



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

LOKALIZACE OSOB V BUDOVĚ

LOCALIZATION OF PEOPLE IN THE BUILDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

VOJTĚCH RANDÝSEK

Ing. MARTIN SAKIN

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce



21812

Student: **Randýsek Vojtěch**
Program: Informační technologie
Název: **Lokalizace osob v budově**
Localization of People in the Building
Kategorie: Vestavěné systémy

Zadání:

1. Seznamte se s dostupnými systémy pro lokalizaci. Prostudujte vhodné bezdrátové technologie a jejich možnosti pro lokalizaci v budově.
2. Popište princip pro lokalizaci osob v budovách. Zaměřte se na zjištění místnosti, ve které se osoba nachází.
3. Navrhněte systém, který pomocí vámi zvolené bezdrátové technologie bude sledovat pohyb osob a určovat jejich pozici v budově.
4. Navržený systém implementujte a demonstруйте na vhodném příkladu.
5. Diskutujte dosažené výsledky a možnosti pokračování práce.

Literatura:

- Ortiz, Gabriel, et al. "A framework for a relative real-time tracking system based on ultra-wideband technology." Positioning, Navigation and Communications (WPNC), 2017 14th Workshop on. IEEE, 2017.
- Zhao, Xinyu, et al. "An Analysis of the Optimal Placement of Beacon in Bluetooth-INS Indoor Localization." Adjunct Proceedings of the 14th International Conference on Location Based Services. ETH Zurich, 2018.
- Su, Hui-Kai, et al. "A hybrid indoor-position mechanism based on bluetooth and WiFi communications for smart mobile devices." 2015 International Symposium on Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB). IEEE, 2015.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Vedoucí práce: **Sakin Martin, Ing.**
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 15. května 2019
Datum schválení: 1. listopadu 2018

Abstrakt

Práce se zabývá tvorbou systému pro lokalizaci osob v budově. Byl představen systém založený na technologii Bluetooth, který pomocí metody fingerprinting osoby lokalizuje. Výsledný systém se skládá z databáze, webové aplikace, hardwarové vrstvy a služeb zprostředkovávajících komunikaci. Bylo vytvořeno demonstrační video, na kterém systém dosahuje průměrné přesnosti 2.46 m a standardní odchylky 2 m. Výsledky této práce ukazují, že zvolená kombinace technologií vede k úspěšné lokalizaci osob.

Abstract

The aim of this thesis is to create a personal indoor positioning system. In this work, new system based on a Bluetooth technology is proposed. Person localization is accomplished by using the fingerprinting method. Proposed system consists of a database, a web application, a hardware layer and communication services. For the purpose of demonstration of the proposed system a video was made. System in the video, using proposed methods, gained standard accuracy of 2.46 m and standard deviation of 2 m. These results show that the combination of used technology leads to a successful localization of people in buildings.

Klíčová slova

lokalizace v budově, Bluetooth, BLE, SocketIO, REST, Angular, Raspberry Pi, HM-10, NoSQL, MongoDB, metoda nejbližšího souseda, Python

Keywords

indoor positioning, Bluetooth, BLE, SocketIO, REST, Angular, Raspberry Pi, HM-10, NoSQL, MongoDB, Nearest neighbor method, Python

Citace

RANDÝSEK, Vojtěch. *Lokalizace osob v budově*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Martin Sakin

Lokalizace osob v budově

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Martina Sakina. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Vojtěch Randýsek
13. května 2019

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Martinovi Sakinovi za odborné vedení, ochotu při konzultacích a celkovou podporu. Dále bych chtěl poděkovat za ohleduplnost a trpělivost své rodině a přátelům.

Obsah

1	Úvod	3
2	Úvod do lokalizačních systémů	4
2.1	Počítačové vidění a zpracování obrazu	4
2.2	Bezdrátové technologie	5
2.3	Magnetické pole	5
2.4	Barometr	5
2.5	Dead Reckoning	6
3	Bezdrátové technologie pro lokalizační systémy	7
3.1	FM	7
3.2	GSM	8
3.3	Wi-Fi	8
3.4	ZigBee	9
3.5	Bluetooth	10
3.6	UWB	11
3.7	RFID	11
4	Metody určení polohy	13
4.1	Proximity	13
4.2	Triangulace	13
4.3	Trilaterace a multilaterace	14
4.4	Síla přijatého signálu	15
4.5	Fingerprinting	16
4.6	Průběh lokalizačního algoritmu	16
5	Filtrování, optimalizace a porovnání dat s databází	18
5.1	Kalmanův filtr	18
5.2	Bayesovo filtrování	19
5.3	K-Means	19
5.4	Nearest Neighbor a modifikace	19
6	Návrh lokalizačního systému	21
6.1	Zhodnocení současného stavu	21
6.2	Návrh	21
6.3	Průběh	24
7	Implementace	25

7.1	Databáze	25
7.2	API Host	25
7.3	SocketIO Server	26
7.4	Webový klient	27
7.5	Vysílač	29
7.6	Tag	30
7.7	Fingerprinting	31
8	Testování	32
8.1	Nasazení a konfigurace systému	32
8.2	Určení polohy v místě otisku	34
8.3	Určení polohy v prostoru mezi otisky	34
8.4	Osoba v pohybu a vliv délky intervalu	35
8.5	Video demonstrace	35
9	Závěr	37
	Literatura	38
A	Obsah přiloženého paměťového média	41
B	Popis rozhraní API Host	42
C	Popis videa	45

Kapitola 1

Úvod

Zvyšující se zájem široké veřejnosti o inteligentní zařízení a prostředky pro monitorování denních činností umožnil v posledních letech výrazný posun v této oblasti. Nástup nových technologií a standardů otevírá tvůrcům nové možnosti. U dříve velmi těžko realizovatelných projektů se dnes nediskutuje o splnitelnosti, ale o tom, jak je splnit co nejefektivněji. Jednou z takových úloh je i téma této práce – lokalizace osob v budově.

Problém lokalizace osob a objektů řeší aktuálně ve světě mnoho subjektů ze všech možných oblastí – od pečovatelských domů a nemocnic přes skladiště a obchodní domy až po výzkumníky v oblasti robotiky a mnohé další. Práce představuje systém, který osoby v budově lokalizuje pomocí technologie Bluetooth. Systém svými parametry splňuje potřeby některých ze zmíněných subjektů.

Na trhu se pohybuje několik firem, které nabízejí lokalizační systémy. Každý takový systém je vytvářen na míru zákazníkovi a vychází tak z jeho specifických potřeb. Mezi nejčastěji se vyskytující technologie v těchto systémech patří Wi-Fi, Bluetooth a UWB.

Jedním z cílů práce je prozkoumat technologie, které by bylo možné použít pro vytvoření lokalizačního systému. Dále prozkoumat existující řešení na trhu a matematické metody a algoritmy, které by dokázaly stávající řešení optimalizovat. Na základě těchto informací byl navržen lokalizační systém, jehož funkčnost a správnost byla ověřena na vytvořeném prototypu.

V následující části práce jsou obecně představeny jednotlivé kategorie lokalizačních systémů. Kapitola 3 popisuje vybrané bezdrátové technologie, které byly dříve použity v některých lokalizačních systémech a mají potenciál být znovu využívány. V kapitole 4 je uveden výčet nejčastějších metod používaných pro určení polohy. Kapitola 5 je zaměřena na optimalizaci, filtrování a zpracování naměřených hodnot při procesu lokalizace. V kapitole 6 je představen návrh, jehož implementace je popsána v kapitole 7. Se systémem byla provedena série experimentů, které jsou v kapitole 8 popsány a vyhodnoceny.

Kapitola 2

Úvod do lokalizačních systémů

*Indoor positioning system*¹ je systém, jehož funkcí je lokalizace osob a objektů uvnitř budov. Takové systémy využívají počítačové vidění, některý druh záření, magnetické pole, akustické signály nebo jiné technologie. Tato práce se více zabývá pouze bezdrátovou technologií.

Lokalizační systémy je podle použité infrastruktury a algoritmů možné rozdělit do dvou skupin [21]:

1. *Client-oriented*
2. *Server-oriented*

V prvním případě probíhá určení polohy na klientském zařízení, jedná se o tzv. *self-positioning*. Typickým zástupcem této kategorie je systém GPS. Výsledná poloha je známá uživateli a může být dále využívána aplikacemi a službami pracujícími na klientském zařízení.

Ve druhém případě, nazývaném někdy *remote-positioning*, je poloha klienta určena na vzdáleném serveru, kde probíhají veškeré výpočty. Výsledná poloha je pak buď poslána na klientské zařízení nebo dále zpracována serverem. Následující sekce představují alternativní dělení – podle druhu použité technologie [19].

2.1 Počítačové vidění a zpracování obrazu

S narůstajícím počtem průmyslových digitálních kamer nasazených ve městech začaly více objevovat projekty zpracovávající získaná data. Tímto se zabývá část relativně nového oboru počítačového vidění. Již nasazené průmyslové kamery představují lákavý nástroj pro tvůrce lokalizačních systémů. Úspěšné použití kamer bylo představeno například v lokalizačním systému pro školní kampus [8], nebo u lokalizačního systému tvořícího model prostředí z ptáčích perspektivy [28].

Pro tvorbu modelu na základě záznamů z kamer je nutné projít několika fázemi.

1. získání videa a jeho přenos z kamery na počítač
2. rozdělení videa na popředí a pozadí
3. rozpoznání objektů z videa, přemapování na reálné objekty

¹Indoor positioning system - zkráceně IPS, v překladu lokalizační systém v budově, dále bude použit anglický název, nebo zkratka.

4. určení polohy těchto objektů
5. zobrazení objektů na výsledném modelu

Dalším z možných využití počítačového vidění je navigace lidí, robotů a dronů v uzavřených prostorech [22]. Tyto systémy nejčastěji pracují v prostředí, ve kterém jsou rozmístěny značky a na základě toho, jakou značku kamera zachytí, je určena poloha. Při správném rozmístění značek po budově je takto možné dosáhnout úspěšné navigace [5].

Jedním z problémů těchto systémů je, že nemonitorují celý objekt, ale vždy jen jeho část. Objevují se tak velmi často slepá místa. Algoritmy v pozadí systému nejsou triviální a potřebný výpočetní výkon je v porovnání s jinými přístupy velmi velký. Předchozí dosažené výsledky v této oblasti jsou navíc těžko aplikovatelné pro lokalizaci osob, protože identifikace osob z kamerového záznamu je sama komplexním vědeckým oborem, navíc do hry vstupuje otázka narušování soukromí sledovaných osob a legálnost celého procesu.

2.2 Bezdrátové technologie

Bezdrátové technologie dokáží proniknout skrz dveře a zdi a pokrývají tak celou budovu. Lokalizační systémy založené na bezdrátových technologiích využívají vlastností přijatého signálu k určení vzdálenosti neznámého místa od známých bodů. Naprostá většina existujících lokalizačních systémů je založena právě na bezdrátových technologiích. Hlavní výhodou je jednoduchost nasazení, kvůli využití běžně dostupných, známých a často již nasazených prostředků, jako jsou například WLAN routery. Vlnění tvořené systémem ve většině případů nijak neomezuje běžnou činnost lidí v budově a systém je tak snadněji přijat uživateli. Cena bezdrátového čipu je výrazně nižší než například cena průmyslové kamery. Spotřeba energie a výpočetní síly je také ve většině případů v porovnání s počítačovým viděním výrazně nižší.

2.3 Magnetické pole

Další oblastí jsou systémy pracující s magnetickým polem Země. Tyto systémy jsou lákavé zejména kvůli nulové pořizovací ceně infrastruktury, protože Země již magnetické pole má. Prvním z problémů této technologie je složitá inicializační fáze. Nejčastěji se používá tzv. fingerprinting 4.5. Zachytávaná síla magnetického pole je však často na zařízení a modelech jednotlivých výrobců odlišná. To vede k tomu, že při online fázi nemusí údaje z jiného zařízení, než na kterém byl proveden fingerprinting, vést k získání skutečné pozice. Jedním z možných řešení tohoto problému je například snímání na vícero zařízeních a následné využití neuronové sítě, či jiného softwarového prostředku, a nebo kombinace s jinými technologiemi.

Tento systém je využitelný v případě, že konstrukce budovy způsobuje dostatečné odlišnosti v magnetickém poli k rozlišení polohy [14].

2.4 Barometr

Jednou z méně rozšířených metod je využití atmosferického tlaku pro určení výšky a následně patra budovy. Moderní mobilní telefony již běžně bývají vybaveny barometry pro měření tlaku v okolí. Bylo ukázáno, že je možné barometry použít k určení patra budovy,

ve kterém se zařízení nachází. Metoda není uplatnitelná ve všech situacích a na základě implementace se vyskytuje buď potřeba časté kalibrace zařízení nebo přítomnosti referenční stanice. V systémech založených na dříve uvedených technologiích může využití barometru přinést přesnější výsledky [16].

2.5 Dead Reckoning

V případě využití Dead Reckoning je možné průběžně určovat polohu objektu na základě znalosti jeho předchozí polohy a velikosti a směru jeho aktuální rychlosti. Pro úspěšné použití je potřeba znát počáteční polohu. Chyba měření narůstá s každým jednotlivým měřením. Je možné určit maximální odchylku v závislosti na počtu provedených měření a inkrementaci počáteční polohy. Pro zlepšení přesnosti a zmenšení chyby je nutné použít další metody k upřesnění polohy. Jedním z příkladů použití Dead Reckoning je určení polohy pohybujícího se chodce na základě odhadu délky kroku a směru, ve kterém se pohybuje [6]. Tato metoda se používá spíše jako doplněk, je častá její implementace v automobilových navigacích využívajících GPS. Ve chvíli, kdy auto jedoucí tunelem ztratí GPS signál, je na základě poslední známé polohy, rychlosti a směru jízdy vozidla poloha na mapě aproximována až do chvíle, kdy je znovu zachycen signál GPS.

Kapitola 3

Bezdrátové technologie pro lokalizační systémy

Architektura lokalizačního systému typicky sestává ze dvou částí – majáků¹, které odesílají signál a klientských zařízení, která signál zachycují, případně opačně. GPS je ukázkovým příkladem popsané topologie. 24 satelitů obíhajících Zemi slouží jako vysílače (majáky). Klientská GPS zařízení určují svou zeměpisnou polohu na základě zachyceného signálu ze satelitů. GPS je však technologie využívající *line-of-sight* a není schopná přesně určit polohu v zastřešených prostorech, proto je často kombinována s dalšími technologiemi, jako je *Dead Reckoning*, popsaný v kapitole 2.5.

Lokalizace v zastřešených prostorech přináší oproti venkovní lokalizaci další problémy a výzvy, které musí návrhář lokalizačního systému řešit. Šíření bezdrátového signálu může být ovlivňováno odrazem a lomem. Síla signálu je ovlivňována stíněním a šířením více směry. Stěny, nábytek a osoby působí na šíření bezdrátových vln. Výsledné prostředí je proměnlivé a vlastnosti signálu také.

Využití bezdrátových technologií založených na rádiových vlnách vede v porovnání s alternativami k výraznému snížení nákladů na pořízení systému a k jednoduššímu pokrytí sledovaných místností a budov. Na druhou stranu vyvstávají problémy zmíněné výše, které použití bezdrátových technologií komplikují. Při výběru vhodné technologie je tedy důležité uvažovat nejen cenu, ale i efektivnost.

Následuje výčet potenciálně použitelných bezdrátových technologií, seřazených sestupně podle uváděného dosahu. Řazení není absolutní, ani se nejedná o úplný výčet všech možných technologií.

3.1 FM

FM vysílání je metodou rádiového vysílání s využitím frekvenční modulace (FM). Technologie je používána celosvětově a poskytuje vysoce kvalitní přenos zvuku. V porovnání s amplitudovou modulací (AM) dosahuje FM obecně lepších výsledků a je tak využívána většinou komerčních rádiových stanic. FM rádiové stanice využívají tzv. velmi krátké vlny (30-300 MHz).

Rádiové vlny jsou šířeny vysílacími věžemi, rozmístěnými po světě. Vlnové pásmo se však v jednotlivých státech liší. V současné době je FM stále využívána, nicméně se objevují tendence přechodu na digitální vysílání. Norsko v roce 2017 přešlo na národní úrovni čistě na

¹Maják – v originále *beacon*, interně jde o vysílač, v prostředí domů je pevně umístěn.

digitální vysílání a můžeme očekávat, že v budoucnu budou další státy následovat, zejména kvůli snížení provozních nákladů [23].

Velmi krátké vlny byly úspěšně využity v lokalizačních systémech. Samotná síla přijatého signálu je pro lokalizaci použitelná, významně však závisí na struktuře konkrétní budovy. S využitím dalších atributů přijatého signálu lze dosáhnout výsledku s přesností v řádech metrů. Kombinování s jinými technologiemi také vede ke zlepšení vlastností systému, hlavně ke snížení odchylky a zmenšení chybovosti.

Hlavními výhodami, oproti některým z častěji používaných technologií, jsou nulové náklady na rozmístění vysílačů, protože jsou využívány již existující antény a vysílání. Další přidanou hodnotu představuje velký dosah a nízká náchylnost k odchylkám.

Všechny zmíněné výhody se však v určitých situacích mohou jevit jako zápory. Systém založený na FM je závislý na existenci rádiových vysílání, v případě změny v infrastruktuře vysílačů může přesnost systému klesat. Díky velké stabilitě, malé náchylnosti k chybám a dobré prostupnosti objekty nemusí být síla přijímaného signálu na úrovni budovy dostatečně proměnlivá, aby stačila k rozlišení polohy v odlišných místnostech. Pro tyto účely je vhodné využít přijímač, který poskytuje aplikační vrstvě mimo síly signálu i další charakteristiky, jako například *signal-to-noise ratio*, *multipath* a *frequency offset* [9].

3.2 GSM

GSM je světově nejrozšířenější standardem pro mobilní komunikaci. Ve více než 220 zemích celého světa sídlí téměř 800 mobilních operátorů. Většina současných mobilních telefonů GSM podporuje a podporovat bude nejméně do roku 2021.

Ke vzniku lokalizačních systémů založených na GSM vedla podobná myšlenka jako pro systémy založené na magnetickém poli nebo na FM. Je velmi výhodné využít technologie, jejichž infrastruktura je již nasazena. Bylo navíc ukázáno, že síla signálu GSM není tak proměnlivá jako například u 2.4 GHz technologií [27].

Pásmo GSM se liší mezi jednotlivými kontinenty a státy, obecně jde však o pásma okolo 900 MHz a 1800 Mhz. Spolu s GSM byla v několika pracích diskutována možnost využít další mobilní sítě, zejména 3G a 4G. Oproti GSM a obvyklejším technologiím, jako je Wi-Fi a Bluetooth se však jeví jako nedostatečné [21].

V minulosti bylo představeno pár lokalizačních systémů využívajících GSM, s přesností v řádech kilometrů, ale i s přesností na jednotlivé místnosti a patra budovy. Bylo ukázáno, že je možné úspěšně nasadit systém využívající pouze GSM a metodu fingerprinting. Konfigurační fáze v tomto případě však zabrala několik měsíců a uvedený postup se tak pro praktické nasazení v komerční sféře jeví jako nepoužitelný. Technologie GSM by však mohla být, podobně jako FM, použita jako podpůrná technologie v jiném lokalizačním systému.

3.3 Wi-Fi

V současnosti je Wi-Fi nejrozšířenější bezdrátovou komunikační technologií a hlavním prostředkem světového internetového provozu. I přes to, že je na trhu již přes dvě dekády, je Wi-Fi stále na vzestupu. V roce 2018 bylo používáno 9 miliard zařízení pracujících nějakým způsobem s Wi-Fi [2].

Technologie je založena na standardu IEEE 802.11 a obchodní známku Wi-Fi vlastní společnosti Wi-Fi Alliance, která se stará o interoperabilitu jednotlivých *Wi-Fi Certified* zařízení. Od stvoření Wi-Fi bylo nasazeno mnoho verzí, pracujících na různých frekvencích.

Aktuální je verze 5, která je přítomna na většině nových zařízení. Pracuje na frekvenci 5 GHz, ale z důvodu podpory starších zařízení většina routerů podporuje i pásmo 2.4 GHz. Verze 5 odpovídá standardu IEEE 802.11ac. Vývoj nových verzí Wi-Fi stále probíhá a klade si za cíl zlepšit propustnost a zvýšit stabilitu sítě [24].

Technologie Wi-Fi byla úspěšně využita v mnoha lokalizačních systémech. Před nasazením standardu verze 5 pracovala Wi-Fi výhradně s pásmem 2.4 GHz, ve kterém operovalo mnoho dalších zařízení a docházelo tak k rušení. Šlo například o mikrovlnné trouby, bezpečnostní kamery, ZigBee zařízení, Bluetooth zařízení, telefony a v některých zemích i o amatérské rádio.

Zejména z tohoto důvodu někteří výzkumníci hledali alternativní technologie. Vznikly lokalizační systémy založené na jiných technologiích, jako ZigBee nebo Bluetooth, a dále hybridní systémy využívající kombinaci technologií. Na problém sdíleného 2.4 GHz pásma cílí nový standard (verze 5 a novější) využívající výhradně 5 GHz pásmo, kde dochází k rušení signálu známého z 2.4 GHz pásma minimálně. Drtivá většina výzkumníků v oblasti lokalizace pomocí Wi-Fi pracuje s RSS². První systém, který odstartoval lokalizaci pomocí Wi-Fi byl RADAR, vytvořený firmou Microsoft Corporation [31].

3.4 ZigBee

ZigBee³ je standard založený na IEEE 802.15.4. Tvoří nízkonákladové osobní sítě nenáročné na spotřebu energie. Technologie definovaná specifikací ZigBee je zamýšlena jako jednodušší a méně nákladná náhrada existujících bezdrátových osobních sítí, jako jsou Bluetooth a Wi-Fi [11, 6].

ZigBee pracuje ve frekvenčním pásmu ISM⁴, což ve většině světa odpovídá pásmu 2.4GHz, výjimečně i v jiných pásmech. Toto pásmo sdílí s technologiemi Wi-Fi a Bluetooth. Bylo prokázáno, že se technologie vzájemně negativně ovlivňují.

Délka dosahu se v prostoru bez překážek pohybuje mezi 10-100 m, v závislosti na příkonu a podmínkách prostředí [3].

ZigBee zařízení jsou dělena do tří kategorií [6]:

1. Koordinátor (*Coordinator*, ZC) – nejschopnější zařízení v síti. Může sloužit jako most (*bridge*) mezi sítěmi. V každé klasické ZigBee síti musí být právě jeden koordinátor. Koordinátor uchovává informace o síti a zajišťuje zabezpečení.
2. Směrovač (*Router*, ZR) – směrovač buď vykonává nějakou aplikační funkci, nebo může přeposílat data dalším zařízením.
3. Koncové zařízení (*End device*, ZED) – obsahuje pouze takovou funkcionalitu, která zařízení dovoluje komunikovat s rodičovským uzlem v síti. Tento vztah dovoluje koncovým zařízením velkou část života strávit ve spánkovém režimu, tudíž prodlužují výdrž na baterii. Jedná se obvykle o malé zařízení, sestávající z jediného čipu.

Pro účely lokalizace se nejčastěji využívá RSS. Síla signálu v prostoru se mění podobně jako u jiných technologií z 2.4 GHz pásma. Je možné využít jak multilateraci, tak fingerprinting, z čehož druhá zmíněná metoda se objevuje častěji [7, 11, 6].

V literatuře bylo představeno několik úspěšných prototypů systémů pracujících se ZigBee. Hlavním nedostatkem bylo pásmo sdílené s dalšími technologiemi. ZigBee navíc není

²RSS – Received Signal Strength, v překladu síla přijatého signálu. Dále bude použita anglická zkratka.

³Název ZigBee odkazuje na tanec medonosných včel po návratu do úlu [13].

⁴ISM – Industrial, scientific and medical

typicky dostupné v mobilních telefonech, čímž podobně jako u UWB vzniká potřeba klientského hardware, což přináší vyšší pořizovací náklady a omezuje možné případy užití.

3.5 Bluetooth

Bluetooth je nízkenergetická přenosová technologie postavená na standardu IEEE 802.15.1. Přenos probíhá v pásmu ISM od 2.402 do 2.486 GHz. Jedná se o přenos na krátké vzdálenosti, typicky v jednotkách až nízkých desítkách metrů. Dosah záleží hlavně na použité verzi standardu Bluetooth a příkonu zařízení. Aby mohlo být zařízení označeno jako Bluetooth zařízení, musí splňovat standardy skupiny Bluetooth SIG, která za technologii Bluetooth zodpovídá.

Pro přenos využívá Bluetooth *frequency-hopping spread spectrum*. Data jsou rozdělena do paketů, každý z paketů je přenášen na jednom ze 79 Bluetooth kanálů. Každý kanál má šířku 1 MHz. Od verze 4, implementující možnost AFH (*adaptive frequency-hopping*), mají kanály šířku 2 MHz, což odpovídá celkově 40 kanálům.

Všechny verze Bluetooth jsou zpětně kompatibilní. V současnosti jsou na trhu dostupné dvě hlavní verze Bluetooth zařízení, 4.x a 5. Verze 4.x je v současnosti nejrozšířenější verzí Bluetooth, na trhu je od roku 2010, kdy byla představena verze 4.0. Ta obsahovala tři protokoly – *Classic Bluetooth*, *Bluetooth High Speed*, vycházející z Wi-Fi, a BLE (*Bluetooth Low Energy*).

Protokol BLE, dříve známý jako *Wibree*, je alternativou ke standardním Bluetooth protokolům. Cílí na zařízení u kterých nám jde o minimální energetickou spotřebu, typicky napájených z knoflíkové baterie. Hlavním cílem BLE bylo snížit spotřebu zařízení, aniž by byl snížen dosah. Po verzi 4.0 bylo vydáno ještě několik dalších, cílících na IoT (*Internet of Things*) zařízení. V roce 2013 byla vydána verze 4.1, přinášející softwarový update, dovolující zařízením zastávat více rolí najednou. O rok později pak přišla verze 4.2, která zlepšila zabezpečení protokolu a navýšila maximální délku přenášených paketů. V současnosti se jedná o nejrozšířenější verzi. Bluetooth 5 bylo poprvé představeno v roce 2016 a podobně jako verze 4.2 cílí na IoT. Z názvu byla vypuštěna desetinná část a verze je označována jen jako Bluetooth 5. Standard je oficiálně nasazen, jeho rozšíření je však stále malé a na trhu dominují zařízení s verzí 4.2. Hlavním přínosem verze 5 je dvojnásobná přenosová rychlost (2 Mb/s), za cenu snížení dosahu, nebo až čtyřnásobné zlepšení dosahu, za cenu snížení přenosové rychlosti [10, 26].

Ve specifikacích nejnovějších mobilních telefonů předních výrobců je často uváděno, že podporují Bluetooth 5, nepodporují však tu část standardu, která umožňuje přenos na větší vzdálenosti než verze 4.2. Většina zařízení (nejen mobilních telefonů) uvádí ve specifikacích, že jsou Bluetooth 5 „*ready*“, nebo „*compatible*“, což však znamená jen to, že v budoucnu může být aktualizován jejich firmware. Skutečných zařízení využívajících plný potenciál Bluetooth 5 je zatím menšina.

Z hlediska lokalizačních systémů se jedná o velmi oblíbenou technologii. K implementaci IPS je využito zařízení zvané beacon, schopné v daných intervalech vysílat pakety do okolí. Na základě síly přijatého signálu je možné přibližně určit vzdálenost příjemce od beaconu. Beacons implementují jeden ze dvou standardů. Standard iBeacon představila v roce 2013 společnost Apple. V roce 2015 se připojil Google s protokolem Eddystone.

Nejčastějšími metodami používanými v Bluetooth IPS jsou trilaterace a fingerprinting. Bluetooth IPS dosahují přesnosti 1-5 m, což je dostatečná přesnost pro většinu případů použití IPS. Přesnost závisí na rozmístění beaconů (hustota rozmístění i pozice), použitých metodách, filtrování a prostředí [32].

Jedním z mnoha úspěšných příkladů nasazení IPS na bázi Bluetooth je Americké přírodovědné muzeum. V muzeu je od roku 2010 nasazen systém Explorer, navigující návštěvníky po jednotlivých expozicích muzea prostřednictvím jejich telefonů. Nejprve využíval Wi-Fi, v roce 2015 přešel systém na technologii Bluetooth. V muzeu bylo v roce 2015 nasazeno přes 700 Bluetooth beaconů [1].

Bluetooth je v současnosti nejoblíbenější technologie pro tvorbu IPS, zejména kvůli obrovskému rozšíření BLE a dobrému poměru mezi cenou, náročností a výkonem takového IPS. Technologie Bluetooth byla využita jak samostatně, tak jako doplňková technologie. V případě využití jako sekundární technologie se nejčastěji majáky používají pro vyplnění hluchých míst v systému.

3.6 UWB

UWB⁵ je bezdrátová technologie, která ke komunikaci využívá široké pásmo na velké části rádiového spektra. V poslední době je UWB využíváno ke sběru dat ze senzorů a v lokalizačních a sledovacích aplikacích. Zvláštností UWB je, že se šíří způsobem, který neovlivňuje a není ovlivňován ostatním provozem ve stejném frekvenčním pásmu.

Vývoj UWB byl provázen komplikacemi a změnami vývojového týmu. Pomalý vývoj UWB a výsledky, které zdaleka neodpovídaly původním očekáváním, vedly k současnému velmi nízkému zastoupení UWB na trhu.

UWB není možné kombinovat s obvyklejšími technologiemi jako je Wi-Fi a Bluetooth. Nabízí však přesnost v řádech centimetrů, což je výrazně lepší než obvyklé výsledky dosažené s Wi-Fi a BLE (1-15 m). Odezva UWB systémů je velmi nízká, je možné provádět až 100 lokalizací za vteřinu. Pomocí UWB je možné měřit výšku.

Pro lokalizaci je možno použít fingerprinting, častějším případem je však použití trilaterace. Dále je možné postavit systém buď na RSS, nebo na ToA (*Time of Arrival*). Pro všechny metody krom RSS je vyžadováno, aby mezi senzory a lokalizovaným zařízením nebyly žádné překážky. Nevýhodou RSS je podmínka malé vzdálenosti mezi senzory [6].

Kvůli zmiňovaným problémům je UWB používáno ve speciálních případech, jako jsou lokalizace vysokozdvíhových vozíků ve skladištích a sledování objektů a palet. Další oblastí využití jsou sledování a lokalizace, které vyžadují vysokou přesnost na krátké vzdálenosti [4, 22].

Mezi hlavní výhody UWB patří nízká spotřeba energie a nízká úroveň rušení a odrazu. Další výhodou je dobrá průchodnost materiálem. Využitelnost technologie leží v mnoha oblastech. Například v navádění robotů, v sítích senzorů, průmyslu i ve vojenství. Technologie jako taková má jen velmi málo nedostatků, problémy přichází až při práci s touto technologií. Dostupnost na trhu je výrazně menší než u ostatních technologií, často je tak nutné navrhovat vlastní hardware, což vede k výrazně vyšším nákladům na vytvoření a pořízení systému [6, 15].

3.7 RFID

RFID⁶ využívá rádiové vlny k bezdrátovému přenosu identifikačních informací (ID, sériové číslo) o sledované osobě nebo objektu. Nejčastěji je technologie RFID využívána k automatické identifikaci objektů ve velkých systémech, jako jsou například skladiště. Princip

⁵UWB – Ultra-Wideband, česky ultra-širokopásmové.

⁶RFID – Radio frequency Identification

spočívá ve výměně signálů různých frekvencí mezi dvěma typy komponent systému – čteček a tagů (klíčenek, značek). Ke komunikaci a přenosu dat je používán předdefinovaný protokol. Tagy, skládající se z mikročipu, schopného pojmout až 2KB dat, a vysílací antény, jsou typicky přichyceny na veškeré objekty, které je potřeba identifikovat. Tagy se dále dělí na dva typy – aktivní a pasivní.

Čtečky jsou v porovnání s tagy výrazně komplexnější a dražší zařízení, obsahující například procesor, anténu, připojení na server a zdroj energie [6].

RFID byla mnohokrát použita v IPS, vždy však ve velmi specifickém případě a často v kombinaci s další technologií, jako je Bluetooth, Wi-Fi nebo UWB. Dosah RFID je okolo jednoho metru, není tak vhodné pro plošnou lokalizaci, ale spíše pro identifikaci. Nevýhoda krátkého dosahu nebrání využití RFID v lokalizačních systémech [4]. Objevují se kombinace využití RFID a metody Proximity 4.1.

RFID lze použít jako doplňující technologii v systémech založených na jiných technologiích. Mezi komerčně dostupné a částečně generické řešení patří kombinace RFID a UWB ve výrobních linkách, kde RFID poskytuje identifikaci a UWB údaje o poloze. Další možností je sledování zákazníků v obchodech. Košíky vybavené Bluetooth majákem a RFID tagem zaznamenávají pohyb zákazníka obchodem a při placení na pokladně je naskenováním RFID tagu možné propojit trajektorii košíku s nákupem. V průmyslu je možné označit RFID tagy jednotlivé palety ve skladišti, na vysokozdvižný vozík připojit čtečku a sledovat vozík pomocí jiné technologie, například UWB. Na základě propojení technologií lze optimalizovat celý řetězec procesů přesunů ve skladišti.

Kapitola 4

Metody určení polohy

Jedním z klíčových faktorů při úspěšné lokalizaci je zvolená metoda. Metoda definuje, jak bude zvolená technologie použita pro určení polohy. Žádná technologie není svázána s konkrétní metodou, existují však ustálené kombinace¹.

4.1 Proximity

Proximity² je nejjednodušší technikou použitelnou pro lokalizaci. Předpoklad, na kterém je tato metoda založena je, že poloha osoby v dosahu signálu pevně umístěného vysílače může být aproximována na polohu daného vysílače. Mapovaný prostor je rozdělen do oblastí, někdy zvaných buňky. Každé z těchto buněk je v referenční databázi přiřazen vysílač, který má v dané buňce nejsilnější signál. Ve fázi určování polohy je změřena síla všech signálů v daném místě a z databáze je vybráno místo odpovídající poloze vysílače nejsilnějšího naměřeného signálu. Na tomto principu je založeno několik existujících GSM lokalizačních systémů, je však možné tuto techniku použít s téměř jakoukoli technologií. Platí, že čím větší je hustota buněk, tím přesnějších výsledků systém dosáhne.

Modifikace této metody je využívána s technologií RFID. V tomto případě stačí, aby čtečka zaznamenala přítomnost RFID tagu na objektu a pozice objektu je aproximována na pozici čtečky. Ve většině případů již není dále nutné pozici zpřesňovat, což by bylo technicky proveditelné jen velmi obtížně [6].

Dosažená přesnost závisí na hustotě rozmístění vysílačů. Výhodou může být využití již existující infrastruktury. Pro lokalizaci osob není tato technika příliš často používána.

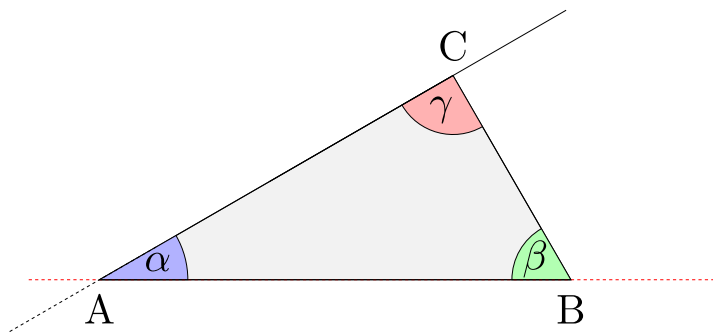
4.2 Triangulace

Triangulace je v trigonometrii a elementární geometrii způsob ke zjištění vzdáleností a souřadnic. Ze znalosti dvou bodů se dopočítává třetí, neznámý. Triangulace se nejčastěji používá pro účely geodézie, navigace a astronomie.

V kontextu lokalizačních systémů může být triangulace použita v případech, kdy je znám úhel příchozího signálu.

¹Například Wi-Fi + fingerprinting, Bluetooth + RSSI trilaterace, RFID + proximity.

²Proximity – v překladu blízkost, někdy se používá také *Cell of origin*.



Obrázek 4.1: Triangulace, obrázek byl převzat z [Wikimedia Commons](#).

Angle of Arrival

AoA je jednou z úspěšně používaných metod pro získání úhlů pro triangulaci. Spočívá v použití směrové antény na vysílačích. Získané údaje však nemusí být vždy přesné, zejména kvůli rušení a odrazům od stěn a překážek. Teoreticky na určení polohy stačí pro lokalizaci ve 2D prostoru dva vysílače. Vyšší redundance vysílačů však s vhodně zvoleným rozhodovacím algoritmem může výrazně snížit chybovost systému [25].

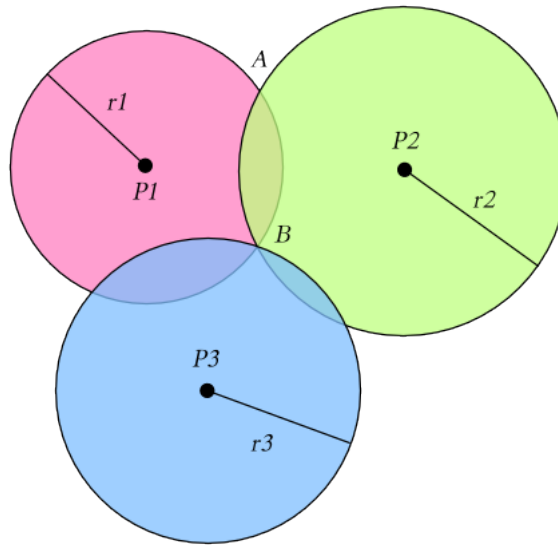
4.3 Trilaterace a multilaterace

Trilateraci je možno chápat jako zrcadlení k pojmu triangulace, kde slovo „angul“ odkazující na úhel je nahrazeno částí „later“ odkazující na délku. Rozdíl je pak v použitých trigonometrických metodách – při triangulaci se vychází ze znalosti úhlů (věta USU), při trilateraci je vzdálenost vypočítána pomocí věty SSS. Multilaterace je jednou z možných aplikací trilaterace, kdy jsou k dispozici více než tři body a je tak možné vytvořit různé kombinace trojúhelníků. Výsledná pozice je pak určena na základě váhových koeficientů přiřazených jednotlivým trojúhelníkům vypočítaným klasickou trilaterací. Trilaterace je řádově o dvě století mladší než triangulace. Hlavní nevýhodou obou metod je nutnost *line-of-sight* pro přesné určení polohy. Tento fakt výrazně snižuje použitelnost zmíněných metod v IPS, které monitorují objekty se zdmi, dveřmi, chodbami, nábytkem a osobami. Přesto tyto techniky mnoho systémů využívá.

Time of Arrival

Tato a následující metoda využívají trilateraci, resp. multilateraci. Obě vychází z předpokladu, že na základě doby přenosu signálu lze odvodit vzdálenost vysílače od přijímače. Rychlost bezdrátového signálu různých technologií je obecně známa a je zhruba rovna rychlosti světla ve vzduchu.

ToA měří dobu cesty paketu od vysílače k přijímači. Vysílač označí paket časovou značkou a přijímač jednoduše vypočítá dobu cesty odečtením časového razítka paketu od aktuálního času. Tato metoda je v teorii velmi jednoduchá a jeví se účinně, nicméně vyžaduje velmi přesnou synchronizaci času ve všech vysílačích a přijímačích, čehož je ve fyzickém



Obrázek 4.2: Trilaterace, obrázek byl převzat z [Wikimedia Commons](#).

světě velmi obtížné dosáhnout. Tuto metodu používá pro určení polohy například systém GPS.

Time Difference of Arrival

TDoA je velmi podobnou metodou jako ToA, přináší ale zjednodušení v synchronizaci časů. Pro úspěch této metody stačí synchronizovat časy všech pevných bodů. Princip metody je oproti ToA opačný. Hledané zařízení funguje jako vysílač a pevné body jako přijímače. Vysílač vyšle signál v neznámém čase, který je v rozdílných časech zachycen jednotlivými přijímači. Na základě rozdílu časů přijetí signálu a znalosti rychlosti šíření signálu vzduchem lze určit hyperbolu s předpokládanou polohou hledaného zařízení. Hyperbola má však dvě větve a jsme tak nuceni jednu z větví eliminovat, například na základě znalosti předchozí polohy zařízení. Průsečík alespoň tří hyperbol (jedna pro každý přijímač) pak určuje polohu hledaného zařízení [19].

4.4 Síla přijatého signálu

Mimo dobu přenosu existují i další vlastnosti signálu, které lze použít pro určení vzdálenosti, nebo přímo pro určení polohy s využitím např. fingerprintingu. Nejčastěji používanou vlastností je síla přijatého signálu (anglicky RSS, případně RSSI). Vzdálenost je spočítána na základě znalosti ztrátového modelu síly přichozího signálu v závislosti na uražené vzdálenosti.

$$\overline{RSSI} = -10n \log(d) + \overline{A} \quad (4.1)$$

Logaritmický ztrátový model vyjádřený vztahem 4.1 se v literatuře vyskytuje nejčastěji. Proměnná d je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem, n parametr charakterizující prostředí, \overline{A} je průměrné naměřené RSSI ve vzdálenosti 1 m od vysílače. Pro úspěšné použití je nutně správně určit parametry \overline{A} a n [17].

4.5 Fingerprinting

V současnosti nejčastěji využívanou metodou pro lokalizaci je fingerprinting³. Jedná se o proces, který mapuje obecně velký objem dat na malou reprezentaci (otisk), který unikátně identifikuje původní data, podobně jako lidský otisk prstu identifikuje člověka. V kontextu lokalizace jde o identifikaci daného místa v objektu podle jeho vlastností. Tyto sledované vlastnosti závisí na použité technologii, jde však většinou o počet a sílu rozdílných signálů v daném místě.

Samotný proces sestává ze dvou částí. Nejprve je v konfigurační fázi vytvořena databáze, kterou je potřeba naplnit naměřenými daty. Získávání dat probíhá nejčastěji tak, že jsou ve sledovaném objektu vybrány význačné body, kterými následně prochází osoba se zařízením, schopným snímat potřebné údaje. Naměřené hodnoty z jednotlivých míst jsou ukládány do databáze. Ve druhé tzv. on-line fázi je databáze využívána k určení polohy klientského zařízení. Důležitou roli hraje samotný algoritmus pro určení polohy a optimalizační metody, popsane v následující kapitole.

Hlavním důvodem, proč je fingerprinting hojně využíván je, že není ovlivněn problémy se šířením, odrazy a rušením, na něž jsou náchylné ostatní metody. Největším problémem této metody je, podobně jako u ostatních metod, závislost na prostředí. V případě, že je změněna infrastruktura systému nebo budovy, je potřeba provést znovu konfigurační fázi. Dle vybrané technologie se naměřené hodnoty mohou měnit například s přítomností osob v místnosti, nebo s otevřením dveří. Je proto důležité systém správně navrhnout a zvolit vhodně algoritmus pro výběr nejlepšího otisku z databáze [29].

4.6 Průběh lokalizačního algoritmu

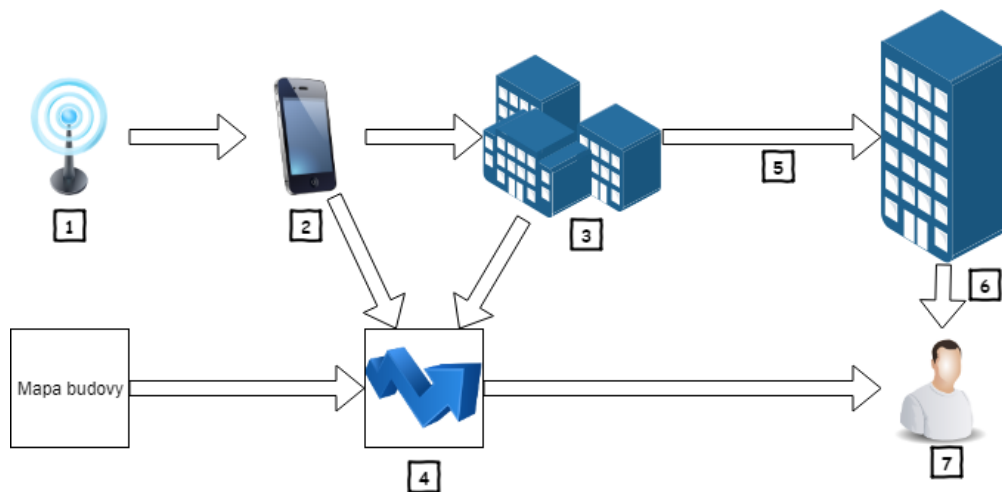
Na obrázku 4.3 je uveden typický průběh lokalizačního procesu. Tímto, nebo velmi podobným, schématem je řízena většina dosud představených IPS. Jednotlivé kroky jsou popsány níže [12]:

1. Zařízení (vysílač, beacon) periodicky vysílá signál do okolí. Na základě použité metody ze sekce 4 se jedná buď o tento, nebo o opačný případ, kdy beacons pracují v režimu přijímače. V obvyklejším případě, tedy v případě, že beacons pracují jako vysílače, je důležité stanovit vhodně délku vysílací periody. Z důvodu šetření energie bývají totiž zařízení v mnoha případech v mezech deaktivována.
2. Vysílaný signál je pravidelně zachytáván na nějakém jiném zařízení (mobilní telefon, aj.), většinou pomocí periodického volání funkce, která dokáže zachycené signály zachytit a zagregovat.
3. Cílem následující fáze je úspěšná detekce budovy, ve které se osoba nachází. Vychází se z předpokladu, že z adresy vysílače můžeme určit v jaké budově se nachází. To lze dosáhnout například použitím předpony v adrese vysílače, značící kód budovy, nebo pomocí seznamu vysílačů a budov, ve kterých se nacházejí. Problém nastává v situaci, kdy zařízení zachytí signál ze zařízení umístěných v různých budovách. Řešení je více, literatura zmiňuje například většinový výběr, kdy je vybrána budova, které odpovídá největší počet zachycených vysílačů. Další možností je výběr budovy

³Fingerprinting – sloveso odvozené od slova *fingerprint*. Dále bude používáno sloveso fingerprinting a pro *fingerprint* český výraz „otisk“.

podle nejspolehlivějšího zařízení, tedy podle vysílače, jehož signál je nejsilnější. Při výběru metody záleží na konkrétní situaci a obecně nelze určit, která je lepší.

4. Z naměřených údajů, nejčastěji RSS, je pro každé patro vytvořena *radio-propagation map*, reprezentující očekávané hodnoty RSS všech vysílačů ve všech (vybraných) bodech. V tomto bodě dochází k nejvýznamnějšímu dělení mezi jednotlivými systémy. *Radio-propagation-map* je vytvořena buď metodou fingerprinting 4.5, nebo pomocí ztrátového modelu funkcí 4.1. Oba přístupy byly úspěšně použity a každý přináší své výhody a nevýhody. Výsledkem obou je však model patra, který může být dále použit k určení polohy.
5. Detekce patra pracuje na velmi podobném principu jako detekce budovy a řeší se zde podobné problémy. Výběr algoritmu pro detekci patra také hraje roli v celkové úspěšnosti systému.
6. Po určení budovy a patra dochází k filtrování zachycených signálů. Jedná se například o prahování signálů, kdy jsou odfiltrovány slabé signály z jiných budov a pater. Další technikou používanou pro zpřesnění měření je agregace údajů zachycených z jednoho vysílače za určitý časový úsek do jediné hodnoty.
7. Na základě zvolené metody je určena pozice hledaného zařízení z vytvořeného modelu patra a hodnot získaných z předchozího kroku. Pozice ve většině případů není absolutní, pracuje se s určitou chybou a vzniká tak víc možných pozic. Pro zmenšení odchylky a výběr nejsprávnější pozice se používají algoritmy a metody popsané v následující sekci.



Obrázek 4.3: Schéma lokalizačního algoritmu.

Kapitola 5

Filtrování, optimalizace a porovnání dat s databází

Nedílnou součástí lokalizačního systému je matematický aparát. Použité metody a algoritmy se liší především podle toho, zda je použit fingerprinting nebo jiná metoda. Trilaterace a jí podobné metody vyžadují ztrátovou funkci, která určuje, jak se mění síla signálu v závislosti na vzdálenosti od vysílače. Příkladem takové funkce pro Wi-Fi může být například funkce ITU [12] a logaritmický ztrátový model 4.1.

V následující části práce je uveden přehled některých nejčastěji používaných matematických metod a algoritmů pro systémy založené na fingerprintingu. Algoritmy jsou v typickém IPS použité až na třech místech. Ve fázi sběru dat před uložením do databáze je na hodnoty pohlíženo jako na signál a je nad nimi možno provést filtrování. Nejčastěji se objevuje Kalmanův filtr, spíše výjimečně pak Bayasův, nebo částicový filtr. S vyfiltrovanými daty může být před uložením do databáze proveden *preprocessing* (předzpracování), což může obnášet například shlukování pomocí algoritmu K-Means [31].

V on-line fázi je hlavním úkolem IPS porovnat hodnotu zachycenou klientským zařízením s hodnotami uloženými v databázi a nalézt co nejpřesnější pozici. Nejčastěji jsou využívány algoritmy vycházející z NN (*Nearest neighbor*) – KNN, případně WKNN (*Weighted KNN*) a jejich varianty. Součástí těchto algoritmů je funkce reprezentující vzdálenost. Nejčastěji je kvůli své jednoduchosti využita Euklidovská vzdálenost, je však možné použít i vzdálenosti Manhattan, Chebyshev a jiné [21].

5.1 Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je algoritmus, využívající sérií dat získaných za určitý časový interval, obsahující šum a jiné nepřesnosti, k odhadu hodnot neznámých proměnných. Algoritmus byl představen v roce 1960 R. E. Kalmanem a rychle se stal standardním přístupem. Kalmanův filtr je využíván typicky v oblastech sledování a navádění, zpracování digitálního obrazu, sensorických dat, detekce vzorů, segmentaci obrazu a detekce hran v obraze. Využívá jej například systém GPS [18].

IPS využívající Kalmanův filtr dosahuje vyšší přesnosti, jak bylo ukázáno v mnoha případech. Bylo také provedeno porovnání Kalmanova a částicového filtru. Při správném nastavení obou nebyly výsledky příliš rozdílné a bylo doporučeno vybrat filtr v závislosti na specifikách navrhovaného systému [30, 31].

5.2 Bayesovo filtrování

Bayesovo filtrování řeší v IPS stejný problém jako Kalmanův filtr. Princip vychází z předpokladu, že události v systému jsou mezi sebou závislé a je možné na základě aktuálního stavu odvodit pravděpodobnost budoucích jevů. Bayesův filtr je v současnosti využíván hlavně pro detekci spamu v e-mailu, ale byl úspěšně použit i pro filtrování šumu v IPS, kde dokázal například snížit vliv výkyvů v signálu v časovém horizontu několika měsíců na správnost určování polohy [27].

5.3 K-Means

Algoritmus K-Means shlukuje naměřená data z fingerprintingu do K shluků. Poté jsou jednotlivé otisky označeny identifikátorem shluku, do kterého patří. Ve fázi určování polohy je pak nejprve vybrán příslušný shluk a dále se pak pracuje jen s tímto shlukem.

Princip metody spočívá v náhodném výběru K bodů (center) ze sledované oblasti, okolo kterých vytvoříme shluky. Jednotlivé body jsou součástí toho shluku, jehož centru jsou nejbližší. Po přiřazení všech bodů do shluků je vypočítáno nové těžiště (centrum) shluku a přiřazení je provedeno znovu. Po konečném počtu kroků se shluky ustálí. Bylo ukázáno, že K-Means úspěšně snižuje časovou náročnost aktivní fáze lokalizace [31].

5.4 Nearest Neighbor a modifikace

Metody v této sekci jsou využívány k porovnání RSS hledaného bodu s referenční databází při použití fingerprintingu 4.5 a k výběru nejlepší pozice [11].

Nearest Neighbor Method

Hlavní myšlenkou je nějakým způsobem kvantifikovat správnost hledané polohy vzhledem ke každému ze záznamů v referenční databázi. Stupeň podobnosti může být vyjádřen například pomocí Euklidovské vzdálenosti bodů. Čím je Euklidovská vzdálenost mezi záznamem v databázi a naměřeným údajem menší, tím spíše je ten daný záznam v databázi správným odhadem polohy. Euklidovskou vzdálenost lze vypočítat jako:

$$D(R_{t,i}, \overline{R_{j,i}}) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (R_{t,i} - \overline{R_{j,i}})^2} \quad (5.1)$$

Kde $R_{t,i}$ značí velikost RSS i -té složky naměřených dat a $\overline{R_{j,i}}$ velikost RSS i -té složky záznamu v databázi. Proměnná t je čas, j index pozice. Pro úspěšnou lokalizaci je nutné najít minimální Euklidovskou vzdálenost mezi měřením a otisky v databázi.

Weighted KNN Method

Díky složitosti prostředí budov mají často hodnoty RSS velké odchylky. Bylo ukázáno, že bod s nejmenší Euklidovskou vzdáleností nemusí být vždy tím nejoptimálnějším. Určením několika nejbližších bodů je možné odchylku snížit. Tato metoda je známá jako

KNN (*K Nearest Neighbors*).

$$W_i = \frac{1/D_i}{\sum_{i=1}^k 1/D_i} \quad (5.2)$$

Přidáním vah jednotlivým bodům vznikne vzorec pro metodu WKNN (*Weighted KNN*).

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^k W_i * L_i \quad (5.3)$$

Kde W_i označuje váhu. Pro použití WKNN je nutné určit váhy jednotlivých bodů. Bylo ukázáno, že KNN i WKNN dosahují téměř stejné přesnosti a je možné použít kterýkoliv z těchto algoritmů bez větších rozdílů ve výsledku [20].

Kapitola 6

Návrh lokalizačního systému

6.1 Zhodnocení současného stavu

V předchozích kapitolách bylo představeno několik technologií, přístupů, metod výpočtů a optimalizací, které je mezi sebou možné téměř libovolně kombinovat. Vzniká tak možnost vytvořit spoustu různorodých lokalizačních systémů s odlišnými vlastnostmi. Práce v oblasti lokalizačních systémů se nejčastěji zabývají tvorbou prototypů a porovnáváním jednotlivých možností.

Mezi nejpopulárnější systémy patří systémy využívající Wi-Fi a fingerprinting, zapojené do různých topologií a využívající rozdílné metody filtrování. Další častou možností je lokalizace osob pomocí mobilních telefonů a rozmístěných Bluetooth majáků. Výpočet v těchto systémech probíhá často na straně klienta.

Za teoreticky nejvhodnější technologii pro lokalizaci osob považují Bluetooth, zejména verzi 5.0, která přináší několikanásobné zlepšení ve všech důležitých aspektech. Hlavním problémem je, že verze 5.0 v době psaní této práce ještě není na trhu dostupná.

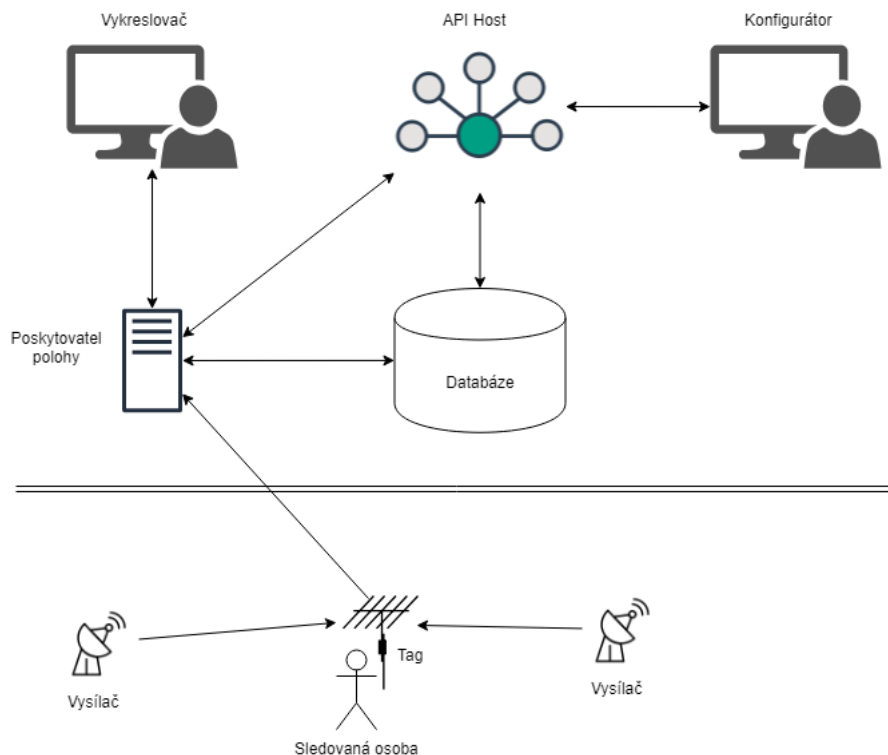
Alternativním přístupem je kombinace několika technologií v jednom lokalizačním systému, mající za cíl zpřesnění systému. Typicky se jedná například o vyplnění hluchých míst v systému Bluetooth majáky. Častým problémem je kolize frekvencí a vzájemné rušení mezi jednotlivými technologiemi. Může se tak například stát, že místo aby Bluetooth majáky posílily infrastrukturu Wi-Fi, spíše výslednou přesnost sníží.

Nejuniverzálnější metodou lokalizace je fingerprinting. Je možné jej využít pro všechny bezdrátové technologie pracující se silou signálu. Největší slabinou je, že každé zařízení zachycuje sílu signálu jinak, což se negativně projevuje například u systémů využívajících mobilní telefony různých výrobců. Řešením je používat stejný hardware pro získání otisků pro vytvoření fingerprinting databáze i pro následnou lokalizační fázi.

Žádná z optimalizačních a filtračních metod není považována za standard. Dosažené výsledky závisí jednak na použité metodě, ale i na zbytku systému, je proto obtížné metody porovnávat. Mezi nejčastěji používané patří Kalmanův filtr a některá z variant *Nearest neighbor*. Obecně použití filtrování systém zpřesní, nejedná se však o nutnost.

6.2 Návrh

Na základě poznatků získaných v teoretické části práce byl vytvořen návrh systému pro lokalizaci osob v budově založený na technologii Bluetooth. K tomuto účelu jsou sledované



Obrázek 6.1: Schéma navrženého lokalizačního systému. Šipky mezi jednotlivými komponentami znázorňují směr komunikace. Dvojitá čára odděluje hmotnou část systému od části nehmotné.

osoby vybaveny zařízením schopným zachytit vysílání Bluetooth a připojeným na Internet, dále označovaným jako „tag“. Poloha sledované osoby je aproximována na polohu tagu.

Mimo tagy jsou nedílnou součástí systému i další zařízení – vysílače. Hlavním a jediným úkolem vysílače je periodicky všesměrově vysílat Bluetooth pakety obsahující MAC adresu daného vysílače. Samotná lokalizace bude prováděna metodou fingerprinting.

Byla navržena sada podpůrných komponent, které umožňují se systémem pracovat. Při návrhu komponent byl kladen důraz na znovupoužitelnost a snadnou modifikovatelnost. Každá komponenta má vlastní zodpovědnost a komunikuje s ostatními předem definovaným způsobem. Vzhledem k rozmanitosti a různorodosti uživatelských požadavků na systém je možné každou část nahradit za jinou, za předpokladu, že dodrží komunikační rozhraní. Architektura systému je zachycena na obrázku 6.1.

Databáze

Základem navrženého systému je databáze otisků, vůči kterým je v online fázi prováděno porovnávání. Mimo jednotlivé otisky databáze uchovává i konfiguraci systému. Konkrétně se jedná o:

- Uživatel – data sloužící k autentizaci a autorizaci uživatelů klientské aplikace. Rozlišovány jsou dva typy uživatelů – administrátor a obyčejný uživatel.
- Mapa – Součástí dat jsou i plány pater a místností jednotlivých budov. Tyto jsou v systému reprezentovány jako obrázky – mapy.

- Vysílač – data o umístění jednotlivých vysílačů na mapě.
- Tag – S tagem mohou být svázána další data, například informace o majiteli tagu.

API Host

S databází je nutné komunikovat prostřednictvím klientského rozhraní. Služba *API Host* je mezivrstvou mezi databází a klientskou aplikací. Stará se primárně o zabezpečení a poskytuje abstrakci nad rozhraním databáze. Operace modifikující data jsou dostupné pouze administrátorovi systému, čtecí operace pak všem přihlášeným uživatelům. Mimo to jsou součástí API i nezabezpečené operace pro autentizaci a autorizaci klienta.

Poskytovatel polohy

Za výpočet polohy sledované osoby zodpovídá služba *Poskytovatel polohy*. Služba získává z tagů naměřená data, která následně pomocí metody *Nearest Neighbor* 5.4 porovná s databází otisků. Takto určenou polohu vystaví pomocí výstupního rozhraní. Služba musí dodávat informace o polohách jen autorizovaným klientům, k čemuž využívá příslušné operace na *API Host*.

Konfigurátor

Tato komponenta poskytuje grafické uživatelské rozhraní pro přístup k databázi přes službu *API Host*. Slouží pro přihlášení administrátora a následnou správu dat. Správou se rozumí zobrazení, vytvoření, modifikace a mazání dat.

Vykreslovač polohy

Druhým uživatelským rozhraním je komponenta zobrazující polohu sledovaných osob. K zobrazení využívá data získaná od *Poskytovatele polohy* a mapy načtené z databáze přes *API Host*. Na jednotlivých mapách vykresluje staticky umístěné vysílače a dynamicky se měnící polohy osob. Vysílač je na mapě zobrazen jako zelený kruh, osoba jako modrý kruh. Pod každou z těchto entit je napsáno její jméno.

Vysílač

Vysílač je jednou ze dvou komponent systému závislých na použitém hardware. Jde o statický prvek, umístěný na vybraném místě v budově. V předem stanovených intervalech vysílá do okolí pakety, které s určitou silou signálu zachytí tag. Velikost intervalu má vliv na spotřebu energie. Při rozmístování vysílačů po objektu je vhodné udržovat mezi vysílači rozestupy tak, aby bylo v každém bodě možné zachytit signál z co největšího počtu vysílačů. Bluetooth pakety prochází se ztrátami přes většinu objektů. K jednomu z největších ztrát dochází při průchodu přes lidské tělo, které je z velké části tvořeno vodou. Proto je dobré vysílače umísťovat na viditelné místo na strop, kde nehrozí snadné zastínění.

Tag

Osoba je v systému aproximována pomocí tagu. Tag je hardwarové zařízení, které v pravidelných intervalech provádí sken okolí. Sken trvá předem stanovenou dobu a tag během něj zpracovává všechny zachycené Bluetooth pakety. Po vypršení intervalu skenování, řádově

v jednotkách sekund, jsou naměřené hodnoty přefiltrovány a agregovány. Takto zpracovaná data jsou předána *Poskytovateli polohy*. Délka skenování výrazně ovlivňuje koncové vlastnosti systému. Delší interval zvyšuje přesnost v případě, že osoba setrvává na místě. V případě pohybu osoby pak přesnost s delším intervalem klesá. Kratší interval přináší vyšší frekvenci výpočtu polohy a menší odchylku způsobenou pohybem sledované osoby, snižuje však objem naměřených dat v daném intervalu. Při nasazení systému je důležité vybrat dobu intervalu tak, aby co nejlépe odpovídala požadavkům daného případu užití. Rozhodujícím faktorem může být v některých případech i vyšší zahlcení sítě u velmi krátkých intervalů.

6.3 Průběh

Konfigurační fáze předpokládá nasazení jednotlivých částí systému do produkčního prostředí a obnáší vytvoření základních databázových entit, potřebných pro chod systému, a samotných otisků. Pro vytvoření otisků je nejprve nutné vybrat na mapách příslušné body. Následně je na každém z vybraných bodů provedeno měření a výsledky jsou vloženy do databáze. Takto inicializovaná databáze je nutnou podmínkou pro sledování osob.

Během online fáze tag po danou dobu zachycuje Bluetooth pakety z vysílačů. Po uplynutí intervalu naměřené síly signálu zagreguje a výsledné naměřené hodnoty odešle *Poskytovateli polohy*. *Poskytovatel polohy* porovná tyto údaje s databází otisků metodou *Nearest neighbor* využívající Euklidovskou vzdálenost a vybere nejvíce odpovídající otisk. Takto určenou polohu dále deleguje všem autorizovaným *Vykreslovačům polohy*.

Kapitola 7

Implementace

System navržený v předchozí kapitole byl následně implementován. Kapitola je členěna do sekcí podle jednotlivých komponent. Místo *Poskytovatele polohy* bude dále použito označení *SocketIO Server*. *Konfigurátor* a *Vykreslovač polohy* byly sloučeny do jediné webové aplikace, dále zvané *Webový klient*. Součástí implementace je i proces tvorby otisků míst v domě.

7.1 Databáze

V oblasti databází existují dva alternativní přístupy. Tradiční relační databáze pracují s tabulkami a jejich schéma je pevně dáno. Oproti tomu NoSQL databáze obsahuje kolekce dokumentů, které nejsou předem nijak popsány. Umožňuje tak snadné horizontální rozšiřování databáze bez nutnosti migrací stávajících dat a je tak vhodnější pro tvorbu prototypů systémů.

Díky jazyku SQL jsou relační databáze vhodné pro složité dotazy. V případě NoSQL takové prostředky dostupné nejsou a dotazy nejsou tak mocné. NoSQL databáze jsou optimalizovány pro jednoduché dotazy nad velkým množstvím dat. Neřeší integritu dat, spolehlivost transakcí, uživatelská oprávnění, atd., nejsou tak robustní jako relační databáze. Díky větší flexibilitě je NoSQL vhodnější pro tvorbu prototypů systémů.

Očekávaným obsahem databáze je velké množství jednoduše strukturovaných dat, proto byla zvolena databáze MongoDB, jakožto nejznámější zástupce NoSQL databází. MongoDB poskytuje drivery pro spoustu jazyků, včetně Pythonu a JavaScriptu, což jsou jazyky použité ve zbylé části práce.

Databáze byla umístěna na cloudový hosting MongoDB Atlas¹ provozovaný stejnou společností jako samotné MongoDB. Součástí je webové uživatelské rozhraní zjednodušující administrativní úkoly jako je konfigurace, správa přístupových práv a přímý přístup k datům.

7.2 API Host

Pro komunikaci mezi webovým klientem a službou poskytující přístup k databázi byla využita architektura REST. Komunikace je bezstavová, žádný klientský kontext není uchovávan na serveru, každé volání API je tak nezávislé na ostatních. Pomocí metod HTTP GET, POST,

¹<https://www.mongodb.com/cloud/atlas>

PUT a DELETE jsou implementovány jednotlivé operace z CRUD (*Create, Read, Update, Delete*).

Pro implementaci byl použit skriptovací jazyk `Python 3.7` s balíkem `Flask`. Samotný projekt sestává ze dvou balíčků. Balíček `DB` tvoří vrstvu nad samotným providerem `PyMongo`. Navenek poskytuje rozhraní pro snadnější vkládání a vyhledávání dokumentů v databázi a práci s databázovými identifikátory `ObjectId` převádí na práci s řetězci.

Vstupním bodem balíku `API.Host` je skript `host.py`, který inicializuje připojení k databázi, deklaruje jednotlivé koncové body API a třídy, které je obsluhují. Při běhu na lokálním serveru využívá balík `Flask`.

Podrobný popis jednotlivých koncových bodů a očekávaný formát dat je uveden v Příloze B. Vzhledem k bezstavovosti komunikace jsem pro zabezpečení zvolil *JSON Web Token* a *Bearer token* autorizaci. API vystavuje koncový bod `/token` a v metodě `POST` očekává přihlašovací údaje uživatele. V případě úspěšné autorizace vrací zakódovaný *Bearer token*, který klient přikládá v každém dalším požadavku na API v HTTP hlavičce *Authorization*. `GET` operace vyžadují přítomnost platného *tokenu*, operace modifikující data vyžadují, aby role uživatele, pro nějž byl *token* vystaven, byla administrátor.

Druhá operace související se zabezpečením je na nezabezpečeném endpointu `/token-valid`, který v reakci na `POST` vrací návratový kód podle toho, zda je *token* obsažený v datech validní nebo ne. Tuto metodu používá *SocketIO Server* pro autorizaci webových klientů.

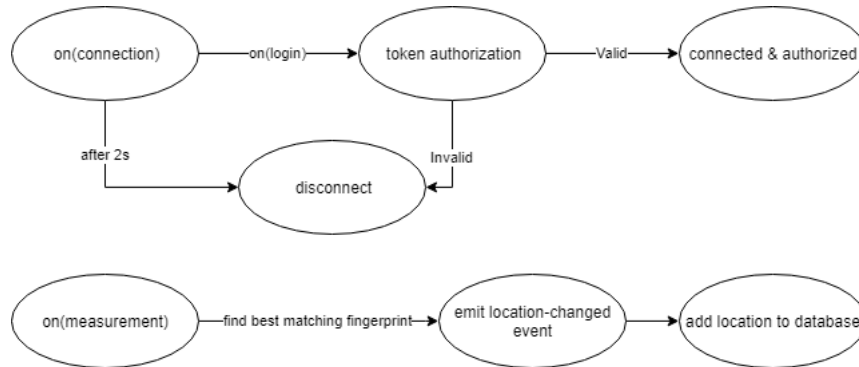
7.3 SocketIO Server

Událost	Data	Popis
<code>connection</code>		Připojení klienta
<code>login</code>	<pre>{ token: string }</pre>	Autorizace a autentizace klienta
<code>measurement</code>	<pre>{ tag_bt_address: string, measurements: { bt_address: string, rssi: number }[] }</pre>	Nová poloha z tagu
<code>location-changed</code>	<pre>{ map_id: string, tag_bt_address: string, loc_x: number, loc_y: number }</pre>	Odeslání vypočtené polohy klientům

Tabulka 7.1: Události a očekávaný formát dat *SocketIO Serveru*.

Komponenta *Poskytovatel polohy* byla naimplementována jako `Node.js` server. `JavaScript` s vhodnými balíčky poskytuje podporu pro přímý přístup k `MongoDB` a pro komunikaci

se službou *API Host*. S využitím balíku `SocketIO` navíc umožňuje v reálném čase komunikovat s vícero klienty, přičemž komunikace může být inicializována jak na straně klienta, tak na straně serveru. Díky tomu je možné jednotlivým přihlášeným klientům posílat nově vypočtené polohy osob bez toho, aby o ně tyto klienti pokaždé žádali. Kdykoliv *Tag* odešle nové měření a je určena jeho poloha, klient se o tom dozví, aniž by pro to musel krom prvotního přihlášení něco udělat. Stejným způsobem získá *SocketIO Server* data z jednotlivých měření, aniž by musel o tato data žádat.



Obrázek 7.1: Diagram zpracování `SocketIO` událostí na *SocketIO serveru*.

Server je nasazen prostřednictvím balíku `Express.js`. V lokálním prostředí běží na portu 3000. Při spuštění je vytvořeno spojení s databází, odkud jsou načteny kolekce `tag` a `fingerprint`.

Rozhraní *SocketIO Serveru* sestává ze čtyř událostí a je popsáno v Tabulce 7.1. Zjednodušený diagram událostí a příslušných reakcí je na obrázku 7.1. První větev začíná připojením `SocketIO` klienta. V okamžiku připojení se spustí časovač nastavený na 2 s. Pokud není klient do vypršení intervalu autorizován pomocí události `login`, je odpojen. Ve druhé větvi je reakce na událost `measurement`. Nejprve je vypočítán nejlépe odpovídající otisk, který je následně událostí `location-changed` odeslán všem připojeným klientům.

Algoritmus nalezení nejbližšího otisku vycházející z metody NN 5.4 je zapsán v následujícím pseudokódu:

```

foreach fingerprint:
  distance = EuclideanDistance(measurement, fprint)

  if distance < current_smallest_dist:
    current_smallest_dist = distance
    nearest = fingerprint
  
```

Pro každý z otisků v databázi je vypočtena Euklidovská vzdálenost od naměřených dat. Tato vzdálenost je rovna součtu vzdáleností jednotlivých složek podle vzorce 5.1. Poloha osoby je přibližně rovna poloze otisku, jehož vzdálenost je nejmenší. Vypočtená poloha je odeslána všem přihlášeným klientům a uložena do databáze.

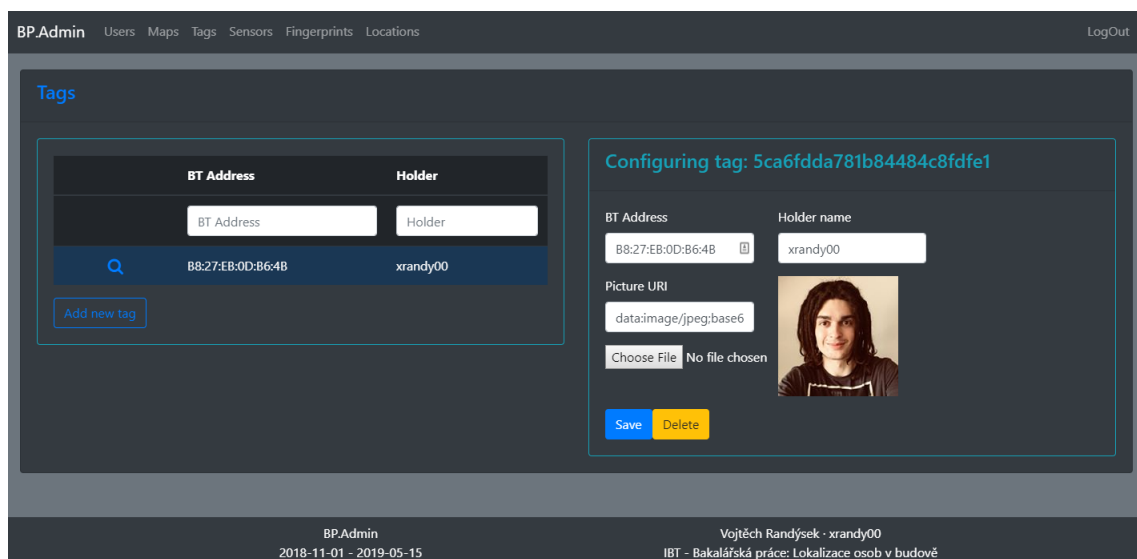
7.4 Webový klient

Roli *Konfiguratoru* a *Vykreslovače polohy* zastává *Webový klient*. Primárně poskytuje uživatelské rozhraní pro konfiguraci systému a samotné sledování pohybu osob.

Při implementaci byl použit framework **Angular**, který zjednodušuje tvorbu webových aplikací. Výsledná webová aplikace se skládá z komponent a služeb. Komponenty jsou tvořeny HTML souborem definujícím vzhled a souborem zapsaným v jazyce **TypeScript**, definujícím chování. Jazyk **TypeScript** je nadmnožinou **JavaScriptu**, do kterého je před spuštěním webu přeložen. Uživatelské rozhraní je v angličtině. Nástroje pro překlad aplikace jsou součástí **Angularu**.

V aplikaci lze použít jakýkoliv **JavaScriptový** balík. Doporučením je používat standardní nástroje jako je **npm** a **Angular CLI**. Aplikace pracuje s frameworkem **Bootstrap**, díky kterému je rozhraní responzivní a použitelné i na mobilním telefonu.

Přihlášení do aplikace probíhá na stránce `/login`, neznámé adresy jsou přeměrovány na stránku 404. Odpovědí na odeslání přihlašovacího formuláře na *API Host* je v případě úspěšného přihlášení `token` a `role`. `Token` je uložen do `local-storage` prohlížeče. Aplikace po přihlášení pracuje ve dvou režimech. Pokud je přihlášený uživatel administrátor, je mu umožněno na jednotlivých stránkách číst a modifikovat data. Příklad stránky je na obrázku 7.2. V horním menu jsou odkazy na zabezpečené stránky *Users*, *Maps*, *Tags*, *Sensors* a *Fingerprints*. Stránka *Locations* je jako jediná přístupná i uživateli, který není administrátor.



Obrázek 7.2: *Webový klient* na stránce *Tags* s detailem tagu.

Na každé z těchto stránek je tabulka zobrazující jednotlivé dokumenty v příslušné databázové kolekci. Nad vybranými sloupci bylo implementováno filtrování. Tabulky jsou stránkovány pomocí komponenty `Pagination` z **Bootstrapu**.

Aplikace obsahuje podpůrnou funkcionalitu pro vkládání senzorů a otisků do databáze při konfiguraci systému. Jak senzory, tak otisky musí být umístěny na určitou pozici na mapě. Poloha je v aplikaci zadávána kliknutím na příslušné místo na zvolené mapě.

Jedinou stránkou přístupnou uživateli bez administrátorských oprávnění je stránka *Locations*. Ve spodní části stránky je databázová tabulka s jednotlivými lokacemi. V detailu lokace je dané místo zobrazeno na příslušné mapě modrým kolečkem. V horní části aplikace lze vybrat některou ze systémových map. Kliknutím na tlačítko *Connect* se klient připojí k *SocketIO Serveru* a odešle event `login` s aktuálním `tokenem` získaným při přihlášení. V okamžiku, kdy *SocketIO Server* vystaví polohu některého z tagů a tato poloha je na

vybrané mapě, poloha je na mapu vykreslena. Pro implementaci mapy byl použit HTML element `canvas`.

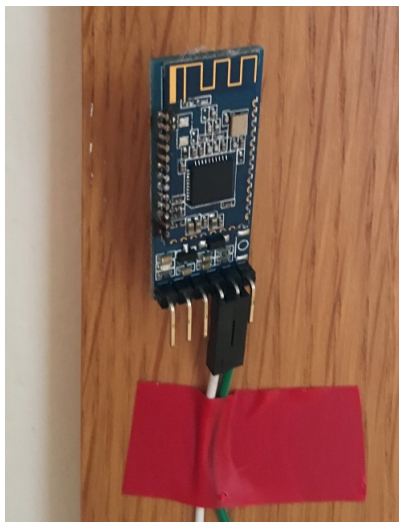
Webový klient je aplikace určená administrátorům a přihlášeným uživatelům. Prací administrátora je nakonfigurovat a dále spravovat systém. Ostatní uživatelé sledují označené osoby na mapách budovy.

7.5 Vysílač

Vysílač, ve zbytku práce označovaný jako senzor, je jednou ze dvou hardwarových částí systému. Podmínkou při výběru senzorů byla podpora Bluetooth verze alespoň 4.0. Jako další faktory působily rozměry zařízení, spotřeba, velikost uživatelské základny a rozsah případné dokumentace.

Zmíněné podmínky nejlépe splňoval modul HM-10, který je na obrázku 7.3. HM-10 je nástupcem hojně využívaného modulu HC-05, který však podporuje pouze Bluetooth 2.0. Komunikace s modulem HM-10 je možná prostřednictvím sériové linky a rozhraní modulu je definováno jeho firmwarem. Komplikací je, že je prakticky nemožné získat originální modul HM-10, protože trh je zaplaven klony s neoriginálním firmwarem. Konfigurace a komunikace s modulem byla omezena na minimum – nastavení jména modulu a základního RSSI na stejnou hodnotu. Modul ve firemním nastavení pracuje na bázi protokolu iBeacon, toto nastavení bylo ponecháno. Pro komunikaci s modulem a jejich napájení byly využity jednodeskové počítače Arduino Nano. Potřeba Arduino byla v závěru eliminována napájením modulů pomocí 5 V a GND vodičů z USB kabelů. Senzor nainstalovaný na rámu dveří je na obrázku 8.2.

Dosah vysílačů je při popsané konfiguraci okolo 13 m, v závislosti na prostředí. Alternativou pro moduly HM-10 je jakýkoli jiný Bluetooth vysílač, implementující některý z protokolů *iBeacon* nebo *Eddystone*.



Obrázek 7.3: Zapojený modul HM-10.

7.6 Tag

Implementaci softwaru tagu předcházela výběr fyzického zařízení. Podmínkou při výběru hardware byla výsledná mobilita zařízení a podpora všech potřebných technologií:

- Bluetooth co nejvyšší verze, alespoň 4.0
- WLAN
- Možnost implementovat `SocketIO` klienta
- Přístup k BLE RSSI paketům

Podmínky splňují následující zařízení:

- High-end Android telefon
- RaspberryPi (dále jen RPi)
- Arduino s příslušnými moduly

Kvůli ceně, úrovni abstrakce, na které se se zařízením pracuje, a dobré dokumentaci bylo zvoleno RPi 3B+, což byl v době psaní práce nejvýkonnější model RPi. Součástí mikropočítače jsou i Wi-Fi a Bluetooth 4.0 moduly. Jako operační systém byla použita Linuxová distribuce `Raspbian`. Dle návrhu musí tag plnit dvě role:

- Zachycovat a agregovat RSSI z vysílačů.
- Odesílat naměřená data na *SocketIO Server*.

Pro implementaci byl použit jazyk Python, který je vhodný pro tvorbu jednoduchých multiplatformních prototypů. Pro práci s Bluetooth modulem byla v Pythonu použita knihovna `PyBluez`. Při spotřebě² 500 mA a napájení z powerbanky o kapacitě 12000 mAh je očekávaná výdrž 24 hodin, což je pro demonstrační účely dostačující. Obrázek 7.4 ukazuje zapojené RPi a použitou powerbanku.

Pro práci s Bluetooth jsem převzal a upravil skript pracující právě s knihovnou `PyBluez`. Ve skriptu byl upraven výstupní formát dat, aby lépe odpovídal potřebám systému. Dále byla odstraněna nadbytečná funkcionality.

Druhou částí je skript `tag.py`. Skriptu je možné volitelně v prvním a zároveň jediném parametru předat délku intervalu skenování, implicitně 1 s. V první fázi skript pomocí balíčku `commands` a příkazu `hciconfig` získá MAC adresu zařízení `hci0`, což je Bluetooth modul RPi. Následně je navázáno spojení se *SocketIO Serverem* a provedeno přihlášení vysláním události `login`. Inicializace skriptu končí otevřením Bluetooth schránky pomocí funkce ze skriptu `blescan.py` a nastavením parametrů skenování.

Na inicializaci navazuje fáze skenování. Skript po dobu danou intervalem skenuje a zpracovává jednotlivé Bluetooth pakety. Funkce vrací pole objektů, obsahujících MAC adresu vysílače a příslušné RSSI. Tyto údaje jsou podle adres vysílačů shlukovány. Pro každý shluk je vypočítána jediná hodnota RSSI, která nejlépe odpovídá skutečnosti. Součástí kódu je pole povolených MAC adres, které slouží k odfiltrování zachycených Bluetooth paketů z neznámých zařízení. V budoucích verzích by tyto adresy měly být součástí databáze a čteny z *API Host*.

²Spotřeba závisí na využití a pohybuje se od 350 do 1000 mA.

Pro výpočet hodnoty RSSI je využit jednoduchý filtr, který hodnoty nejprve zprůměruje a v následném průchodu odstraní ty, které jsou od průměru vzdáleny o více než 10. Takto spočítané hodnoty jsou odeslány prostřednictvím `SocketIO` na *SocketIO Server*. Zpracování dat jednoho skenu je popsáno následujícím pseudokódem:

```
grouped = measurements.group_by(x => x.mac_address)
```

```
for sensor data in grouped:
    if sensor adress is allowed
        avg = sum(sensor data) / len(sensor data)

        for val in sensor data :
            if val in avg +- 10:
                remove val
        if not removed all:
            avg = sum(sensor data) / len(sensor data)
            result.add(sensor mac address, avg)
```

```
emit('measurement', result)
```

V aktuální podobě je tag dobře použitelný pro demonstrační účely. Pro produkční nasazení obsahuje RPi 3B+ příliš mnoho součástí, majících za následek zbytečně velkou spotřebu. Je však možné použít některý z jednodušších modelů, mobilní telefon nebo chytrý náramek.



Obrázek 7.4: Raspberry Pi 3B+ napájené z powerbanky.

7.7 Fingerprinting

Součástí implementace systému je i popis získávání otisků míst v budově. Data pro fingerprinting jsou získána zásahem do softwaru *tagu*. Místo odeslání dat na *SocketIO Server* jsou data před odesláním odchycena. Data tak prochází stejným procesem filtrování jako při fázi určování polohy. Získané hodnoty jsou ručně vloženy do databáze prostřednictvím *Webového klienta*. Parametrem skriptu je délka skenování, což je v tomto případě velmi výhodné a je tak možné tímto parametrem nastavit délku měření dat daného otisku. Čím delší interval, tím kvalitnější bude vytvořený fingerprint. Proces je možné paralelizovat využitím více tagů a měření na více místech současně.

Kapitola 8

Testování

Celý proces nasazení a následných měření probíhal po dobu pěti dní a v monitorovaném domě se nacházelo 3 až 7 osob. Prostředí tak bylo proměnlivé a odpovídalo podmínkám skutečného nasazení.

8.1 Nasazení a konfigurace systému

Před samotnou konfigurací systému musí proběhnout instalace jednotlivých aplikací a služeb. Databázový hosting byl zajištěn pomocí MongoDB Atlas. *Webový klient* byl nainstalován na školní server *eva*¹, *API Host* a *SocketIO Server* byly nasazeny prostřednictvím platformy Heroku. Proces konfigurace systému probíhal během celého vývoje kvůli průběžné validaci implementovaných komponent.

Tvorba map

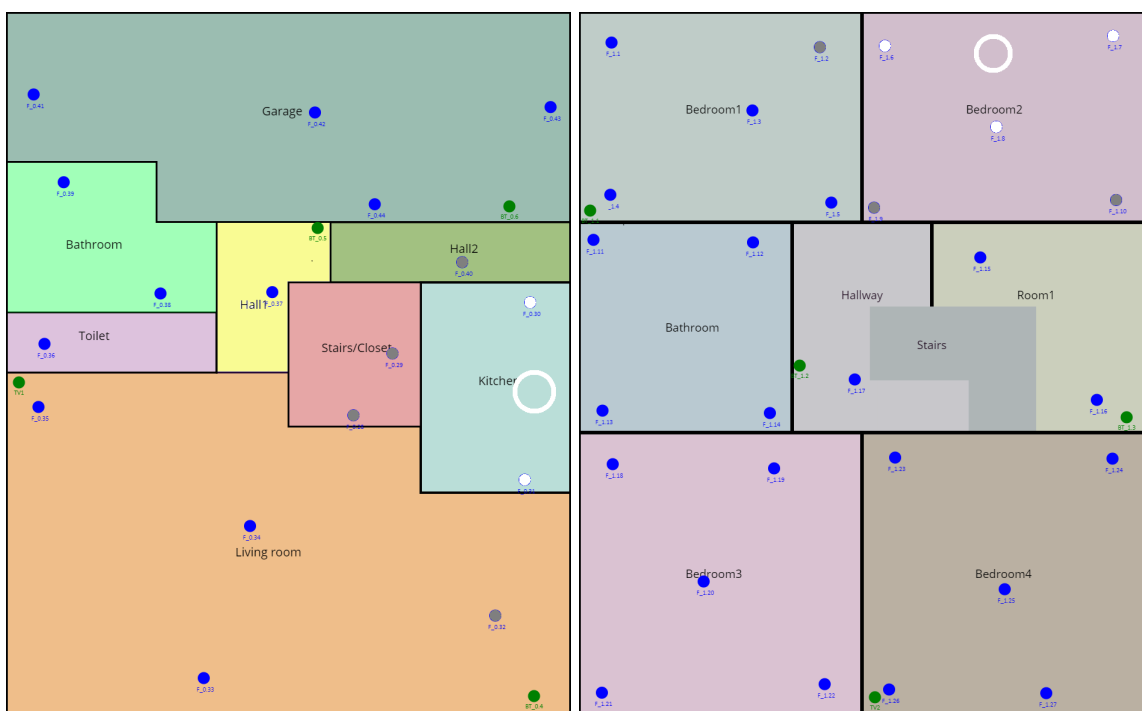
Pro každé podlaží byla vytvořena mapa. K dispozici byly informace o celkové rozloze domu a o rozloze jednotlivých místností. Nejprve byly změřeny délky nejvýznamnějších stěn, na základě kterých byl proveden náčrt daného podlaží. Podle rozlohy jednotlivých místností byly délky jednotlivých stěn upraveny, aby odpovídala rozloha místností i celého domu. Takto vytvořené mapy byla přerýsovány a pomocí klientské aplikace nahrány do databáze.

Rozmístění senzorů

V systému bylo nasazeno 6 senzorů z modulů HM-10. Podmínkou při rozmísťování senzorů bylo umístit senzor v blízkosti zásuvky z důvodu napájení. Pro lepší výsledky je vhodné senzor umístit co nejvýš, kvůli prevenci stínění těly osob. Dalším doporučením je rozmísťovat senzory dál od sebe, ideálně tak, aby senzory byly rozmístěny v rovnoměrných vzdálenostech a každé místo domu pokrývalo co nejvíc senzorů. Dosah jednotlivých senzorů byl experimentálně stanoven na 13 m, což v případě domu znamenalo ve většině případů pokrytí celého podlaží. Jako senzory byly použity také dvě televize, které vysílaly signál podobný signálu senzorů. Výsledné rozmístění senzorů je vyobrazeno na mapách 8.1, senzory jsou vyobrazeny zeleně. Příklad umístění jednoho z vysílačů, konkrétně modulu HM-10 označeného jako BT_1.2. je na obrázku 8.2.

Při rozloze patra 110 m je výsledná hustota 1 senzor na $27.5 m^2$. Signál je však zachytáván z obou podlaží, hustotu je tak možno chápat jako 1 senzor na $13.75 m^2$.

¹Odkaz na *Webového klienta* umístěného na školním serveru.



Obrázek 8.1: Mapa testovacího prostředí, nalevo přízemí, napravo 2. nadzemní podlaží.



Obrázek 8.2: Zapojení vysílače do zásuvky a umístění na rám dveří.

Zvolení míst pro fingerprinting

Místa, na kterých byl prováděn fingerprinting, byla vybrána tak, aby bylo možné rozlišit polohu v rámci jednotlivých místností. Pro výběr bodů nebyla stanovena žádná přesná pravidla. Byla vynaložena snaha vybrat ve větších místnostech body v rozích, případně další bod ve středu místnosti. Dále byla preferována významná místa, na kterých byl očekáván vyšší výskyt osob. Taková místa jsou například stůl, toaleta, vana nebo křeslo. Výsledná kolekce bodů byla doplněna o několik bodů v prostoru, aby bylo možné sledovat pohyb osob mezi významnými místy.

V přízemí bylo označeno 17 bodů, což odpovídá hustotě 1 otisk na 6.47 m^2 . Ve druhém podlaží bylo vybráno bodů 27, tedy 1 na 4.07 m^2 . Rozmístění otisků je vidět na obrázcích 8.1, na kterých jsou znázorněny modře, bíle a šedě.

Provedení fingerprintingu

Fingerprinting byl prováděn ručně. Délka skenování každého otisku byla stanovena na 10 minut, což při celkovém počtu 44 otisků a použití jediného RPi odpovídá 7.33 hodinám. Společně s režijním časem pro byl celý proces proveden za 9 hodin. S využitím více tagů by bylo možné proces snadno paralelizovat a zkrátit.

8.2 Určení polohy v místě otisku

Cílem prvního experimentu bylo ověřit, že vytvořený systém je validní a že přesnost je dostatečná pro určení polohy sledované osoby. Podstatou experimentu bylo určení polohy v nejlepším možném případě, tedy v případě, že se osoba zastaví přesně v místě některého z otisků. Experiment byl proveden celkem na 12 bodech, 6 v každém podlaží. Interval skenování byl stanoven na 5 s. V každém z bodů se tag nacházel po dobu 5 minut a určená poloha byla zaznamenávána. Pro vyhodnocení byly vypočítány následující metriky:

1. Pravděpodobnost určení správného bodu
2. Pravděpodobnost určení bodu do 3 m
3. Pravděpodobnost správného podlaží

Pravděpodobnost určení bodu do 3 m přibližně odpovídá pravděpodobnosti určení správné místnosti. Naměřené údaje jsou v tabulce 8.1, interpretované výsledky v tabulce 8.2.

8.3 Určení polohy v prostoru mezi otisky

Druhý experiment si klade za cíl dále prověřit pozitivní výsledky prvního experimentu a ukázat tak i další situaci, která při skutečném provozu nastává. Měření byla provedena ve vybraných bodech mimo otisky. Body byly vybrány tak, aby nebylo předem jasné do kterého otisku by se měla poloha zobrazit. Byly použity podobné metriky jako v předchozím experimentu. Za správný bod byl označen některý z nejbližších bodů, body v blízkosti jsou pak jiné než správné body, do vzdálenosti tří metrů. Délka měření v každém z bodů byla stanovena na 5 minut, stejně jako v předchozím experimentu. Příklad dvou takto vybraných bodů a označení příslušných otisků je na obrázku 8.1. Místo měření je označeno bílým kruhem. V okolí těchto bodů jsou bíle označeny správné body, šedě jsou označeny otisky do vzdálenosti 3 m. Naměřené údaje jsou v tabulce 8.3, interpretované výsledky v tabulce 8.4.

Místo	Přesně	V toleranci	Chyba	Správné podlaží	Špatné podlaží
F3	75	17	8	100	0
F8	197	5	0	202	0
F20	59	41	0	100	0
F27	71	18	11	100	0
F15	85	9	6	95	5
F14	17	79	4	100	0
F32	89	11	0	100	0
F30	100	0	0	100	0
F35	36	64	0	100	0
F36	86	11	4	100	0
F42	103	0	1	103	1
F40	39	54	7	93	7
Celkem	957	309	41	1293	13

Tabulka 8.1: Počet určení polohy v jednotlivých kategoriích při prvním experimentu. Ve sloupci „Místo“ jsou kódy otisků na příslušných místech.

Pravděpodobnost správného podlaží	99 %
Pravděpodobnost správného bodu	73 %
Pravděpodobnost dostatečné přesnosti	97 %

Tabulka 8.2: Výsledné metriky prvního experimentu, pravděpodobnost dostatečné přesnosti je vypočtena ze součtu sloupců „Přesně“ a „V toleranci“.

8.4 Osoba v pohybu a vliv délky intervalu

Pro demonstraci vlastností systému v případě pohybující se osoby byl proveden experiment, zkoumající správnost určení podlaží. Součástí tohoto experimentu bylo také porovnání výsledků při různých délkách intervalu skenování. Celkem bylo provedeno šest měření, tři v každém podlaží, vždy pro interval o délce 1, 5 a 10 sekund. Délka každého měření byla 5 minut. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.5, interpretované výsledky v tabulce 8.6.

8.5 Video demonstrace

Jako poslední experiment bylo vytvořeno video, prezentující schopnost systému určit polohu pohybující se osoby. Popis videa je uveden v příloze C.

Na základě určených poloh ve videu a aktuální polohy tagu z videa byla vypočítána přesnost nasazeného systému v momentě určení polohy. Pro každý z určených bodů byla na mapě vyhledána pozice tagu podle videa a byla určena vzdálenost mezi těmito body. Celkem byla na videu poloha určena 45krát a vzdálenost určené polohy od skutečné polohy z videa byla po sečtení a zaokrouhlení 111 m. Průměrná přesnost systému prezentovaného na videu je tak 2.46 m, maximální chyba 7 m. Vypočítaná průměrná absolutní odchylka je 1.484 m, což je o 69 % lepší výsledek, než v práci kombinující Wi-Fi a Bluetooth fingerprinting [25]. Standardní odchylka je stejně jako ve zmíněné práci rovna po zaokrouhlení 2 m.

Místo	Přesně	V toleranci	Chyba	Správné podlaží	Špatné podlaží
F1, F3, F4	78	0	22	100	22
F6, F7, F8	98	1	1	99	1
F5, F9, F17, F12	97	2	3	100	2
F24, F25, F27	32	3	65	100	0
F20, F21, F22	92	0	8	100	0
F29, F30, F31	92	25	2	119	0
F32, F33, F34	67	2	32	101	0
F33, F34, F35	109	0	6	115	0
F37, F28, F29	51	0	1	52	48
F41, F39, F42, F44	13	48	52	62	51
Celkem	729	81	192	948	124

Tabulka 8.3: Počet určení polohy v jednotlivých kategoriích při druhém experimentu. Ve sloupci „Místo“ jsou kódy nejbližších otisků ke snímanému místu na mapě.

Pravděpodobnost správného podlaží	88 %
Pravděpodobnost správného bodu	68 %
Pravděpodobnost dostatečné přesnosti	76 %

Tabulka 8.4: Výsledné metriky druhého experimentu.

Podlaží	Délka intervalu	Správné podlaží	Špatné podlaží	Úspěšnost
1NP	1 s	205	43	83 %
1NP	5 s	56	4	93 %
1NP	10 s	29	3	91 %
2NP	1 s	291	18	94 %
2NP	5 s	62	0	100 %
2NP	10 s	32	1	97 %

Tabulka 8.5: Počet určení polohy v jednotlivých kategoriích při experimentu v pohybu. 1NP je zkratka pro 1. nadzemní podlaží, tedy přízemí, 2NP pro 2. nadzemní podlaží.

Délka intervalu	Správné podlaží	Špatné podlaží	Úspěšnost
1 s	496	61	89 %
5 s	118	4	97 %
10 s	61	4	94 %

Tabulka 8.6: Souhrnné počty a procentuální úspěšnosti pro obě podlaží.

Kapitola 9

Závěr

Tato práce se zabývá tvorbou systému pro lokalizaci osob v budově. Navrhl jsem lokalizační systém založený na technologii Bluetooth využívající metodu fingerprinting. Systém jsem podle vytvořeného návrhu implementoval a nasadil v prostředí rodinného domu. S výsledným systémem jsem provedl několik experimentů a vytvořil demonstrační video.

Jako nejvhodnější délku intervalu obnovení polohy jsem zvolil 5 s. Výsledný systém na videu dosáhl průměrné přesnosti 2.46 m. Pravděpodobnost určení správného podlaží u pohybující se osoby je 97 %. V případě, že je osoba v některém ze známých míst, je pravděpodobnost určení polohy do tří metrů od skutečné polohy rovna 97 %.

Všechny součásti představeného systému jsou nahraditelné jinými komponentami implementujícími stejné rozhraní. Systém není vázán na žádnou konkrétní technologii. V porovnání s konkurenčními systémy je dosažená přesnost minimálně srovnatelná, spíše lepší. Průměrná absolutní odchylka 1.484 m při měření zachyceném na videu je o 69 % lepší než nejlepší výsledek získaný v práci autora Hui-Kai Su [25].

V navazující práci bych se rád zaměřil na optimalizaci hardwarové části systému. Vysílače by mohly být napájeny z baterie a nikoliv přímo z elektrické sítě. Místo modulů HM-10 bych použil vlastní, na míru vyrobený hardware. Následně by pak bylo možné senzory umístit na strop a zabránit tak problémům se stíněním tělem sledované osoby. Další optimalizací by mohlo být zkrácení intervalu výpočtu polohy a implementace Kalmanova filtru. Výpočet polohy by tak nebyl izolovaný, ale závisel by na předchozích měřeních. Po nasnímání více míst v budově a případnou animací na straně uživatelského rozhraní by se pohyb jevil jako plynulý.

Z dlouhodobého hlediska by bylo vhodné upravit software tagu pro jiný hardware. Mohlo by se jednat o mobilní telefon nebo chytrý náramek. Další oblast, která si zaslouží pozornost, je bezpečnost komunikace a jednotlivých komponent, která je v rámci bakalářské práce řešena pouze provizorně.

Literatura

- [1] Bluetooth Beacons Help Navigate Museum Halls AMNH.
URL <https://www.amnh.org/explore/news-blogs/news-posts/bluetooth-beacons-help-navigate-museum-halls>
- [2] Discover Wi-Fi.
URL <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi>
- [3] Z-wave vs Zigbee vs Bluetooth vs Wifi: Which Smart Home Technology is Best For Your Situation?
URL <https://inovelli.com/z-wave-vs-zigbee-vs-bluetooth-vs-wifi-smart-home-technology/>
- [4] Technology: Positioning Sensors and Hardware Products for Indoor Localization. 2019, [Online; accessed 19-January-2019].
URL <https://www.infsoft.com/technology>
- [5] bin Abdul Malek, M. F.; Sebastian, P.; Drieberg, M.: Augmented reality assisted localization for indoor navigation on embedded computing platform. In *2017 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, Zář 2017, s. 111–116, doi:10.1109/ICSIPA.2017.8120589.
- [6] Alarifi, A.; Al-Salman, A.; Alsaleh, M.; aj.: Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors*, ročník 16, č. 5, 2016: str. 707.
- [7] Bianchi, V.; Ciampolini, P.; Munari, I. D.: RSSI-Based Indoor Localization and Identification for ZigBee Wireless Sensor Networks in Smart Homes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, ročník 68, č. 2, Únor 2019: s. 566–575, ISSN 0018-9456, doi:10.1109/TIM.2018.2851675.
- [8] Chen, L.; Chen, T.; Chen, D.: iGuiding: A Mobile Campus Care and Guidance System Based on Internet of Things Technologies. In *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, March 2018, s. 436–438, doi:10.1109/PERCOMW.2018.8480190.
- [9] Chen, Y.; Liu, J.; Lymberopoulos, D.; aj.: FM-based Indoor Localization. Červen 2012.
URL <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/fm-based-indoor-localization/>
- [10] David: What's the Difference Between Bluetooth Versions 2.x, 3.x, 4.x and 5.x. Říjen 2016.

URL <https://thedroidguy.com/2019/01/whats-difference-between-bluetooth-versions-2-x-3-x-4-x-5-x-1065792>

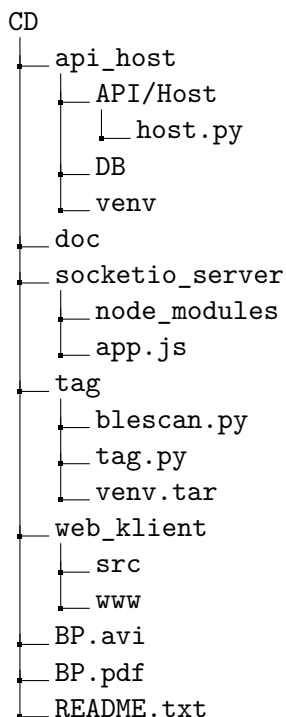
- [11] Dong, Z.; Mengjiao, C.; Wenjuan, L.: Implementation of indoor fingerprint positioning based on ZigBee. In *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Květen 2017, ISSN 1948-9447, s. 2654–2659, doi:10.1109/CCDC.2017.7978963.
- [12] Fudickar, S.; Valentin, M.: Most accurate algorithms for RSS-based Wi-Fi indoor localisation. In *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Říjen 2014, s. 38–47, doi:10.1109/IPIN.2014.7275466.
- [13] Gislason, D.: *ZigBee wireless networking*. Newnes, 2008, ISBN 9780750685979.
- [14] Gkoufas, Y.; Katrinis, K.: Copernicus: A Robust AI-Centric Indoor Positioning System. In *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Zář 2018, ISSN 2471-917X, s. 206–212, doi:10.1109/IPIN.2018.8533821.
- [15] Hong, J.; Kim, K.; Kim, C.: Comparison of Indoor Positioning System Using Wi-Fi and UWB. In *Intelligent Information and Database Systems*, editace N. T. Nguyen; D. H. Hoang; T.-P. Hong; H. Pham; B. Trawiński, Cham: Springer International Publishing, 2018, ISBN 978-3-319-75417-8, s. 623–632.
- [16] Li, B.; Harvey, B.; Gallagher, T.: Using barometers to determine the height for indoor positioning. In *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Říjen 2013, s. 1–7, doi:10.1109/IPIN.2013.6817923.
- [17] Li, G.; Geng, E.; Ye, Z.; aj.: Indoor Positioning Algorithm Based on the Improved RSSI Distance Model. *Sensors*, ročník 18, č. 9, 2018, ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s18092820.
URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/2820>
- [18] Li, Q.; Li, R.; Ji, K.; aj.: Kalman Filter and Its Application. In *2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*, Listopad 2015, s. 74–77, doi:10.1109/ICINIS.2015.35.
- [19] Liu, J.: *Survey of Wireless Based Indoor Localization Technologies*. 2014.
- [20] Machaj, J.; Brida, P.; Benikovsky, J.: Using GSM signals for fingerprint-based indoor positioning system. In *2014 ELEKTRO*, Květen 2014, s. 64–67, doi:10.1109/ELEKTRO.2014.6847872.
- [21] Molina, B.; Olivares, E.; Palau, C. E.; aj.: A Multimodal Fingerprint-Based Indoor Positioning System for Airports. *IEEE Access*, ročník 6, 2018: s. 10092–10106, ISSN 2169-3536, doi:10.1109/ACCESS.2018.2798918.
- [22] Ortiz, G.; Treven, F.; Svensson, L.; aj.: A framework for a relative real-time tracking system based on ultra-wideband technology. In *2017 14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, Říjen 2017, s. 1–6, doi:10.1109/WPNC.2017.8250067.

- [23] Oslo, A. F.-P. i.: Norway becomes first country to end national radio broadcasts on FM. Prosinec 2017.
URL <https://www.theguardian.com/world/2017/dec/13/norway-becomes-first-country-to-end-national-radio-broadcasts-on-fm>
- [24] Shaw, K.: 802.11: Wi-Fi standards and speeds explained. Říjen 2018.
URL <https://www.networkworld.com/article/3238664/wi-fi/80211-wi-fi-standards-and-speeds-explained.html>
- [25] Su, H.; Liao, Z.; Lin, C.; aj.: A hybrid indoor-position mechanism based on bluetooth and WiFi communications for smart mobile devices. In *2015 International Symposium on Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB)*, Říjen 2015, s. 188–191, doi:10.1109/ISBB.2015.7344955.
- [26] Support, A.: Update on Bluetooth 5 and Beacons.
URL <https://www.beaconzone.co.uk/blog/update-on-bluetooth-5-and-beacons/>
- [27] Tian, Y.; Denby, B.; Ahriz, I.; aj.: Robust indoor localization and tracking using GSM fingerprints. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, ročník 2015, č. 1, Červen 2015: str. 157, ISSN 1687-1499, doi:10.1186/s13638-015-0401-7.
URL <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0401-7>
- [28] Tsai, T.; Chang, C.; Chen, S.: Vision based indoor positioning for intelligent buildings. In *2016 2nd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, Červen 2016, s. 1–4, doi:10.1109/IGBSG.2016.7539419.
- [29] Vinichayakul, W.; Promwong, S.: Improvement of fingerprinting technique for UWB indoor localization. In *The 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE)*, Březen 2014, s. 1–5, doi:10.1109/JICTEE.2014.6804115.
- [30] Yim, J.; Kim, J.; Lee, G.; aj.: Kalman Filter vs. Particle Filter in Improving K-NN Indoor Positioning. In *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, editace A. König; A. Dengel; K. Hinkelmann; K. Kise; R. J. Howlett; L. C. Jain, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 978-3-642-23863-5, s. 203–213.
- [31] Yu, C.; Li, X.; Dou, L.; aj.: Implement and Optimization of Indoor Positioning System Based on Wi-Fi Signal. In *Algorithms and Architectures for Parallel Processing*, editace J. Carretero; J. Garcia-Blas; R. K. Ko; P. Mueller; K. Nakano, Cham: Springer International Publishing, 2016, ISBN 978-3-319-49583-5, s. 220–228.
- [32] Zhao, X.; Ruan, L.; Zhang, L.; aj.: An Analysis of the Optimal Placement of Beacon in Bluetooth-INS Indoor Localization. In *Adjunct Proceedings of the 14th International Conference on Location Based Services*, ETH Zurich, 2018, s. 50–55.

Příloha A

Obsah přiloženého paměťového média

Struktura adresářů na přiloženém CD odpovídá jednotlivým komponentám systému. Adresář `api_host` obsahuje složku `venv` s virtuálním prostředím pro Python. Složky `API` a `DB` obsahují příslušné skripty. V `doc` jsou zdrojové soubory této zprávy ve formátu `LaTeX`. Složka `socketio_server` obsahuje potřebné zdrojové soubory a balíčky `Node.js` aplikace *SocketIO Server*. Ve složce `tag` jsou skripty tagu, společně s virtuálním prostředím pro Python 2, zabaleným do archívu `tar`. Posledním adresářem na nejvyšší úrovni je `web_klient`, obsahující přeloženou aplikaci ve složce `www` a zdrojové kódy a potřebné balíčky ve složce `src`. Mimo adresáře jsou na nejvyšší úrovni soubory `BP.pdf`, což je tento dokument, demonstrační video `BP.avi` a `README.txt` s návodem ke spuštění aplikací a adresami nasazených aplikací. Adresářová struktura s nejvýznamnějšími soubory je popsána následujícím grafem:



Příloha B

Popis rozhraní API Host

Popis obsahuje implementované HTTP metody a očekávaný formát dat. Většina metod pracuje s URL parametrem `id`. V případě `GET` je `id` volitelné a funguje jako filtr dat. V případě, že `id` není součástí dotazu, vrací metoda pole příslušných objektů. S přítomným `id` vrací pouze objekt z dané kolekce se stejným `id`. Metody `POST` sloužící k tvorbě nových objektů `id` nepoužívají, protože před vytvořením objektu `id` neexistuje. `POST` a `PUT` využívají stejné datové objekty. Při chybě je spolu s návratovým kódem 400 odeslán i objekt `{ error: string }`, který v sobě nese popis příslušné chyby.

Tabulka B.1: Přehled operací na *API Host*.

URL	Operace	Request data	Response data
<code>/login</code>	<code>POST</code>	<pre>{ user: string, password: string }</pre>	<pre>{ token: string, role: number }</pre>
<code>/user</code>	<code>GET</code> <code>DELETE</code> <code>POST</code> <code>PUT</code>	<pre>{ login: string, password: string, role: number }</pre>	<pre>{ login: string, id: string, role: number }</pre> 200; 400; 200; 400;
<code>/map</code>	<code>GET</code>		<pre>{ id: string, name: string, description: string, picture_uri: string, size_x: number, size_y: number }</pre>

	DELETE		200; 400;
	POST PUT	{ name: string, description: string, picture_uri: string, size_x: number, size_y: number }	200; 400;
/sensor	GET		{ bt_address: string, id: string, map_id: string, loc_x: number, loc_y: number, name: string }
	DELETE		200; 400;
	POST PUT	{ bt_address: string, map_id: string, loc_x: number, loc_y: number, name: string }	200; 400;
/tag	GET		{ bt_address: string, id: string, picture_uri: string, holder_name: string }
	DELETE		200; 400;
	POST PUT	{ bt_address: string, picture_uri: string, holder_name: string }	200; 400;

/fingerprint	GET DELETE POST PUT	<pre> { datetime_created: string, map_id: string, loc_x: number, loc_y: number, name: string, measurements: { bt_address: string, rssi: number } } </pre> <pre> { datetime_created: string, map_id: string, loc_x: number, loc_y: number, name: string, measurements: { bt_address: string, rssi: number } } </pre>	<pre> { id: string, datetime_created: string, map_id: string, loc_x: number, loc_y: number, name: string, measurements: { bt_address: string, rssi: number } } </pre> <p>200; 400;</p> <p>200; 400;</p>
/position	GET DELETE POST PUT	<pre> { tag_id: string, map_id: string, loc_x: string, loc_y: string, datetime: string } </pre> <pre> { tag_id: string, map_id: string, loc_x: string, loc_y: string, datetime: string } </pre>	<pre> { id: string, tag_id: string, map_id: string, loc_x: string, loc_y: string, datetime: string } </pre> <p>200; 400;</p> <p>200; 400;</p>
/token-valid	POST	<pre> { token: string } </pre>	<p>200; 400;</p>

Příloha C

Popis videa

Součástí práce je i demonstrační video¹, jehož popis je obsahem této přílohy. V úvodu videa probíhá přihlášení do klientské aplikace, výběr mapy podlaží a připojení k *SocketIO Serveru*. V následující části je do videa vložen záznam z kamery mobilního telefonu, na kterém je vidět jak se sledovaná osoba pohybuje jednotlivými místnostmi domu. Paralelně se záznamem kamery je na mapě vidět určená poloha. Celý experiment se odehrával pouze na jednom podlaží. V popisu jsou příležitostně použity barvy odpovídající barvám na mapě 8.1, ne však barvám stěn příslušných místností.

Experiment začíná v levém horním rohu místnosti **Bedroom1**, na mapě zeleně. Následně osoba prochází chodbou do růžové ložnice **Bedroom3**. Cestou byl nejprve označen jeden z krajních bodů v koupelně, poté správný bod v **Bedroom3**. V čase 1:20 poloha odskočila do sousední místnosti **Bedroom4**. To je způsobeno otáčením osoby na místě. Naměřené hodnoty odpovídaly spíše jinému bodu než bodu, na kterém se osoba skutečně nacházela. Podobné chyby se na videu objevují ještě několikrát. V **Bedroom3** se osoba ještě chvíli pohybuje, poté se přesune do modré koupelny. V čase 2:05 je záběr na jeden z rozmístěných senzorů. V čase 2:36 se poloha správně ustálí na pozici toalety. Z koupelny se video přesouvá do hnědé ložnice **Bedroom4**, kde je v čase 3:00 záběr na televizi, která funguje v systému jako senzor. Následuje růžová **Bedroom2** v pravém horním rohu. V **Bedroom2** je tag položen na psací stůl. Pozice u stolu byla téměř správná, byl vybrán bod za stěnou, u které stůl stojí. Na závěr se osoba odebere do žluté technické místnosti, cestou byla pozice několikrát nesprávně určena do okolních místností, v blízkosti senzoru v čase 4:20 byla opravena. Video končí cestou na původní pozici v levém horním rohu místnosti **Bedroom1** a záběrem na monitor, na kterém běžela nahrávaná klientská aplikace.

¹Odkaz na video - <https://youtu.be/gTYduHkbCDo>.