

- Návrh prenositeľného a reprodukovateľného postupu analýzy nepokrytých miest, založeného na priestorovom vyhodnotení strát orientácie, a následnej optimalizácie rozmiestnenia identifikátorov cieleným doplnením alebo premiestnením referencií.
- Vytvorenie reprodukovateľného simulačného a analytického rámca, ktorý umožňuje porovnať rôzne typy referencií, rozmiestnenia a parametre snímacieho systému ešte pred fyzickou inštaláciou v sklade.

Uvedené prínosy predstavujú nové postupy v oblasti nasadenia vizuálnych referencií pre AR-asistovanú skladovú navigáciu; sú zovšeobecniteľné a možno ich ďalej modifikovať pre výskum aj technickú prax. Prechod od plošnej k priestorovej identifikácii prináša signifikantné zvýšenie robustnosti systému a poskytuje pevný základ pre ďalší vývoj v kontexte Industry 4.0 a 5.0. Budúce rozšírenia zahŕňajú fyzické overenie na reálnom vozíku a fyzických identifikátoroch, rozšírenie modelu detekcie o obrazové podmienky a automatickú optimalizáciu rozmiestnenia identifikátorov.

Publikačná činnosť autora

ADC — Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 KOLIMÁR, O. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. — KUŠNIRÁK, K. PetriLink: A Web-Based Platform for Control of Discrete-Event and Hybrid Systems Using Hybrid Colored Petri Nets and OPC UA. In *Symmetry*. Vol. 18, iss. 6 (2026), art. no. 1039. ISSN 2073-8994 (JIF Q2). DOI: 10.3390/sym18061039.

ADM — Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných vo WoS/SCOPUS

ADM01 KUŠNIRÁK, K. — HAFFNER, O. — KUČERA, E. — KOLIMÁR, O. Spatial All-Azimuth Versus Single-Sided Planar Identifiers for Warehouse Robot Navigation: A Factorial Simulation Study. In *Eng*. Vol. 7, iss. 8 (2026), art. no. 394. ISSN 2673-4117. DOI: 10.3390/eng7080394.

AFC — Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 KOLIMÁR, O. — KUŠNIRÁK, K. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. Delivery team management on small software development projects in practice. In *2022 Cybernetics & Informatics (K&I)*. Danvers : IEEE, 2022, [6] s. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: SCOPUS, IEEE.

AFC02 KOLIMÁR, O. — KUŠNIRÁK, K. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. Proposal for Petri Nets Utilisation in the Control of Mechatronic Systems with OPC UA Support. In *Cybernetics & Informatics (K&I) 2025*. Danvers : IEEE, 2025, S. 205–210. ISSN 2767-875X. V databáze: SCOPUS, WOS, IEEE.

AFC03 KUŠNIRÁK, K. — KOLIMÁR, O. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. Micro software development projects in practice from client-delivery partner perspective. In *2022 Cybernetics & Informatics (K&I)*.

Danvers : IEEE, 2022, [4] s. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: SCOPUS, IEEE.

AFC04 KUŠNIRÁK, K. — KOLIMÁR, O. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. Proposal for Implementation of Software-Generated 3D Identifiers in Logistics. In *Cybernetics & Informatics (K&I) 2025*. Danvers : IEEE, 2025, S. 211–216. ISSN 2767-875X. V databáze: SCOPUS, WOS, IEEE.

AFD — Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 KOLIMÁR, O. — KUŠNIRÁK, K. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. Proposal of New Petri Net editor and simulator based on Python for mechatronic systems control. In *ELITECH'24*. Bratislava : SPEKTRUM STU, 2024, [5] s. ISBN 978-80-227-5409-5.

AFD02 KOLIMÁR, O. — KUŠNIRÁK, K. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. Architecture of OPC UA Compatible Controller for Mechatronic Systems using Petri Nets in Python. In *ELITECH'25*. Bratislava : SPEKTRUM STU, 2025, [7] s. ISBN 978-80-227-5492-7.

AFD03 KUŠNIRÁK, K. — KOLIMÁR, O. — HAFFNER, O. — KUČERA, E. Comparison of bearing capacity and flexibility of 3D resin printing with and without UV post-processing. In *ELITECH'24*. Bratislava : SPEKTRUM STU, 2024, [8] s. ISBN 978-80-227-5409-5.

AFD04 KUŠNIRÁK, K. — KOLIMÁR, O. — HAFFNER, O. — KUČERA, E. Proposal of Generative 3D Identifier Framework for Enhanced Mixed Reality Applications in Logistics. In *ELITECH'25*. Bratislava : SPEKTRUM STU, 2025, [6] s. ISBN 978-80-227-5492-7.

BEF — Odborné práce v domácich zborníkoch

BEF01 JANECKÝ, D. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. — KUŠNIRÁK, K. Virtual reality as a tool for managing phobias. In *ELITECH'22*. Bratislava : SPEKTRUM STU, 2022, [8] s. ISBN 978-80-227-5192-6.

BEF02 KOLIMÁR, O. — KUŠNIRÁK, K. — KUČERA, E. — HAFFNER, O. Current state of brain-computer interface device usage in personal and professional applications. In *ELITECH'23*. Bratislava : SPEKTRUM STU, 2023, [7] s. ISBN 978-80-227-5298-5.

BEF03 KUŠNIRÁK, K. — HAFFNER, O. — KOLIMÁR, O. — KUČERA, E. Deep dive into 3D printing solutions and their comparison. In *ELITECH'23*. Bratislava : SPEKTRUM STU, 2023, [5] s. ISBN 978-80-227-5298-5.

Zoznam použitej literatúry

[1] AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6*, 4 (1997), 355–385.

[2] CADENA, C., CARLONE, L., CARRILLO, H., LATIF, Y., SCARAMUZZA, D., NEIRA, J., REID, I., AND LEONARD, J. J. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics 32*, 6 (2016), 1309–1332.

[3] CAMPOS, C., ELVIRA, R., GÓMEZ RODRÍGUEZ, J. J., MONTIEL, J. M. M., AND TARDÓS, J. D. ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM. *IEEE Transactions on Robotics 37*, 6 (2021), 1874–1890.

[4] COLLINS, T., AND BARTOLI, A. Infinitesimal plane-based pose estimation. *International Journal of Computer Vision 109*, 3 (2014), 252–286.

[5] FRAGAPANE, G., DE KOSTER, R., SGARBOSSA, F., AND STRANDHAGEN, J. O. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research 294*, 2 (2021), 405–426.

[6] GARCÍA-RUIZ, P., ROMERO-RAMIREZ, F. J., MUÑOZ-SALINAS, R., MARÍN-JIMÉNEZ, M. J., AND MEDINA-CARNICER, R. Fiducial objects: Custom design and evaluation. *Sensors 23*, 24 (2023), 9649.

[7] HUANG, Q., DEGOL, J., FRAGOSO, V., SINHA, S. N., AND LEONARD, J. J. Optimizing fiducial marker placement for improved visual localization. *IEEE Robotics and Automation Letters 8*, 5 (2023), 2450–2457.

[8] KALAITZAKIS, M., CAIN, B., CARROLL, S., AMBROSI, A., WHITEHEAD, C., AND VITZILAIOS, N. Fiducial markers for pose estimation: Overview, applications and experimental comparison of the ARTag, AprilTag, ArUco and STag markers. *Journal of Intelligent & Robotic Systems 101*, 4 (2021), 71.

[9] MAGNAGO, V., PALOPOLI, L., PASSERONE, R., FONTANELLI, D., AND MACII, D. Effective landmark placement for robot indoor localization with position uncertainty constraints. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 68*, 11 (2019), 4443–4455.

[10] MICHALOVIČ, M. *Inovatívne metódy rozpoznávania zhodných entít v prostredí zmiešanej reality*. písomná práca k dizertačnej skúške, Ústav automobilovej mechatroniky, FEI STU v Bratislave, 2024.

[11] MILGRAM, P., AND KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems E77-D*, 12 (1994), 1321–1329.

[12] MUR-ARTAL, R., AND TARDÓS, J. D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras. *IEEE Transactions on Robotics 33*, 5 (2017), 1255–1262.

[13] OLSON, E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2011), pp. 3400–3407.

[14] TUBIS, A. A., AND ROHMAN, J. Intelligent warehouse in Industry 4.0—systematic literature review. *Sensors 23*, 8 (2023), 4105.