

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ OBOR GEODÉZIE A KARTOFRAFIE

STUDIJNÍ PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

INDOOR NAVIGACE

INDOOR NAVIGATION

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.

Katedra geomatiky

květen 2019

Bc. Veronika VÁVROVÁ



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Vávrová</u>	Jméno: <u>Veronika</u>	Osobní číslo: <u>439227</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra geomatiky</u>		
Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor: <u>Geodézie a kartografie</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Indoor navigace</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Indoor navigation</u>	
Pokyny pro vypracování: Rešerše technik a technologií využívaných pro indoor navigaci. Převod 3D modelu budovy Fakulty stavební z BIM do GIS. Návrh indoor navigace pro Fsv v programu ArcGIS Pro. Publikace návrhu indoor navigace na webových stránkách.	
Seznam doporučené literatury: 1. Mautz, R.: Indoor positioning technologies, habilitation thesis, ETH Zürich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, 2012. 2. ArcGIS Indoors, dostupné z https://www.esri.com/en-us/landing-page/product/2018/arcgis-indoors	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>doc. Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>18.2.2019</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>19.5.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>18.2.2019</u>	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací indoor navigace po budově Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze v programu ArcGIS Pro. V rámci tohoto zpracování bylo nutné vyřešit převod dat ze získaného informačního modelu budovy (BIM) do geografického informačního systému (GIS), ve kterém bylo provedeno následné zpracování.

Práce pojednává o indoor navigačních technikách a technologiích vyvíjených pro potřeby navigace a orientace tam, kde nelze využít klasické metody GNSS. V praktické části je uveden návrh řešení navigace po budově Fakulty z kartografického hlediska s využitím produktu ArcGIS Indoors a součástí textu je i popis BIM softwaru Revit a GIS softwaru ArcGIS Pro, jež byly využity pro zhotovení návrhu.

Výsledkem zpracování jsou dva navigační modely pro vybrané části budovy Fakulty stavební ČVUT v Praze publikované na stránkách ArcGIS Online, které lze využít studenty, zaměstnanci či návštěvníky školy prostřednictvím softwaru ArcGIS Pro.

KLÍČOVÁ SLOVA

Indoor navigace, BIM, GIS, ArcGIS Pro, ArcGIS Indoors, 3D model, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design and implementation of indoor navigation in the building of the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague in the ArcGIS Pro software. As part of this process, it was necessary to solve the transfer of data from the acquired building information model (BIM) to the geographic information system (GIS) in which postprocessing was carried out.

The thesis deals with indoor navigation techniques and technologies developed for navigation and orientation where the classical GNSS methods cannot be used. In the practical part there is a proposal of the navigation solution in the building of the Faculty from a cartographic point of view using the ArcGIS Indoors product as well as a description of BIM software Revit and GIS software ArcGIS Pro that were used for making a design.

The result of this processing are two navigation models for selected parts of the building of the Faculty of Civil Engineering CTU in Prague published on ArcGIS Online, which can be used by students, employees or school visitors via ArcGIS Pro software.

KEYWORDS

Indoor navigation, BIM, GIS, ArcGIS Pro, ArcGIS Indoors, 3D model, The Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala pod vedením vedoucího diplomové práce samostatně a že jiné zdroje nebo prostředky než ty, které jsou uvedeny v seznamu referencí, nebyly použity. Dále prohlašuji, že tato diplomová práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze, dne 19. 5. 2019

.....

Bc. Veronika Vávrová

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří doc. Ing. Jiřímu Cajthamlovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval. Dále děkuji panu Ing. arch. Robertu Bouškovi za poskytnutí BIM modelu Fakulty stavební ČVUT, panu Mgr. Stanislavu Kalinovi za poskytnutí produktů z My Esri a dále panu Ing. Radkovi Kuttelwascherovi a dalším zaměstnancům firmy ARCDATA PRAHA, s.r.o. za ochotnou spolupráci a komunikaci se společností Esri.

V neposlední řadě také děkuji mé rodině a blízkým za vstřícnost a podporu během celého studia.

Obsah

Význam zkratk	10
Úvod	12
1 Navigace	13
1.1 Outdoor navigace.....	13
1.2 Indoor navigace	14
1.3 Navigace z kartografického hlediska.....	15
2 Indoor navigační techniky	18
2.1 Vlastnosti signálu	19
2.1.1 Time of Arrival (TOA).....	19
2.1.2 Time Difference of Arrival (TDOA).....	20
2.1.3 Round Trip Time (RTT).....	20
2.1.4 Angle of Arrival (AOA)	20
2.1.5 Received Signal Strength Indication (RSSI).....	21
2.1.6 Phase Difference (PD).....	21
2.1.7 Near-Field Electromagnetic Ranging (NFER®).....	22
2.1.8 Doppler Ranging	22
2.2 Navigační algoritmy	22
2.2.1 Polar Point Method.....	22
2.2.2 Triangulation	23
2.2.3 Trilateration	23
2.2.4 Centroid Determination	24
2.2.5 Cell of Origin (COO) / Proximity.....	24
2.2.6 Fingerprinting (FP).....	24
2.2.7 Dead Reackoning (DR)	25
2.2.8 Kalman Filter	25
2.2.9 Map Matching (MM).....	25
3 Indoor navigační technologie	26
3.1 Inerciální navigační systémy (INS)	26
3.1.1 INS bez vnější infrastruktury.....	26

3.1.2	INS s využitím doplňkových metod	27
3.2	Kamerové systémy	28
3.2.1	Využití obrazových záznamů	29
3.2.2	Využití kódových cílů	29
3.2.3	Využití projektovaných cílů	30
3.2.4	Využití 3D modelů budov	30
3.3	Viditelné světlo	31
3.4	Infračervené záření	32
3.4.1	Využití aktivních majáků	32
3.4.2	Infračervené snímkování s využitím přirozeného záření	33
3.4.3	Infračervené snímkování s využitím umělého záření	34
3.5	Vysokofrekvenční rádiové vlny	34
3.5.1	RFID	35
3.5.2	Bluetooth	35
3.5.3	WLAN, Wi-Fi	37
3.5.4	Ultra-širokopásmové (UWB) technologie	38
3.5.5	Další RF technologie	40
3.6	Zvuk	41
3.6.1	Ultrazvuk	41
3.6.2	Slyšitelný zvuk	42
3.7	Magnetická navigace	43
3.7.1	Využití blízkého pole antén	43
3.7.2	Využití elektrického proudu	43
3.7.3	Využití permanentních magnetů	44
3.7.4	Využití magnetického Fingerprinting	44
3.8	Asistované GNSS	45
3.9	Pseudosatelitní systémy	47
3.10	Dotykové a kombinované polární systémy	48
3.10.1	Dotykové systémy	49
3.10.1	Polární kombinované systémy	49
3.11	Shrnutí indoor navigačních technologií	52

4	Softwary použité pro zpracování	53
4.1	BIM	53
4.1.1	Revit	53
4.2	GIS	54
4.2.1	ArcGIS	55
4.2.2	ArcGIS Indoors	56
5	Zpracování	57
5.1	Převod modelu z BIM do GIS	57
5.2	Příprava vstupních dat	59
5.3	Převod vstupních dat do geodatabáze	60
5.4	Konfigurace mapových vrstev	63
5.4.1	Vlastnosti mapy	63
5.4.2	Vrstvy s plány podlaží	63
5.4.3	Body zájmu	64
5.4.4	Konfigurační tabulky	66
5.5	Tvorba síťového datasetu	66
5.5.1	Ruční tvorba cest a orientačních bodů	67
5.5.2	Založení síťového datasetu	68
5.5.3	Vyhledávání tras pomocí síťové analýzy	70
5.6	Publikace na webových stránkách	72
6	Zhodnocení výsledků	73
7	Závěr	75
	Použitá literatura	76
	Seznam obrázků	84
	Seznam tabulek	85

Význam zkratek

AGNSS	Asistovaný globální navigační satelitní systém
AIIM	ArcGIS Indoors informační model
AOA	<i>Angle of Arrival</i>
BIM	Informační model budovy (z anglického <i>Building Information Modeling</i>)
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
COO	<i>Cell of Origin</i>
DR	<i>Dead Reckoning</i>
FP	<i>Fingerprinting</i>
GIS	Geografický informační systém
GNSS	Globální navigační satelitní systém
GPS	Globální polohový systém
iGPS	<i>Indoor Global Positioning System</i>
IPS	<i>Indoor Positioning System</i>
IMU	Inerciální měřická jednotka (z anglického <i>Inertial Measurement Unit</i>)
INS	Inerciální navigační systém
IR	Infračervený (z anglického <i>Infrared</i>)
LBS	<i>Location Based Service</i>
LED	Elektroluminiscenční dioda (z anglického <i>Light-Emitting Diode</i>)
LOS	Přímá viditelnost (z anglického <i>Line of Sight</i>)
MM	<i>Map Matching</i>
ND	Síťový dataset (z anglického <i>Network Dataset</i>)
NFER	<i>Near-Field Electromagnetic Ranging</i>
NLOS	Nepřímá viditelnost (z anglického <i>Non Line of Sight</i>)
PD	Fázový rozdíl (z anglického <i>Phase Difference</i>)
PDR	<i>Pedestrian Dead Reckoning</i>
POIs	Body zájmu (z anglického <i>Points of Interest</i>)
RF	Vysokofrekvenční rádiové vlnění (z anglického <i>Radio Frequency</i>)
RFID	Identifikace na rádiové frekvenci (z anglického <i>RF Identification</i>)
RSS	Síla přijatého signálu (z anglického <i>Received Signal Strength</i>)
RSSI	Indikace síly přijatého signálu (z anglického <i>Received Signal Strength Indication</i>)

RTT	<i>Round Trip Time</i>
TDOA	<i>Time Difference of Arrival</i>
TOA	<i>Time of Arrival</i>
TOF	<i>Time of Flight</i>
TS	Totální stanice
TTFF	<i>Time To First Fix</i>
TWR	<i>Two Way Ranging</i>
URL	Jednotná adresa zdroje (z anglického <i>Uniform Resource Locator</i>)
UWB	Ultra-širokopásmové (z anglického <i>Ultra-Wideband</i>)
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
WGS	Světový geodetický systém (z anglického <i>World Geodetic System</i>)
WLAN	Bezdrátová lokální síť (z anglického <i>Wireless Local Area Network</i>)

Úvod

Jako studentka oboru Geodézie a kartografie na ČVUT v Praze jsem si nemohla nevyšimnout nevyhovujícího zpracování navigačního systému po budově naší Fakulty, který je realizován nástěnnými tabulemi se schématem rozdělení jednotlivých budov a jejich pater a nevýraznými značkami na chodbách. Orientace a navigace návštěvníků po letištích, muzeích, nemocnicích, školách či obecně pohyb po složitě členěných budovách a areálech vyžaduje dobře zpracovaný navigační systém.

Indoor navigace je v posledních letech velice diskutované a zajímavé téma a toto odvětví se nezaměřuje pouze na interiér budov, ale využívá se všude tam, kde nelze použít konvenční metodu GNSS. O dané téma se zajímají odborníci z různých odvětví a dá se řešit různými způsoby. Ať už jde o fyziky, programátory či geodety a kartografy, je často velice důležitá jejich spolupráce. V této diplomové práci je celý problém řešen z pohledu kartografa a jedná se o jeden z mnoha možných návrhů zpracování a řešení daného problému.

Hlavním cílem této diplomové práce je návrh a realizace navigace po budově Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze s využitím nového produktu ArcGIS Indoors od společnosti Esri. Výstup v digitální podobě publikovaný na stránkách ArcGIS Online by mohl být využit pro navigaci studentů, zaměstnanců a návštěvníků Fakulty stavební ČVUT v Praze.

Tato práce je rozdělena do několika částí. V první kapitole jsou uvedeny obecné informace o navigaci, kterou lze rozdělit na outdoor a indoor navigaci. Druhá kapitola se zabývá základními indoor navigačními technikami, které využívají různé vlastnosti signálu a algoritmy pro výpočet a zpřesnění navigace. Ve třetí kapitole je uveden základní přehled nejpoužívanějších technologií pro indoor navigaci. Tento přehled zahrnuje pouze technologie s přesností do 1 m, jelikož přesnější metody jsou vyvíjeny jednotlivými výrobci a informace o jejich výzkumu jsou tajné, a tudíž nepublikovatelné. Další kapitola seznamuje čtenáře se softwary použitými pro zpracování návrhu indoor navigace a zbývající části práce se zabývají konverzí převzatých dat z BIM do GIS, tvorbou síťového datasetu a následnou úpravou a publikací indoor navigace.

1 Navigace

Slovo navigace pochází z latiny a vzniklo spojením dvou slov – *navis*, což znamená „lod“ a *agere*, což znamená „akt“. Již od pradávna lidé měli potřebu určit směr, zobrazit zemský povrch do mapových děl či najít svoji polohu, a to za účelem snadnější orientace a navigace. Definice slova navigace nalezneme v odborné literatuře mnoho a často se nepatrně liší ve svém pojetí, ale u všech najdeme společné prvky. V navigaci je důležité vždy určit výchozí a cílový bod buď osoby, objektu, dopravního prostředku či moderního přístroje a dále získat informace nezbytné ke stanovení nejlepší cesty nebo trasy mezi těmito dvěma body, které lze získat pomocí vhodné techniky a dostupné technologie. Díky těmto základním předpokladům jsme schopni úspěšně dosáhnout našeho cíle. [1] [2]

1.1 Outdoor navigace

Navigace slouží lidem již od počátku jejich existence. Nejprve byly využívány k navigaci po zemi a na moři významné orientační body v krajině, přírodní elementy a nebeská tělesa (Slunce, Měsíc a hvězdy). Časem byly vyvíjeny mnohem přesnější nástroje a metody měření, díky kterým se navigace stále zpřesňovala. Jako první se začaly používat přesýpací hodiny, sextanty, magnetické kompasy nebo astroláby a v této době také vznikaly první navigační mapy, do kterých byly zaznamenávány důležité většinou obchodní trasy. Od 16. století byla definována první kartografická zobrazení a byly vydávány námořnické almanachy a mapy magnetických deklinací. Až do konce 18. stol. tak byla základní metodou navigace výpočet. Díky konstrukci přesného chronometru a sextantu se začala na začátku 19. století rozšiřovat již dlouhou dobu známá astronomická navigace a s objevem rádiových vln byly zanedlouho položeny i základy pozemní rádiové navigace.

Další významný vývojový krok je spojen s rozvojem letectví v období světových válek. Navigace ve vzdušných prostorech je mnohem komplikovanější, než na zemi nebo na moři a poprvé přechází do trojrozměrného prostoru. Proto bylo nutné vyvinout mnohem modernější, rychlejší a přesnější navigační technologie. Mezi nové nástroje v této době patřily moderní kompasy, krystalické oscilátory, rádiové navigační a detekční systémy, jednoduché inerciální navigační systémy a automatické polohovací systémy. Avšak i tyto systémy měly své nedostatky a jejich používání nebylo vždy snadné. Se startem první umělé družice Země Sputnik 1 v roce 1957 začala éra družicové rádiové

navigace. První družicový polohový systém TRANSIT založený na Dopplerovských měřeních byl vybudován v roce 1964 pro účely U. S. Navy. V 70. letech bylo také zahájeno budování dvou nejdůležitějších globálních navigačních satelitních systémů Navstar GPS (USA) a GLONASS (SSSR, dnes RF) založených na principu trilaterace, které jsou používány dodnes. Na přelomu tisíciletí byly vybudovány další dva důležité systémy – BeiDou (Čína) a Galileo (EU). V současné době existují i menší regionální systémy, které doplňují systémy globální. [2] [3]

1.2 Indoor navigace

Po úspěšné éře GPS navigace bylo novou výzvou pro vědce a firmy vytvořit navigaci fungující v prostorech, kde konvenční metody GNSS nelze využít. Indoor navigace se stala na dlouhou dobu předmětem výzkumu a odborníci přišli s různými technikami a technologiemi. První indoor navigační systémy využívaly pro sledování a určování polohy senzory, které se skládaly z vysílače a přijímače. Uživatel pohybující se prostorem měl u sebe vysílač nebo přijímač, zatímco druhý z přístrojů byl fixován. Novější systémy využívají na podobném principu velice rozšířené chytré telefony. Tato navigace je nejčastěji zprostředkována skrze mobilní aplikaci, mapu vnitřního prostoru a databázi k uložení mapových dat.

V dnešní době nalezneme na trhu mnoho technologií a metod využívajících inerciální navigační systémy, kamerové systémy, princip elektromagnetického vlnění na různých vlnových délkách (viditelné světlo, infračervené záření, rádiové vlny – Bluetooth, WLAN), princip mechanického vlnění (zvuk, ultrazvuk), magnetickou lokalizaci, asistované GNSS, pseudosatelitní, dotykové či kombinované polární systémy a mnoho dalších. Na vývojáře jsou kladeny požadavky na vysokou přesnost, nízkou cenu a jednoduchost používání a údržby. Mimo to musí řešit i mnoho dalších problémů, jako jsou mnohonásobné odrazy, zpomalování signálu o překážky či špatné pokrytí Wi-Fi signálu. Na druhou stranu oproti outdoor navigaci se zde nemusí řešit vliv počasí, atmosféry nebo rychlý pohyb sledované osoby či objektu.

Primární účel indoor navigací je určení polohy osoby a její navigace z výchozího místa do požadovaného cílového místa či destinace, tzv. *Location Based Service* (LBS) nejčastěji zprostředkovaný mobilním zařízením a aplikací. Data o pohybu uživatelů mnohdy využívají poskytovatelé těchto služeb pro marketing nebo propagaci svých výrobků. LBS bývá často doplněno také o bezpečnostní a evakuační informace a indoor

navigace tak pomáhá i záchranným a bezpečnostním složkám při jejich výkonu práce. Pro tyto účely se zpravidla využívá WLAN a Bluetooth metod. Indoor navigace má významné využití i ve zdravotnictví při robotických operacích nebo ve stavebnictví pro lokalizace dělníků na prostorově komplikovaných stavbách a pro detekci posunů a deformací konstrukcí. S robotizací v průmyslu se i zde začínají využívat velmi přesné lokalizační a navigační systémy. Uplatnění indoor navigace je opravdu široké napříč různými obory. [2] [4]



Obr. 1 Indoor navigace ¹

1.3 Navigace z kartografického hlediska

V oboru geodézie a kartografie se v současné době tvorbou navigací zabývá digitální (počítačová) kartografie, jejíž rozvoj úzce souvisí s rozvojem výpočetní techniky. Za počátek digitální kartografie se dá považovat zavedení geografických informačních systémů v 60. letech 20. století (viz. kapitola 4.2). Nové technologie a možnosti zpracování geografických dat rozšiřují pole působnosti klasické kartografie a s tím přicházejí i nové definice popisující tento obor.

„Kartografie je proces přenosu informací, v jehož středu je prostorová datová báze, která sama o sobě může být považována za mnohvrstevný model geografické skutečnosti. Taková prostorová datová báze je základnou pro dílčí kartografické procesy, pro něž čerpá data z rozmanitých vstupů a na výstupu vytváří různé typy informačních produktů.“

(MORRISON, J. L., dlouholetý prezident Mezinárodní kartografické asociace ICA, – geoinformační definice)

¹ <https://slideplayer.com/slide/3122555/>

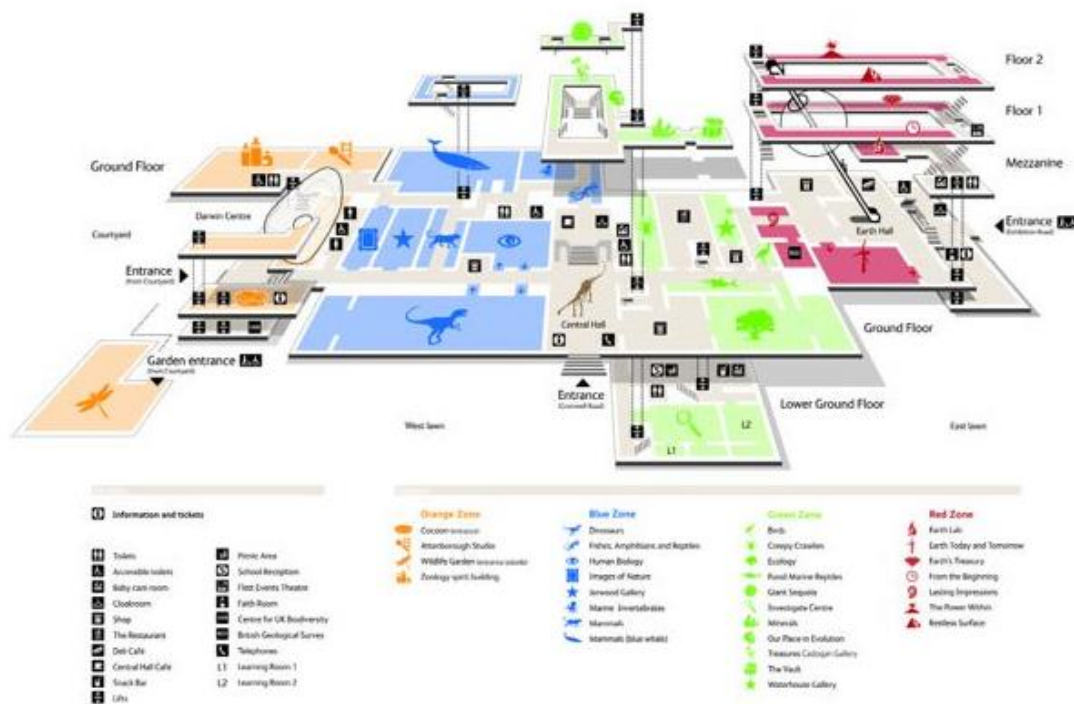
I přes to, že nové digitalizované výstupy se značně liší od starých navigačních map, je nutné při jejich tvorbě dodržovat stejné kartografické zásady. Na mapě nebo v modelech je skutečnost zmenšená, zjednodušená a vyjádřená smluvenými znaky, v mapách navíc dochází i ke zkreslení. Při tvorbě kartografických výstupů je velice důležitý kartografický jazyk, což je soustava grafických prvků, kartografických znaků a pravidel pro práci s nimi. Pro jeho vytvoření je nutné nejprve sestavit systém kartografických znaků, určit způsob jejich zobrazení a do legendy či vysvětlivek napsat přesnou definici jejich významu. Kartografický znak má tři základní vlastnosti – formu, obsah a polohu a prezentuje dva typy informací – polohovou a popisnou. Jejich volba ovlivňuje estetiku mapové kresby. Mezi morfologické parametry znaků řadíme tvar, velikost, orientaci, strukturu a výplň a z pohledu geometrie je dělíme na znaky bodové, liniové a areálové. Pro navigaci jsou nejdůležitější znaky liniové, které dle přesnosti zobrazení daného jevu dělíme na – geometricky přesné (vyjadřují skutečný tvar objekt, limitující je pouze měřítko mapy – např. hranice), topograficky přesné (je zanedbána skutečná šířka objektu, zakreslují se konstantní šířkou – např. silnice) a schematicky přesné (schematické linie či plochy - např. letecké či námořní linky). Parametry liniových znaků jsou struktura, šířka, orientace a výplň.

Popisná a grafická složka mapy (modelu) tvoří jeden celek. Písmo má informační a estetickou hodnotu a hlavním požadavkem je jeho čitelnost. Maximální podíl písma na grafickém zaplnění plochy se pohybuje okolo 30 %. Důležitým krokem při tvorbě navigace je generalizace obsahu, díky které se komplikovaná modelovaná skutečnost stává přehlednou a uživatelsky přívětivou. Mezi nejpoužívanější metody generalizace řadíme výběr vyjadřovaných skutečností, geometrickou generalizaci, kartografickou abstrakci a generalizaci kvantitativních či kvalitativních charakteristik. Dalším velice důležitým faktorem je použití správných barev, protože nevhodné barvy mohou znehodnotit kvalitu výstupu. Vnímáním barev se zabývá psychologie barev a v každé kultuře je mírně odlišná. Kvalitativní jevy se odlišují pomocí tónu barvy a jevy kvantitativní pomocí jasů a sytosti barvy. Při sestavování vlastní barevné stupnice je nutné dodržovat určité zásady – např. pro velké plochy se používají světlé barvy a pro bodové a liniové znaky se volí pouze tmavé a syté odstíny.

Nelze opomenout ani kompozici mapy, tedy uspořádání základních náležitostí mapového díla, které musí být čitelné, estetické a názorné. Mezi hlavní kompoziční prvky, které by měly být v každé mapě, patří mapové (grafické) pole, název, legenda, měřítko a tiráž. Mezi nadstavbové kompoziční prvky, které zvyšují informační hodnotu

a atraktivnost, řadíme např. směrovku, tabulky, loga, grafy, fotografie, různé doprovodné texty či reklamy. Od kvalitního kartografického díla se v současné společnosti vyžaduje polohová přesnost, vysoká technická a estetická úroveň a tvorba na vědeckém základě, i když poslední podmínka není často dodržována.

Tematické mapy jsou jeden z nejčastějších výstupů z databází GIS, jsou hojně využívány a jejich význam stále roste. Tematické mapy mají dvě základní složky obsahu – topografický podklad, který slouží k prostorové lokalizaci prvků tematického obsahu, a tematický obsah, který mohou tvořit vybrané zvýrazněné či podrobně znázorněné prvky topografického podkladu, jevy zjištěné přímým pozorováním v terénu anebo vědecky získané poznatky. Mezi metody pro kartografické vyjadřování na tematických mapách řadíme body, pohybové čáry (vektory), tabulky, grafy, metodu plošných znaků apod. Body a vektory vyjadřují skrze své grafické zpracování kvalitu, kvantitu i hustotu sledovaného jevu.



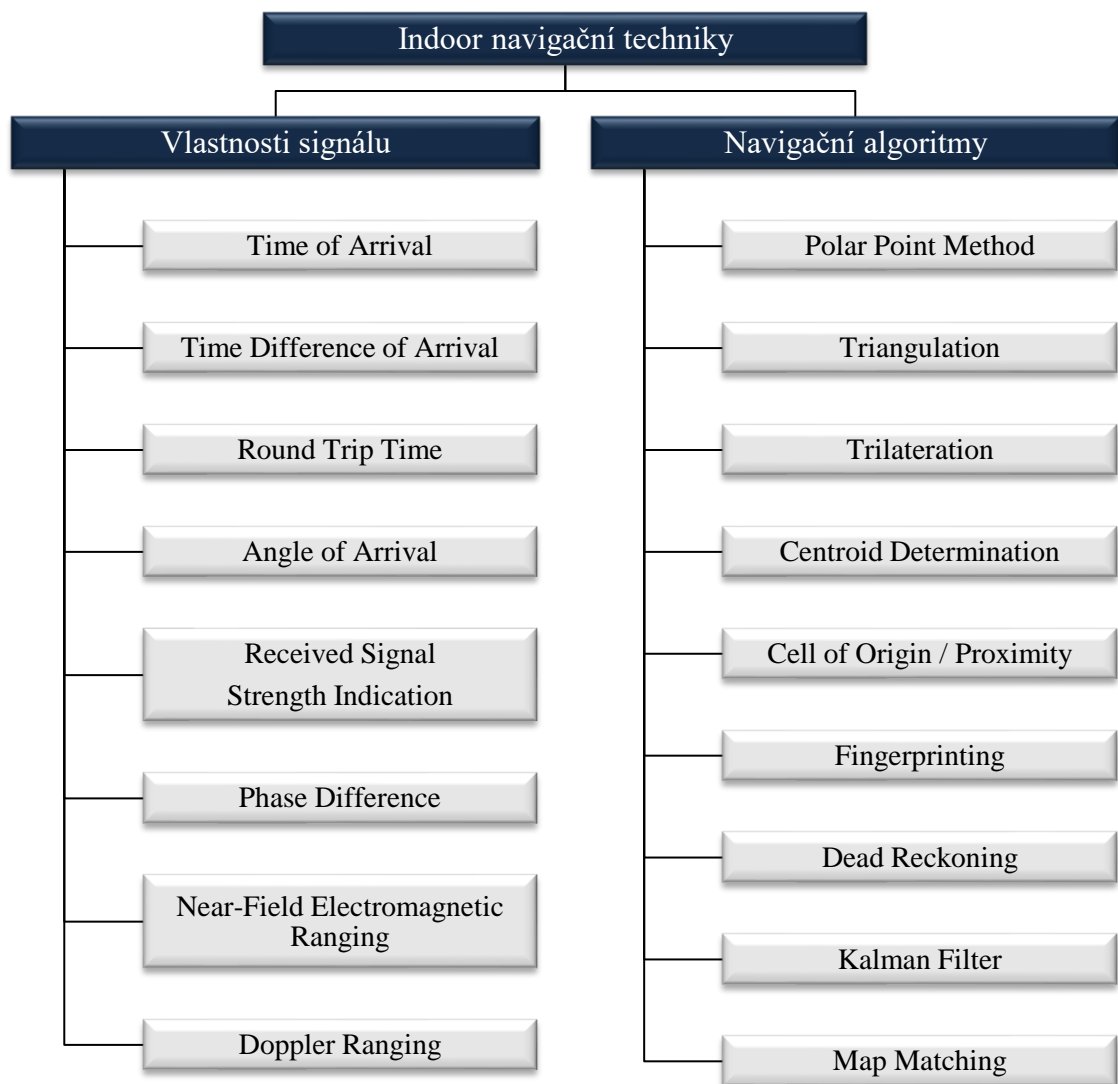
Obr. 2 Příklad kartografického díla²

² <https://www.techadvisor.co.uk/feature/software/best-apps-for-navigating-inside-buildings-3573460/>

2 Indoor navigační techniky

Navigační techniky jsou používány pro odhadování a určování pozice senzorů za účelem zpřesnění polohové přesnosti navigačního systému na základě měření signálu nebo jeho vlastností. I přes nepřehledné množství navigačních technik, jsou v této práci popsány jen ty nejvýznamnější. Navigační techniky používané v indoor navigačních systémech zahrnují vlastnosti signálu a navigační algoritmy, které převádí vlastnosti přijatého signálu na úhly a vzdálenosti, jež jsou poté přepočítávány na aktuální polohu nebo umístění cílového objektu. Přehled nejvyužívanějších vlastností signálu a navigačními algoritmů je uveden v tabulce č. 1. [2] [7]

Tab. 1 Klasifikace indoor navigační techniky

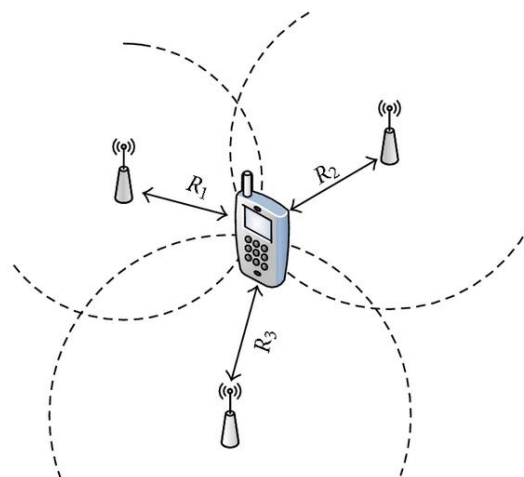


2.1 Vlastnosti signálu

Vlastnosti signálu jsou geometrické parametry jako je úhel a vzdálenost anebo síla signálu měřená za účelem zjištění pozice objektu. Existuje mnoho metod nebo technik měření signálu, nicméně mezi nejvyužívanější vlastnosti signálu řadíme čas dopadu (*Time of Arrival*), rozdíl času při vyslání a dopadu signálu (*Time of Difference Arrival*), tranzitní čas (*Round Trip Time*), úhel dopadu (*Angle of Arrival*) a dále se využívá indikace síly přijatého signálu (*Received Signal Strength Indication*), fázový rozdíl (*Phase Difference*), měření blízkého elektromagnetického pole (*Near-Field Electromagnetic Ranging*) a Dopplerův efekt (*Doppler Ranging*). Z důvodu nepřesného překladu názvů těchto technik do češtiny jsou nadále ponechány jejich originální anglické názvy. Podrobný popis jednotlivých technik je uveden v následujících podkapitolách.

2.1.1 Time of Arrival (TOA)

TOA je doba, za kterou signál dorazí od vysílače k přijímači. Tato metoda využívá absolutní čas. Euklidovskou vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem lze vypočítat na základě změřené doby letu signálu a známé rychlosti vlny, která závisí na vlastnostech prostředí a materiálů, kterými prochází. TOA je někdy také nazývána *Time of Flight* (TOF), rozdíl je pouze v tom, zda je jako referenční bod označen přijímač nebo vysílač. Pro určení přesné polohy vysílače je nutné mít data alespoň ze tří přijímačů (viz. obr. 3). TOA poskytuje vysokou přesnost, ale často vyžaduje složitý a drahý hardware. [2] [7]

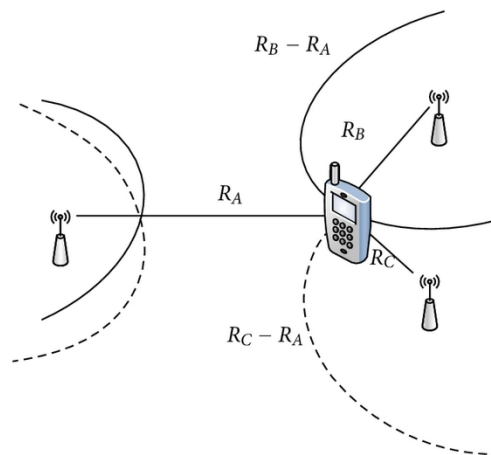


Obr. 3 Princip metody TOA ³

³https://www.researchgate.net/figure/Representation-of-ToA-localization-technique_fig9_258389120

2.1.2 Time Difference of Arrival (TDOA)

Metoda TDOA je obdobná jako TOA pouze s tím rozdílem, že při této metodě je měřen rozdíl časů mezi dvěma senzory, a tudíž není nutné znát čas, kdy byl signál vyslán. U obou těchto metod je velice důležitá časová synchronizace vysílače a přijímače, což v praxi není vždy snadné. Geometrické interpretace je znázorněna na obrázku č. 4, kde vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem je řešena pomocí hyperbol, v jejichž ohniscích jsou jednotlivé přijímače. TDOA taktéž dává poměrně vysokou přesnost výsledků. [2]



Obr. 4 Princip metody TDOA⁴

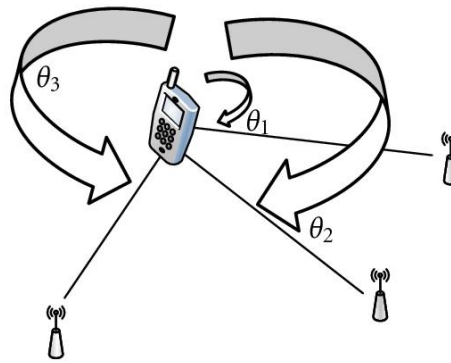
2.1.3 Round Trip Time (RTT)

Čas, za který signál uletí cestu od vysílače k přijímači a zpět, je v geodézii nejčastěji nazýván jako tranzitní čas a v anglicky psané literatuře nalezneme označení *Round Trip Time* (RTT) nebo *Two Way Ranging* (TWR). Tato metoda nevyžaduje časovou synchronizaci mezi přijímačem a vysílačem, a lze jí tak aplikovat např. v neuspořádaných sítích. Nevýhodou je, že měření více zařízeními je nutné provádět postupně, což může způsobit dlouhou prodlevu pro rychle se pohybující zařízení. [7]

2.1.4 Angle of Arrival (AOA)

AOA je metoda pro učení úhlu a vzdálenosti relativně ke dvěma nebo více referenčním bodům pomocí průsečíku úhlových směrů. Výpočet úhlu a vzdálenosti je používán pro odhad a určení polohy vysílače. Tato technika často vyžaduje složitý a drahý hardware. Na obrázku č. 5 je znázorněn princip metody AOA. [2]

⁴ https://www.researchgate.net/figure/TDoA-localization-technique-representation_fig7_258389120

Obr. 5 Princip metody AOA ⁵

2.1.5 Received Signal Strength Indication (RSSI)

Metoda RSSI využívá speciální indikátor pro měření intenzity přijatého signálu a taktéž se používá pro odhad vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Při větších vzdálenostech je signál slabší a bezdrátová přenosová rychlost se zpomaluje. Právě tento útlum či ztráta signálu v důsledku šíření prostředím nám poskytuje informace pro výpočet vzdálenosti mobilních zařízení. Čím vyšší je hodnota RSSI, tím je lepší kvalita signálu. Ve vnitřních prostorech, kde je téměř nemožné získat přímou viditelnost mezi všemi místnostmi (*Non Line of Sight* - NLOS), jsou naměřené hodnoty ovlivněny mnohonásobným odrazem, tříštěním a zpomalováním signálu o mnoho překážek, což snižuje přesnost této metody. [2] [4]

2.1.6 Phase Difference (PD)

Při této metodě je měřen fázový rozdíl mezi dvěma nebo více přijímacími anténami pro výpočet přesné lokalizace. Oproti RSSI je lokalizace založená na fázovém doměru přesnější, robustnější a citlivější, pokud není poměr síly signálu k celkovému šumu příliš malý. Princip je založen na nepřímém určení tranzitního času pomocí fázového rozdílu vyslaného a odraženého signálu. Výhodou při využití této metody je, že lze při měření odhadovat pohyb objektu či sledovat lidskou činnost při přirozených rychlostech. Z tohoto důvodu našla metoda PD uplatnění i v různých chirurgických oborech jako je neurochirurgie, ortopedie či traumatologie. Pro zlepšení přesnosti lokalizace lze tuto metodu kombinovat s metodou RSSI. [5]

⁵ https://www.researchgate.net/figure/AoA-technique-representation-a-AoA-with-mobile-unit-known-orientation-b-AoA-without_fig1_258389120

2.1.7 Near-Field Electromagnetic Ranging (NFER®)

NFER® je spojeno s rádiovou (magnetickou) technologií a využívá vlastností blízkého pole rádiových vln. Princip vychází z faktu, že fáze elektromagnetického pole se mění se vzdáleností od antény. Tato metoda poskytuje výsledky s přesností od 30 cm do 1 m a lze jí využít do vzdálenosti až 300 m od antény. Výhodou je, že není vyžadována žádná modulace signálu a stejně jako u metody RTT není potřeba přesná časová synchronizace mezi zařízeními. NFER® je registrovaná ochranná známka společnosti Q-Track Corporation. [7]

2.1.8 Doppler Ranging

Technika *Doppler Ranging* se využívá k pozorování relativní rychlosti mezi vysílačem a přijímačem. Pokud je použit upevněný zdroj signálu, je absolutní rychlost vypočtena z posunu naměřené frekvence. Díky známé počáteční pozici a pozorování více frekvencí lze následně určit posun mobilního zařízení. [7]

2.2 Navigační algoritmy

Navigační algoritmy definují, jak vypočítat aktuální pozici objektu ze získaných naměřených vlastností signálu, které převádí na vzdálenosti a úhly, popř. souřadnice. Algoritmy zpřesňují předem odhadnutou pozici objektu a liší se nejen svým principem, ale i přesností, která je do jisté míry závislá na správnosti měření vlastností signálu. Každý algoritmus má nějaké výhody i nevýhody a pro co nejpřesnější řešení je často používáno více algoritmů najednou. Některé metody výpočtu jsou již dobře známe z outdoor navigace, jiné našly uplatnění až zde. Mezi hlavní navigační algoritmy patří polární metoda (*Polar Point Method*), triangulace (*Triangulation*), trilaterace (*Trilateration*), určení centroidu (*Centroid Determination*), *Fingerprinting* (FP), *Cell of Origin* (COO) / *Proximity*, *Dead Reckoning* (DR), Kalmanův filtr (*Kalman Filter*) a *Map Matching* (MM). [2]

2.2.1 Polar Point Method

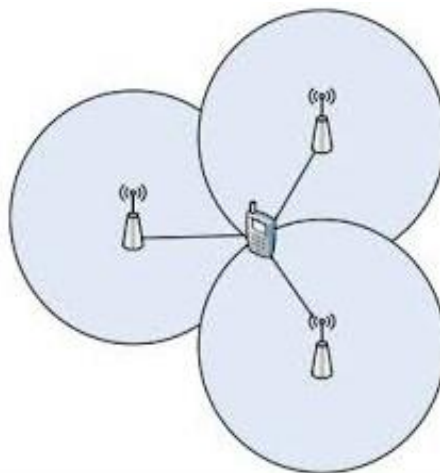
Polární metoda je nejzákladnější metodou využívanou v geodézii. Při známé orientaci nám pro určení souřadnic blízkého bodu nebo zařízení stačí délkové a úhlové měření pouze z jedné stanice, což činí tuto metodu obzvláště užitečnou. [7]

2.2.2 Triangulation

Jak již název napovídá, tato metoda využívá k výpočtu pozice cílového objektu geometrických vlastností trojúhelníků. Pro výpočet je nutné znát úhlové měření (α , β) na dvou bodech (A, B) o známé pozici a vzdálenost mezi těmito body (c). Souřadnice hledaného bodu (C) jsou následně dopočteny pomocí sinové věty a polární metody. Pro určování vzdáleností mezi body je používána metoda AOA. Použití triangulace je velice jednoduché a levné, avšak pro širokou oblast pokrytí, kde je mnoho referenčních bodů, může určení polohy obsahovat některé chyby, což následně snižuje celkovou přesnost této metody. Kromě toho je pro veliké prostory potřeba složité, a tudíž i poměrně nákladné hardwarové vybavení. [2]

2.2.3 Trilateration

Trilaterace je metoda velmi podobná metodě triangulační a taktéž využívá geometrických vlastností trojúhelníků. Na rozdíl od úhlového měření však tato metoda využívá přesné délkové měření, což nám umožnily až přesnější moderní přístroje. Pro výpočet je využíváno dvou a více bodů o známých souřadnicích a naměřených délek mezi cílovým objektem a již známými referenčními body. Při využití více než tří bodů je někdy tato metoda nazývána jako multilaterace. Pro určení vzdálenosti skrze naměřený čas, který urazí signál od vysílače k přijímači, se využívá metody TOA neb TDOA. Přesnost určení polohy závisí na vlastnostech přijatého signálu a podmínkách prostředí. Zásadní význam této metody pro navigační účely je i její aplikace v GPS. [2]



Obr. 6 Princip trilaterace ⁶

⁶ <http://www.tothenew.com/blog/indoor-positioning-systemtrilateration/>

2.2.4 Centroid Determination

U technologií využívající majáky je často požadavkem určit polohu jejich centroidu, což vyžaduje buď znalost přesné pozice více majáků na území rozsahu detekce, nebo lze tento centrální bod určit váženým průměrem, kde jsou váhy stanoveny na základě hodnot RSSI, nejistot jednotlivých majáků anebo jejich vzdáleností. [7]

2.2.5 Cell of Origin (COO) / Proximity

Metoda *Cell of Origin* může být také označována jako *Proximity Detection* nebo *Connectivity Based Positioning*. Zvláštností této metody je, že nám namísto absolutní nebo relativní pozice poskytuje pouze informace o poloze objektu prostřednictvím sítě antén o známé pozici. Při detekci objektu více anténami je pro výpočet jeho polohy využita vždy anténa s nejsilnějším signálem. Pro odhad vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem se využívá technika RSSI. Tato metoda je nejčastěji aplikována pro systémy využívající infračervené záření nebo vysokofrekvenční pásma rádiového vlnění. Pro dosažení spolehlivých výsledků a širokého pokrytí je třeba větší množství přijímačů, což opět vede ke složitosti a vyšší ceně, a proto je tato metoda využívána pro aplikace s nízkými požadavky na přesnost. [2] [7]

2.2.6 Fingerprinting (FP)

Tento algoritmus je založen na analýze zájmového území a obvykle se skládá ze dvou fází. V první (offline) kalibrační fázi je v daném prostoru zaměřena síť několika bodů, pro něž je určena poloha a RSSI vektor vůči přístupovým bodům, které generují signál. Takto určené hodnoty jsou uloženy do speciální databáze nazývané radio map. Ve druhé (online) provozní fázi jsou nově naměřené hodnoty porovnávány s hodnotami v této databázi a na základě jejich korelace lze určit polohu cílového objektu. Výsledná poloha může být vztažena pouze k jednomu kalibračnímu bodu, nebo je určena váženým průměrem z nejbližších kalibračních bodů, kde váhy jsou voleny úměrně jejich vzdáleností, anebo v nejjednodušším případě je zvolena minimální euklidovská vzdálenost ze všech naměřených vzdáleností. Přesnost metody závisí na hustotě kalibračních a přístupových bodů. Nevýhodou této metody je, že základní databázi je nutné při každé změně interiéru aktualizovat a samotný signál ovlivňuje pohyb lidí a vlhkost vzduchu. Tato metoda je obecně velmi časově náročná a drahá. Využití nalezneme v kamerových systémech nebo RF systémech (WLAN/Wi-Fi). [4] [7]

2.2.7 Dead Reackoning (DR)

DR je proces odhadu pozice na základě dříve určených pozic a známých nebo odhadnutých rychlostí pohybu během uplynulého času. Metoda DR je nejčastěji využívána pro inerciální navigační systémy (INS) a stala se základem pro technologii nazývanou *Pedestrian Dead Reckoning* (PDR). Významným nedostatkem této metody je však akumulace chyby v určení správné pozice, která roste s časem a vzdáleností. [7]

2.2.8 Kalman Filter

Nejpoužívanějším algoritmem pro aktualizaci polohy u metody PDR a předpovídání polohy mezi dvěma datovými informacemi u kamerových a inerciálních navigačních systémů je Kalmanův filtr, který odhaduje neznámé hodnoty proměnných na základě aktuálních naměřených dat a údajů z předchozích epoch zatížených nepřesnostmi a šumem. Pro nelineární observace je využíván rozšířený Kalmanův filtr. [2] [7]

2.2.9 Map Matching (MM)

Algoritmy pro porovnání map kombinují aktuální údaje o poloze osoby či objektu s prostorovými údaji v digitálních mapách pro identifikaci správné trasy, na níž se chodec nebo vozidlo pohybuje. MM techniky zahrnují topologické analýzy, metodiky rozpoznávání vzorů či pokročilejší hierarchické algoritmy využívající tzv. fuzzy průsečíky (neexistující body v průsečících dvou linií). [7]

3 Indoor navigační technologie

Při vývoji indoor navigačních technologií je nutné řešit různé aspekty a problémy komplikující vývoj jednotlivých systémů. Stejně tak jako jsou různé oblasti aplikace těchto technologií, mají i vývojáři různé přístupy k řešení daného problému. Díky tomu se na trhu objevila velká škála navigačních technologií s různou přesností, spolehlivostí, dostupností a cenou. Většina technologií využívá elektromagnetické vlny, o něco méně jsou využívány vlny mechanické (zvukové). Pro systémy s vyšší přesností jsou obecně využívány kratší vlnové délky. V této práci jsou popsány inerciální navigační systémy, kamerové systémy, některá spektra elektromagnetického záření – infračervené záření, viditelné světlo či vysokofrekvenční rádiové vlny (RFID, Bluetooth, WLAN, UWB), zvuk, magnetická lokalizace, asistované GNSS, pseudosatelitní systémy, dotykové systémy a kombinované polární systémy. Jak již bylo řečeno v úvodu, tento přehled zahrnuje pouze vybrané technologie s přesností do 1 m, jelikož přesnější metody jsou vyvíjeny soukromými firmami a informace o jejich výzkumu jsou přísně tajné.

3.1 Inerciální navigační systémy (INS)

Inerciální navigační systém umožňuje pomocí inerciální měřicí jednotky (*Inertial Measurement Unit* – IMU) a procesorové jednotky určovat polohu, směr, rychlost a orientaci pohybujícího se objektu. Pokud je známa počáteční poloha a orientace, jsou následující hodnoty určovány pomocí DR bez nutné potřeby vybudování vnější infrastruktury, což je hlavní výhodou této metody. IMU se skládá ze soustavy akcelerometrů, gyroskopů a některé mohou obsahovat i magnetometr. Typická kombinace obsahuje jeden akcelerometr pro měření zrychlení (tj. funkce rychlosti a času, ze které lze zpětně integrací určit polohu), tři navzájem kolmé gyroskopy pro měření náklonů a jeden magnetometr (3 kolmé senzory) pro určení síly a/nebo směru magnetického pole. [6] [8]

3.1.1 INS bez vnější infrastruktury

INS využívající DR neustále měří změny k předchozí vypočtené pozici, a tudíž poskytuje pouze relativní polohu a orientaci. Pokud však známe počáteční polohu objektu, lze snadno dopočítat na základě těchto změn současnou polohu v místním souřadnicovém systému. Odchylka v určení směru a polohy se s uraženou vzdáleností zvětšuje a vzniká tak Abbeho chyba. Akumulace chyby v poloze může být způsobena

nepřesností určení délky jednotlivých kroků a nepřesným úhlovým měřením. Čím kratší je doba měření a čím přesněji je určena výchozí poloha, tím spolehlivější dává tato metoda výsledky. Využívá se proto nejčastěji jako dočasné krátkodobé řešení v přechodných oblastech mimo dosah signálu, kde nelze určit absolutní polohu.

Další vhodnou metodou je *Pedestrian Dead Reckoning* (PDR), jež využívá akcelerometrů zabudovaných v mobilním zařízení pro detekci jednotlivých kroků pohybující se osoby. Na základě výpočetních algoritmů je možné rozlišit normální chůzi, chůzi po schodech, běh, jízdu výtahem, stání na místě či jakýkoliv nepravidelný pohyb. Měřicí zařízení rozpoznává směr (gyroskopy, případně kompasem), počet kroků a jejich frekvenci, ze které je poté odhadována délka kroků. Pokud je během chůze k dispozici absolutní poloha určená jinou metodou, délka kroku je zpřesněna.

Mobilní zařízení může být doplněno o další pomocné zařízení s IMU namontované na nohách, které data ze senzorů předává prostřednictvím Bluetooth aplikační platformě pro rekonstrukci sledované trasy. Při nulové akceleraci je odhad rychlosti překalibrován a tyto aktualizace jsou použity jako vstupní data do Kalmanova filtru, díky kterému lze efektivně snížit akumulovanou chybu inerciální měřické jednotky. Díky tomuto zařízení a vyrovnávacím algoritmům je výsledná chyba této metody kolem 1 %, tedy 1 m na 100 m. [6] [7] [9]

3.1.2 INS s využitím doplňkových metod

Jelikož odchylka v poloze metody DR kvadraticky narůstá s časem a vzdáleností, je nutné občas zpřesnit správnou pozici z externího zdroje. Principiálně lze pro zvýšení dlouhodobé stability využít podporu jakékoliv technologie. Nejrozšířenější je kombinace INS a GNSS, jelikož nevyžaduje vybudování místní infrastruktury, což je požadavkem mnoha aplikací, které využívají např. hasiči, vojáci či záchranáři. Pomocí GNSS je určena výchozí pozice a směr při vstupu do budovy či prostředí bez GNSS signálu a dále je navigace zajištěna senzory INS připnutými na helmách či páscích. Další doplňkovou metodou využívanou např. v důlním průmyslu je WLAN RSSI Fingerprinting. Jedná se o levné a energeticky nenáročné řešení využívající chytré telefony. Teprve ve vývoji je kombinace INS a kamerových systémů či rotujících laserových skenerů, u kterých jsou naskenovaná data využita pro tvorbu 2D mapy, díky které je možné osobu navigovat. Další kombinací může být INS s metodou AOA a některé indoor navigace dokonce aplikují i více metod dohromady.

Ne vždy je nutné mít předem vybudovanou infrastrukturu. Pro získání aktualizace přesné polohy nám mohou posloužit i detailní mapy lokálně uložené v zařízení s IMU ve standartních formátech jako je např. CityGML nebo IndoorGML. Proces *Map Matching* (MM) slouží ke korekci aktuální polohy a orientace na mapě. Omezující prvky z mapy jsou porovnávány s pohybovými vzorci, a tím jsou určeny doplňkové geometrické parametry pohybu. Princip této metody vychází z automobilové outdoor navigace, avšak omezený pohyb člověka v uzavřených prostorech vyžaduje speciální mapovací algoritmy přizpůsobené navigaci pro pěší. V indoor navigaci je navíc nutné uvažovat vertikální posuny při používání výtahu či schodiště. Využívány jsou různé topologické MM algoritmy či informační modely budovy (BIM) s omezujícími prvky, kterými mohou být např. polygony obrysu přístupných oblastí nebo průchozí části jako jsou dveře nebo schody.

Pro všechny hybridní systémy je nutné vyvinout speciální algoritmy, které nejčastěji využívají Kalmanova filtru a sekvenční metody Monte Carlo (SMC) pro vyhodnocení dat z velkého počtu snímačů, při kterém je nepřesnost každého snímače kompenzována naměřenými hodnotami z ostatních snímačů pro dosažení nejlepších výsledků. [6] [7]

3.2 Kamerové systémy

Optické metody využívající kamery či mobilní senzory se díky technologickému pokroku a miniaturizaci detektorů a zařízení přeměňujících elektrický signál na fyzický výstup (např. laser) staly dominantní technologií využívanou pro indoor navigaci, u které lze dosáhnout až sub-milimetrové přesnosti. Rozvoj těchto technologií je spojen s rychlejším přenosem dat, dostupností výpočetní techniky a vývojem efektivnějších algoritmů pro zpracování obrazových dat. U kamerových systémů je buď kamera součástí pohybujícího se objektu a je nutné ji lokalizovat, nebo je kamera statická a určuje pozici pohybujícího se objektu, který je v danou chvíli snímán.

Většina systémů určuje obrazové 2D souřadnice s využitím úhlové techniky AOA a pro získání třetího rozměru jsou využívány základní principy stereofotogrammetrie. Pokud je u stereo kamerového systému známá délka základny, lze ze stereoskopických snímků určit hloubku obrazu. Vzdálenost lze případně měřit pomocí přídavných systému jako jsou laserové skenery nebo TOF kamery. Pro měření se nejčastěji využívají obrazové záznamy, kódové a projektované cíle nebo 3D modely budov. [6] [7]

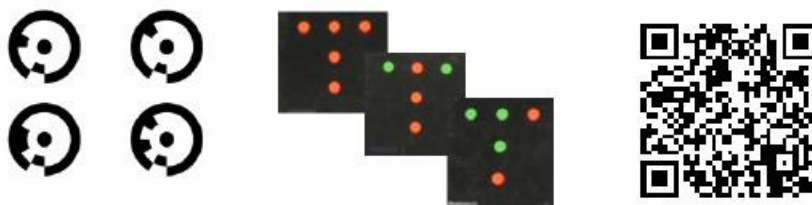
3.2.1 Využití obrazových záznamů

Pro lokalizaci objektu lze využít sekvenci snímků předem pořízených kamerou po všech trasách v budově. Po analýze, kompresi a uložení obrazových dat do databáze je možné začít navigovat. Při pohybu objektu je aktuální pohled snímáný pomocí mobilního zařízení se zabudovanou kamerou porovnáván na základě digitální korelace obrazu se snímkem z databáze. Porovnávání snímků je však časově velmi náročné a bývá obtížné dosáhnout lokalizace v reálném čase. Z důvodu korekce nahromaděné odchylky od správné polohy systém vyžaduje čas od času nezávislý referenční zdroj. Přesnost metody nejčastěji dosahuje několika desítek centimetrů. Pro vědecké účely jsou nejčastěji využíváni roboti, kteří slouží jak pro prvotní fázi pořízení obrazových dat kamerou, tak i jako testovací objekt, který je následně navigován. Srovnání aktuálních snímků s uloženými šablonami je prováděno na základě výpočtu korelačních koeficientů či RFC (*Receptive Field Cooccurrence*) histogramů. Trajektorii lze také určit na základě relativní orientace po sobě jdoucích snímků pořízených panoramatickou 360° kamerou.

Maye a spol. (2006) využili principu optické odometrie (metoda relativní lokalizace založená na odhadu změny pozice a orientace kolového robota prostřednictvím údajů o otáčení jeho hnacích nebo běžných kol naměřených pomocí rotačních enkodérů [10]) a vyvinuli tak levné optické navigační zařízení. [6] [7]

3.2.2 Využití kódových cílů

Přesnější a robustnější systémy využívají kódové značky či orientační body, kterými mohou být soustředné kruhy využívané ve fotogrammetrii, QR kódy nebo vzory obsahující barevné tečky (obr. 7). Kódové cíle jsou odrazové (retroreflexní) nebo naopak bezodrazové a slouží ke zjednodušení automatické detekce a identifikaci cílů pomocí jedinečného kódu, který je na značkách.



Obr. 7 Příklady kódových cílů⁷

⁷ https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-coded-targets_fig2_268360961

Společnost TotalTrax vyvinula navigační systém pro vysokozdvizné vozíky s optickými snímači, které snímají na stropěch umístěné kódované referenční značky, díky kterým jsou navigovány po předem definovaných trasách s přesností až jednoho čtverečního palce (cca 6,45 cm²). Mulloni a spol. (2009) vyvinuli laciný navigační systém pro majitele chytrých telefonů využívající v dnešní době velmi rozšířené QR kódy, které jsou rozmístěny po chodbách, schodištích či výtazích. Toto řešení využívá společnost vanillaNAV, která nabízí organizátorům veletrhů či podobných akcí snadný a levný indoor navigační systém. Stačí společnosti zaslat 2D plány budovy společně s orientačními a cílovými body, na základě kterých zpětně pošle vytištěné QR kódy, které organizátor rozmístí po budově, a návštěvníci se tak skrze jejich aplikaci staženou v chytrém telefonu mohou nechat jednoduše navigovat po areálu s přesností několika centimetrů. Jiný přístup využívá odrazové cíle a kameru citlivou na infračervené světlo, která zaznamenává různé vzory na bodech osvětlené zdrojem infračerveného světla. Poloha ve 2D může být takto určena se sub-decimetrovou přesností. [6] [7] [11] [12]

3.2.3 Využití projektovaných cílů

Instalace kódových cílů může být někdy příliš náročná, nepraktická nebo dokonce nerealizovatelná a v těchto případech je výhodnější projekce referenčních bodů či vzorů. Detekce promítaných obrazců je navíc usnadněna díky jejich odlišné barvě, tvaru a jasů. V prostorách, kde je nevhodné projektovat viditelné cíle, lze využít např. infračerveného světla, které nijak uživatele neruší. Nevýhoda této metody spočívá v tom, že kamera a zdroj světla vyžadují přímý pohled na stejný povrch. Nejjednodušší systém se skládá z projektoru, který musí promítat dostatečný počet bodů na stěny či strop, a jednoduché kamery (detektoru). Pomocí algoritmu detekce hran jsou určeny linie a průsečíky a pomocí triangulace je vypočtena vzdálenost a orientace na všechny body vzhledem ke kameře. Prakticky lze tento navigační systém využít např. pro nákupní vozíky či robotické vysavače, jejichž poloha a umístění je určováno pomocí infračervených světelných bodů vyzařovaných z elektroluminiscenčních diod (LED) a detektoru. [6] [7]

3.2.4 Využití 3D modelů budov

Princip této metody spočívá v detekci objektů na snímcích a rozpoznávání těchto objektů ve 3D modelu budovy, který obsahuje informace o vnitřních prostorách budovy (databázi referenčních bodů), a to bez nutnosti instalace místní infrastruktury.

Kohoutek a spol. (2010) používají sémantický digitální model budovy ve formátu CityGML v nejvyšším detailu (LoD 4). Po identifikaci správné místnosti z databáze modelu jsou ze 3D mračna bodů pořízeného kamerovým *range imaging* zařízením pomocí algoritmů vyhledány pevné objekty (okna, dveře apod.). V momentě ztotožnění 3D mračna bodů s geometrií objektu na základě techniky kombinující trilateraci s prostorovou resekci (iterační řešení základních fotogrammetrických rovnic) je známa poloha a orientace kamerového zařízení s decimetrovou přesností. Podobné řešení, které srovnává půdorysné plány s obrázky pořízenými kamerou v mobilním telefonu, využívá pro prvotní lokalizaci WLAN, čímž je ušetřen čas potřebný k prohledávání databáze 3D prvků. Jiným řešením může být ztotožňování obrazového záznamu s vektorovým modelem budovy, které taktéž poskytuje přesnost v řádu decimetrů. [6] [7] [13]

3.3 Viditelné světlo

Optická bezdrátová technologie pro indoor navigaci využívající viditelné světlo pro přenos dat na vlnové délce přibližně 380 – 780 nm se nejčastěji označuje jako *Visible Light Communication* (VLC) technologie. Tato technologie používá pro přenos signálu kompaktní zářivky a bílé LED žárovky, které oproti jiným zářivkám a žárovkám disponují delší životností, energetickou účinností, odolností vůči vlhkosti a minimální tvorbou tepla. V posledních letech se využití viditelného světla jeví jako vhodná alternativa k RF technologii, jelikož zasahuje do širší části spektra elektromagnetického záření. Systém se skládá ze světelného zdroje (vysílače) umístěného na stropěch či stěnách a mobilního zařízení či obrazového senzoru (přijímače), který demoduluje přijaté vlny. Jednou z nevýhod této metody je, že vyžaduje pro komunikaci přímou viditelnost bez jakýchkoliv překážek.

I v této oblasti je prováděno mnoho výzkumů a různé přístupy používají trochu odlišný hardware, architekturu a techniku. Příkladem využitých technik může být triangulace, trilaterace, všesměrový vysílač s akcelerometry pro získání pozice ve 3D, techniku TDOA, RSSI nebo optické čočky mezi přijímačem a vysílačem. Další možný přístup zvolili Zhou, Kavehrad a Deng (2012), kteří ve své studii využívají analytické řešení Lambertových rovnic pro přenos světla k určení vzdálenosti mezi přístroji a pro odhad polohy přijímače. VLC technologie nabízí i světoznámé firmy jako je např. holandská firma Philips, která vyvinula indoor navigaci do nákupních center pro snadnější a rychlejší vyhledání požadovaného zboží (obr. 8).



Obr. 8 Philips indoor navigační systém [15]

Všechny tyto systémy jsou velmi rychlé, spolehlivé, přesné a finančně nenáročné, vyžadují minimální údržbu a nepotýkají se ani s mnohonásobnými odrazy. Nejčastěji jsou využívány v muzeích, nemocnicích, obchodních centrech, univerzitních kampusech či na letištích a mohou být využity pro indoor i outdoor navigaci. [2] [14] [15]

3.4 Infračervené záření

Infračervené (IR) záření je část spektra elektromagnetického záření s vlnovými délkami od 760 nm do 1 mm a pro lidské oko je tudíž neviditelné, což je jednou z jeho hlavních výhod. Metody využívající infračervené záření pro indoor navigaci lze rozdělit na tři základní typy: využití aktivních majáků, infračervené snímkování s využitím přirozeného záření a infračervené snímkování s využitím umělého záření. Podrobnější popis těchto metod je uveden v následujících podkapitolách. [5] [7]

3.4.1 Využití aktivních majáků

Metoda využívající aktivní majáky (*beacons*) se skládá z infračervených přijímačů pevně usazených na místech o známých souřadnicích a mobilních majáků, jejichž poloha je určována. Pro dosažení lepší než metrové přesnosti je nutné využít více přijímačů rozmístěných po místnosti tak, aby bylo možné rozlišit jednotlivé části místnosti, jelikož většina materiálů nedovoluje průchod IR záření. Jejich propustnost je tedy téměř nulová a je nutné řešit problém s NLOS. Infračervené vlny dále ruší fluorescenční a sluneční

světlo a kvůli všem těmto omezením je tato metoda velmi hrubá a prakticky se používá pouze pro určení místnosti, ve které se lokátor nachází. Pokud je maják i aktivní lokátor doplněný o polarizační filtr, tak může být infračervený signál polarizován v určitém úhlu a následně převeden na azimut pro doplnění měření o úhlovou informaci.

Jeden z nejstarších a nejznámějších IR indoor navigačních systémů navržených pro lokalizaci objektů či osob na úrovni jednotlivých místností je *Active Badge System* (Want a kol., 1992). Aktivní odznaky/štítky (*Active Badges*) vysílají krátké IR impulzy s unikátním kódem a tyto signály jsou přijímány sítí IR senzorů upevněných ve vyšších částech interiéru budovy, jež jsou připojeny k hlavní stanici, která zpracovává přijatá data a umožňuje je zobrazit uživateli. Jelikož jsou impulzy vysílány periodicky každých 15 s, není tato metoda vhodná pro navigaci v reálném čase. I přes to našel systém své využití zejména v administrativních a nemocničních budovách a mezi jeho výhody lze zařadit dlouhou životnost baterií a praktickou využitelnost senzorů (převážně cenovou dostupnost, malé rozměry a nízkou váhu). Tato metoda nejčastěji využívá techniky AOA, trilaterace anebo COO. [5] [7] [16]

3.4.2 Infračervené snímkování s využitím přirozeného záření

Infračervené snímkování s využitím přirozeného infračervené záření používá speciální senzory pro vlnové délky tepelného záření (cca 8 μm – 15 μm), které získávají naprosto pasivně obraz snímaného okolí z přírodních zdrojů tepla bez nutnosti instalace jakýchkoliv aktivních zdrojů IR záření. Speciálními senzory mohou být různé termokamery, IR detektory či termočlánky používané pro detekci pohybu nebo bezkontaktní měření teploty.

Hauschildt a Kirchof (2010) vyvinuli pasivní navigační systém pro detekci osob z infračervených snímků pořízených pasivními IR senzory umístěnými v rozích místností s využitím principu AOA a triangulace. Ve své studii uvádí, že při použití pouze osmi senzoru lze vypočítat polohu až tří osob s přesností v řádu decimetrů. Jelikož člověk není jediným zdrojem tepla v interiéru, mohou jiné zdroje jako je počítač, radiátor či žárovka ovlivnit přijaté signály, a tudíž i přesnost výsledků. Na druhou stranu tento systém není ovlivněn jinými aplikacemi využívajícími stejné frekvence. Využití pasivních systémů nalezneme v oblasti detekce osob u automatických dveří, v bezpečnostních zónách nebo v pečovatelských domech. [2] [5] [7] [16]

3.4.3 Infračervené snímkování s využitím umělého záření

Alternativním řešením k optickým indoor navigačním systémům využívajícím viditelné světlo jsou systémy založené na umělých zdrojích IR světla a CCD kamerách citlivých na IR záření. Společnost Microsoft do roku 2017 vyráběla zařízení pro snímání pohybu Kinect pro populární herní konzole Xbox a počítače se systémem Microsoft Windows, které využívalo nepřetržité projekce infračerveného světla pro zachycení 3D scény pomocí IR kamery. Pohyb hráčů byl sledován do vzdálenosti 3,5 m při frekvenci snímání 30 Hz s přesností okolo 1 cm. Vydání tohoto softwaru inspirovalo další vývojáře v oblasti automatického sledování, robotického řízení, biometrické obličejové identifikace či jemné chirurgické navigace. [7] [18]



Obr. 9 Kinect⁸

3.5 Vysokofrekvenční rádiové vlny

Vysokofrekvenční pásmo rádiového vlnění (*Radio Frequency – RF*) je označení pro kmitočty nad oblastí slyšitelných (nízkofrekvenčních) zvukových vln. V různých oborech je interval pro RF vymezen různými hranicemi. Pro běžné vysílání a příjem je využívána oblast od 30 kHz (kilometrové vlny) až po 300 GHz (milimetrové vlny). Tato část elektromagnetického spektra má díky svým vlastnostem nezastupitelné využití v každodenním životě pro navigaci, rádiové a televizní vysílání, Wi-Fi, mobilní komunikaci, mikrovlnná zařízení či moderní radary. Díky schopnosti RF signálu do jisté míry proniknout pevnými materiály je možné značky integrovat do dlažby, pod koberce či na stěny bez potřeby jejich přímé viditelnosti. Snadno lze navíc využít již existující RF infrastrukturu, což vede k širší oblasti pokrytí a nižším nákladům. Těchto výhod samozřejmě využili vývojáři, kteří pro RF technologii aplikovali různé techniky jako RSSI, COO, triangulaci, trilateraci či FP. Mezi nejvýznamnější RF navigační systémy

⁸ <https://www.wired.com/2012/02/microsoft-kinect-for-windows/>

lze zařadit identifikaci na rádiové frekvenci (RFID), Bluetooth, bezdrátovou lokální síť (WLAN) a ultra-širokopásmové (UWB) technologie. [2] [19]

3.5.1 RFID

Tento automatický identifikační systém využívá bezdrátovou RF komunikační technologii založenou na přenosu dat skrze rádiové vlny mezi RFID čtečkou (skenerem) a aktivními nebo pasivními štítky (*RFID tags*). Data obsahují unikátní ID štítku (jeho sériové číslo), ze kterého lze získat informace o jeho poloze. Přesnost systému úzce souvisí s hustotou rozmístění štítků a maximálním dosahem čtení. Nejčastěji používanými technikami je COO, RSSI ve spojení s multilaterací, TOA v kombinaci s AOA či FP. Pro měření vzdáleností mezi čtečkou a štítkem s přesností lepší než 1 m je nutné použít pásmo o šířce alespoň 10 kHz a výsledná hodnota musí být určena průměrem z více pozorování. Obecně platí, že čím vyšší je frekvence, tím více trpí signál útlumem. RF identifikace může být použita např. pro bezpečnostní kontrolu při vstupu do budov nebo pro platební systémy umožňující automatické placení.

Aktivní RFID systém se skládá z RFID skeneru a aktivního rádiového přijímače se zabudovanou baterií, která sice zvyšuje hmotnost a cenu přijímačů, ale na druhou stranu umožňuje širší oblast detekce (30 m a více). Některé systémy mohou pro zlepšení přesnosti lokalizace navíc využívat hodnot RSSI. Aktivní RFID technologii nabízí např. společnost Kimaldi, která využívá pro dálkové vysílání mikrovlnné záření a přijímače vyrábí ve formě různých náramků či klíčenek.

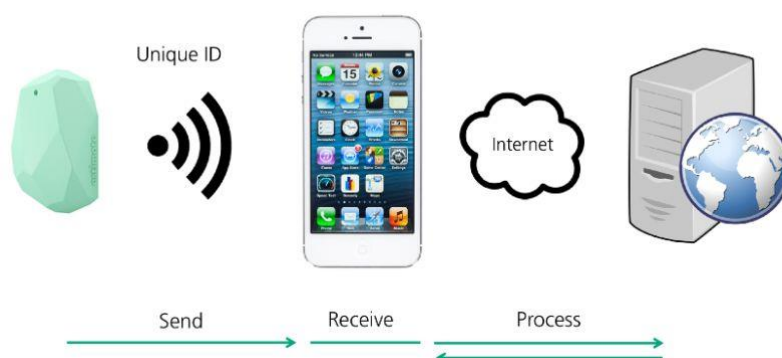
Pasivní RFID systémy využívají indukční spojení, které umožňuje štítkům přijímat dostatečnou energii ve formě RF vln od blízkého RFID skeneru pro zpětný přenos dat, a proto nevyžadují baterie. Výhodou štítků je tak jejich malá velikost, vysoká odolnost, levná instalace a nízké nároky na údržbu. Naopak nevýhodou je jejich malý dosah, který vyžaduje husté rozmístění štítků po budově. Příkladem aplikace pasivních systémů může být vyhledávání a identifikace podzemního potrubí a jiného vedení (Dziadak a kol., 2006), řízení vozidel a skladových zásob nebo navigační systém *ways4all* pro zrakově postižené a nevidomé (Kiers a spol., 2010). [2] [7] [20] [21] [22]

3.5.2 Bluetooth

Bluetooth je otevřený standard pro bezdrátovou komunikaci a budování osobních počítačových sítí PAN (*Personal Area Network*) pomocí vysokofrekvenčních rádiových

vln. Výhodou využívání Bluetooth pro výměnu dat mezi elektronickými zařízeními je vysoká bezpečnost, nízká cena, malá velikost a nízká energetická náročnost této technologie. Nejvyšší úroveň výkonu Bluetooth standardu umožňuje komunikaci v rozsahu 5 až 10 m v závislosti na vnějších podmínkách (přímá viditelnost, povrchový materiál, konfigurace antén atd.). Jako základní technika pro určení polohy je nejběžněji využívána metoda COO. Příkladem lze uvést firmu Zonith, která nabízí řešení využívající Bluetooth majáky komunikující s Bluetooth mobilním zařízením pro ochranu zaměstnanců při práci, první reakci na požární a technické poplachy nebo bezpečnost v nákupních centrech.

Na trhu mají své významné zastoupení i BLE (*Bluetooth Low Energy*) majáky, které vysílají signál, který je čitelný běžným uživatelským zařízením pomocí rozhraní Bluetooth a jedná se tedy o jednostrannou komunikaci. Data s unikátním ID vysílaná v určitém intervalu jsou zpracována buď na serveru a poté zaslána do aplikace v mobilním zařízení skrze WLAN (obr. 10), nebo jsou zpracována přímo v mobilním zařízení. BLE operuje na stejné frekvenci jako Wi-Fi vysílače, což může ovlivnit přesnost lokalizace. Na druhou stranu spojení obou těchto řešení dává mnohem přesnější výsledky než každá technologie zvlášť. Nejčastěji jsou BLE majáky využívány pro reklamu, informační účely a v kombinaci s technikou RSSI a vhodnými algoritmy i pro určování polohy. Existují dva protokoly pro BLE majáky – iBeacon vydaný v roce 2013 společností Apple Inc. a Eddystone vydaný o dva roky později společností Google, přičemž oba systémy jsou nezávislé na operačním systému uživatele. [4] [7] [23] [24]



Obr. 10 Technologie využívající iBeacons⁹

⁹ https://www.adnovum.ch/en/company/focus/knowhow/ibeacons_simple_technology_with_potential.html

3.5.3 WLAN, Wi-Fi

Bezdrátová lokální síť WLAN je vysokorychlostní síť využívající vysokofrekvenční rádiové vlny ke spojení a komunikaci mezi přístupovými body (*access points* – AP) a mobilním zařízením. Nejčastěji je založena na standardech IEEE 802.11 uváděných na trhu pod značkou Wi-Fi a stala se jednou z nejznámějších řešení pro indoor lokalizaci a navigaci díky své snadné dostupnosti téměř ve všech budovách a možnosti využití standartních mobilních hardware zařízení. Typický rozsah sítě je 50 – 100 m a další obrovskou výhodou je, že pro signál není nutná přímá viditelnost (LOS). Systém se skládá z Wi-Fi zařízení, AP a serveru. Nejčastěji využívanou technikou je RSSI, která je snadno dostupná v sítích 802.11 a může být provozována na již existujících WLAN zařízeních. Obecně lze užití WLAN v kombinaci s RSSI rozdělit na 4 základní přístupy dle zvolené techniky: analytický FP, empirický FP, COO a multilaterace.

Modelování šíření signálu neboli analytický FP využívá pro určení hodnoty RSSI různé modely šíření (*Multi Wall Model, Dominant Path Model, Indoor Path Loss Model* apod.). Vhodný model popisující vztah mezi hodnotami RSSI a pozicí přijímače ve vnitřních prostorech ovšem není snadné nastavit, jelikož hodnoty RSSI do značné míry závisí na daném prostředí. Proto se jako vhodnější ukázaly FP metody porovnávající empirická měření bez nutnosti aplikace teoretického modelu. V závislosti na hustotě rozmístění základních stanic a AP lze pomocí této metody dosáhnout až metrové přesnosti, kterou však ovlivňuje fakt, že i když je prostředí neměnné, tak naměřené hodnoty RSSI kolísají v čase. Aby došlo k eliminaci těchto nepříznivých jevů, je výsledná hodnota určena zprůměrováním hodnot naměřených v určitém časovém intervalu. Nevýhodou je, že RSSI hodnoty shromážděné od různých prodejců čipů je obtížné porovnat, protože jejich definice RSSI se liší.

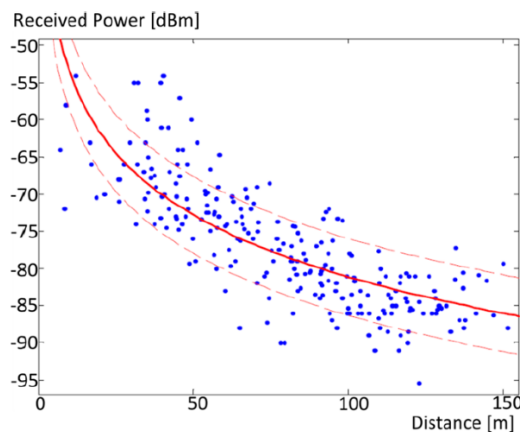
Metoda COO je vhodná pro aplikace, které nevyžadují určení polohy s přesností vyšší než 50 m. Princip metody je velice jednoduchý. Mobilní zařízení identifikuje přístupový bod generující nejsilnější hodnotu RSSI a jeho pozice je považována za shodnou s polohou uživatele.

Z času letu signálu a amplitudy přijatých vln můžeme získat informace o vzdálenosti, kterou lze s využitím WLAN odhadnout z RSSI, TOA, TDOA či RTT s přesností několika metrů. Tyto metody jsou však méně běžné kvůli složitosti určení časového zpoždění i úhlového měření. Hodnota RSSI získaná bezdrátovým zařízením je funkcí vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Tato závislost je obecně popsána ztrátovým

modelem, který však nezohledňuje proměnlivé podmínky vnitřního prostředí ovlivňující šíření signálu. Ztrátový model (obr.11) vykazuje logaritmický trend a odhad vzdálenosti se tak stává s rostoucí vzdáleností mnohem těžší a těžší (až úplně nemožný).

Technika WLAN TOA založená na trilateraci poskytuje stabilnější alternativu oproti RSSI, avšak TOA pozorování nejsou přímo dostupná ze standardního rozhraní WLAN. Kvůli omezením hardwaru a protokolů WLAN současné přístupy určují TOA nepřímo z technik RTT. Pro určení vzdálenosti pomocí RTT je nutné znát časové zpoždění signálu v přístupovém bodě, kde ho také můžeme přímo měřit a tuto hodnotu poté předat mobilnímu zařízení pro následné zpracování. Odchylka 5 μ s však může způsobit chybu v délce až 1500 m. Metoda TDOA zase vyžaduje současný příjem signálů nejméně ze dvou přístupových bodů, ovšem předpokladem WLAN je, že tyto body nevysílají současně na stejném kanálu. Proto byl využit opačný přístup, kdy AP slouží jako vícenásobné synchronizované přijímače a mobilní stanice vysílá signál. Nicméně i zde nastává problém, že sousední body jsou obvykle nastaveny na různé frekvenční kanály a přijímají pouze tuto konkrétní frekvenci.

Na systémy založené na WLAN existuje mnoho studií. Modely šíření se zabývali např. Mazuelas a kol. (2009) a Nurminen a kol. (2012), metodami empirického FP pak Gansemer a kol. (2010), Gallagher a kol. (2010) nebo King a kol. (2006). [4] [7]



Obr. 11 Ztrátový model vyjadřující závislost mezi vzdáleností a RSSI [7]

3.5.4 Ultra-širokopásmové (UWB) technologie

UWB je vysokorychlostní ultra-širokopásmová (>500 MHz) rádiová technologie krátkého dosahu pro bezdrátovou komunikaci s odolností vůči mnohonásobným odrazům a NLOS. Typická UWB sestava obsahuje stimulační generátor rádiových vln a přijímače,

kteřé zachycují vlny rozptýlené v prostoru. Aby nedocházelo k rušení jiných rádiových služeb, tak Federální komunikační komise v USA omezila frekvenční pásmo na 3,1 – 10,6 GHz a Evropský výbor pro komunikaci dokonce zúžil hranice na 6,0 – 8,5 GHz. Licenční UWB technologie tak pracují s mikrovlnami, kde nižší frekvenční složky mají schopnost proniknout do stavebních materiálů, což je na jednu stranu velice užitečná vlastnost pro měření v členitém interiéru, avšak na druhou stranu nepříznivě ovlivňuje přesnost určování vzdáleností kvůli vícenásobnému odrazu signálu a navíc tento efekt komplikuje interpretaci dat. Díky své velké šířce pásma a vysokému rozlišení v čase umožňuje UWB technologie rozlišit opožděné vícenásobné odrazy, a proto se využívá pro zmírnění ztráty signálu. Dále se pro své vlastnosti tato technologie používá pro délkové měření, přičemž vhodnou technikou může být TOA, TDOA nebo RTT.

Jendou z metody určování polohy pomocí ultra-širokopásmové technologie jsou pasivní UWB systémy, které fungují na principu radaru a využívají tak odrazu signálu od lidského těla bez potřeby nošení aktivních či pasivních štítků. Pro výpočet je nutné znát polohu nainstalovaných UWB vysílačů a přijímačů a nejvyužívanější technikou je TOA, TDOA nebo trilaterace. Tento systém je vhodný i pro pozorování extrémně malých pohybů, jako je srdeční či respirační aktivita. Pokud je známa 3D geometrie místnosti, může být pro odhad polohy mobilního přijímače použit pouze jeden vysílač, přičemž signál odražený od stěn způsobující opoždění signálu je použit k odvození pseudovzdáleností k tzv. virtuálním kotvám a pomocí multilaterace je poté odhadnuta poloha vysílače.

Své zastoupení zde mají také aktivní přímé (neodrazné) systémy využívající mobilní aktivní štítky vysílající ultrakrátké impulsy upevněným UWB sensorům, které vysílají získané informace skrze WLAN do centrální softwarové platformy, kde jsou prováděny analýzy, výpočty a zobrazení polohy v reálném čase s využitím stejných technik jako u pasivních systémů. Další možností je UWB Fingerprinting využívající informace získané z impulzní odezvy kanálu, jež jsou pro každou pozici unikátní a lze tak na základě jejich korelace porovnat aktuální polohu s polohou předem uloženou v databázi.

Tato technologie není příliš komerčně využívána, ale i zde nalezneme zajímavá řešení. Firma Ubisense vyvinula pro určování polohy v reálném čase dva UWB sensorové systémy (Dimension4 a AngleID), které lze uplatnit v řadě průmyslových odvětví včetně automobilové a letecké výroby, logistiky či veřejné dopravy. UWB technologie nabízí i firma Zebra, která využívá TDOA k vyhledání štítků do vzdálenosti až 200 m s přesností pod 30 cm v případě přímé viditelnosti (LOS). [2] [7] [25] [26]

3.5.5 Další RF technologie

Nejvíce technologií pro indoor lokalizaci a navigaci bezesporu využívá šíření RF signálu. Pro úplnost této kapitoly je nutné zmínit několik dalších komunikačních protokolů. ZigBee je podobně jako WLAN navržen pro bezdrátový přenos krátkého dosahu (v interiéru 20 – 30 m) a odhad vzdálenosti mezi dvěma uzly bývá určován z hodnot RSSI. Vzhledem k tomu, že ZigBee pracuje v neschválených pásmech, bývá rádiová komunikace narušena jinými signály o stejné frekvenci.

Telefony založené na technologii *Digital Enhanced Cordless Technology* (DECT) jsou běžná zařízení pro komunikace v rámci jednotlivých budov. Vysílací signály pozemních digitálních televizních stanic, jejichž síť byla vybudována v 90. letech 20. století, jsou nejčastěji využívány pro lokalizaci v komplikovaných členitých budovách v hustě zastavěných oblastech, a to s přesností až 10 m. Dalším příkladem může být bezdrátová telefonní technologie 2. generace GSM (*Global System for Mobile communication*), která využívá mobilní celulární síť. Možnost určit přibližnou polohu mobilních uživatelů je velmi praktická věc pro navigační systémy, pomoc při mimořádných událostech, nebo reklamní a marketingové účely.

Radar (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) je technika pro rozpoznávání a zaměřování cílů, určení jejich polohy a případně i jejich identifikace pomocí rádiových vln. Oproti původnímu principu radaru, kdy byl měřen čas a směr rádiových impulzů vyslaných ze směrové antény odražených od pasivního cíle zpět do téže antény, se nově začal měřit čas jednosměrného letu impulzu pomocí techniky TOA, který se poté aktivně vrací zpět.

FM rádio původně označovalo pouze frekvenční modulaci signálu na vyšší kmitočty (tzv. nosné vlny) pro přenos informací. V současné době FM označuje jakoukoliv rádiovou vlnu frekvence 87,5 MHz až 108,0 MHz bez ohledu na to, jaký typ modulace je používán. FM signál neobsahuje časovou informaci, proto je pro měření využita technika FP založená na síle signálu. Výhodou při indoor navigaci je existence rozsáhlé infrastruktury rozhlasových věží, která poskytuje vysoké hodnoty RSS, téměř všudypřítomné pokrytí a možnost využití levného a nízkoenergetického hardwaru. Pro určování polohy a navigaci v uzavřených prostorech lze využít rádiový signál o jakékoli frekvenci, rozsahu a protokolu. Použitelnost a výsledná přesnost však závisí na mnoha faktorech, jako je existence referenční infrastruktury, rozsah signálu, přítomnost zařízení apod. [7]

3.6 Zvuk

Na rozdíl od elektromagnetického vlnění je zvuk vlněním mechanickým, které se šíří látkovým prostředím a je schopno vyvolat zvukový vjem. Lidský sluch je schopen vnímat vlnění o frekvencích přibližně 16 – 20 000 Hz a frekvence nižší než 16 Hz jsou označovány jako infrazvuk a frekvence vyšší než 20 kHz jako ultrazvuk. Pro navigační účely bývá nejčastěji vodícím prostředím vzduch a stavební materiál. Zavedená struktura systému většinou obsahuje mobilní uzly nebo štítky, jejichž poloha je určena multilaterací ze vzdáleností měřených na statické majáky, jež jsou namontované na stropě nebo na stěnách. Dominantní využití má ultrazvuk, pouze malý zlomek technologií využívá zvuk slyšitelný. [7]

3.6.1 Ultrazvuk

U navigačních systémů využívajících ultrazvukové vlny je relativní vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem určována pomocí techniky TOA, případně TDOA, pokud se chceme vyhnout nutnosti časové synchronizace mobilního zařízení s pevnými majáky. Kvůli silnému útlumu zvukové vlny při průchodu prostředím je však dosah určení vzdálenosti limitován na pouhých 10 m. Majáky vysílají také RF signál, který aktivuje interní pulsní čítač do doby, než obdrží akustický puls. Obrovský vliv na rychlost zvuku má teplota, jejíž změna o 1°C při max. rozsahu 10 m způsobí chybu v určení délky 2 mm. Proto má většina systémů vestavěné senzory pro automatickou teplotní kompenzaci, které však neovlivní teplotu v průběhu přenosu. Rychlost zvuku menší mírou ovlivňuje i vítr, tlak vzduchu, obsah CO₂ nebo amplituda zvuku, a proto je tato technologie vhodná pouze pro indoor navigaci. Samotný signál trpí silným efektem Dopplerova jevu. Aby systém fungoval, je nutné předem znát souřadnice statických majáků s milimetrovou přesností, které lze dosáhnout pouze manuálními časově náročnými metodami, jako je zaměření totální stanicí. Aby se zabránilo nutnosti použít pomocný systém, Mautz a Ochieng (2007) implementovali algoritmus automatické lokalizace majáků.

U aktivních systémů je poloha vysílače určována multilaterací ze vzdáleností mezi vysílačem a nejméně třemi přijímači o známé pozici. Jejich nevýhodou je, že pokud se v jedné místnosti shromáždí příliš mnoho uživatelů, výrazně se zvyšuje šance na překrytí signálu. Ward a kol. (1997) popisují ve své práci jeden z prvních aktivních ultrazvukových systémů *Active Bat* s centralizovanou systémovou architekturou, který se skládá z husté sítě ultrazvukových přijímačů upevněných na stropě a roamingových

vysílačů, jejichž poloha je určována pomocí techniky TOF s 3D přesností až 3 cm. Mnoho patentů a zkušeností v oblasti ultrazvukových IPS má firma Sonitor, která nabízí komerčně dostupné řešení nainstalované v mnoha nemocničních zařízeních pro sledování pohybu a navigaci pacientů s přesností okolo 30 cm.

Pasivní systémy zahrnují trvale nainstalované vysílače, které emitují ultrazvukové signály do pasivních mobilních přijímačů. Díky této architektuře je zachováno soukromí uživatelů a jejich počet navíc může libovolně narůstat bez rizika překrývání signálu. Priyantha (2005) v jeho dizertační práci popisuje pasivní systém *Cricket* vyvinutý na MIT dosahující přesnosti 1 cm až 2 cm při maximálním rozsahu. Vzhledem k tomu, že hardwarová jednotka může být naprogramována buď jako statický maják, nebo jako mobilní přijímač, stal se tento systém základem pro mnoho dalších výzkumů a inovací.

Později byl vyvinut systém *Dolphin* (Fukuju a kol., 2003), který oproti výše zmíněným systémům vyžaduje minimální počet předem nakonfigurovaných referenčních bodů pro lokalizaci ostatních bodů systému. Základní princip je založený na předávacím mechanismu, kdy neznámá poloha tzv. normálních bodů je určována pomocí algoritmu z referenčních bodů, jejichž poloha je známa z předešlých měření.

V neposlední řadě je možné využít echolokace, kdy se vyslaný zvuk sám odráží od daného předmětu zpět do místa vyslání, a na základě měřeného času lze vyhledat objekt nebo určit polohu vysílače. U echolokačních systémů tak není potřeba aktivních či pasivních majáků nebo štítků. [4] [7] [27] [28] [29] [30]

3.6.2 Slyšitelný zvuk

Méně zastoupené jsou systémy využívající slyšitelné zvukové vlny a zvukové karty standartních zařízení. Mnoho problémů vzniká kvůli nízké přenosové rychlosti, zpoždění signálu způsobenému zvukovými kartami a síle samotného zvuku, který může být pro uživatele velice nepříjemný. Jedinou výhodou slyšitelného zvuku je, že oproti ultrazvuku je mnohem méně omezený dosahem díky menšímu útlumu signálu při šíření vzduchem. Pro výpočet polohy je nejčastěji využívána technika TOA. Všechny systémy se skládají z centrálního serveru, bezdrátové sítě, a dále dle konkrétní implementace buď z mobilního zařízení a akustického přijímače, nebo z reproduktoru a mikrofону. Jako příklad lze uvést systémy BeepBeep či Guoguo. [4] [7]

3.7 Magnetická navigace

Magnetická lokalizace a navigace je jeden z nejstarších způsobů určování polohy využívající magnetická pole, kompasy či magnetické pole Země. Magnetické navigační systémy jsou uskutečněny pomocí dvou typů magnetických polí, jejichž rozdělení se liší dle různé literatury na statické a dynamické magnetické pole (Gozick a kol., 2011), statické a nízkofrekvenční střídavé magnetické pole (Talcoth a Rylander, 2011) či umělé magnetické a elektromagnetické pole (Mautz, 2012). Magnetické pole může být vytvářeno permanentními magnety nebo cívkami s použitím střídavého nebo stejnosměrného elektrického proudu. Zdrojem elektromagnetického pole jsou buď statické náboje (vytvářející elektrické pole) a proud (vytvářející magnetické pole), anebo jak dokázal skotský fyzik J. C. Maxwell oscilující elektrické náboje. Některé systémy se skládají z vysílačů a přijímačů magnetických signálů, jiné systémy naopak využívají magnetických vlastností ocelových konstrukcí, elektrických a elektronických přístrojů a dalších struktur, které vykazují určitou formu magnetického pole. [4] [7] [30] [31]

3.7.1 Využití blízkého pole antén

Technika NFER[®] (viz. kapitola 2.1.7) využívá vlastností rádiových vln v blízkém poli antény. Vzdálenost od vysílací antény je odvozena z fázového rozdílu mezi elektrickými a magnetickými složkami elektromagnetického pole, přičemž v blízkosti antény mají tyto složky signálu maximální fázový rozdíl 90° a s rostoucí vzdáleností od antény tento rozdíl klesá. Přijímač tedy musí být schopen přijímat obě složky samostatně a porovnat jejich fáze. Výhodou techniky je, že nevyžaduje synchronizaci nebo modulaci signálu. *Real-Time Location System (RTLS) Q-Track* využívající princip NFER[®] popsali ve své práci Schantz a kol. (2011). Systém pracuje s nízkými frekvencemi (~ 1 MHz) a dlouhými vlnovými délkami (~ 300 m), při kterých může signál proniknout zdmi a pro měření tak není podmínkou přímá viditelnost. Po více jak 400 měření bylo dosaženo průměrné odchylky v poloze 55 cm při provozním rozsahu 1,4 – 23,4 m. [7] [32]

3.7.2 Využití elektrického proudu

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, zdrojem magnetického pole může být elektrický proud. Vliv určitého materiálu nebo prostředí na výsledné účinky působícího magnetického pole vyjadřuje permeabilita μ , kterou lze vyjádřit pomocí magnetické indukce B (Tesla) a intenzity magnetického pole H (A/m) dle vztahu 3.1.

$$\mu = B/H \quad (3.1)$$

Poskytovatelé magnetických polohovacích systémů však používají zjednodušené „magnetické pole“, kde uvažují stejné hodnoty veličin B a H . Statické magnetické pole může být vytvářeno různými zdroji stejnosměrného proudu, jako jsou cívky nebo dráty. Pokud magnetické pole vytváří více cívek o známé pozici, lze určit relativní 3D pozici senzoru. Výhodou je, že není nutná podmínka LOS, pole není ovlivněno mnohonásobnými odrazy a je možné sledovat kinematický pohyb při vysokých rychlostech s neomezeným počtem senzorů. Cívky použila např. firma Ascension, která poskytuje navigační systém *trakSTAR* se 4 miniaturizovanými senzory o velikosti 1,5 – 8 mm vhodnými pro chirurgické zákroky, vizualizaci v reálném čase a biomedicínskou analýzu. Výrobce deklaruje střední kvadratickou odchylku v poloze 1,4 mm.

Na rozdíl od systémů s cívkami využívajících stejnosměrný proud, jsou magnetické navigační systémy založené na střídavém proudu méně ovlivněny zemským či umělým magnetickým polem. Těchto vlastností využila firma Polhemus k vytvoření systému *Liberty*, který je díky své sub-milimetrové přesnosti aplikován v biomechanice, pro pilotní simulační tréninky nebo pro sportovní analýzy. [7] [33] [34]

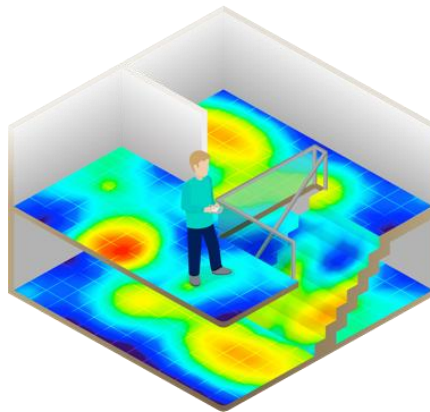
3.7.3 Využití permanentních magnetů

Druhou možností, jak vytvořit magnetické pole, je pomocí permanentních magnetů. Systémy pro navigaci se většinou skládají z více statických magnetických senzorů pro měření magnetické indukce jednoho mobilního magnetu, nebo naopak z jednoho mobilního magnetického senzoru a více magnetů pevně umístěných na dané pozici. Současné přístupy umožňují měření v rozsahu 1 m³, což omezuje využití této metody na drobné práce. Songa a kol. (2009) ve své studii popisují systém pro 3D lokalizaci a 2D orientaci bezdrátových endoskopických kapslí, ve kterých je uzavřen permanentní magnet generující magnetické pole, jehož signál je měřen pomocí senzorů rozmístěných kolem lidského těla. Pomocí speciálních algoritmů systém dosahuje vysoké rychlosti a přesnosti (průměrná chyba v poloze dosahuje 1,8 mm a v orientaci 1,5°). [4] [7] [35]

3.7.4 Využití magnetického Fingerprinting

Princip magnetického FP využívají v přírodě zvířata pro určení své polohy z místních anomálií magnetického pole Země. Stejně tak v budově má každá lokalita svůj jedinečný popis pomocí magnetické indukce B a toto kolísání magnetického pole je způsobeno

přírodními a umělými zdroji, jako jsou železné konstrukční materiály nebo elektrizační soustavy. Metodu magnetického FP je možné použít za předpokladu, že magnetické pole uvnitř budovy lze považovat za statické. V první fázi je vytvořena magnetická mapa a ve druhé fázi jsou porovnávány aktuální naměřené hodnoty magnetické indukce s hodnotami z databáze. Stroms a kol. (2010) využili jako jeden ze dvou možných řešení tuto techniku pro odhad polohy a trajektorie vozidla a pomocí Kalmanova filtru dosáhli s reálnými daty decimetrové přesnosti. Chung a kol. (2011) představili indoor navigační systém, ve kterém jsou geomagnetické anomálie měřeny elektronickými kompasem. Při měření ve dvou budovách s více podlažími dosáhli v 88% času přesnosti v rámci 1 m. Kim a kol. (2012) navrhli indoor navigační systém využívající chytré telefony s vestavěnými akcelerometry, magnetometry a gyroskopy. Vědci zde využili stochastické metody Monte Carlo a experimentální výsledky dosáhly přesnosti do 3 m. [4] [7] [36] [37] [38]



Obr. 12 Geomagnetic Indoor Positioning System¹⁰

3.8 Asistované GNSS

GNSS je jedinou technologií umožňující nezávislý provoz z místní infrastruktury a zároveň celosvětové pokrytí, proto má značný potenciál stát se univerzálním všudypřítomným systémem. Nicméně pro klasické GNSS přijímače je satelitní signál v budovách natolik oslaben, že bylo nutné zahájit výrobu vysoce citlivých a asistovaných GNSS přijímačů. Jejich vývoj je teprve na začátku a jejich výkonnost je značně zhoršená oproti výkonu dosaženého ve venkovním prostředí. Již nyní jsou však tyto přijímače užitečnou součástí jiných indoor navigačních systémů.

¹⁰ <https://gomap-asset.com/indoor-atlas/>

Důležitým ukazatelem je poměr signálu k šumu specifický pro každý přijímač, který závisí na hodnotě RSS a typu zesilovače. Největší ztráta síly satelitního rádiového signálu je způsobena při pohybu volným prostorem mezi satelitem a přijímačem a při průchodu stavebním materiálem, kde faktor útlumu závisí především na elektrických vlastnostech materiálu. Útlum v dřevěných budovách je mírný od 5 dB do 15 dB, cihlové a betonové budovy způsobují ztrátu 20 – 30 dB a v podzemí je signál již téměř nedetekovatelný. Vyšší výkon vysílačů by zlepšil sílu signálu a vliv útlumu by nebyl tak razantní, bohužel je však nelze implementovat do satelitů, které získávají energii pouze ze solárních panelů. Příjem signálu ve vnitřních prostorech vyžaduje komplexní řešení. Kromě oslabení signálu se vývojáři musejí potýkat s jeho reflexí (zpětným odrazem), difrakcí (ohybem), rozptylem nebo vícenásobným příjmem, který způsobuje časový posun jednotlivých měření.

Asistované GNSS (AGNSS) jsou v praxi hojně využívány a časem dobře otestované ve venkovním prostředí, kde jsou aplikovány pro lokalizaci mobilních telefonů nebo pro poskytování informací o družicových efemeridách, almanachu, diferenciálních korekcích, času apod. Při studeném startu neasistovaného přijímače GNSS není znám jeho počáteční čas, pozice, almanach a dopplerovský posun (rozdíl frekvencí vyslaného a přijatého signálu) způsobený relativním pohybem přijímače a satelitů, proto je nutné vyhledat a dekodovat všechna potřebná data a efemeridy. Celkový čas k první opravě pozice přijímače (*Time To First Fix – TTFF*) trvá přibližně 60 s a v prostředí se slabým signálem trvá oprava mnohem déle, nebo dokonce není vůbec možná. Dodatečná data pomáhají AGNSS tento čas výrazně snížit. Předběžně jsou známy informace o poloze a rychlosti každého satelitu ze serveru AGNSS a dále není nutné stahovat efemeridy, což ušetří až polovinu času. Stejně jako u klasického GNSS je podmínkou pro výpočet polohy získat signál alespoň ze 4 satelitů. Do budoucna lze očekávat dosažení nové úrovně indoor struktury GPS signálu díky rozvoji regionálních navigačních systémů.

Kromě systému AGNSS využívají přijímače GNSS s vysokou citlivostí dvě další techniky, které usnadňují příjem slabých rádiových signálů. První technika zlepšuje poměr signálu k šumu díky integraci v několika intervalech po delší pořizovací dobu a druhá technika se spoléhá na masivní paralelní korelátoři, které snižují výpočetní dobu korelace a požadovaný výkon přijímače.

Zhang a kol. (2011) otestovali čtyři statické AGNSS přijímače v různých vnitřních prostorech a dosáhli horizontální chyby 18,4 – 53,4 m a vertikální chyby 26,4 – 61,2 m. V závěru uvádějí, že výkon přijímačů od různých výrobců se značně liší a každý má

nějaké přednosti, ale neexistuje jeden jasný „vítěz“. S cílem zlepšit pochopení charakteristik indoor GPS příjmu Kjærgaard a kol. (2010) porovnali výkon vysoce citlivých GNSS přijímačů včetně méně přesných přijímačů zabudovaných v mobilních telefonech a jeho závislost na místních podmínkách. Negativní vliv na dostupnost měl hlavně vysoký počet překrývajících se podlaží a stěn, stavební materiál a blízkost okolních budov. TTFF obvykle trval 10 s, výjimečně až 1 minutu. U dřevěných domů byla dosažena přesnost v poloze pod 5 m, u většiny cihlových a betonových budov pod 10 m a v nákupních centrech kolem 20 m. [7] [39] [40]

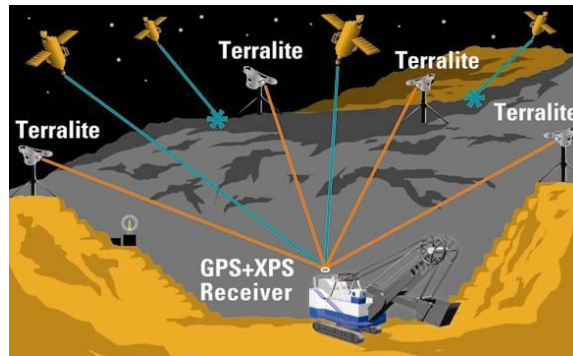
3.9 Pseudosatelitní systémy

Pseudosatelity jsou generátory pseudonáhodného šumu, binárního signálu generovaného dle pevného algoritmu stejně jako C/A kód nebo P-kód systému NAVSTAR GPS, které se používají k vytvoření lokálního pozemního polohového systému tam, kde je normální signál GPS nedostupný nebo zablokovaný. Systém využívá mobilní přijímače (rovery), jejichž pozice je určována z délkového měření na pseudosatelity o známé pozici. Na oblast pokrytí systému dosahující až 10 km má značný vliv přímá viditelnost mezi pseudosatelity a rovery. I když je horní hranice síly signálu regulována předpisy, hodnota RSS pseudosatelitů je řádově silnější než u satelitů. Kombinovaný přijímač může přijímat signál z GNSS i pseudosatelitů, což umožňuje plynulý přechod mezi vnitřním a venkovním prostředím. Zdrojem chyb pro tyto systémy nejčastěji bývá vícenásobný odraz, časová synchronizace atomových hodin, nejednoznačnost fáze nosné vlny a rušení signálu způsobeného velkým rozdílem vzdáleností pseudosatelitů od přijímače, kvůli kterému není možné slabší signál dekodovat.

I když využití stávající struktury GPS a hardwarových přijímačů by mohlo být výhodné, legální vysílání signálů GNSS je velice omezené, a proto se výzkum a vývoj odklonil od zachování kompatibility se stávajícími systémy. Pseudosatelitní systémy využívající signály odlišné od GNSS obvykle měří pseudovzdálenosti a fázi nosné vlny. Výhodou frekvenčních pásem bez licence je možnost jejich využití pro komerční účely.

Firma Trimble nabízí systém *Terralite XPS*, který v kombinaci s GNSS systémy zpřesňuje a rozšiřuje pokrytí pro navigační služby v otevřených důlních dílech, kde se mnohem hůře přijímá signál ze satelitů kvůli členitosti terénu (obr. 13). Systém se skládá

ze sítě nejméně čtyř pozemních stanic vysílajících signál XPS mobilnímu přijímači umístěného na důlním stroji.



Obr. 13 Systém Terralite XPS od firmy Trimble [42]

GNSS opakovače využívají zesílený nemodifikovaný signál GNSS a umožňují klasickým přijímačům sledovat družice v prostředí s blokováním signálem. Opakovač svede pomocí kabelu signál z venkovní antény umístěné na vhodném místě s dobrou viditelností na oblohu a vysíláče, které se skládají ze zesilovače a vnitřní vysílací antény, potom tento signál vysílají do prostoru skrytého před GNSS signálem. Poloha roveru je určena multilaterací z pseudovzdáleností mezi roverem a vysílači získaných z posunu fáze nosné vlny signálu přijatého roverem. Aby nedošlo k rušení signálu GNSS, byl vydán regulační předpis (ECC Report 145, 2010) striktně omezující provoz opakovačů a v mnoha zemích je dokonce jejich používání zakázáno. Česká firma Ryston Electronics nabízí opakovače *Roger* s vnitřním pokrytím až 50 m, které umí pracovat se signálem GPS, GLONASS i GALILEO. Lze je využít při provádění stavebních prací nebo pro výrobní testování systémů s GPS přijímačem. [7] [41] [42] [43]

3.10 Dotykové a kombinované polární systémy

Dotykové a kombinované polární systémy jsou díky své polohové přesnosti od 0,1 mm do 0,01 mm a dosahu několika metrů využívány především v průmyslu a geodézii pro laboratorní měření, kalibraci nebo hodnocení vysoce přesných přístrojů. Vynikající výkon s sebou však nese i vyšší cenu, která není akceptována běžným trhem, a proto nejsou tyto systémy tradičně považovány za IPS. [7]

3.10.1 Dotykové systémy

Dotykové systémy určují polohu objektu pomocí vysoce přesných mechanických přístrojů, které se dotýkají objektu speciální kalibrovanou sondou. Měřicí ramena jsou ručně ovládaná zařízení řetězcové konstrukce s vysoce přesnými úhlovými snímači umístěnými ve všech spojích určená pro vnitřní navigaci krátkého dosahu (do 3 m). Pozice sondy nebo laserového triangulačního skeneru umístěného na konci konstrukce je určována pomocí úhlového měření a známých kalibrovaných délek spojů. Výhodou měřicích ramen je jejich snadná přenosnost, vysoká přesnost a jednoduché ovládání. Mezi nejznámější výrobce patří Faro, Hexagon Manufacturing Intelligence, Nikon Metrology, Trimos a Kreon Technologies.



Obr. 14 Měřicí rameno od firmy Faro ¹¹

Velmi přesný stacionární měřicí stroj určující 3D souřadnice (*Coordinate Measuring Machine* – CMM), někdy také označovaný jako měřicí robot, se skládá ze stolku, na který se pokládá zaměřovaný předmět, a pohyblivého mostu s měřicí sondou. Původní dotykové sondy byly postupem času vyměněny za nové snímací systémy využívají bezdotykové optické sondy s ručním či počítačově řízeným ovládáním. K určení polohy je využívána optická mřížka umístěná podél každé osy definující měřítko. Výrobci CMM na trhu jsou Carl Zeiss AG, Nikon Metrology, Mitutoyo, Brown & Sharpe a další. [7]

3.10.1 Polární kombinované systémy

Polární systémy určují polohu na základě měřených úhlů mechanickými či optickými dekodéry nebo TOA rotujícího paprsku a vzdáleností určených ze 3D vektoru mezi strojem a cílovým objektem. Mezi tyto systémy lze zařadit laserové trackery (sledovače), totální stanice, teodolity, 3D Disto (dálkoměr), laserové skenery, laserové radary a iGPS.

¹¹ <https://www.faro.com/en-gb/products/3d-manufacturing/faroarm/>

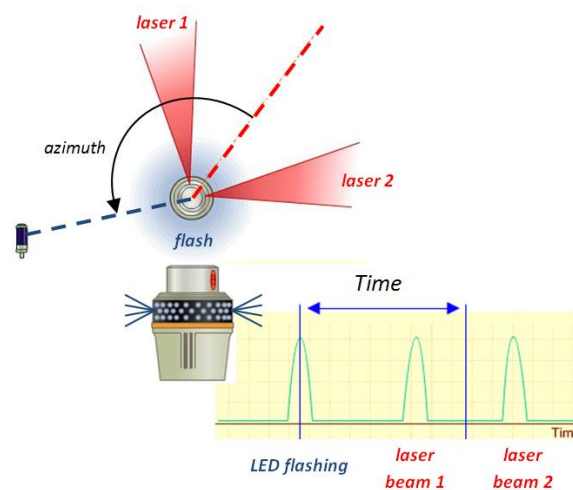
Laserový tracker je přenosný laserový přístroj vybavený dalekohledem, dvěma úhlovými snímači pro měření vertikální a horizontální polohy os, interferometrem a mnoha senzory, jež slouží pro vysoce přesná měření objektů velkých rozměrů, až do 120 m. Zařízení se skládá ze stojanu, optické hlavičky a řídicí jednotky. Laserový paprsek nepřetržitě sleduje polohu sondy se sféricky montovaným koutovým odražečem a odečítá její polární prostorové souřadnice určené z jedné vzdálenosti a dvou úhlů. Pomocí nejmodernějších interferometrů lze získat přímo absolutní vzdálenost. Délková přesnost dosahuje $10 \mu\text{m} + 5 \text{ ppm}$ a úhlová přesnost až $0,001''$. Díky vysoké přesnosti a rychlosti našly laserové trackery uplatnění v energetice, leteckém a automobilovém průmyslu, těžkém strojírenství a stavebnictví a nejčastěji jsou nabízeny společnostmi Faro, Hexagon Metrology či Mena 3D.

Totální stanice (TS) jsou elektronické geodetické přístroje pro měření a vytyčování vodorovných směrů, zenitových úhlů a vzdáleností, které díky vestavěnému softwaru umožňují registraci, základní zpracování, zobrazení a editaci naměřených dat. Totální stanice jsou vybaveny elektrooptickým, pulsním nebo frekvenčním dálkoměrem, díky kterému lze měřit délky buď pomocí odrazného hranolu/fólie, nebo v bezhranolovém módu odrazem o povrch měřeného objektu pomocí úzkého laserového paprsku. Moderní robotizované stanice jsou vybaveny systémy samočinného rozpoznávání cílů a servomotory pro automatické zaměřování cílů nebo jejich monitoring. V současné době lze TS použít k měření 3D trajektorií pohybujících se objektů v reálném čase s přesností několika milimetrů. Teodolity oproti TS neobsahují dálkoměr a slouží tak pouze pro úhlová měření. 3D souřadnice lze získat pomocí protínání vpřed z úhlů, kdy je nutné znát délku základny tvořenou 2 teodolity. Takto lze dosáhnout přesnosti v souřadnicích až 0,1 mm na 10 m. Maximální dosah je obvykle 2 – 10 km v závislosti na dálkoměru a hranolu. Navzdory těmto parametrům jsou teodolity jen výjimečně využívány pro indoor navigaci kvůli vysoké ceně hardwaru a podmínce přímé viditelnosti mezi strojem a cílem. Předními výrobci teodolitů a TS jsou firmy Leica Geosystems, Trimble, Sokkia a Topcon.

3D Disto od společnosti Leica Geosystems (2011) je nízkonákladovou robotickou totální stanicí pro zachycení a promítání přesných trojrozměrných měření nejčastěji ve vnitřních prostorech. 3D Disto v sobě kombinuje laserový dálkoměr, horizontální a vertikální goniometry, laserový projektor, kameru a velmi citlivé inklinometry se samonivelační funkcí. Stroj je ovládán bezdrátově pomocí softwaru nainstalovaného v notebooku, tabletu nebo dálkovém ovladači. 3D Disto umožňuje mimo jiné promítání

bodů, tvorbu šablon v CADu, 3D vizualizaci, využití dat z BIM nebo fotodokumentaci. 3D přesnost (kombinace úhlového a délkového měření) dosahuje 1 mm na 10m.

iGPS (*Indoor Global Positioning System*) je vysoce přesný 3D laserový měřicí systém, který se skládá z vysílačů s rotující hlavou, integrovaných snímačů a pracovní stanice se zabudovaným výpočetním a kontrolním softwarem. Každý vysílač emituje dva infračervené laserové paprsky a jeden infračervený LED pulsní signál. Doba mezi dvěma laserovými signály udává svislou polohu (výšku) cíle a z doby mezi LED pulsem a středem laserových signálů lze určit horizontální polohu (azimut) senzoru (obr. 15). Aby bylo možné stanovit časovou závislost mezi příchodem laserových rovin a svislým úhlem je osa rotace nakloněna pod úhlem 30° . 3D polohu snímače lze určit pomocí dvou vysílačů o známé pozici (princip triangulace). iGPS je používán především v leteckém průmyslu a obraně státu pro montáž, navigaci a sledování v reálném čase.



Obr. 15 Princip měření iGPS [46]

Pozemní laserové skenery jsou elektronické přístroje řízené počítačem pro rychlé automatické neselektivní určování prostorových souřadnic objektu dle nastavených parametrů. Výsledkem skenování je mračno bodů obsahující desítky, i stovky miliónů bodů. Tuto bezkontaktní technologii lze podle principu měření rozdělit na polární skenery, kde je pomocí bezhranolového dálkoměru měřen tranzitní čas nebo fázový rozdíl, a na skenery se základnou, kde jsou souřadnice určovány pomocí protínání vpřed z úhlů. Dle typu přístroje lze objekty skenovat ze vzdálenosti od několika desítek centimetrů až po 3 km. Firma Götting (2014) nabízí laserový skener pro autonomní navigaci vozidel s využitím reflexních značek. Systém je doplněn o snímače pro detekci překážek (ultrazvukové nebo optické) a k navigaci lze využít mnoha alternativních cest.

Laserový radar stejně jako laserový skener vysílá IR laserový parsek k cílovému objektu, kde se signál odráží a jeho část je vrácena. Oproti skenování však část paprsku prochází referenční cestou kalibrovaného optického vlákna. Tato technologie umožňuje automatické a velice přesné měření absolutních vzdáleností až 2000 bodů za sekundu a dokáže změřit i vysoce odrazivé povrchy různé barvy, materiálu, teploty a osvětlení. Hoppen a kol. (1990) ve své práci popisují mapovací a navigační systém založený na laserových radarech pro autonomní mobilní roboty speciálně navržené pro provoz v neznámém vnitřním prostředí s pohyblivými překážkami. Výrobce laserových radarů je například firma Nikon Metrology nebo Faro. [7] [44] [45] [46] [47] [48] [49]

3.11 Shrnutí indoor navigačních technologií

Výše uvedené systémy pro indoor navigaci jsou rozděleny do 10 různých kategorií podle využití technologie se srovnatelnými parametry. V různé literatuře se může toto rozdělení lišit anebo obsahovat jiné technologie, snahou při tvorbě této práce bylo vybrat ty nezákladnější. Velmi často je používán tzv. hybridní systém neboli kombinaci dvou a více technologií s ohledem na konkrétní prostředí pro dosažení co nejširšího pokrytí a požadované přesnosti. Většina technologií využívá široké spektrum elektromagnetických vln, naopak nejmenší uplatnění mají dotykové a polární systémy. V tabulce č. 2 je uveden souhrnný přehled indoor navigačních technologií. Rozmezí pro přesnost a dosah je uvedeno pouze orientačně a mnoho řešení zasahuje mimo tento interval. Stejně tak jsou v tabulce uvedeny pouze základní principy měření. [2] [7]

Tab. 2 Souhrnný přehled indoor navigačních technologií [7] [50]

Technologie	Přesnost	Dosah [m]	Měřické principy
Inerciální navigace	1 % *	10 – 100	dead reckoning
Kamerový systém	mm – dm	1 – 10	úhlové měření ze snímků
Viditelné světlo	cm – m	1 – 20	trilaterace, TDOA
Infračervené záření	cm – m	1 – 5	termografické snímky, aktivní majáky
RF	cm – m	1 – 50	proximity, fingerprinting, TOA
Zvuk	cm	2 – 10	určení vzdáleností z TOA
Magnetická navigace	mm – cm	1 – 20	fingerprinting
Asistované GNSS	10 m	globální	paralelní korelace
Pseudosatelitní systémy	cm – dm	10 – 1000	měření fáze nosné vlny
Dotyk. a polární systémy	μm – mm	3 – 2000	mechanické, interferometry

* % ujeté vzdálenosti

4 Softwary použité pro zpracování

Zdrojem dat pro zpracování návrhu indoor navigace po budově Fakulty stavební ČVUT v Praze byl nově vytvořený informační model budovy (BIM), jež byl vymodelován ze stávajících CAD výkresů budovy v softwaru Revit. Samotná realizace navigace byla poté vyhotovena v programu ArcGIS Pro s využitím nového produktu ArcGIS Indoors od společnosti Esri. V rámci zpracování byl řešen i problém převodu dat z BIM do GIS softwaru, který je podrobněji popsán v kapitole 5.1.

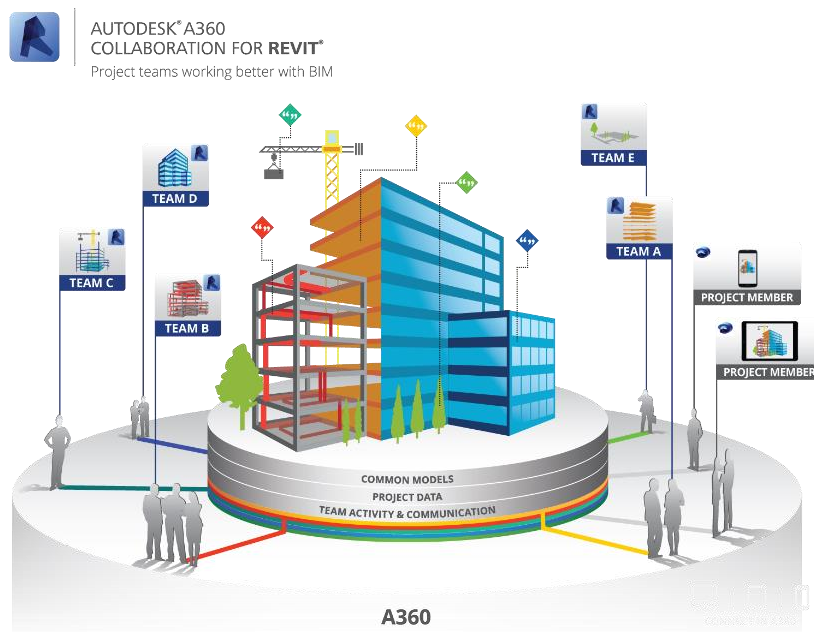
4.1 BIM

Building Information Modeling (BIM) je proces vytváření a správy dat o budově během celého jejího životního cyklu, který zrychluje a usnadňuje výměnu informací mezi všemi účastníky stavebního procesu. Informační model budovy je digitální model fungující jako otevřená databáze informací o budově. Jakékoliv změny a úpravy modelu se projeví v celém projektu najednou, přičemž data zůstanou konzistentní a uspořádaná. Z důvodu zvýšení interoperability je pro výměnu a sdílení dat o stavbě mezi aplikacemi od různých výrobců softwarů využíván otevřený souborový formát IFC, který je vyvíjen mezinárodním sdružením *buildingSMART*. V mnoha zemích se pomalu zavádí BIM jako povinný pro projektování nových staveb a mnoho již existujících projektů se do BIM dodatečně převádí. V České republice bude zavedena povinnost použití BIM pro nadlimitní veřejné zakázky na projektové a stavební práce financované z veřejných rozpočtů od roku 2022. Již teď je jisté, že BIM představuje budoucnost navrhování, výstavby a provozování pozemních a inženýrských staveb. [51] [52] [53]

4.1.1 Revit

BIM software Revit® od společnosti Autodesk, Inc. obsahuje funkce a nástroje pro tvorbu architektonických návrhů, projektování konstrukcí, návrh technických zařízení budov a vyhodnocení projektů před zahájením výstavby. V aplikaci Revit je možné importovat, exportovat a propojovat data pomocí různých formátů jako IFC, DWG™, DXF a DGN. Samotný projekt má příponu RVT. Tento software nabízí mnoho funkcí pro plánování, navrhování, tvorbu a správu budovy a infrastruktury, konkrétně nástroje pro navrhování všech komponent budov, sdílení práce, tabulkové výkazy, grafické programovací rozhraní s otevřeným zdrojovým kódem, moduly pokročilé analýzy,

nástroje pro mračna bodů z laserového skenování, vizualizaci 3D návrhů aj. Základní funkce lze navíc rozšířit pomocí rozhraní API, doplňků a knihovny obsahu ve službě Autodesk App Store. Pro studenty je Revit nabízen až na 3 roky zdarma. [54]



Obr. 16 Ilustrační schéma BIM v Revitu ¹²

4.2 GIS

Geografický informační systém (GIS) lze chápat buď jako technologii, tedy hardware a software, jako aplikační nástroj (systém na získávání, ukládání, vyhodnocování a úpravu informací), nebo jako interdisciplinární vědecký obor. Jeho vývoj je spojen s počátkem 60. let 20. století. Tento systém umožňuje sběr, správu, zpracování, ukládání a vyhledávání geograficky určených dat (geodat) a poskytuje účinné nástroje pro jejich analýzu, modelování a grafické zobrazení. Digitální data a výstupy lze navíc prezentovat v internetovém prostředí pomocí mapových serverů pro publikaci webových mapových služeb. Vstupní data jsou ukládána do geodatabáze, která umožňuje aplikaci prostorových dotazů a provádění analýz ve spojení s GIS softwarem. Zdrojem rastrových či vektorových dat mohou být naskenované analogové podklady, družicové a letecké snímky, údaje z geodetického měření, laserového skenování a fotogrammetrie, databáze s prostorovými daty a BIM či CAD soubory. GIS nachází velmi široké uplatnění

¹² <https://blogs.autodesk.com/bim-and-beam/2015/01/15/a360-collaboration-for-revit/>

v organizacích státní správy, samosprávy i v soukromém sektoru. Nejčastěji je aplikován pro územní rozhodování a regionální rozvoj, krizová řízení, evidenci majetku, parcel a nemovitostí, modelování přírodních a socioekonomických jevů, cestovní ruch, řízení energetických a vodohospodářských soustav, správu inženýrských sítí, vizualizace modelů budov, mapové výstupy a navigační systémy a podklady. Mezi nejběžnější produkty GIS patří klasické kartografické produkty (nástěnné a turistické mapy, plány, glóby, 3D modely území aj.), data pro GPS navigace, internetové mapové portály, mapové aplikace, 2D a 3D interaktivní vizualizace a animace nebo mapové podklady pro desktopové GIS aplikace. [55] [56]

4.2.1 ArcGIS

ArcGIS je geografický informační systém určený pro práci s prostorovými daty od firmy Esri (*Environmental Systems Research Institute*), kterou založili v Kalifornii v roce 1969 Jack a Laura Dangermondovi. Do kategorie základního systému ArcGIS Desktop patří tři licenční úrovně produktů: Basic, Standard a Advanced. Všechny tyto licence zahrnují následujících pět aplikací: ArcGIS Pro, ArcMap, ArcCatalog, ArcScene a ArcGlobe, které lze rozšířit o další nadstavby (extenze) umožňující řešit komplikovanější úkoly v rámci zpracování geodat. Patří k nim např. 3D Analyst, Spatial Analyst, Maplex, Network Analyst aj. Na základě knihovny ArcObjects si lze navrhnout ve standartních počítačových jazycích i vlastní nadstavby.

ArcGIS Pro je nejmodernější desktopový GIS založený na 64bitové architektuře, který podporuje vícejádrové procesy a výpočetní možnosti současných grafických karet. Dokážou tak lépe využívat paměť počítače a zároveň zpracovávat výpočty, takže práce s velkými objemy dat je mnohem rychlejší. Grafický engine nově umožňuje pracovat v jednom projektu s více mapami současně a mapová okna lze navíc provázat polohou a stupněm přiblížení. Projekt je soubor mapových kompozic, uložených dat, stylů, připojení ke složkám a serverům, skriptů, geoprocessingových nástrojů atd., je tak velice kompaktní a lze ho snadno sdílet. Další obrovskou výhodou je, že v prostředí ArcGIS Pro není nutné používat speciální aplikace na zobrazení, zpracování a analýzu 3D dat a tento systém dokáže zobrazovat i 3D data vytvořená pomocí pravidel aplikace CityEngine. Nový ArcGIS Pro dále nabízí sdílení pracovních postupů pomocí tzv. úloh, těsnou integraci s platformou ArcGIS, snadné sdílení výstupů, pokročilou editaci a mnoho dalšího. Pro studenty ČVUT jsou všechny produkty ArcGIS po dobu studia poskytovány bezplatně. [56] [57]

4.2.2 ArcGIS Indoors

ArcGIS Indoors je kompletní systém pro zmapování indoor prostředí, který slouží pro vytvoření propojeného pracoviště na základě sdílení mnoha doplňkových informací, operací a dat mezi všemi zaměstnanci, správci, uživateli a návštěvníky budov. Tento nejnovější produkt od společnosti Esri, vydaný na konci března roku 2019, umožňuje prostřednictvím rozšířených verzí ArcGIS Pro, webových a mobilních aplikací a ArcGIS indoor informačního modelu (AIIM) snadnější navigaci, koordinaci, řízení a využití pracovního prostředí. Systém je navržen tak, aby pracoval s ostatními částmi platformy ArcGIS a pomocnými aplikacemi a lze ho využít pro vizualizaci a monitoring pracoviště, zpracování a analýzu dat či zadávání nových požadavků k opravě či výměně pomocí služby Survey123. Indoor mapy lze samozřejmě využít k orientaci a navigaci po budově i v prostředí bez jakéhokoliv připojení.

ArcGIS Indoors for Pro umožňuje vytvářet a spravovat data a sdílet mapy a služby za podpory tří aplikací – ArcGIS Indoors Web, ArcGIS Indoors for iOS a ArcGIS Indoors for Android. Pomocí aplikace ArcGIS Indoors Web je velice snadné vyhledání cílové lokace či zdroje, cestu k tomuto místu a její časový odhad. Webové rozhraní nabízí režim prohlížeče pro počítače či jiná zařízení s webovým prohlížečem a režim kiosku pro dotykové obrazovky a tablety. ArcGIS Indoors pro iOS a Android jsou aplikace vytvořené v jejich nativní platformě, aby plně využily funkcí operačních systémů. Obě aplikace slouží k zobrazení a průzkumu indoor map, vyhledávání tras, ukládání a sdílení zajímavých míst a událostí, hlášení závad či získávání orientačních bodů. V případě dostupnosti IPS zobrazují tyto aplikace umístění v reálném čase, kdy se mapa sama přepne na aktuální patro, na kterém se uživatel nachází. [58]



Obr. 17 ArcGIS Indoors [58]

5 Zpracování

Po vydání ArcGIS Indoors se ukázalo, že tento produkt není součástí celouniverzitní licence, a tudíž není možné k němu získat přístup. Tento problém byl řešen i ve spolupráci s panem Mgr. Stanislavem Kalinou z výpočetního a informačního centra ČVUT a firmou ARCDATA PRAHA s.r.o., která zajišťovala komunikaci přímo se společností Esri jakožto její oficiální distributor pro Českou republiku. Bohužel ani jim se nepodařilo tuto licenci získat, a proto bylo nutné se při zpracování návrhu navigace po budově školy odklonit od původního zadání.

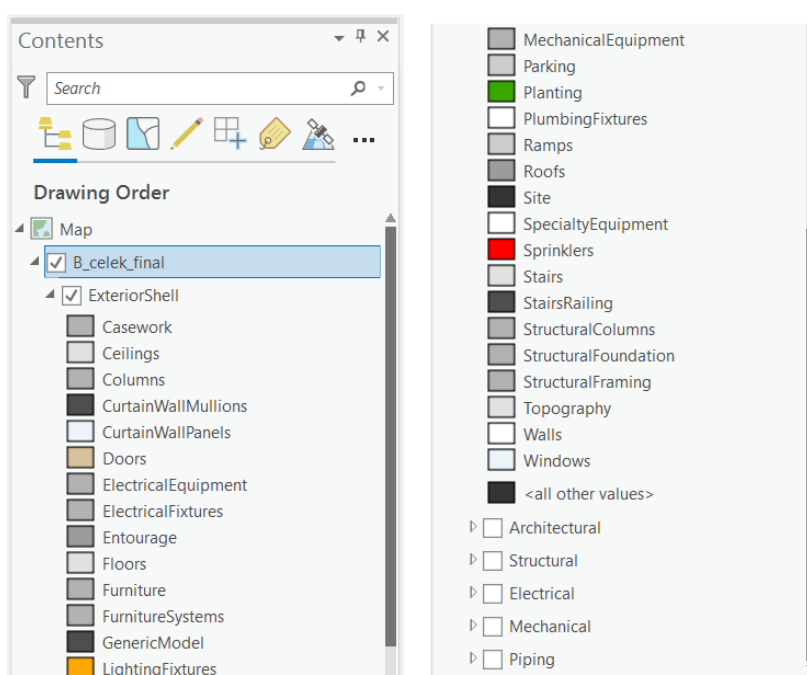
Na stránkách ArcGIS Online lze po přihlášení získat beta verzi ArcGIS Indoors z uživatelské konference z roku 2017, která obsahuje vzorový projekt s nástroji pro vytvoření geodatabáze z CAD souborů, konfiguraci mapových vrstev a publikování vytvořených indoor map. Soubor dále obsahuje mimo jiné vstupní CAD výkresy, konfigurační tabulku, vrstvy se symbolikou a podrobný návod pro práci s vlastními daty, podle kterého byl návrh realizován. Pro vytvoření ArcGIS Indoors mapy jsou v této verzi požadovány čtyři extenze (*Spatial Analyst*, *3D Analyst*, *Network Analyst* a *Production Mapping*) a uživatelský typ *ArcGIS Professional Advanced*. I přes to, že naše univerzita má k dispozici pouze uživatelský typ *Creator*, bylo možné nástroje a funkce ze vzorového projektu plně využít. Nevýhodou této verze však je, že počet vstupních dat je omezen a nebylo tak možné vytvořit navigační model po celé budově Fsv ČVUT, jak bylo původně v plánu. Pro ukázkou různých řešení a funkcí byly zpracovány dva modely, jeden pro budovu B, kde jsou zachycena horní tři patra, a druhý pro budovu C. Dalším omezením bylo, že zde chyběly nástroje pro vytvoření indoor sítě, na základě které jsou vyhledávány jednotlivé trasy. Tento krok bylo proto nutné zpracovat ručně, a to pomocí aplikace ArcCatalog, jelikož nejnovější verze ArcGIS Pro 2.3 ještě nepodporuje tvorbu nového síťového datasetu (*New Network Dataset*). [59] [60]

5.1 Převod modelu z BIM do GIS

Během zpracování této diplomové práce byla vydána nová verze ArcGIS Pro 2.3, která podporuje formát souborů Autodesk Revit (RVT) 2015 až 2019. BIM z Revitu tak lze přímo otevřít v programu ArcGIS Pro bez nutnosti použití jakékoliv platformy pro integraci prostorových dat, jako je například *Feature Manipulation Engine* (FME) od společnosti Safe Software. Datový model v ArcGIS Pro je značně odlišný od CAD datových balíčků a soubory Revitu musí být v ArcGIS Pro uspořádány do pracovních

prostorů (*workspaces*), datových setů (*datasets*) a tříd prvků (*feature classes*) tak, aby mohly být dalším zdrojem dat jako je geodatabáze nebo shapefile. Data z Revitu jsou primárně určena pouze pro čtení (zobrazení), avšak pomocí geoprocessingových nástrojů mohou být převedeny do jiných formátů, a dokonce i publikovány z geodatabáze do vrstvy I3S. V dokumentaci ArcGIS Pro je detailně vysvětleno, jak jsou soubory Revitu v ArcGIS Pro organizovány a kde se nachází každá kategorie.

Atributy extrahované z Revitu jsou omezeny na jmenovité rozměry, uživatelem definované parametry a primární identifikátory objektu. V současné verzi ArcGIS Pro nelze načíst barvy a vlastnosti materiálu z modelu. Dále zde nejsou podporovány výkazy, které je však možné teoreticky znovu vytvořit pomocí nástrojů pro tabulky. Soubor Revit lze jako zdroj dat do mapy přidat různými způsoby. Je možné přidat celý projekt (obr. 18), který obsahuje datové sady jednotlivých disciplín a třídy prvků představující všechny rodiny a atributy 3D multipatch geometrie. Aby se zkrátila doba načítání takto velkých souborů, ve výchozím nastavení se zobrazuje pouze třída prvků pro exteriér budovy (*Exterior Shell*). Ta je obvykle v architektonickém datovém setu, ale zde je vybrána pro snadnější zobrazení budovy. Dále je možné přidat pouze datové sady jednotlivých disciplín (architektonické, strukturní, elektrické, mechanické aj.) obsahující rodiny Revitu, které odpovídají příslušné disciplíně, anebo jednotlivé třídy prvků, které je možné dále filtrovat podle atributů pro specifičtější výběr toho, co se zobrazí v mapě. [61]



Obr. 18 Datové sady a třídy prvků Revit souboru v ArcGIS Pro

5.2 Příprava vstupních dat

V obou verzích ArcGIS Indoors (alfa i beta) lze plány podlaží nahrát prozatím pouze z CAD formátů, jako jsou DWG soubory z AutoCADu či DGN soubory z MicroStationu. Tyto soubory lze z Revitu velice snadno vyexportovat, jelikož často bývají pokladem pro tvorbu celého BIM. Výhodou BIM je, že z něho lze získat i další užitečné informace, které v klasických výkresech nejsou obsaženy. V mém případě byly vyexportovány do DWG souboru navíc typy místností. Před samotným importem vstupních dat byly tyto výkresy zkontrolovány a upraveny v softwaru AutoCAD. Velmi důležité je, aby všechny názvy a popisy místností začínaly uvnitř polygonů místností (konec textu již přesahovat polygon smí) a aby kresba jednotlivých prvků byla ve správných vrstvách. Vrstvy, které budou později využity pro indoor mapy, navíc musí být ve všech výkresech pojmenovány stejně. V případě kopírování vrstev mezi více výkresy je nutné dbát na shodné měřítko výkresů. Dále je třeba zkontrolovat, zda je ve výkresech obsažena vrstva s jednoduchou linií ohraničující podlaží. U mých výkresů bylo nutné většinu prvků předělat či doplnit, jelikož podkladové CAD výkresy byly často nejednotné a chaoticky uspořádané.

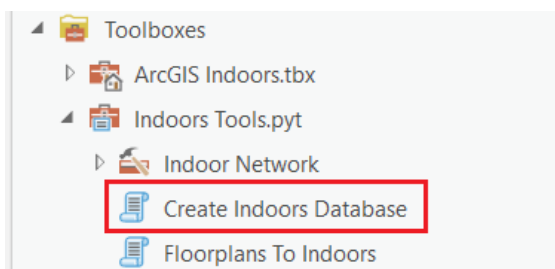
Ve vzorovém projektu ArcGIS Indoors.aprx, byla nejprve založena nová mapa v záložce *Insert* s názvem *CAD to GIS*. Do této mapy byly pomocí tlačítka *Add Data* v záložce *Map* přímo naimportovány vlastní CAD soubory, jež byly uloženy do složky s názvem *CAD B (C)*. Do ArcGIS Pro je možné po kliknutí na název DWG souboru v dialogovém okně přidat pouze některé GIS vrstvy z výkresu, jako jsou anotace, body, linie či polygony. Jelikož mé soubory nebyly georeferencovány, bylo nutné tak učinit pomocí nástrojů v záložce *CAD Layer - Manage*, která se objeví po kliknutí na libovolnou vrstvu přidaného výkresu. CAD formáty primárně nepodporují ArcGIS georeferenční systém, proto bylo georeferencování provedeno spojením dvou kontrolních bodů ve výkresu se známými zeměpisnými souřadnicemi v mapě, přičemž zdrojová data zůstala na disku nezměněná. Podobnostní transformace celý výkres posune, pootočí a změní mu měřítko, aniž by došlo ke zkreslení geometrie či změně poměru stran. Informace o spojení se automaticky uložily do pomocného souboru s příponou *.wld*, který je možné dále sdílet či opakovaně použít v jiných projektech. Pomocný soubor a CAD výkres musí být uloženy ve stejné složce a musí mít stejný název. Pokud jsou tyto dvě podmínky splněny, program načte kontrolní body do paměti a při opakovaném přidání výkresu do mapy automaticky umístí dataset na správnou pozici. Důležité je provést georeferencování

s co nejvyšší možnou přesností, protože jakékoliv chyby v měřítku nebo geografické poloze budou promítnuty do výstupních GIS funkcí. Jako referenční data byly využity podkladové mapy OpenStreetMap. [60] [62]

5.3 Převod vstupních dat do geodatabáze

V prvním kroku byla založena prázdná souborová geodatabáze *AIIM_BuildingB (C)*, která slouží pro převod dat z výkresů podlaží, a proto byla zvolena jako výchozí. Poté byl spuštěn nástroj *Create Indoors Database*, který lze najít v okně *Catalog* v nástrojovém setu *Indoor Network* – viz obr. 19.

Jako *Input Workspace* parametr byla zvolena nově vytvořená souborová geodatabáze. Dále byla zaškrtnuta možnost *Create Network Features*, jež vytvoří v indoor geodatabázi dataset funkcí, který obsahuje třídy prvků pro indoor síť. Ty lze později využít k vytvoření indoor síťového datasetu pro vyhledávání cest. Pokud je potřeba přepsat vstupní geodatabázi, stačí zaškrtnou i poslední možnost *Drop Existing Indoors Database*. Tato funkce byla velmi užitečná při používání vlastních dat, jež bylo nutné během zpracování několikrát upravit. Po spuštění nástroje se vytvořily ve vstupní databázi všechny AIIM třídy prvků, vztahové třídy (*relationship class*) a přednastavené konfigurační tabulky potřebné k vytvoření indoor mapy.



Obr. 19 Spuštění nástroje *Create Indoors Database*

Druhým krokem byl import CAD plánů podlaží do nově vytvořené AIIM geodatabáze. Tento proces využívá pro definování názvů zdrojových CAD vrstev do výstupních GIS vrstev a atributů konfigurační tabulku Excelu (.xlsx), jež musí být uložena ve stejném adresáři jako jsou vstupní CAD soubory. Konfigurační tabulku lze získat ve vzorovém projektu v adresáři `\Tools\Indoors\CADToAIIMConfigTemplate`, případně pak v plné verzi ArcGIS Indoors v adresáři `\ArcGISIndoors\Tools\CADToAIIMConfigTemplate`.

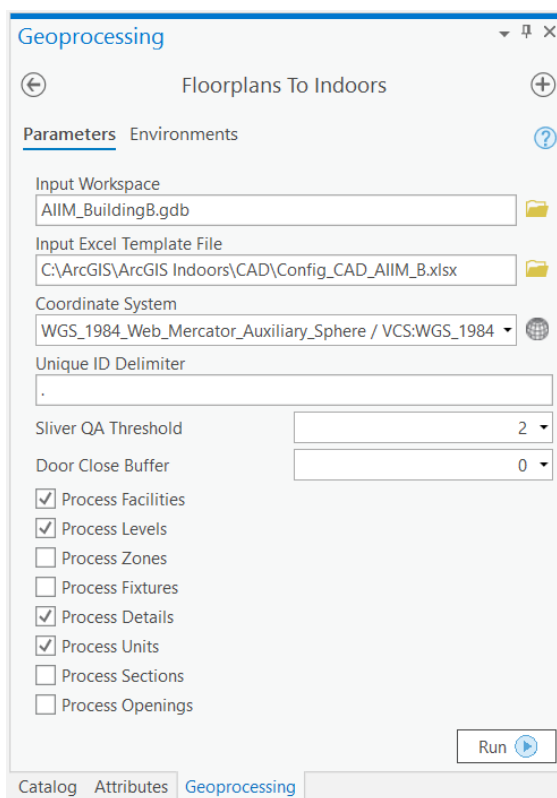
Pro úplné pochopení, jak tabulku vyplnit, je nejjednodušší si otevřít vzorovou tabulku z adresáře `\CAD Sample` a podle ní doplnit do své tabulky vlastní názvy vrstev. Detailní popis lze nalézt v dokumentaci na webových stránkách a další nápovědou mohou být informace uložené přímo v tabulce, které se zobrazí při kliknutí na buňky s názvy sloupců. Tabulka obsahuje tři listy, ve kterých jsou uloženy různé konfigurační parametry a metadata o výkresech a budově. První list *CAD Layer to FC Mapping* slouží pro přiřazení názvů zdrojových CAD vrstev do odpovídajících výstupních tříd prvků. Nejjednodušší je definovat polygony místností, pater, zón apod., které mohou být přímo převedeny na GIS polygony. Pokud nejsou tyto polygony ve výkresu k dispozici, lze specifikovat křivky ohraničující dané prvky, ze kterých se polygony automaticky vygenerují. Tento postup byl využit pro vykreslení detailů. Do výstupních tříd byly dále přidány anotace, jež obsahují hodnotné informace. Dle vzoru byla vyplněna pole pro identifikaci a využití místností (*UNIT_IDENTIFIER*, *UNIT_USE*). Při zpracování bylo zjištěno, že pokud není vyplněno pole *UNIT_NAME*, nástroj pro převod CAD do GIS připiše před názvy místností (jednotek) slovo *Unit*. Tomu se lze snadno vyhnout vyplněním tohoto pole stejnou vrstvou, jako je v poli pro *UNIT_IDENTIFIER* či jinou anotační vrstvou obsahující názvy jednotlivých místností. Minimálně by měla být vyplněna pole a odpovídající anotace pro zařízení (*Facility*), patra (*Levels*), místnosti (*Units*) a detaily (*Details*). Pokud jsou polygony místností generovány z křivek, je nutné vyplnit i poslední sloupec *OPENING*, který slouží pro identifikaci linií dveří. Při spuštění nástroje lze poté zvolit možnost „zavřít“ tyto linie, čímž se oblouk vyznačující otevírání dveří vymaže a nahradí rovnou linií. Následující dva listy *Building Properties* a *Floor Properties* slouží k doplnění metadat o budově a jednotlivých podlažích. Pro jejich vyplnění je opět výhodné využít vzorovou tabulku. Pro patra je nutné zadat umístění vstupních výkresů v počítači, jejich identifikátory, názvy, relativní výškové informace, jež byly převzaty z BIM, možnost sloučení různých linií a případně funkci pro zavírání dveří.

CAD Layer to FC Mapping		Building Properties				Floor Properties			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	SITEID	SITENAME	FACILITYID	NUMBER	NAME	LONGNAME	DESCRIPTION	ADDRESS	BUILDDATE
2	CTU.PRG	CTU in Prague	CTU.PRG.B	1	B	B	Building B	Thakurova 2077/7, 166 29 Praha 6	18.01.1707

CAD Layer to FC Mapping		Building Properties		Floor Properties				
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	SOURCEPATH	FACILITYID	LEVELID	NAME	LONGNAME	DESCRIPTION	ACCESSTYPE	LEVELNUMBER
2	C:\ArcGIS\ArcGIS Indoors\CAD\B_N7.dwg	CTU.PRG.B	CTU.PRG.B7	B7	B7	Floor 7	Employee	7
3	C:\ArcGIS\ArcGIS Indoors\CAD\B_N8.dwg	CTU.PRG.B	CTU.PRG.B8	B8	B8	Floor 8	Employee	8
4	C:\ArcGIS\ArcGIS Indoors\CAD\B_N9.dwg	CTU.PRG.B	CTU.PRG.B9	B9	B9	Floor 9	Employee	9

Obr. 20 Ukázka z konfigurační tabulky Excelu

Po vyplnění konfigurační tabulky byl spuštěn nástroj *Floorplans to Indoors*, který je umístěn pod nástrojem *Create Indoors Database*. Zde byla do prvního pole vložena nově vytvořená AIIM geodatabáze, do druhého pole konfigurační tabulka a do třetího pole souřadnicový systém Web Mercator Auxiliary Sphere pro souřadnice X/Y a souřadnicový systém WGS 1984 pro Z-ové souřadnice. Jako oddělovač pro unikátní ID byla zvolena tečka, ale lze použít i pomlčku či podtržítka. Prahová hodnota *Silver QA Threshold* určuje poměr obvodu mnohoúhelníku k jeho ploše a výchozí hodnota 2 funguje pro většinu situací. Pro výkresy se špatnou topologií lze pomocí *Door Close Buffer* uzavřít mezery kolem stěn a dveří, zde však byla ponechána nula. Na závěr byly vybrány prvky, které bylo třeba na základě konfigurační tabulky vygenerovat (viz. obr. 21). Výpočet této funkce může trvat až několik desítek minut, v závislosti na složitosti a počtu výkresů.

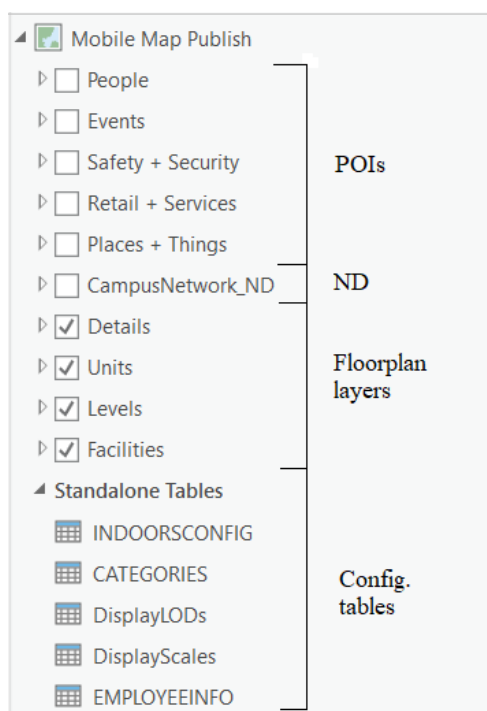


Obr. 21 Nástroj *Floorplans to Indoors*

Jakmile nástroj *Floorplans to Indoors* dokončil všechny své výpočty, bylo nutné zkontrolovat nově vytvořené třídy prvků (*Facilities*, *Levels*, *Units* a *Details*), jež byly uloženy v AIIM geodatabázi definované v poli *Input Workspace*. Při nalezení jakékoliv chyby či mezery ve výstupech, bylo nutné opravit vstupní CAD soubory nebo konfigurační tabulku a spustit nástroj znovu. [60] [63]

5.4 Konfigurace mapových vrstev

Vzorová mapa *Mobile Map Publish* je nakonfigurovaná pro publikování všech vrstev, které využívá mobilní aplikace. V panelu *Contents* jsou uvedeny základní komponenty indoor mapy: body zájmu (*Points of Interest – POIs*), síťový dataset (*Network Dataset – ND*), vrstvy s plány podlaží (*Flooplan layers*) a konfigurační tabulky (*Config. tables*).



Obr. 22 Základní komponenty Indoor mapy

5.4.1 Vlastnosti mapy

Pro další zpracování byla založena nová mapa s názvem *Mobile Map Publish Building B (C)*. Ve vlastnostech mapy byla v záložce *General* povolena možnost *Allow assignment of unique numeric IDs for sharing web layers*, dále byl vyplněn název, klíčová slova, shrnutí, popis a kredity v záložce *Metadata* a bylo zkontrolováno, zda je definován souřadnicový systém pro souřadnice X/Y a Z v záložce *Coordinate Systems*. [60]

5.4.2 Vrstvy s plány podlaží

Do nové mapy byly přidány třídy prvků *Facilities*, *Levels*, *Units* a *Details*, jež tvoří základní vrstvy indoor mapy. Pro úpravu jejich symboliky byly nejprve importovány vzorové soubory s příponou (.lyrx) uložené ve složce *\Symbology* vzorového projektu a až potom byly provedeny potřebné úpravy, jelikož vzorové soubory mají kromě barev

a typů čar nastavenou i viditelnost dle měřítka a konfiguraci pro vyskakovací prvky. Upravené soubory pro symboliku byly ukládány do složky s názvem *Symbology B (C)*. Linie detailů se ve všech projektech značně liší v závislosti na tom, z jakých vrstev CAD výkresů byly vytvořeny. Pro zdi a dveře bylo zvoleno šedočerné spektrum barev a pro okna světle modrá barva s tloušťkou linie cca 0,5 pt. Místnosti (jednotky) byly barevně odlišeny dle jejich typu či využití. Důležité je znovu upozornit, že výběr barev má dopad na výsledný vzhled a přehlednost mapy. Opět by měla být použita asociativnost barev, tedy pro chodby a haly byly využity světle šedé barvy a pro sociální zařízení bledě modré barvy. Polygony pro jednotlivá patra byly v mnoha případech zakryté místnostmi a detaily, i přesto by měly být vždy v mapě přítomny. Polygon budovy představující rozsah všech nadzemních úrovní budovy je viditelný v širším rozsahu přiblížení než vrstvy s jednotkami a detaily. Všechny vrstvy reprezentující jednotlivá patra byly v atributové tabulce automaticky vyplněny metadaty, výškovými údaji, vertikálním pořadím a identifikátory zadanými do konfigurační tabulky. Aby bylo možné jednotlivé vrstvy filtrovat a dotazovat se na ně, musí být v tabulce přítomny určité atributy, jejichž seznam je uveden v příloženém návodu. Pro snadnější práci s jednotlivými patry byla ve vlastnostech vrstev v záložce *Range* přidána pohyblivá lišta pro přepínání viditelnosti pater na základě atributu *Vertical Order*. [60]

5.4.3 Body zájmu

Body zájmu (POIs) jsou lidé, místa, události či objekty, které lze zobrazit na mapě. Pro snadnější vyhledávání jsou rozděleny do dvou úrovní kategorií. Kategorie *Level 1* seskupují body zájmu stejného typu, zatímco kategorie *Level 2* detailněji popisují jednotlivé typy z první úrovně. Obě úrovně kategorií lze upravit či rozšířit dle požadavků konkrétní budovy. Vzorový projekt obsahuje následující kategorie *Level 1: People, Events, Safety + Security, Retail + Services a Places + Things*. Bodová vrstva s lidmi (*People*) je v samostatné třídě prvků, zatímco ostatní body zájmu jsou definovány atributem *LOCTYPE* ve třídě prvků *POIs* datového modelu ArcGIS Indoors. Pro oddělení těchto čtyř kategorií byla ve vlastnostech vrstvy v záložce *Definition Query* zadána vždy konkrétní hodnota atributu *LOCTYPE (1, 2, 3 nebo 4)*. Všechny body zájmu musí mít Z-ovou souřadnici, jelikož síťový dataset, ve kterém se generují navigační trasy, je ve 3D. Pro hromadný převod těchto bodů do 3D byl využit nástroj *Feature To 3D By Attribute*, kde Z-ová souřadnici byla převzata z atributu *Base Elevation*.

Pro doplnění informací o zaměstnancích budovy byla využita prázdná tabulka *EMPLOYEEINFO* vygenerovaná v AIIIM geodatabázi, ve které byly upraveny některé výchozí hodnoty polí pro její rychlejší naplnění. Pro převod této tabulky na bodovou vrstvu slouží v beta verzi skript *PepolePoints*, který je umístěn v ArcGIS Indoors.tbx. Pro správné fungování skriptu byla ještě před jeho spuštěním založena nová pomocná geodatabáze. Do dialogového okna byla zadána cílová AIIIM geodatabáze (*TargetGDB*), do níž se generuje výsledná bodová třída prvků, nově vytvořená pomocná geodatabáze (*WorkingGDB*), souřadnicový systém a umístění tabulky *EMPLOYEEINFO* a vrstvy s místnostmi (*Units*). Výstupní třídě prvků *People* byla na závěr importována symbolika *People.lyrx* ze vzorového projektu.

Body zájmu *Places + Things* (*LOCTYPE = 1*) obecně reprezentují centroidy místností či zajímavá místa a prvky v budově. Mohou jimi být kanceláře, učebny, výtahy, fontány nebo umělecká díla. Body zájmu v kategorii *Retail + Services* (*LOCTYPE = 2*) zobrazují v mapě místa, kde lze nakupovat zboží a služby nebo vytvářet jiné finanční transakce. Zdrojem událostí v kategorii *Events* (*LOCTYPE = 3*) jsou nejčastěji různé tabulky, rozvrhy a plány a většinou mají název, popis a časový údaj o začátku a konci události. Body zájmu v kategorii *Safety + Security* (*LOCTYPE = 4*) určují, kde jsou v budově umístěny únikové východy, hasicí přístroje, lékárničky apod. Většina bodů zájmu byla přidána do třídy prvků *POIs* manuálně pomocí nástroje *Create*, který je umístěn v záložce *Edit*. Některá místa byla v mapě již definována polygonem místnosti a byla tak velmi snadno převedena na body pomocí nástroje *Feature To Point* s využitím možnosti *Inside*, a poté jim byla doplněna Z-ová souřadnice pomocí nástroj *Feature To 3D By Attribute*. Všem kategoriím byla na závěr přiřazena odpovídající symbolika ze vzorového projektu, jež byla dále upravena dle vlastních potřeb. Symboly jednotlivým bodům zájmu byly přiřazeny na základě hodnot uvedených v atributu s názvem *Category*.

Atributová tabulka třídy prvků *POIs* musí obsahovat stejné atributy jako vrstvy s plány podlaží, a navíc atributy *DISPLAY_SCALE* a *DAYOFWEEK*. Atribut *LOCSUBTYPE* pro kategorii *Events* daný zkratkou dne v týdnu byl v beta verzi špatně přednastaven, a proto bylo nutné tyto zkratky ručně dopsat do domény *Events*. Pro správné určení začátku a konce událostí bylo dále nutné ve vlastnostech vrstvy *Events* v záložce *Time* zvolit možnost *Each feature has start and end time fields*, určit názvy polí s časem začátku a konce událostí a definovat časové pásmo. [60]

5.4.4 Konfigurační tabulky

V AIIM geodatabázi bylo pomocí nástroje *Create Indoors Database* vytvořeno pět samostatných tabulek, které musí být přítomny v indoor mapě, aby správně fungovala v mobilní a webové aplikaci. Tabulka s názvem *EMPLOYEEINFO* slouží k doplnění informací o zaměstnancích budovy a byla již popsána výše. Tabulka *DisplayLODs* (*Levels Of Details*) obsahuje úroveň detailu a měřítko mapy pro nastavení viditelnosti různých vrstev map. Tato tabulka funguje ve spolupráci s tabulkou *DisplayScales* a měla by zůstat nezměněná. Tabulka *DisplayScales* obsahuje minimální a maximální měřítko, ve kterém jsou různé prvky viditelné v mapě, a taktéž by měla zůstat nezměněná. Tabulka *INDOORCONFIG* obsahuje základní konfigurační parametry pro správné načtení indoor mapy v mobilní či webové aplikaci. V této tabulce bylo nutné vyplnit minimálně verzi ArcGIS Indoors, název a URL adresu organizace, URL adresu podkladové mapy a časové pásmo. Poslední tabulka s názvem *CATEGORIES* obsahuje popisné informace o bodech zájmu a bylo nutné jí přizpůsobit dle požadavků konkrétní budovy. V této tabulce byl pro všechny kategorie a jejich úrovně doplněn správný počet bodů zájmu vložených do mapy, aby aplikace zobrazovala jejich ikony. K tomu byl využit nástroj *Frequency*.

Mobilní a webové aplikace (ArcGIS Indoors Web, ArcGIS Indoors for iOS a ArcGIS Indoors for Android) jsou bohužel vázány stejnou licencí jako ArcGIS Indoor for Pro, a z tohoto důvodu je nebylo možné spustit. [60]

5.5 Tvorba síťového datasetu

V plné verzi ArcGIS Indoors je tvorba Indoor sítě rozdělena do 6 kroků. V prvním kroku je pomocí nástroje *Generate Pathways* vygenerována podrobná síť cest po celé budově, jejíž hustota se typicky nastavuje na hodnotu 0,25 m až 0,9 m. Pro určení linií, skrze které nemohou cesty vést, využívá nástroj vrstvu *Details* z informačního modelu. Ve druhém kroku je využíván nástroj *Create Floor Transitions* k automatické tvorbě vertikálních 3D linií propojujících jednotlivá patra. Jelikož schody a eskalátory nejsou přímé vertikální linie, je nutné tyto prvky po vygenerování manuálně upravit. Třetí krok slouží k redukování počtu cest v husté síti a vytvoření finální podoby síťového datasetu pomocí nástroje *Thin Pathways*. Ve čtvrtém kroku lze díky nástroji *Classify Pathways* klasifikovat jednotlivé cesty a přiřadit jim tak určité priority. V případě, že indoor mapa zahrnuje více budov, je možné v dalším kroku tyto budovy propojit venkovními trasami pomocí editačních nástrojů ArcGIS Pro. Poslední krok je vyhrazen k tvorbě bodové

vrstvy reprezentující orientační prvky (*landmarks*), které slouží k detailnějšímu popisu trasy a snadnější navigaci po budově. Tato vrstva může být kdykoliv aktualizována bez nutnosti vytvořit nový síťový dataset. Detailní popis tvorby indoor sítě je uveden v dokumentaci ArcGIS Indoors.

Z důvodu licenčního omezení nebylo možné výše uvedené nástroje využít a při vydání beta verze ArcGIS Indoor byly tyto nástroje teprve vyvíjeny, a tudíž nejsou ve vzorovém projektu k dispozici. Proto byla síť vyhotovena ručně na základě protokolu uvedeného ve vzorovém projektu, který lze najít ve vlastnostech síťového datasetu v záložce *Source* v odrážce *Summary*. Jak již bylo v úvodu této kapitoly zmíněno, současná verze ArcGIS pro 2.3 zatím nepodporuje tvorbu nového síťového datasetu, a proto bylo nutné využít starší aplikaci ArcCatalog, která slouží k organizaci a správě různých typů geografických informací pro ArcGIS Desktop. Pro vytvoření nového síťového datasetu je nutné mít povolenou extenzi *Network Analyst*. [64]

5.5.1 Ruční tvorba cest a orientačních bodů

Nejlepší možností je vytvořit síťový dataset z tříd prvků uložených v datasetu funkcí *CampusNetwork* AIIIM geodatabáze, jež byly vygenerovány pomocí nástroje *Create Indoros Database* v případě, že byla zaškrtnuta možnost *Create Network Features*. Tyto třídy prvků bylo nutné doplnit ručně pomocí nástroje *Create*. Pro tvorbu nových cest byla založena nová mapa s názvem *Network Map* a 3D scéna s názvem *Network Scene*. Pomocná třída prvků *Pathways_2D* byla kreslena pomocí 2 bodové linie. Do aktivní šablony, která se objeví v panelu *Create Features* po kliknutí na šipku směřující doprava, je třeba vyplnit následující atributy: *Pathway Type = Hallway/Sidewalk (1)*, *From Height = To Height =* relativní výška konkrétního patra, *From Level Name = To Level Name =* ID patra, *Pathway_Rank =* priorita cesty, *Building ID =* ID budovy (viz. konfigurační tabulka Excel) a nejdůležitější atribut pro správný režim zobrazení *Vertical Order*. Při kresbě čar je velice důležité dbát na napojení všech linií ve vertexech, jinak skončí analýza chybovým hlášením. Po vykreslení všech cest byl spuštěn nástroj *Feature To 3D By Attribute* s výškou převzatou z atributu *From Height*. Výstupní třída prvků byla pojmenována svým originálním názvem *Pathways*. Pro snadnější tvorbu síťového datasetu byly do atributové tabulky přidány dva nové sloupce s názvy *Minutes* a *Meters* a datovým typem *Double*, jež udávají dobu a délku chůze. Délka chůze byla dopočtena pomocí nástroje *Calculate Geometry Attributes* na základě 3D vzdálenosti a doba chůze pomocí nástroje *Calculate Field*, kde hodnota *Minutes = !Meters! / 66*.

Třída prvků *FloorTransitions* spojující jednotlivá patra byla vytvořena pomocí křivky. V aktivní šabloně byly vyplněny stejné atributy s tím, že *Pathway Type = Stairs/Curb (2)* či *Elevator/Wheelchair Lift (4)* a atributy „From – To“ již byly různé dle konkrétních pater. Schody byly většinou kresleny křivkou se dvěma body na mezipatře, jejichž Z-ová souřadnice byla určena jako průměrná hodnota výšek spojovaných pater. Pro vykreslení vertikálních linií je nejjednodušší využít kreslení ve 3D scéně. Pro zobrazení pater pod úrovní terénu, jak je tomu u budovy C, bylo nutné ve 3D scéně ve vlastnostech všech tříd nastavit v záložce *Elevation* kartografický offset tak, aby všechna patra byla nad úrovní terénu. Do atributové tabulky *FloorTransitions* byly taktéž přidány sloupce *Meters* a *Minutes*, přičemž doba chůze byla volena dle typu cesty tak, aby odpovídala realitě.

Poslední třída prvků *IndoorLandmarks* byla naplněna body reprezentujícími významné orientační prvky v budově jako jsou výtahy, schodiště, kavárny či vrátnice.

5.5.2 Založení síťového datasetu

Nový síťový dataset lze založit v aplikaci ArcCatalog volbou *New – Network Dataset*. Na první stránce stačí zadat název sítě a její verzi, kterou je dobré ponechat co nejvyšší. Na druhé stránce lze vybrat třídy prvků, které budou zdrojem pro síťový dataset, v tomto případě *Pathways* a *FloorTransitions*. Pokud v tomto kroku není zadána zdrojová bodová třída s průsečíky (*junctions*), systém je automaticky vytvoří při vybudování ND a tuto třídu prvků pojmenuje [*název sítě*]*_Junctions*. Volba pro vytvoření míst k otočení (*turns*) na třetí stránce je na uživateli, ale z praktického hlediska se doporučuje tuto možnost potvrdit. Na čtvrté stránce se nastavuje napojení jednotlivých linií. V případě základní navigace po budově není potřeba tvořit více úrovní. Výchozí nastavení napojení linií v koncových bodech je dobré přenastavit na propojení v jakémkoliv vertexu.

Pátá stránka je klíčová pro vytvoření 3D datasetu, jelikož zde se volí využití hodnot Z-ových souřadnic linií a bodů na základě jejich geometrie. Pokud jsou Z-ové souřadnice koncových bodů linií v tabulce uloženy do dvojice polí s názvem *F_Height* a *T_Height*, nástroj je automaticky rozpozná. Šestá stránka slouží pro nastavení síťových atributů, jejichž typem využití jsou hodnoty trasy (*cost*), popisy (*descriptors*), omezení (*restrictions*) a hierarchie (*hierarchy*). Nástroj opět automaticky v atributových tabulkách vyhledává názvy jako *Meters* a *Minutes* nebo *Oneway*, čehož bylo využito pro hodnoty délky a času chůze, jež zde byly přejmenovány na *WalkLength* a *WalkTime*. Dle vzorového projektu bylo dále mezi atributy přidáno omezení pro preferování primárních cest, zakázání použití obousměrných cest, schodů, a výtahů a dále popisy tras.

Pokud je při zakládání nového omezení zaškrtnuta možnost *Use by Default*, využije se toto omezení automaticky při vytvoření nové síťové analýzy a pokud ho chce uživatel ignorovat, je nutné ho vypnout v nastavení dané cesty. Pro všechny atributy bylo pomocí tlačítka *Evaluators* nastaven typ *Field*, do kterého byla pomocí tlačítka *Evaluator Properties* zadána hodnota definující danou funkci. Následující tabulka ukazuje typ využití, typ skriptu a zadané hodnoty pro nově vytvořené atributy.

Tab. 3 Přehled nově vytvořených atributů

Název	Typ využití	Skript	Hodnota
Prefer: Primary Paths	Restrictions	Python	!Pathway_Rank! == 1
Prohibit: Elevators	Restrictions	Python	!Type!==4
Prohibit: Stairs	Restrictions	Python	!Type!==2
Prohibit: Two Way	Restrictions	Python	!Travel_Direction! == "TF" (tam) !Travel_Direction! == "FT" (zpět)
RoadClass	Descriptors	VBScript	roadClass

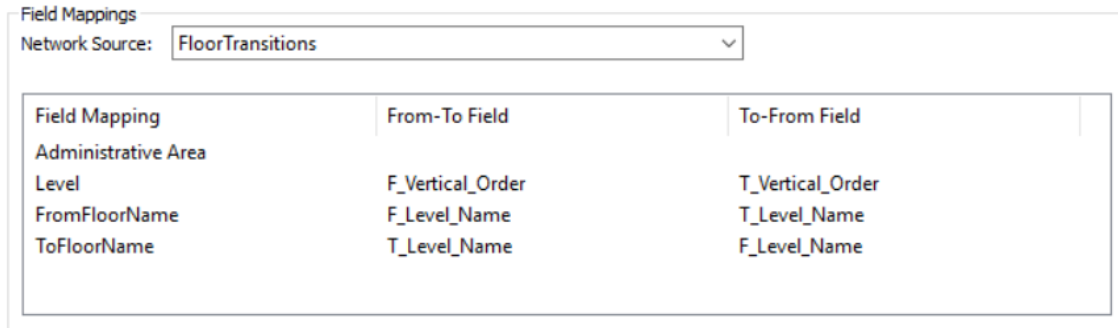
Samotný kód pro VBScript byl použit v tomto tvaru:

```

pathType = [Type]
roadClass = 1
if (pathType = 1) then
roadClass = 10
elseif (pathType = 2) then
roadClass = 12
elseif (pathType = 4) then
roadClass = 14
else
roadClass = 1
end if
    
```

Na sedmé stránce lze přidat cestovní mód, který v nejjednodušším případě nese název *Walking*, typ *Walk*, atribut pro čas: *WalkTime* a atribut pro vzdálenost: *WalkLength* a dále jsou u něj povoleny otočky a preferování primárních cest. Osmá stránka nabízí nastavení popisu trasy, po které je chodec navigován. Zde je třeba v záložce *General* přenastavit délkové jednotky na metry a atributy pro délku a čas na *WalkLength* a *WalkTime*. Dále je třeba pro obě zdrojové třídy prvků, které lze přepínat v rolovacím menu, nastavit název *Administrative Area*. V záložce *Landmarks* stačí vyplnit údaje pouze pro zdrojovou třídu prvků *Pathways*. Do obou polí *Turn* a *Confirmation Landmarks* je třeba pomocí ikony *Add data* přidat vlastní bodovou vrstvu *IndoorLandmarks* a nastavit pro ni tyto parametry:

Spatial Search = Yes, Label = USE, LEVEL = VERTICALORDER, Custom Tolerance = Yes, Tolerance = 5 a Units = Meters. V záložce *Road Detail* je nutné pro zdrojovou vrstvu *FloorTransitions* nastavit hodnoty uvedené na následujícím obrázku.



Obr. 23 Doplnění dat v záložce *Road Detail*

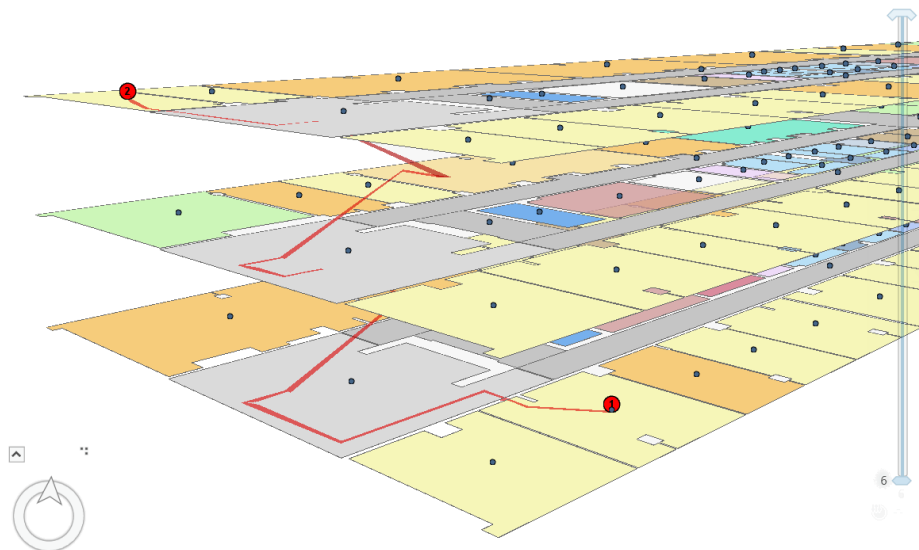
Na poslední stránce stačí zaškrtnout možnost vytvoření indexů pro oblasti služeb, ukončit nastavení nového síťového datasetu a potvrdit dotaz pro jeho vybudování. [65]

5.5.3 Vyhledávání tras pomocí síťové analýzy

Vrstva trasy (*route layer*) poskytuje strukturu a vlastnosti potřebné pro nastavení a řešení navigace. Lze ji vytvořit v záložce *Analysis – Tools – Network Analysis – Route*. V rolovacím menu *Network Analysis* je nutné ještě před tím zkontrolovat, zda je nastaven správný zdroj dat sítě, kterým by měl být nově vytvořená síťový dataset *CampusNetwork_ND*. Vrstva trasy se automaticky přidá do panelu *Contents* a je nutné na ni kliknout, aby se v horní části okna zobrazila záložka *Network Analyst – Route*, kde jsou umístěny všechny ovládací prvky. Ve vlastnostech vrstvy trasy lze v záložce *Travel Mode* v odrážce *Restrictions* zadávat či ubírat přednastavená omezení.

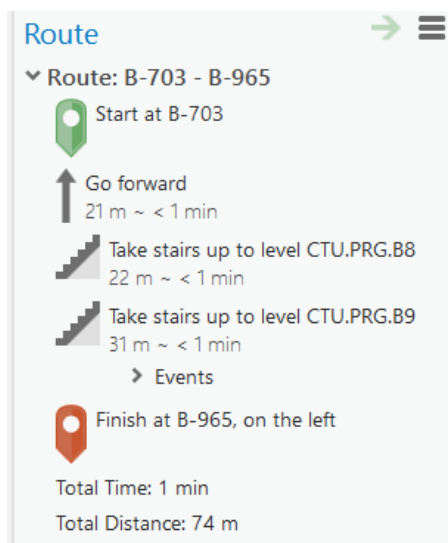
Dále je třeba definovat body (*stops*), mezi kterými má být vypočtena trasa. Pro analýzu lze využít třídu prvků s již existujícími body *Units_Pts*, anebo lze zakreslit do mapy nové body. V prvním případě je nutné vybrat jednotlivé body pomocí nástroje *Select* v záložce *Edit*, a poté spustit nástroj *Import Stops* v záložce *Route*. V dialogovém okně poté stačí vybrat vrstvu, ze které byly vybrány body, nastavit toleranci vyhledávání a zamítnout možnost *Append to Existing Locations*. Ve druhém případě je možné body zakreslit přímo do mapy pomocí nástroje *Create (Route: Stops)* v záložce *Edit*. Pokud import bodů proběhl úspěšně, je možné spustit analýzu tlačítkem *Run*. Výsledkem je vždy nejrychlejší cesta přes síť spojující všechny zvolené body, u kterých se zobrazí kulatý barevný symbol

s pořadovým číslem zastávky (obr. 24). Pro vyhledání nejlepšího řešení, jak navštívit všechny body (známého jako „problém obchodního cestujícího“), je třeba v záložce *Route* ve skupině *Travel Settings* vybrat pro atribut *Sequence* možnost *Find Best*.



Obr. 24 Ukázka vygenerované trasy v indoor mapě

Pomocí nástroje *Create (Route: xx Barriers)* v záložce *Edit* lze do mapy dále zakreslit dočasná omezení, skrze která nelze projít. Po zakreslení těchto bodů, linií či polygonů a spuštění analýzy se vytvoří cesta, která se vyhne všem bariérám. Pro vygenerování popisu trasy slouží tlačítko *Directions* v záložce *Route*. Po jeho stisknutí se v panelu *Directions* objeví popis trasy a celkový čas a vzdálenost trasy (obr. 25). [66]



Obr. 25 Popis vygenerované trasy

5.6 Publikace na webových stránkách

Výsledné indoor mapy byly publikovány na webových stránkách ArcGIS Online jako mobilní mapový balíček (*Mobile Map Package - MMPK*). Tento formát si lze stáhnout a otevřít v programu ArcGIS Pro, Explorer for ArcGIS, Navigator for ArcGIS a při získané licenci i v mobilní aplikaci ArcGIS Indoors for iOS a ArcGIS Indoors for Android. Poslední dvě aplikace umožňují v mapě navíc vyhledávat trasy na základě různých parametrů, ukládat a sdílet zajímavá místa a události, zobrazovat různé události či získávat orientační body.

Ještě přes spuštěním nástroje *Create Mobile Map Package* byl nejprve vypnut aktivní posuvník rozsahu. Pokud by zůstal zapnutý, publikovala by se pouze viditelná patra budovy. Dále byly vypnuty všechny vrstvy *POIs* a *ND* a zapnuty vrstvy *Floorplan layers*. Ve vlastnostech mapy bylo zkontrolováno, zda je nastaven správný souřadnicový systém a zda jsou vyplněna všechny metadata. Poté byly vymazány všechny aktivní vybrané prvky a z panelu *Contents* byly odstraněny základní mapy, jelikož mobilní aplikace využívá pro jejich zobrazení URL adresu definovanou v tabulce *INDOORSCONFIG*. Na závěr byl nastaven rozsah zobrazení mapy tak, aby všechna data byla zobrazena v rámečku. Poté byl spuštěn nástroj *Create Mobile Map Package*, kde stačilo nastavit název souboru, atribut *Area of Interest* na *Current Display Extent* a tagy, které by měly obsahovat minimálně slovo ArcGIS Indoors a jeho verzi.

Obdobným způsobem byly vyexportovány i 3D scény ve formátu MSPK pomocí nástroje *Create Mobile Scene Package*. Tato data lze otevřít v programu ArcGIS Pro a provádět nad nimi analýzu cest. Opět je důležité připomenout, že pro budovu C byly všechny vrstvy posunuty o 5 m výš a při analýze je tedy nutné zvýšit i nově vytvořené zastávky a vygenerované cesty. Pro publikování MMPK a MSPK souborů na webové stránky ArcGIS Online byl využit nástroj *Share Package*. Soubory byly publikovány jako veřejné pro sdílení se všemi uživateli. [60]

Publikované soubory je možné získat na následujících adrese:

[https://www.arcgis.com/home/search.html?q=owner%3A"vavrova_CTUPrague"&restrict=false&start=1&num=20](https://www.arcgis.com/home/search.html?q=owner%3A)

Všechny soubory jsou dále součástí elektronických příloh, jejichž struktura je popsána v příloze A.

6 Zhodnocení výsledků

V programu ArcGIS Pro byly s využitím beta verze produktu ArcGIS Indoors od společnosti Esri vyhotoveny dvě indoor mapy, jež slouží pro pasivní navigaci po 7., 8. a 9. patře budovy B a po celé budově C Fakulty stavební ČVUT v Praze. Indoor mapy byly vytvořeny z DWG souborů s výkresy jednotlivých podlaží, jež byly doplněny o užitečné informace ze softwaru Revit. Tyto výkresy bylo nutné značně opravit a doplnit pro potřeby dalšího zpracování v programu ArcGIS Pro. Časově nejnáročnější bylo přesunout jednotlivé prvky výkresu do správných vrstev a vytvořit tak jednotnou strukturu. Z důvodu licenčního omezení nebylo možné návrh zpracovat v plné verzi ArcGIS Indoors dostupné od března tohoto roku, a proto byla využita jeho beta verze z roku 2017, která však nebyla ještě kompletně vyhotovena. Nejzásadnějším omezením beta verze byla možnost zpracování pouze omezeného počtu dat, a to konkrétně 32767 prvků. Z tohoto důvodu byly zpracovány pouze dva navigační modely o třech patrech. I přesto je na těchto dvou příkladech ukázána realizace plně funkční indoor mapy s různými charakteristikami. V indoor mapě pro budovu B je možné vybírat restriktce pro pohyb mezi jednotlivými patry, indoor mapa pro budovu C je zase ukázkou řešení pro objekty s patry pod úrovní terénu a cestami s různou prioritou. Dalším omezením bylo, že v beta verzi chyběly nástroje pro vytvoření indoor sítě, na základě které je prováděna analýza tras. Tento krok byl proto zpracován ručně vykreslením všech cest, přechodů mezi podlažími a orientačních bodů, ze kterých byl následně založen nový síťový dataset. Jelikož nejnovější verze ArcGIS Pro 2.3 ještě nepodporuje tvorbu síťového datasetu, bylo nutné k jeho tvorbě využít starší aplikaci ArcCatalog. Výsledné indoor mapy a 3D scény byly publikovány na webových stránkách ArcGIS Online jako mobilní balíčky. Tyto soubory lze otevřít v programu ArcGIS Pro, kde je možné provádět analýzy pro vyhledání nejrychlejších či neoptimálnějších tras po budově mezi zadanými stanovisky.

Toto řešení je z vizuálního hlediska velmi přehledné, atraktivní a pro uživatele snadno ovladatelné a pochopitelné, jelikož je podobné designu outdoor navigací. Důležitá a zajímavá místa jsou v mapě graficky znázorněna pomocí bodů zájmu, jejichž barvené symboly se postupně zobrazují při přiblížení pohledu dle jejich důležitosti. Z praktického hlediska je řešení snadné na instalaci a pokud má instituce již předplacený software na požadované licenční úrovni, tak i finančně nenáročné. Naopak nevýhodou tohoto řešení je jeho časová náročnost a potřeba obrovské pečlivosti při tvorbě indoor map, jelikož často různorodé zdroje informací je třeba sjednotit dle předem definovaných parametrů.

3D informační modely budov jsou v indoor navigaci často využívány například u inerciálních navigačních systémů, kde jsou potřeba pro vymezení průchozích částí (viz. kapitola 3.1.2), nebo u kamerových systémy, u nichž model obsahuje databázi referenčních bodů (viz. kapitola 3.2.4). Jelikož se v dnešní době většina podkladů digitalizuje, jedná se o poměrně snadno dostupný zdroj informací.

Po získání celouniverzitní licence bude možné realizovat návrh indoor navigace po všech budovách Fsv ČVUT v Praze a využít ho skrze webovou či mobilní aplikaci. Indoor mapy lze využít zcela pasivně bez nutnosti jakéhokoliv připojení, kdy lze vyhledávat trasy mezi body definovanými uživatelem. K tomuto účelu by stačilo nainstalovat po budově školy pár navigačních kiosků, kterými by mohl být i obyčejný dotykový tablet. Aktivní určení polohy v rámci budovy je možné díky kombinaci BLE (viz. kapitola 3.5.2), několika senzorů a výpočetních algoritmů. ArcGIS Indoors podporuje více stávajících poskytovatelů IPS a je tak velmi flexibilním řešením indoor navigace. [67]

Projekty pro obě budovy včetně podkladových CAD souborů, konfiguračních tabulek, WLD souborů, vrstev se symbolikou, MMPK a MSPK souborů a vzorových souborů beta verze ArcGIS Indoors byly nahrány na přiloženou SD paměťovou kartu. Struktura elektronických příloh je uvedena v příloze A.

7 Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo vypracovat rešerši technik a technologií využívaných pro indoor navigaci, převést 3D model budovy Fakulty stavební ČVUT z BIM do GIS, navrhnout indoor navigaci po Fsv v programu ArcGIS Pro a publikovat tento návrh na webových stránkách.

V první části práce je uveden základní přehled indoor technik využívajících různé vlastnosti signálu a algoritmy pro výpočet navigace a rozsáhlý přehled nejčastěji využívaných indoor technologií pro indoor navigaci s přesností do 1 m. Ve druhé části je popsán převod dat ze softwaru Revit do softwaru ArcGIS Pro a zpracování návrhu indoor mapy v novém produktu ArcGIS Indoors od společnosti Esri. Jelikož nebylo možné získat celouniverzitní licenci pro plnou verzi tohoto produktu, bylo nutné vypracovat návrh ve starší beta verzi, která není nijak licenčně omezená a vyžaduje pouze vybrané extenze. Při zpracování bylo zjištěno, že beta verze ArcGIS Indoors je omezena velikostí vstupních dat, a proto je výsledný návrh vytvořen pouze pro 7., 8. a 9. patro budovy B a pro budovu C.

V této verzi dále chyběly nástroje pro tvorbu indoor sítě, která slouží pro analytické řešení navigace, a tudíž bylo nutné síťový dataset vytvořit ručně pomocí aplikace ArcCatalog. I přesto je na těchto dvou příkladech ukázána realizace plně funkční indoor mapy, která může posloužit pro navigaci pro budově.

Výsledné indoor mapy doplněné o různé kategorie bodů zájmu byly publikovány na webových stránkách ArcGIS Online jako MMPK soubory, které je možné stáhnout a otevřít v programu ArcGIS Pro, Explorer for ArcGIS a Navigator for ArcGIS. Až bude možné získat celouniverzitní licenci, tak půjde otevřít mobilní mapový balíček i v mobilních aplikacích ArcGIS Indoors for iOS či ArcGIS Indoors for Android, pro které jsou obě indoor mapy nakonfigurovány. V mobilních aplikacích bude možné vyhledávat trasy na základě různých atributů, ukládat a sdílet zajímavá místa a události, zobrazovat různé události či získávat důležité orientační body. Dále byly publikovány i 3D scény jako MSPK soubory, které lze otevřít v programu ArcGIS Pro a provádět v něm nad těmito daty 3D analýzy pro vyhledání cest.

Použitá literatura

- [1] HOFMANN-WELLENHOF, B., LEGAT, K. a WIESER, M. *Navigation: Principles of Positioning and Guidance* [online]. New York: Springer, 2011 [cit. 2019-01-26]. ISBN: 978-3-7091-6078-7. Dostupné z: http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Pouk/SG/Seminar/GNSS_navigacija/Navigacija_pogl1_in_16.pdf
- [2] SAKPERE, Wilson, ADEYEYE-OSHIN, Michael a MLITWA, Nhlanhla B. W. A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *South African Computer Journal* [online]. 2017, 29(3), 145–197. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <http://sacj.cs.uct.ac.za/index.php/sacj/article/view/452>
- [3] VOJTEK, David. *Globální navigační a polohové systémy* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: https://geoinformatika-1.vsb.cz/vojtek/content/gnps/files/_source/Ucebni-texty-GNPS-distancni.pdf
- [4] DLESK, Adam. *Indoor navigace*. Praha, 2017. Semestrální práce. ČVUT v Praze.
- [5] HEKIMIAN-WILLIAMS, Cory, GRANT, Brandon, LIU, Xiuwen, ZHANG, Zhenghao a KUMAR, Piyush. Accurate localization of RFID tags using phase difference. *2010 IEEE International Conference on RFID* [online]. IEEE, 2010 [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5467268>
- [6] DLESK, Adam. *Indoor navigace – doplnění*. Praha, 2017. Semestrální práce. ČVUT v Praze.
- [7] MAUTZ, Rainer. *Indoor Positioning Technologies* [online]. Zürich, 2012. Habilitační práce. ETH Zürich [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/54888/eth-5659-01.pdf>
- [8] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6
- [9] *Inertial Elements* [online]. GT Silicon Pvt Ltd [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.inertiaelements.com/>

- [10] SKALKA, Marek. *Srovnání lokalizačních technik* [online]. Praha, 2011. Diplomová práce. UK v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://marek.sk.sweb.cz/lokalizace/DP-Srovnani-lokalizacnich-technik-Skalka.pdf>
- [11] The Sky-Trax System™ – Vehicle Tracking and Fleet Management. *TotalTrax* [online]. TotalTrax, 2018 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://www.totaltraxinc.com/smart-forklift-solutions/the-sky-trax-system/>
- [12] *vanillaNAV: the smart indoor navigation experience* [online]. VanillaWorks UG, 2019 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://vanillanav.com>
- [13] KOHOUTEK, Tobias K., MAUTZ, Rainer a DONAUBAUER, Andreas. Real-time Indoor Positioning Using Range Imaging Sensors. *Real-Time Image and Video Processing 2010* [online]. International Society for Optics and Photonics [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2c86/37a4850812b0bb3501fcc23c9a11c0fe691b.pdf>
- [14] ZHOU, Zhou, KAVEHRAD, Mohsen a DENG, Peng. Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications. *Optical Engineering* [online]. 2012, 51(8) [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/d772/c7a2fb683deeee260a09dc1c2a5894d3211f.pdf>
- [15] Indoor positioning: Perfect light, precise location. *PHILIPS* [online]. PHILIPS [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <http://www.lighting.philips.com/main/systems/lighting-systems/indoor-positioning>
- [16] WANT, Roy, HOPPER, Andy, FALCÃO, Veronica a GIBBONS, Jonathan. The Active Badge Location System. *ACM Transactions on Information Systems* [online]. 1992, Vol. 10, No. 1. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <http://www.cs.columbia.edu/~coms6998-11/papers/activebadge.pdf>
- [17] HAUSCHILDT, Daniel a KIRCHHOF, Nicolaj. Thermal Infrared Localization. *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 21-23 September 2011, Guimarães, Portugal* [online]. IEEE Xplore, 2011 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: http://ipin2011.dsi.uminho.pt/PDFs/Demo/141_Demo.pdf
- [18] Kinect pro Windows. *Microsoft: Windows Dev Center* [online]. Microsoft, 2019 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://developer.microsoft.com/cs-cz/windows/kinect>

- [19] KRYNICKÝ, Martin. 5.4.3 Radiové vlny a mikrovlny. *www.realisticky.cz: když (se) chcete naučit...* [online]. 2010 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika%20SŠ/05%20Optika/04%20Elektr%20magnetické%20záření/03%20Rádiové%20vlny%20a%20mikrovlny.pdf>
- [20] Active RFID Readers & Tags. *Kimaldi* [online]. Kimaldi Electronics [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: https://www.kimaldi.com/en/products/rfid_systems/active_rfid_readers_tags/
- [21] DZIADAK, Krystyna, SOMMERVILLE, James a KUMAR, Bimal. RFID in the Built Environment: Buried Asset Locating Systems. *Intelligent Computing in Engineering and Architecture. 13th EG-ICE Workshop 2006, Ascona, Switzerland, June 2006, Revised Selected Papers* [online]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006 [cit. 2019-02-24]. ISBN: 978-3-540-46246-0. Dostupné z: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB10657.pdf>
- [22] KIERS, Martijn a SOVEC, Tina. Ways4all: Indoor navigation for visually impaired and blind people. *REAL CORP 2010* [online]. Vienna, 2010 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: https://archive.corp.at/cdrom2010/papers2010/CORP2010_253.pdf
- [23] TORSTENSSON, David. *Indoor Positioning System Using Bluetooth Beacon Technology* [online]. Västerås, 2016. Bakalářská práce. Mälardalen University [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://mdh.diva-portal.org/smash/get/diva2:1075574/FULLTEXT01.pdf>
- [24] *Zonith* [online]. Zonith [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://zonith.com>
- [25] Sensor Systems. *Ubisense* [online]. Ubisense [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.ubisense.net/brand/sensor-systems>
- [26] Ultra wideband (UWB) technology. *ZEBRA* [online]. Zebra, 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.zebra.com/us/en/products/location-technologies/ultra-wideband.html>
- [27] MAUTZ, Rainer a OCHIENG, Washington Y. A Robust Indoor Positioning and Auto-Localisation Algorithm. *Journal of Global Positioning Systems* [online]. 2007, Vol.6, No.1: 38-46 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: https://file.scirp.org/pdf/nav20070100004_59663266.pdf

- [28] Ultrasound Innovation. *Sonitor* [online]. Sonitor Technologies, 2018 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.sonitor.com/ultrasound-innovation>
- [29] PRIYANTHA, Nissanka Bodhi. *The Cricket Indoor Location System* [online]. Cambridge, 2005. Dizertační práce. Massachusetts Institute of Technology [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <http://nms.csail.mit.edu/papers/bodhi-thesis.pdf>
- [30] GOZICK, Brandon, SUBBU, Kalyan Pathapati, DANTU, Ram a MAESHIRO, Tomyo. Magnetic Maps for Indoor Navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. IEEE, 2011 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/220407239_Magnetic_Maps_for_Indoor_Navigation
- [31] TALCOTH, Oskar a RYLANDER, Thomas. *Optimization of sensor positions in magnetic tracking* [online]. Göteborg, 2011. Technický report. Chalmers University of Technology [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/ff31/f7cff38a0d1b0fde3b220a81ba7f137d9ab2.pdf>
- [32] SCHANTZ, Hans Gregory, WEIL, Christian a UNDEN, Alfred Hans. Characterization of error in a Near-Field Electromagnetic Ranging (NFER) Real-Time Location System (RTLS). *2011 IEEE Radio and Wireless Symposium* [online]. IEEE, 2011 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5725491>
- [33] Ascension Trakstar: medical guidance, minimally invasive surgery, real-time visualization, and target acquisition. *Tracklab by Freespace* [online]. Tracklab, 2019 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://tracklab.com.au/products/hardware/ascension-trakstar/>
- [34] LIBERTY™. *Polhemus innovation in motion™* [online]. Polhemus, 2019 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://polhemus.com/motion-tracking/all-trackers/liberty>
- [35] SONG, Shuang, HU, Chao, LI, Mao, YANG, Wanan a MENG, Max Q. H. Real Time Algorithm for Magnet's Localization in Capsule Endoscope. *2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics* [online]. IEEE, 2009 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/224595689_Real_time_algorithm_for_magnet's_localization_in_capsule_endoscope

- [36] CHUNG, Jaewoo, DONAHOE, Matt, SCHMANDT, Chris, KIM, Ig-Jae, RAZAVAI, Pedram a WISEMAN, Micaela. Indoor location sensing using geo-magnetism. *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services* [online]. Bethesda: MobiSys, 2011 [cit. 2019-03-08]. ISBN: 978-1-4503-0643-0. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221234493_Indoor_location_sensing_using_geo-magnetism
- [37] STORMS, William, SHOCKLEY, Jeremiah, a RAQUET, John. Magnetic Field Navigation in an Indoor Environment. *2010 Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service* [online]. IEEE, 2010 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5653681>
- [38] KIM, Seong-Eun, KIM, Yong, YOON, Jihyun a KIM, Eung Sun. Indoor Positioning System Using Geomagnetic Anomalies for Smartphones. *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* [online]. IEEE, 2012 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261155828_Indoor_positioning_system_using_geomagnetic_anomalies_for_smartphones
- [39] ZHANG, Jiahuang, LI, Binghao, DEMPSTER, Andrew G. a RIZOS, Chris. Evaluation of High Sensitivity GPS Receivers. *2010 International Symposium on GPS/GNSS* [online]. 2010 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228414856_Evaluation_of_High_Sensitivity_GPS_Receivers
- [40] KJÆRGAARD, Mikkel Baun, BLUNCK, Henrik, GODSK, Torben, TOFTKJÆR, Thomas, CHRISTENSEN, Dan Lund a GRØNBÆK, Kaj. Indoor Positioning Using GPS Revisited. *Pervasive Computing: 8th International Conference, Pervasive 2010, Helsinki, Finland, May 2010. Proceedings* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221016004_Indoor_Positioning_Using_GPS_Revisited
- [41] Terminologická komise ČÚZK: Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí. *VÚGTK* [online]. VÚGTK [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://www.vugtk.cz/slovník/5888_pseudonahodny-signal--pseudonahodny-sum

- [42] System Overview. *TRIMBLE Transforming the way the world works* [online]. Trimble, 2019 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.trimble.com/mining/Terralite-XPS-Solutions/TerraLite-XPS-System-Overview.aspx>
- [43] Roger repeator. *Ryston electronics* [online]. Ryston Electronics [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <http://www.ryston.cz/obchod/produkty/gnss-opakovace>
- [44] Co je laserový tracker a jak se s ním měří?. *Automa* [online]. Automa – časopis pro automatizační techniku, 2016 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39584.pdf
- [45] 3D Disto: This is the droid you are looking for. *Leica Geosystems* [online]. Leica Geosystems, 2019 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://lasers.leica-geosystems.com/buy-3d-disto>
- [46] The iGPS System. *Amrikart ultraprecision* [online]. Amrikart, 2019 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.amrikart.com/infoletter-details/article/2013-02-11/The-iGPS-system/The-iGPS-system>
- [47] KŘEMEN, Tomáš. *Úvod do 3D skenování* [online]. 2014. Prezentace PPT, 38 snímků. ČVUT v Praze [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: www.kgk.cz/wp-content/uploads/2014/06/Kremen-uvod-do-skenovani.pptx
- [48] Laser Scanner for Navigation. *Götting* [online]. Götting KG [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.goetting-agv.com/components/43600>
- [49] HOPPEN, Peter, KNIERIEMEN, Thomas a Ewald von PUTTKAMER. Laser-Radar based Mapping and Navigation for an Autonomous Mobile Robot. *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. IEEE, 1990 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=126113>
- [50] DO, Trong-Hop a YOO, Myungsik. An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems. *Sensors 2016* [online]. MDPI [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/b124/67f1e41ae037ad9a332a367b5f40b6498cda.pdf>

- [51] BIM – informační model budovy. *CAD Studio* [online]. CAD Studio, 2019 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/bim>
- [52] A co je vlastně ten BIM ?. *Bim.Point* [online]. Bim.Point, 2019 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <http://www.bim-point.com/blog/a-co-je-vlastne-ten-bim>
- [53] BIM bude povinný u nadlimitních zakázek od roku 2022. *Zprávy a informace ČKAIT* [online]. ČKAIT, 2017 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <http://zpravy.ckait.cz/article/bim-bude-povinsky-u-nadlimitnich-zakazek/>
- [54] Revit: Tvorba informačního modelu budovy. *Autodesk* [online]. Autodesk, 2019 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/revit/overview>
- [55] Co je GIS ?. *Geoportal Praha* [online]. Institut plánování a rozvoje hlavního města Prahy [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.geoportalpraha.cz/cs/clanek/11/co-je-gis#.XJILjYo89PY>
- [56] Co je GIS a co není. *Mendelova univerzita v Brně* [online]. 2019 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=60263
- [57] Desktopový GIS. *ARCDATA PRAHA* [online]. ARCDATA PRAHA [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/arcgis-pro>
- [58] ArcGIS Indoors. *Esri* [online]. Esri, 2019 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-indoors>
- [59] Configure your Indoors portal. *ArcGIS Indoor Web* [online]. Esri, 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://doc.arcgis.com/en/indoors/web/configure-your-indoors-portal.htm>
- [60] ArcGIS Indoors UC2017 Beta Version. *ArcGIS Online* [online] Esri, 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d7ed705db7d5480291859f6c0f961aff>
- [61] What is Revit data. *ArcGIS Pro* [online]. Esri, 2019 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/revit/what-is-revit-data-.htm>

- [62] About georeferencing CAD data. *ArcGIS Pro* [online]. Esri, 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/cad/about-georeferencing-cad-data.htm>
- [63] Map floor plans to Indoors. *ArcGIS Pro* [online] Esri, 2019 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/indoors/map-floor-plans-to-indoors.htm>
- [64] Create the Indoors Network. *ArcGIS Pro* [online] Esri, 2019 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/indoors/create-the-indoors-network.htm>
- [65] What is a network dataset ?. *ArcMap* [online] Esri, 2019 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/extensions/network-analyst/what-is-a-network-dataset.htm>
- [66] Tutorial: Create Routes. *ArcGIS Pro* [online] Esri, 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/networks/route-tutorial.htm>
- [67] ArcGIS Indoors and Indoor Positioning System. *Esri* [online] Esri, 2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/landing-page/product/2019/arcgis-indoors-webinar-series/indoor-positioning-systems>

Seznam obrázků

Obr. 1 Indoor navigace	15
Obr. 2 Příklad kartografického díla	17
Obr. 3 Princip metody TOA	19
Obr. 4 Princip metody TDOA	20
Obr. 5 Princip metody AOA	21
Obr. 6 Princip trilaterace	23
Obr. 7 Příklady kódových cílů	29
Obr. 8 Philips indoor navigační systém	32
Obr. 9 Kinect	34
Obr. 10 Technologie využívající iBeacons	36
Obr. 11 Ztrátový model vyjadřující závislost mezi vzdáleností a RSSI	38
Obr. 12 Geomagnetic Indoor Positioning Systém	45
Obr. 13 Systém Terralite XPS od firmy Trimble	48
Obr. 14 Měřicí rameno od firmy Faro	49
Obr. 15 Princip měření iGPS	51
Obr. 16 Ilustrační schéma BIM v Revitu	54
Obr. 17 ArcGIS Indoors	56
Obr. 18 Datové sety a třídy prvků Revit souboru v ArcGIS Pro	58
Obr. 19 Spuštění nástroje Create Indoors Database	60
Obr. 20 Ukázka z konfigurační tabulky Excelu.....	61
Obr. 21 Nástroj Floorplans to Indoors	62
Obr. 22 Základní komponenty Indoor mapy	63
Obr. 23 Doplnění dat v záložce Road Detail	70
Obr. 24 Ukázka vygenerované trasy v indoor mapě.....	71
Obr. 25 Popis vygenerované trasy	71

Seznam tabulek

Tab. 1 Klasifikace indoor navigační techniky	17
Tab. 2 Souhrnný přehled indoor navigačních technologií	51
Tab. 3 Přehled nově vytvořených atributů.....	68

Struktura elektronických příloh

V následující struktuře elektronických příloh jsou uvedeny pouze nově vytvořené soubory, ostatní soubory již byly součástí beta verze ArcGIS Indoors, nebo byly při zpracování automaticky vygenerovány softwarem. Ve složce ArcGIS Indoors B je zpracován návrh indoor navigace pro 7., 8. a 9. patro budovy B a ve složce ArcGIS Indoors C pro všechna patra budovy C Fakulty stavební ČVUT v Praze.

○ ArcGIS Indoors B

- › **AIIM_BuildingB.gdb** (*AIIM geodatabáze*)
- › **CAD B** (*podkladové CAD výkresy, WLD soubory a konfigurační tabulka*)
- › **MMPKs B** (*MMPK a MSPK soubory*)
- › **Symbology B** (*LYRX soubory se symbolikou*)
- › **WorkingB.gdb** (*pomocná geodatabáze*)
- › **ArcGIS Indoors B** (*soubor s projektem*)

○ ArcGIS Indoors C

- › **AIIM_BuildingC.gdb** (*AIIM geodatabáze*)
- › **CAD C** (*podkladové CAD výkresy, WLD soubory a konfigurační tabulka*)
- › **MMPKs C** (*MMPK a MSPK soubory*)
- › **Symbology C** (*LYRX soubory se symbolikou*)
- › **WorkingC.gdb** (*pomocná geodatabáze*)
- › **ArcGIS Indoors C** (*soubor s projektem*)

○ Diplomova práce

- › **DP_Vavrova** (*elektronická verze diplomové práce*)