

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Jakub Studený



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

ROZŠÍŘENÍ FUNKCIONALITY LOKÁTORU PRO POZIČNÍ SYSTÉM REÁLNÉHO ČASU

NEW FEATURES FOR REAL-TIME POSITIONING SYSTEM LOCATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Studený

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jana Kolářová, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Biomedicínské a ekologické inženýrství**

Ústav biomedicínského inženýrství

Student: Bc. Jakub Studený

ID: 130503

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Rozšíření funkcionality lokátoru pro poziční systém reálného času

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte a popište problematiku detekce pádů a nárazů na základě zpracování dat z inerciálních senzorů. 2) Proveďte akvizici dat z lokátoru a navrhnete koncepci řešení umožňující detekci pádů a nárazů s důrazem na minimální spotřebu lokátoru. 3) Implementujte navržené řešení do firmwaru lokátoru a prozkoumejte konkrétní možnosti dané platformy pro další snížení spotřeby. 4) Prostudujte a popište problematiku měření vzdálenosti pomocí laseru. 5) Navrhnete hardwarové i programové řešení, pro měření, vhodné pro integraci do lokátoru Sewio platformy. 6) Proveďte akvizici dat a vyhodnoťte přesnost měření vzdálenosti a dopad na celkovou energetickou náročnost lokátoru. 7) Proveďte diskusi získaných výsledků a zhodnoťte účinnost přidáných funkcionalit a využitelnost navrženého řešení. projekt je řešen ve spolupráci s firmou SEWIO NETWORKS.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KURIAN, Thomas, K.N. BHAT a Amitava BOSE. Fundamentals of Navigation and Inertial Sensors. PHI Learning, 2014. ISBN 978-8120348592.

[2] MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky ... Praha: BEN - technická literatura, 2003. µC & praxe. ISBN 80-7300-077-6.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 17.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jana Kolářová, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou detekce pádů a nárazů, na základě dat získaných z inerciálních senzorů, a měřením vzdálenosti pomocí laseru. Cílem diplomové práce je rozšíření funkcionality lokátorů od společnosti Sewio. Práce popisuje postup při návrhu algoritmů umožňujících detekovat pády a nárazy, uvádí data získaná z lokátoru, podle nichž předkládá možnost řešení, které je v rámci práce implementováno do lokátoru a následně je testována jeho výsledná funkčnost. Dále je v práci uveden postup při vývoji hardwarového i programového řešení, pro měření vzdálenosti laserem pomocí lokátoru, spolu s prezentací dosažených výsledků měření realizovaných lokátorem po implementaci navrhovaného řešení. Text práce také klade důraz na minimalizaci energetické spotřeby jednotlivých řešení. V závěru práce je uvedena diskuse dosažených výsledků s hodnocením účinnosti a využitelnosti navrhovaných řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

akcelerometr, gyroskop, barometr, lidar, detekce pádů, detekce nárazů, měření vzdálenosti laserem

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the detection of falls and impacts, based on data obtained from inertial sensors, and by measuring the distance using a laser. The aim of this thesis is to extend the functionality of locators from Sewio. The thesis describes the procedure for designing algorithms for detection of falls and impacts. Then there is a procedure for development of hardware and software solution, for laser distance measurement by locator, together with presentation of achieved measurement results realized by locator after implementation of proposed solution. The work also emphasizes the minimization of energy consumption of individual solutions. In conclusion, there is a discussion of achieved results with evaluation of efficiency and usability of proposed solutions.

KEYWORDS

accelerometer, gyroscope, barometer, fall detection, impact detection, laser distance measurement

STUDENÝ, Jakub. *Rozšíření funkcionality lokátoru pro poziční systém reálného času*. Brno, 2019, 79 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce: doc. Ing. Jana Kolářová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Rozšíření funkcionality lokátoru pro poziční systém reálného času“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval paní doc. Ing. Janě Kolářové, Ph.D. za konzultace, trpělivost a podnětné návrhy, a panu Ing. Lubomíru Mrázovi za možnost spolupráce s firmou Sewio a praktické téma diplomové práce.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	12
1 Detekce pádů a nárazů na základě zpracování dat z inerciálních senzorů	13
1.1 Inerciální senzory	13
1.1.1 MEMS gyroskopy	13
1.1.2 MEMS akcelerometry	14
1.2 Detekce pádů	15
1.3 Detekce nárazů	18
2 Technologie SEWIO	19
2.1 Technický popis lokátoru Tag IMU v4r7	20
2.2 Integrovaný obvod MPU9250	20
2.2.1 Akcelerometr	20
2.2.2 Gyroskop	21
2.3 Integrovaný obvod DPS310	22
2.3.1 Barometr	22
2.3.2 Teploměr	22
2.4 Akumulátor	22
3 Akvizice dat z lokátoru	23
3.1 Akvizice dat s pády	24
3.2 Akvizice dat s nárazy	30
4 Koncepce algoritmů pro detekci pádů a nárazů	37
4.1 Návrh algoritmu umožňující detekci pádů	37
4.2 Návrh algoritmu umožňující detekci nárazů	39
5 Kalkulace spotřeby navrhovaného algoritmu	41
6 Implementace řešení do firmwaru lokátoru	43
6.1 Další možnosti snížení spotřeby	43
7 Měření vzdálenosti pomocí laseru	45
7.1 Princip měření vzdálenosti laserem	45
7.2 Možnosti nastavení senzoru VL53L1X pro měření vzdálenosti	46
8 Návrh hardwarového řešení vhodného pro integraci do lokátoru platformy Sewio	47

9	Návrh softwarového řešení vhodného pro integraci do lokátoru platformy Sewio	49
9.1	Konsolové uživatelské rozhraní	52
9.2	Aplikace Monitor	54
10	Akvizice dat s vyhodnocením přesnosti měření vzdálenosti a pojednáním o jeho celkové energetické náročnosti	57
10.1	Měření vzdálenosti bez překážek s monotematickým FoV	58
10.2	Měření vzdálenosti 3 m s různorodou scénérií a překážkami	60
10.3	Vývoj přesnosti měření v závislosti na délce akvizice	64
10.4	Časový vývoj přesnosti měření	65
10.5	Dopad měření vzdálenosti na celkovou energetickou náročnost lokátoru	66
11	Diskuze získaných výsledků a zhodnoťte účinnost přidaných funkcionalit a využitelnost navrženého řešení.	67
11.1	Dosažené výsledky z detekce pádů po implementaci	67
11.2	Dosažené výsledky dat z detekce nárazů po implementaci	68
11.3	Dosažené výsledky dat s implementovaným laserovým měřičem vzdálenosti	68
11.4	Zhodnocení účinnosti přidaných funkcionalit a využitelnost navrženého řešení	69
12	Závěr	70
	Literatura	71
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	74
	Seznam příloh	75
A	Použitý script pro první akvizici dat	76
B	Obsah příloženého CD	79

Seznam obrázků

1.1	Osy otáčení gyroskopu	13
1.2	Popis MEMS gyroskopu	14
1.3	Vývojový diagram pro detekci pádů z článku [2]	16
1.4	Vývojový diagram pro detekci pádů z článku [3]	17
2.1	Konfigurace	19
2.2	Orientace os akcelerometru	21
2.3	Orientace os gyroskopu	21
3.1	RTLS studio	23
3.2	Akvizice dat při ADL a pádech; instalace s popisem	25
3.3	Orientace os akcelerometru a gyroskopu, při měření osob	25
3.4	Záznam dat z akcelerometru lokátoru při polohách stoj, sed a leh	26
3.5	Záznam dat z akcelerometru lokátoru při skocích	26
3.6	Záznam dat z akcelerometru lokátoru při chůzi a běhu	27
3.7	Záznam dat z akcelerometru lokátoru při chůzi, pádu a lehu	27
3.8	Záznam dat z gyroskopu lokátoru uvedený při stejné situaci jako na Obr.3.7	28
3.9	Záznam dat z barometru lokátoru uvedený v m a při stejné situaci jako na Obr. 3.7; data z barometru jsou přepočítány pomocí vztahu 4.1 uvedeného v 4.1	28
3.10	Záznam dat z barometru lokátoru uvedený v Pa a při stejné situaci jako na Obr. 3.7; data z barometru bez uprav v jednotkách Pa	29
3.11	Záznam dat z akcelerometru lokátoru při stejné situaci jako na Obr. 3.7, vyjádřené pomocí AM	29
3.12	Záznam dat z akcelerometru lokátoru při stejné situaci jako na Obr. 3.7, vyjádřené pomocí ACM	30
3.13	Akvizice dat při nárazu upravený model	31
3.14	Akvizice dat při nárazu instalace	31
3.15	Záznam dat z akcelerometru při čelním nárazu z 250 cm	32
3.16	Záznam dat při čelním nárazu z 250 cm vyjádřené pomocí AM	32
3.17	Záznam dat při čelním nárazu z 250 cm vyjádřené pomocí ACM	33
3.18	Záznam dat při čelním nárazu z 250 cm vyjádřené pomocí diferencí v ose x akcelerometru	33
3.19	Akvizice dat při nárazu instalace	34
3.20	Akvizice dat při nárazu; difference v ose x při ze záznamu s více nárazy	34
3.21	Čelní náraz; detail difference v ose x	35
3.22	Náraz při couvání; detail difference v ose x	35
3.23	Náraz při couvání; detail difference v ose x	36

4.1	Vývojový diagram pro detekci pádů	38
4.2	Vývojový diagram pro detekci nárazů	40
5.1	Tabulka elektrických vlastností integrovaného obvodu MPU9250 . . .	41
7.1	Princip měření vzdálenosti laserem	45
8.1	Schéma zapojení lokátoru se senzorem VL53L1X	47
8.2	Navržená krabička lokátoru s implementovaným řešením pro měření vzdálenosti	48
9.1	Schema	49
9.2	Vývojový diagram vytvořené funkce <code>measure_Lidar()</code>	51
9.3	Konsolové rozhraní s rozšířenou nabídkou pro nastavení a výběr při- daných funkcionalit	53
9.4	Tvar přijatého packetu z RTLS studia	54
9.5	Vzhled aplikace Monitor	55
9.6	Přehled piktogramů jednotlivých funkcí: šedá = neaktivní stav, zelená = aktivní stav, červená = detekce	55
9.7	Přehled piktogramů pro signalizaci odpojeného a připojeného loká- toru, tlačítka pro zahájení a ukončení vlastního nahrávání a pikto- gramy signalizující stav baterie lokátoru: šedá = neznámý, zelená=nabitá, červená=blížící se vybití	56
10.1	Instalace při měření vzdálenosti 2m pomocí Tagu IMU v4r7 s imple- mentovaným laserovým senzorem VL53L1X	58
10.2	Histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=2$ m (vpravo) a $l=4$ m (vlevo); délka akvizice 1000 vzorků	59
10.3	Histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=4,39$ m; délka akvizice 1000 vzorků	59
10.4	Scénérie měření vzdálenosti, FoV s dopravní značkou (vlevo); histo- gram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků	60
10.5	Scénérie měření vzdálenosti, FoV s hasícím přístrojem a trubkou (vlevo); histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků	61
10.6	Scénérie měření vzdálenosti, FoV se sloupem (vlevo); histogram na- měřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků	61
10.7	Scénérie měření vzdálenosti, FoV s překážkou (vlevo); histogram na- měřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků	62
10.8	Situační plán instalace při měření vzdálenosti s překážkou v FoV sen- zonru před a po posunu lokátoru	63

10.9	Histogramy naměřených hodnot při měření vzdálenosti l s překážkou, $l=3$ m; překážka ovlivňuje měřenou hodnotu (vlevo); překážka neovlivňuje měřenou hodnotu (vpravo); délka akvizice 55 vzorků . . .	63
10.10	Histogramy naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=4$ m; délka akvizice 1000 vzorků (vlevo); délka akvizice 3439 vzorků (vpravo) . .	64
10.11	Histogramy naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=4$ m; délka akvizice 1000 vzorků (vlevo); délka akvizice 3705 vzorků (vpravo) . .	64
10.12	Srovnání histogramu s diskretizovaným časovým průběhem měření; s monotóním FoV ve vzdálenosti $l=4$ m; délka akvizice 3439 vzorků . .	65
A.1	Záznam průběhu pádu	78

Seznam tabulek

9.1	Tvar uživatelské zprávy	54
-----	-----------------------------------	----

Úvod

Cílem diplomové práce je rozšíření funkcionality lokátorů od společnosti Sewio.

Diplomová práce se, v rámci dosažení výše zmíněného cíle, zabývá problematikou spojenou s detekcí pádů a nárazů, na základě dat získaných z inerciálních senzorů, a měřením vzdálenosti pomocí laseru. V práci je popsán postup při návrhu algoritmů umožňujícího detekovat pády a nárazy.

V kapitole 12 je popsána instalace systému, při které byla akvizici dat pořízena, spolu s uvedenou konfigurací Tagu IMU v4r7 a výslednými daty prezentovanými v ve formě grafických příloh.

Na základě zjištěných informací z akvizice je v kapitole 4 proveden návrh algoritmu pro detekci pádů a nárazů vycházející z teoretických poznatků uvedených v kapitole 1. V rámci práce je kladen důraz také na energetickou spotřebu řešení a proto je v kapitole 5 vyčíslena předpokládaná teoretická spotřeba využitých periférií lokátoru navrhovaným algoritmem, při jehož návrhu byla snaha o minimalizaci spotřeby.

Další část práce je věnována implementaci navrhnutého řešení do lokátoru a následně je testována jeho výsledná funkčnost. V práci je také uveden postup při vývoji hardwarového i programového řešení, pro měření vzdálenosti laserem pomocí lokátoru, spolu s prezentací dosažených výsledků měření realizovaných lokátorem po implementaci navrhovaného řešení.

Celý text práce opakovaně klade důraz na minimalizaci energetické spotřeby jednotlivých řešení. V závěru práce je uvedena diskuse dosažených výsledků s hodnocením účinnosti a využitelnosti navrhovaných řešení.

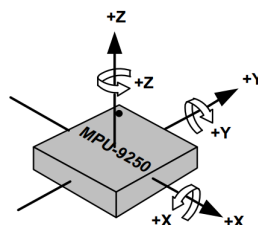
1 Detekce pádů a nárazů na základě zpracování dat z inerciálních senzorů

1.1 Inerciální senzory

Pro měření pohybu využíváme inerciálních senzorů mezi něž patří gyroskop a akcelerometr. Na trhu je dostupné mnoho realizací těchto senzorů a liší se velikostí i způsobem měření fyzikální veličiny například mechanické či optické se světlovodným vláknem. Další rozdělení je pak na základě převodního systému pro získání informace v podobě elektrického signálu. V dnešní době je nejpopulárnější realizací těchto pohybových senzorů pomocí MEMS¹ technologie, s jejímž využitím se dá dosáhnout velmi malých rozměrů jednotlivých senzorů což usnadňuje jejich integraci do integrovaných obvodů. Skupina inerciálních senzorů se pak obvykle nazývá IMU². Lokátor od společnosti SEWIO využívá k měření pohybových aktivit integrovaný obvod MPU-9250, jenž je MEMS technologií vyroben.

1.1.1 MEMS gyroskopy

Inerciální senzor gyroskopu slouží k měření úhlové rychlosti ve stupních za sekundu ($^{\circ}/s$). Výstupem z gyroskopu je údaj o rychlosti otáčení objektu ke kterému je gyroskop připevněn. Na Obr. 1.1 jsou znázorněny osy rotací ve kterých je integrovaný obvod MPU9250 schopen měřit úhlovou rychlost.



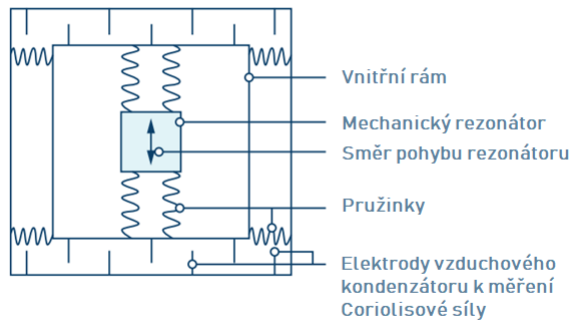
Obr. 1.1: Osy otáčení gyroskopu integrovaného obvodu MPU9250, převzato z [5]

Integrované gyroskopy jsou založené na MEMS obvodech a využívají principu Coriolisovy síly. Základem MEMS gyroskopu je mechanický rezonátor o známé hmotnosti připevněný k rámu pomocí pružin viz Obr. 1.2. Pokud je směr pohybu rezonátoru kolmý ke směru otáčení začne na mechanický rezonátor o známé hmotnosti působit Coriolisova síla jejíž velikost je úměrná úhlové rychlosti otáčení. Pro získání

¹MEMS - Micro Electro Mechanical-Systems technologie [6]

²IMU - Inertial Measurement Unit [17]

velikosti Coriolisovi síly je kolem již zmíněného rámu s mechanickým rezonátorem další rám. Oba rámy jsou spojeny pomocí pružinek. Při vzniku Coriolisovi síly dojde k vychýlení vnitřního rámu v směru kolmém k směru pohybu rezonátoru který tuto sílu vyvolal. V tomto směru jsou v prostoru mezi rámy na rámech umístěny elektrody vzduchových kondenzátorů, které přeměňují informaci o úhlové rychlosti otáčení na změnu kapacity [15].



Obr. 1.2: Ilustrační popis MEMS struktury gyroskopu, převzato a upraveno z [15]

1.1.2 MEMS akcelerometry

MEMS akcelerometr se skládá obdobně jako gyroskop ze dvou pohyblivých rámu. Akcelerometr narozdíl od gyroskopu nevyužívá mechanického rezonátoru, jehož úkolem je vyvolávání periodického pohybu k projevu Coriolisových sil. Výstupem akcelerometru je také změna kapacity ta je ale v tomto případě úměrná hodnotě vychýlení vnitřního rámu vlivem působení zrychlení objektu ke kterému je akcelerometr připevněn[15].

1.2 Detekce pádů

Detekování pádů má široké uplatnění od zajištění bezpečnosti lidí na pracovišti, v nemocnicích či domácnostech nebo při monitorování přeprav břemen například ve skladech, kdy informace o pádu v minulosti může pomoci při návrhu bezpečnější přepravy případně odhalit příčinu poškození obsahu břemene. Zemská přitažlivost zajišťuje širokou škálu příležitostí při kterých by se dala provádět detekce pádů. Text této práce se zaměřuje na detekci pádů pohybově aktivních lidí.

Pro detekování pádů se v dnešní době využívá inerciálních senzorů akcelerometru, gyroskopu. Jako doplňující senzory k dosažení přesnějších výsledků se aplikují magnetometry a barometry. Pro úplnost výčtu senzorů stojí za zmínku fakt, že s rychlým vývojem v oblasti zpracování obrazu se k detekci pádů začíná využívat i kamerových systémů. Poslední zmíněný způsob detekování pádů se, ale neslučuje se zadáním a proto zde nebude více rozebrán.

Po konzultaci s vedením firmy Sewio, která už v minulosti řešila zpracování dat z inerciálních senzorů pro jiné pohybové aktivity byl výběr postupů pro zpracování dat zúžen o metody, které aplikují neuronové sítě. Důvodem byla neadekvátní kvalita dosažených výsledků ve srovnání s náročností jejich vývoje.

Při hledání v vhodného postupu pro zpracování dat z inerciálních senzorů se v publikovaných vědeckých článcích často vyskytoval vztah 1.1, který byl základním prvkem pro stanovení prahové hodnoty stanovující hranici, zda-li se jedná o pád či nikoliv. Na základě tohoto zjištění byly selektivně vybrány dva články jejichž kombinace se jeví jako nejvhodnější přístup k řešení zadaného problému s dostupným hardwarovým vybavením.

V prvním velice aktuálním článku viz [2] z roku 2018 je postup následovný. Nejprve je provedena akvizice dat pomocí příslušného hardwaru (v tomto článku je pro akvizici dat využito pouze 3 osého akcelerometru (a_x, a_y, a_z) a gyroskopu ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$)) a následně jsou ze zaznamenaných hodnot vypočítány hodnoty vektorů \mathbf{AM}^3 , \mathbf{ACM}^4 a \mathbf{AVCM}^5 dle vztahů 1.1, 1.2, 1.3, pro které jsou známé prahové hodnoty.

$$AM(i) = \sqrt{a_x(i)^2 + a_y(i)^2 + a_z(i)^2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (1.1)$$

$$ACM(i) = \sqrt[3]{|a_x(i) \cdot a_y(i) \cdot a_z(i)|} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (1.2)$$

$$AVCM(i) = \sqrt[3]{|\omega_x(i) \cdot \omega_y(i) \cdot \omega_z(i)|} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.3)$$

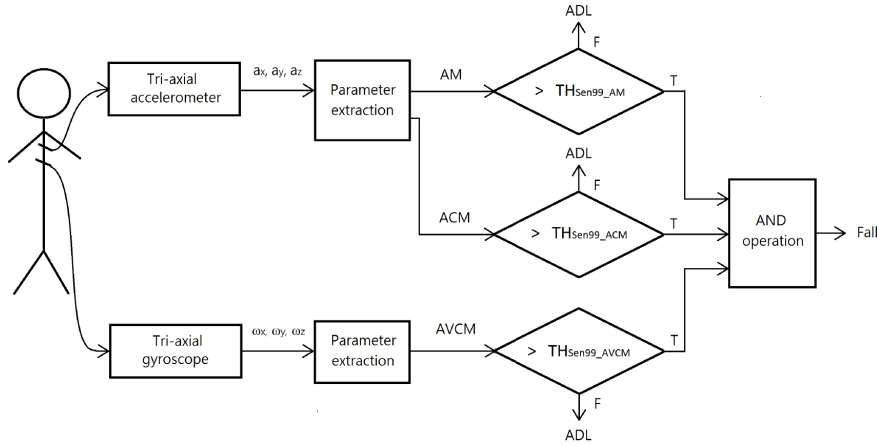
³ \mathbf{AM} - acceleration magnitude

⁴ \mathbf{ACM} - acceleration cubic-product-root magnitude

⁵ \mathbf{AVCM} - angular velocity cubic-product-root magnitude

Průběh akvizice pro získání vstupních dat je známý. Figuranti prováděli sekvenci známých pohybů, které jsou v článku označovány jako ADL⁶, které postačují k popisu běžně konaných lidských pohybů. V článku jsou kromě datasetu pořízeného autory využity i jiné volně dostupné datasety. Na základě těchto datasetu byl stanoven práh, v článku označovaný jako TH_{sens99} ⁷ pro jednotlivé vektory **AM**, **ACM** a **AVCM**.

Výsledný algoritmus při známé hodnotě TH_{sens99} uvedený v článku [2] je možné vidět na Obr. 1.3. Ze senzorů jsou získána data a vypočteny hodnoty parametrů AM, ACM a AVCM (nyní jsou parametry skalární veličiny, byly totiž vypočítány z hodnot v jednom časovém okamžiku). Následně jsou parametry porovnány s hodnotami TH_{sens99} a v případě že podmínku splní všechny parametry současně je výsledkem detekovaný pád. Z algoritmu je patrné, že může být realizován v reálném čase.



Obr. 1.3: Vývojový diagram algoritmu pro detekci pádů uvedeného v článku [2]

Druhý článek [3] z roku 2012 provádí detekci pádu na základě údajů získaných z akcelerometru a barometru. Princip této metody je založen na zjišťování změny tlaku a velikosti již zmíněné hodnoty $AM(i)$, která je v článku [3] uváděna jako $TSA_{(i)}$ ⁸.

Ze známé hodnoty tlaku (změřené barometrem) je možné vypočítat hodnotu absolutní výšky h například v úrovni 10cm nad zemí. Pomocí vztahu 1.4 [3] je pak v článku určena maximální změna výšky Δh za stanovenou dobu T .

$$\Delta h = h - \text{Min}(h_{i-T} - h_{i-1}) \quad [\text{m}] \quad (1.4)$$

⁶ADL - Activities of Daily Life [2], mezi tyto aktivity patří například sed, leh, skok a další

⁷ TH_{sens99} - je hodnota prahu při sensitivitě 99 % a nejlepší dosažitelné specifitě [2]

⁸ $TSA_{(i)}$ - total sum acceleration [3]

1.3 Detekce nárazů

Detekce nárazů je v dnešní době velmi využívána v automobilovém průmyslu a robotice. V prvním případě se skutečně detekuje kolize automobilu v robotice se kromě srážky vyhodnocuje tímto způsobem i dotek například robotické ruky s tlačítkem. Následující text vychází z poznatků vědeckého článku [4] a je zaměřen na detekci nárazů způsobený vozidly.

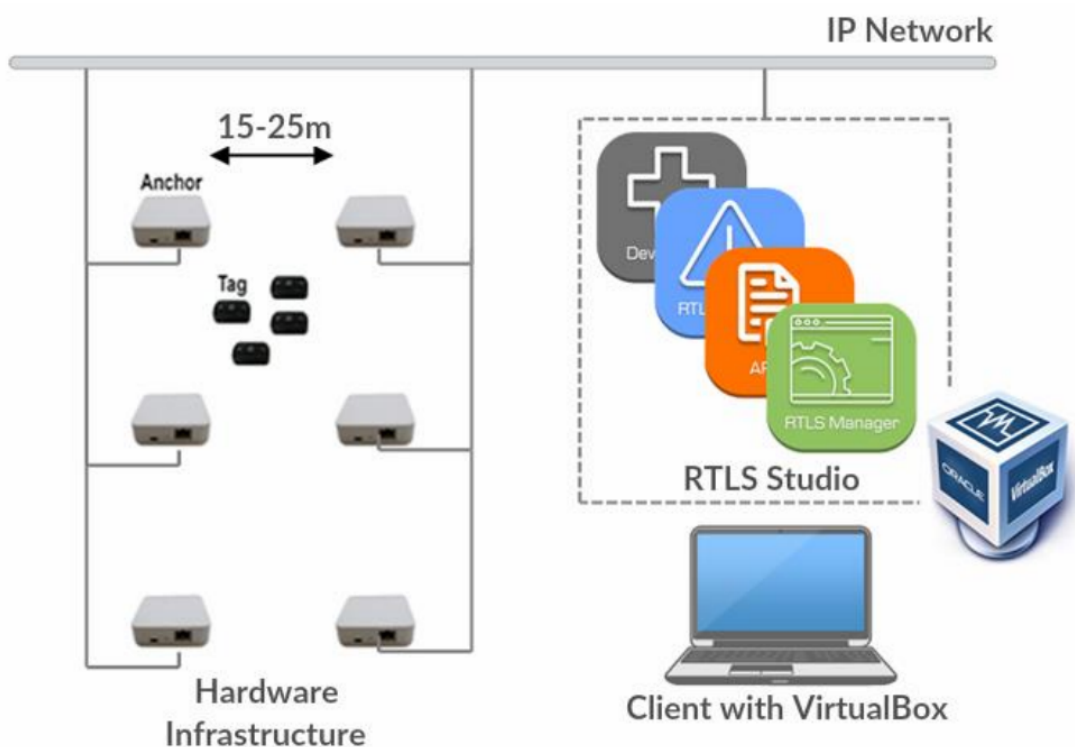
Hlavní myšlenka spočívá v dramatickém poklesu rychlosti bourajícího vozidla. Razantní změnu rychlosti je možné zaznamenat pomocí akcelerometru. Směr zrychlení, resp. zpomalení, automobilu je závislý na směru, ve kterém ke kolizi došlo. V tomto případě stačí i dvou osý akcelerometr měřící zrychlení v osách x a Y . Jak už bylo zmíněno náraz se vyznačuje opravdu prudkou změnou rychlosti. Na základě této úvahy se dají vyhodnotit data z akcelerometru, zjišťováním velikosti difference dvou po sobě jdoucích kroků v ose x či y . V případě, že tato difference překročí stanovený práh, je následně situace hodnocena jako náraz. Práh uváděný pro automobilové srážky je difference o velikosti $2000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ [4]. V tomto zdrojovém článku je k finálnímu vyhodnocení kolize využit i poziční systém GPS ¹¹, pomocí něhož je zkontrolován údaj o nečekané změně směru pohybu vozidla.

¹¹GPS Global Positioning System

2 Technologie SEWIO

Technologie Sewio, od společnosti Sewio Networks, s.r.o., nabízí jednoduché, funkční a hlavně stabilní řešení v oblasti monitorování pohybu osob, zvířat či věcí uvnitř různých objektů. Systém se skládá z několika částí viz Obr. 2.1. Celý monitorovaný prostor je pokryt sítí ze stacionárních bodů tzv. kotev (Anchor) ty jsou od sebe vzdáleny v závislosti na náročnosti sledovaného prostoru. Všechny kotvy jsou připojeny do jedné síťové struktury a mají svou vlastní IP adresu a MAC adresu. Ve stejné síťové struktuře je připojen i server na kterém je nainstalované RTLS¹ Studio, což je softwarový nástroj sloužící ke správě celého systému. Poslední důležitou součástí jsou samotné lokátory (Tag), což jsou bezdrátové jednotky systému sloužící k označení pozice ve sledovaném prostoru.

Poziční systém reálného času Sewio, využívá ke komunikaci mezi pohyblivým lokátorem a stacionárními body technologii ultra-širokopásmového připojení (UWB²).



Obr. 2.1: Struktura systému Sewio, převzato z [13]

¹RTLS z anglického real-time location system

²UWB, z anglického Ultra-wideband, je bezdrátová technologie využívající velmi úzkých impulzů (řádově nanosekundy). Tyto impulzy pokrývají velmi širokou šířku pásma ve frekvenční oblasti. Důvodem využívání bezdrátové technologie UWB je problém konečného rádiového spektra a exponenciálně rostoucího využívání bezdrátových komunikací.[1]

2.1 Technický popis lokátoru Tag IMU v4r7

Lokátor Tag IMU v4r7 je na pohled malá černá krabička o rozměrech 70x50x21 mm s výrazným červeným tlačítkem, sloužícím k ovládní, mini USB portem, skrytou indikační LED a miniaturním vypínacím přepínačem. Celé zařízení váží pouhých 25 g a je koncipováno tak, aby svými rozměry a váhou co nejméně ovlivňovalo monitorovanou osobu, zvíře či věc. Lokátor obsahuje modul Decawave DWM1000 (pro zprostředkování UWB komunikace), ARMový mikrokontrolér EFM32, integrované obvody MPU9250, DPS310 a baterii.

2.2 Integrovaný obvod MPU9250

Integrovaný obvod MPU9250 je tedy více-čipový modul vyrobený technologií MEMS. Obsahuje 3 osy akcelerometr, 3 osy gyroskop a 3 osy magnetometr to vše v jednom QFN pouzdře o rozměrech 3x3x1 mm. Data z jednotlivých senzorů jsou digitalizovány pomocí 16-bitový ADC převodníků. Vstupní napájecí napětí tohoto obvodu je 2,4 - 3,6 V. Ke komunikaci s mikrokontrolérem lokátoru je využita I²C sběrnice³. Obvod MPU9250 je robustní a vydrží i šoky 10 000 g[5].

2.2.1 Akcelerometr

Akcelerometr je inerciální senzor pro měření velikosti zrychlení. Základní jednotkou pro zrychlení je $m \cdot s^{-2}$. Pro získání dat ve standardizovaném tvaru je nutné provést přepočet pomocí vztahu 2.1 [9], kde a je hodnota zrychlení v jednotkách $m \cdot s^{-2}$, a_{raw} hodnota zrychlení získaná z akcelerometru MPU9250, g_{dyn} dynamický rozsah akcelerometru v jednotkách g a g je tíhové zrychlení $g = 9,80665 m \cdot s^{-2}$ [17].

$$a = \frac{a_{\text{raw}} \cdot g_{\text{dyn}} \cdot g}{2^{15}} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (2.1)$$

Na Obr.2.2 je zobrazen lokátor (starší verze Tag IMU, bez funkčního červeného tlačítka) s orientací jednotlivých os akcelerometru. Popis os souhlasí s popisem dat získaných z lokátoru. U akcelerometru se dá nastavovat rozsah v plném měřítku $\pm 2 g$, $\pm 4 g$, $\pm 8 g$ a $\pm 16 g$.

³I²C - Internal-Integrated-Circuit Bus



Obr. 2.2: Tag IMU, Orientace os akcelerometru, převzato z [9]

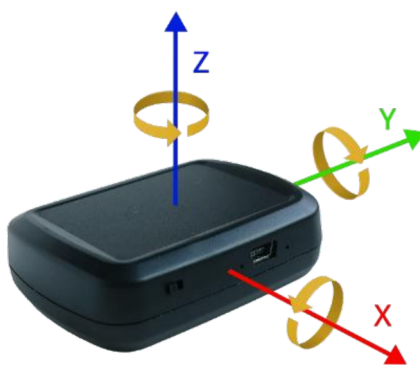
2.2.2 Gyroskop

Gyroskop je inerciální senzor pro měření rychlosti otáčení. Jednotkou úhlové rychlosti je $^{\circ}/s$, často se také uvádí jako *dps* (degree per second) případně se dá úhlová rychlost vyjádřit i v radiánech za sekundu. Pro tuto konverzi je pak využít vztah 2.2 [9], kde ω je výsledná úhlová rychlost v $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, ω_{raw} hodnota úhlové rychlosti získané z gyroskopu MPU9250 a ω_{dyn} je dynamický rozsah gyroskopu v $^{\circ}/s$.

$$\omega = \frac{\omega_{\text{raw}} \cdot \omega_{\text{dyn}}}{2^{15}} \cdot \frac{\pi}{180} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.2)$$

U gyroskopu se dá nastavovat rozsah v plném měřítku: $\pm 250 \text{ deg/s}$, $\pm 500 \text{ deg/s}$, $\pm 1000 \text{ deg/s}$ a $\pm 2000 \text{ deg/s}$.

Na Obr. 2.2.2 jsou zobrazeny osy kolem kterých je gyroskopem měřená úhlová rychlost při rotaci. Jejich popis je v souladu s popisem dat posílaných ze senzoru. V terminologii spojené s užíváním gyroskopů se často uvádí pojmy roll, pitch a yaw odpovídající úhlovým rychlostem při rotaci kolem osy x , y a z .



Obr. 2.3: Tag IMU, Orientace os otáčení pro gyroskop, převzato z [9]

2.3 Integrovaný obvod DPS310

Integrovaný obvod DPS310 je miniaturizovaný digitální barometr s vysokou přesností měření a nízkou spotřebou. DPS310 umožňuje měřit tlak a teplotu. Stejně jako MPU9250 i DPS310 komunikuje s okolními perifériemi pomocí I²C sběrnici.

2.3.1 Barometr

Slouží k měření atmosferického tlaku a přepočtem je možné ze změřeného tlaku určit nadmořskou výšku. Pracovní rozsah barometru DPS310 je v rozmezí 300-1200 hPa. Při přepnutí senzoru do módu s vysokou přesností je možné dosáhnout přesnosti měření $\pm 0,06$ hPa což odpovídá $\pm 0,05$ m. Napájecí napětí obvodu je v rozsahu 1,7-3,6 V.

2.3.2 Teploměr

Jelikož je tlak proměnlivý v závislosti na teplotě je součástí integrovaného obvodu DPS310 i teploměr pomocí něhož je provedena teplotní kompenzace měřených dat. Pracovní rozsah teploměru je -40 - 85 °C. Přesnost teploměru je pak $\pm 0,5$ °C.

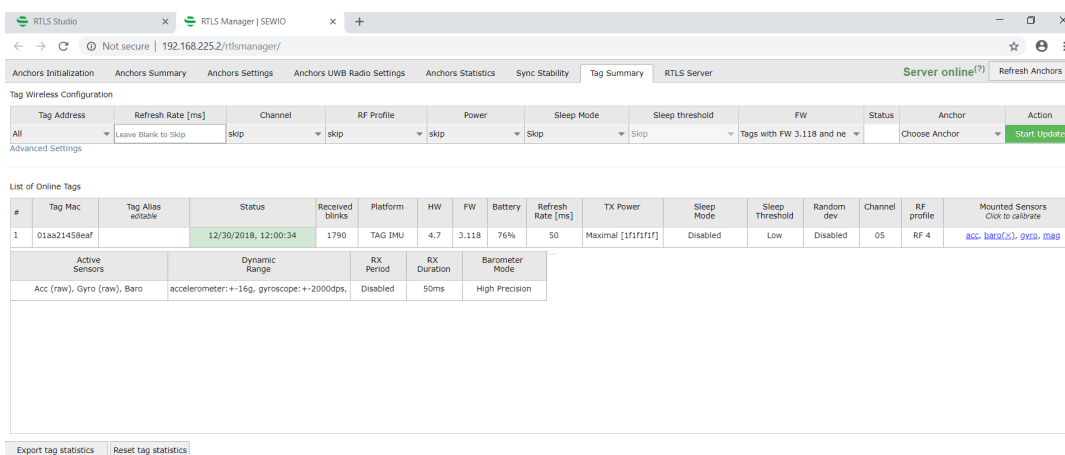
2.4 Akumulátor

Součástí zařízení Tag IMU v4r7 je polštářkový Li-pol akumulátor s nominální hodnotou napětí 3,7 V a kapacitou 560 mAh. Celková výdrž zařízení závisí na jeho nastavení resp. na nastavené délce obnovovací doby.

3 Akvizice dat z lokátoru

Před provedením samotné akvizice dat je nutné nejprve realizovat instalaci systému Sewio. Pro získání dat ze senzorů lokátoru Tag IMU v4r7 nemusí být provedena standardní instalace celého systému. Pro komunikaci s lokátorem stačí mít pouze jednu kotvu. Při této konfiguraci, ale není možná lokalizace lokátoru v místnosti. K obsluze je nutná instalace softwarového nástroje RTLS studio. Ta spočívá v nainstalování univerzálního virtualizátoru VirtualBox, načtení připraveného obrazu RTLS studia do VirtualBoxu provedení síťové konfigurace podrobný postup instalaci je v případě zájmu uveden ve zdrojové literatuře [13].

Po úspěšné instalaci je nutné se do systému přihlásit a provést různá inicializační nastavení, a kalibrace jednotlivých senzorů. Na Obr. 3.1 je zobrazen vzhled portálu pro změnu nastavení lokátoru či zjištění stávajícího nastavení aktuálně připojeného lokátoru.



Obr. 3.1: RTLS studio; nastavení lokátoru

Pro níže uvedené akvizice bylo nastavení jednotlivých senzorů stejné. Pro akcelerometr byl využit dynamický rozsah ± 16 g, pro gyroskop byl dynamický rozsah ± 2000 dps. Barometr byl v módu s velkou přesností. Nejvyšší možná vzorkovací frekvence byla 20 Hz.

Pro akvizici dat bylo nutné napsat skript (uvedený v příloze A) v programovacím jazyku Python v3.7, který na známé IP adrese a portu (tyto údaje se nastavují na straně serveru RTLS studia) prostřednictvím UDP¹ načítá z lokátoru surová data v podobě pakety ve formátu JSON². Parsováním jsou z paketů vybrána zajímavá

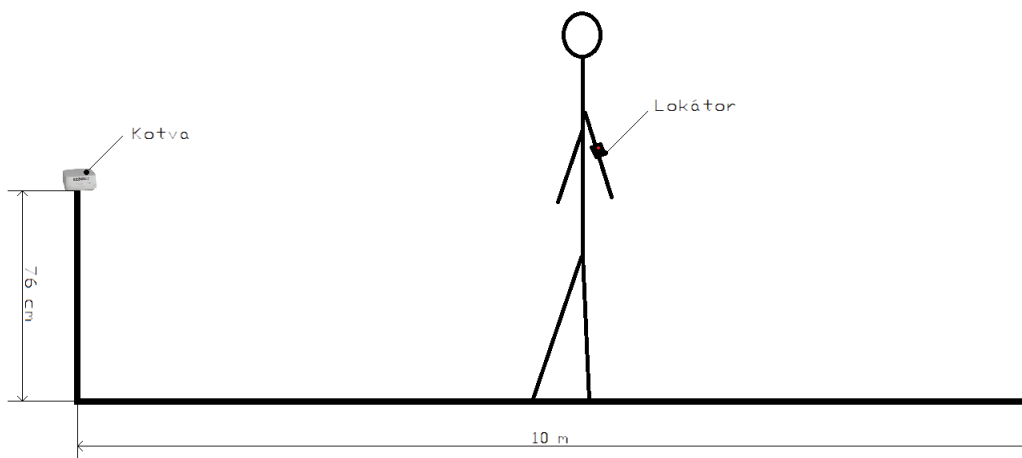
¹UDP - User Datagram Protocol

²JSON - JavaScript Object Notation[19]

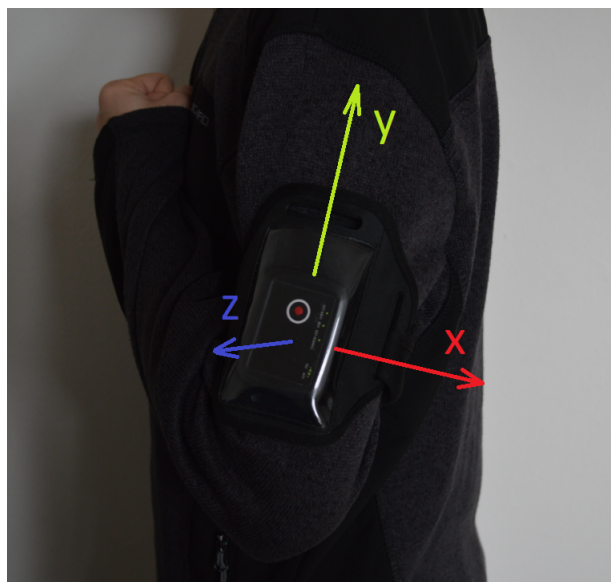
data, která jsou následně ukládána do datového souboru. Výstupem skriptu je tedy datový soubor s tabulkou změřených hodnot senzory z lokátoru.

3.1 Akvizice dat s pády

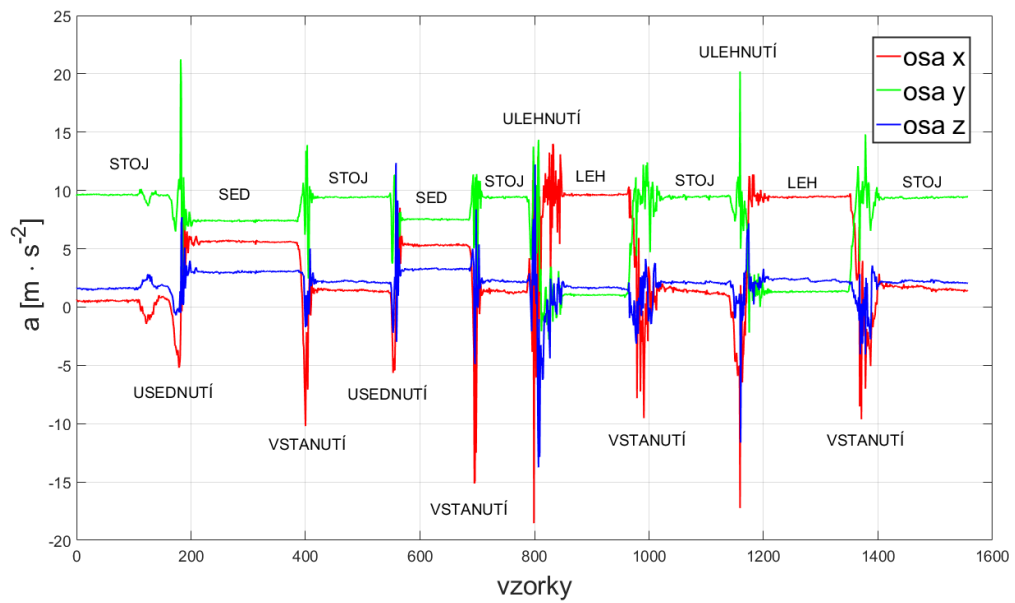
Uvedená data v této sekci jsou pořízena pomocí lokátoru Tag IMU v4r7 připevněného k rameni měřeného figuranta viz Obr.3.3. Vzorkovací frekvence akvizice se pohybovala okolo 20 Hz. Z důvodů omezení nastavení v RTLS studiu nebylo možné tuto frekvenci zvýšit a ani ji zaručit. Důvodem nestability vzorkovací frekvence byl nepravidelný příjem vedlejších informací o lokátoru (například stav baterky). Z tohoto důvodu je pro větší přesnost osa x presentována v diskretizovaném čase pomocí vzorků, kde jeden vzorek odpovídá cca 50 ms. Níže presentovaná data jsou pořízena na 182 cm vysokém, 100kg vážícím muži. Tento figurant měl za úkol na 10 m dlouhé chodbě s přímou viditelností lokátor-kotva (viz uvedená konfigurace instalace na Obr. 3.2) realizovat vybrané aktivity denního života resp. již zmíněné ADL. Na Obr.3.4 je možné pozorovat vývoj zrychlení v jednotlivých osách akcelerometru při polohách stoj, sed, leh a při změnách těchto poloh. Obdobně Obr. 3.5 dokumentuje stejným způsobem skoky a Obr. 3.6. Při pozornějším pohledu je vidět, že při žádném z těchto pohybů není překonána hranice zrychlení $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (v žádné z os). Posledním z dokumentové sekvence pohybů je simulace pádu 3.7, která spočívala v chůzi při níž došlo k pádu a následně otřesený člověk ležel na zemi dokud se nezvedl a nevrátil se k chůzi. Na záznamu s pády je při pozornějším pohledu vidět překročení hranice zrychlení $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a to v případě obou pádů. Pro případné srovnání dat z akcelerometru s daty z gyroskopu je uveden Obr. 3.8, na kterém je také možné pozorovat pád. Kromě inerciálních senzorů akcelerometru a gyroskopu je možné pád pozorovat i v datech pořízených pomocí barometru. Obr. 3.9 a Obr. 3.9 jsou data pořízená při simulaci pádu zobrazené na 3.7. V prvním případě jsou data ze záznamu barometru přepočítána (pomocí vztahu 4.1) na absolutní výšku v m. V druhém případě, Obr. 3.10, jsou presentována neupravená data z barometru v Pa. Na závěr jsou uvedeny průběhy kvantifikátoru AM (vektorová velikost zrychlení) viz Obr. 3.11 a ACM (kubická velikost zrychlení) viz Obr. 3.12. V obou případech jsou pomocí kvantifikátorů AM a ACM viditelně zvýrazněny pády. Pro subjektivní srovnání je možné porovnat Obr. 3.7 s Obr. 3.12 a Obr. 3.11, jelikož se jedná pořád o stejný datový záznam.



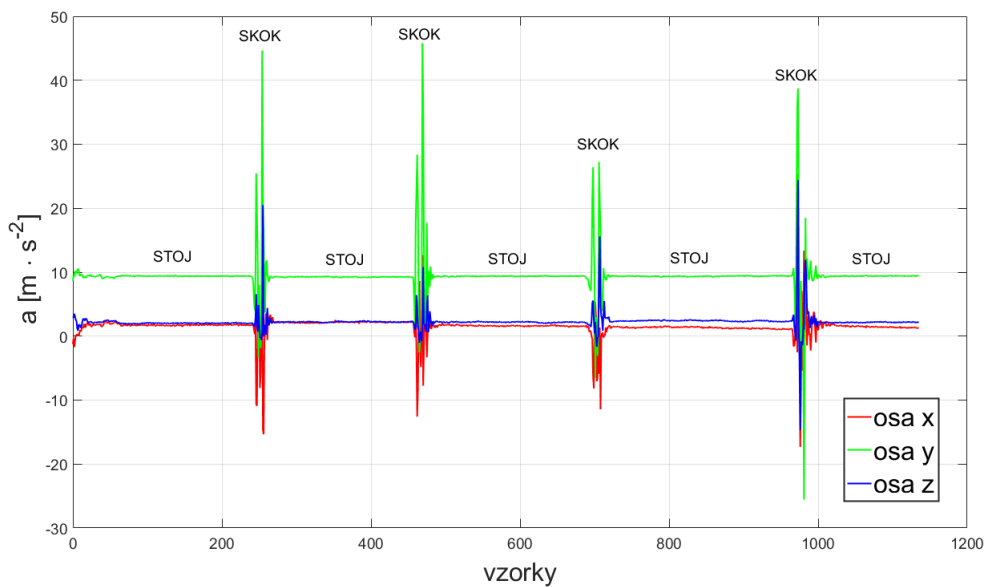
Obr. 3.2: Akvizice dat při ADL a pádech; instalace s popisem



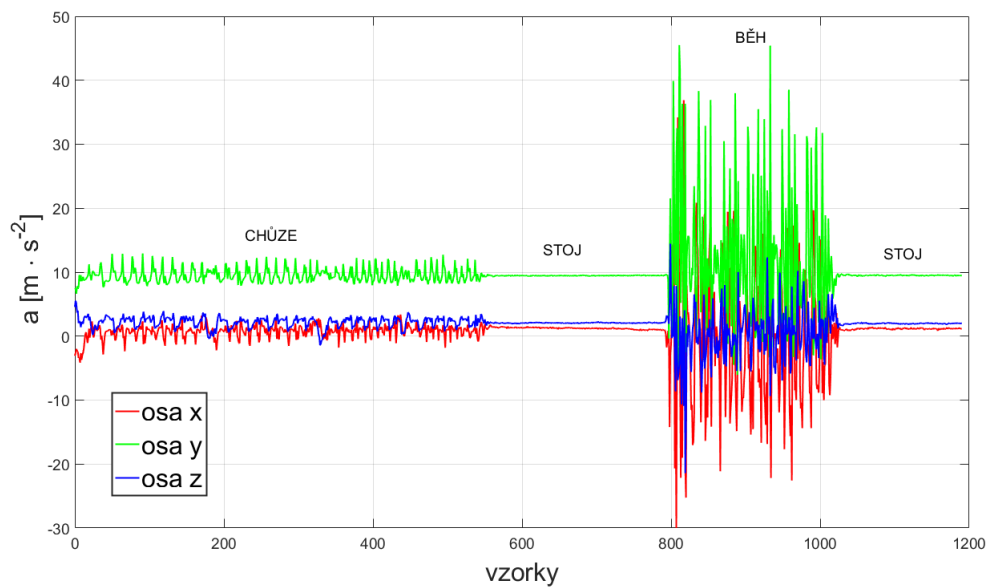
Obr. 3.3: Orientace os akcelerometru a gyroskopu při měření osob



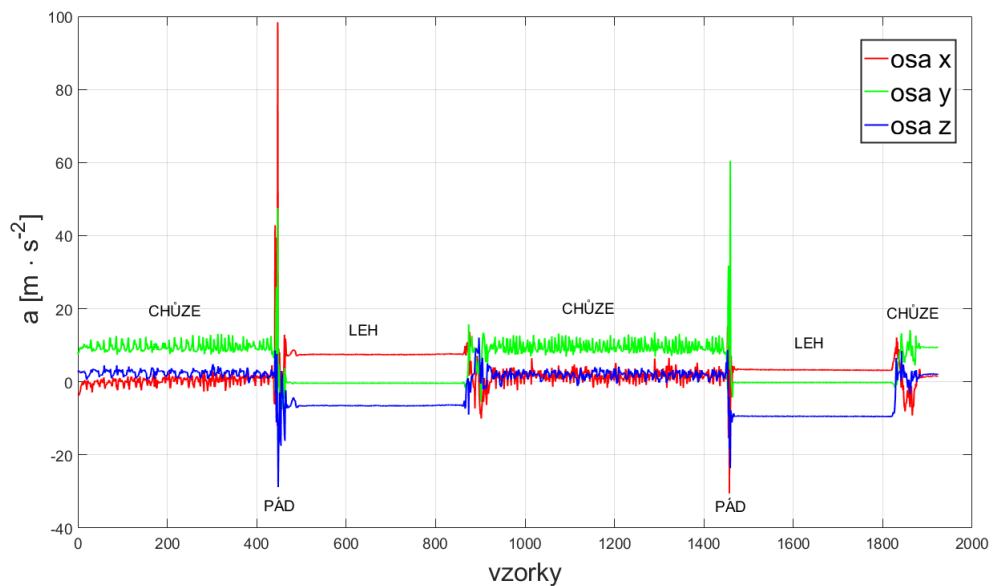
Obr. 3.4: Záznam dat z akcelerometru lokátoru při polohách stoj, sed a leh



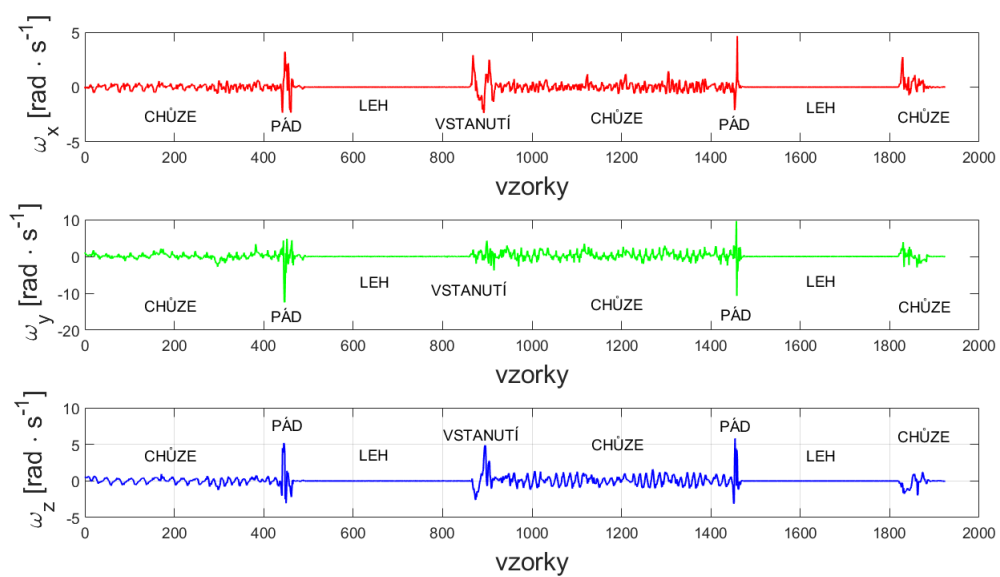
Obr. 3.5: Záznam dat z akcelerometru lokátoru při skocích



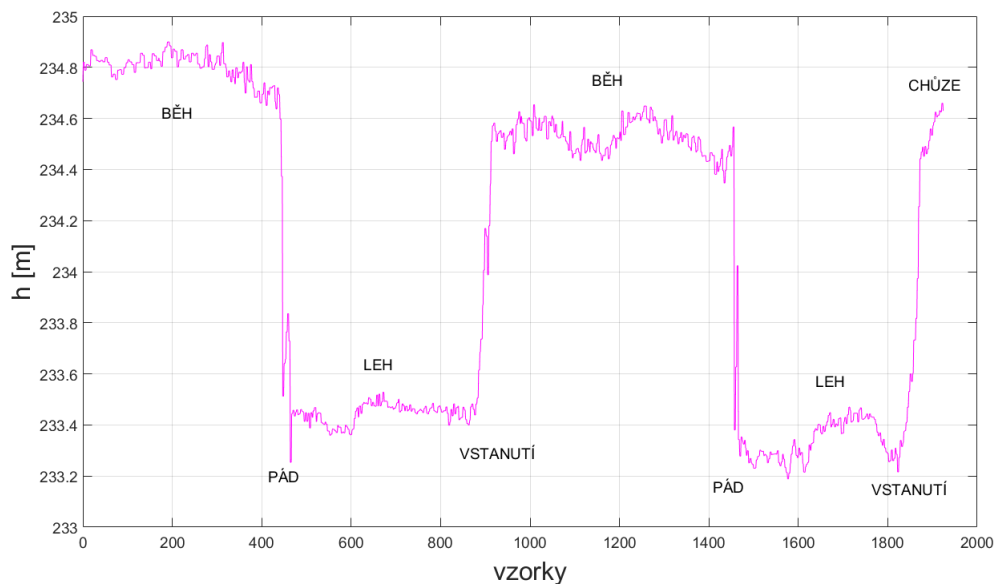
Obr. 3.6: Záznam dat z akcelerometru lokátoru při chůzi a běhu



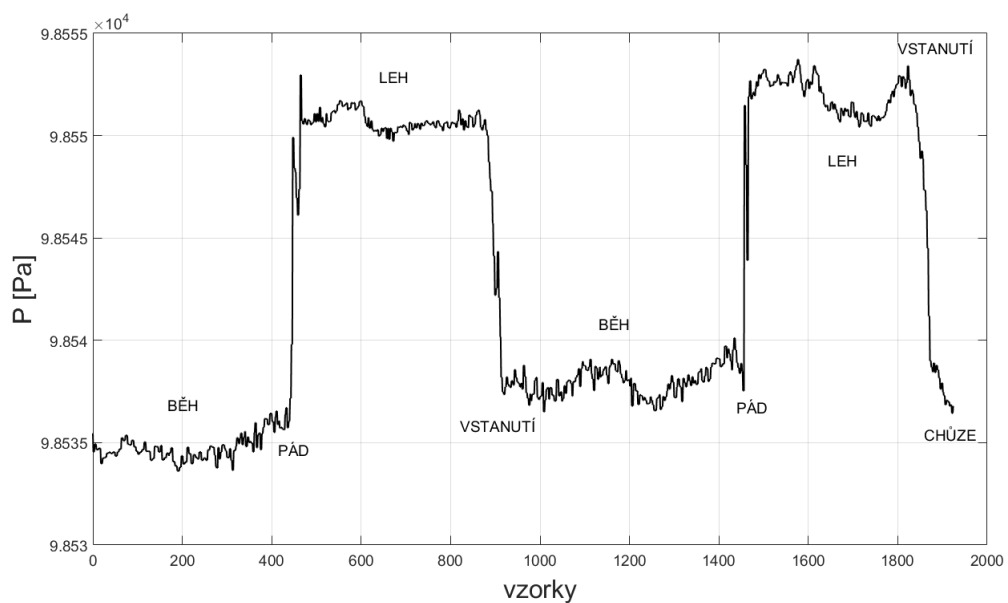
Obr. 3.7: Záznam dat z akcelerometru lokátoru při chůzi, pádu a lehu



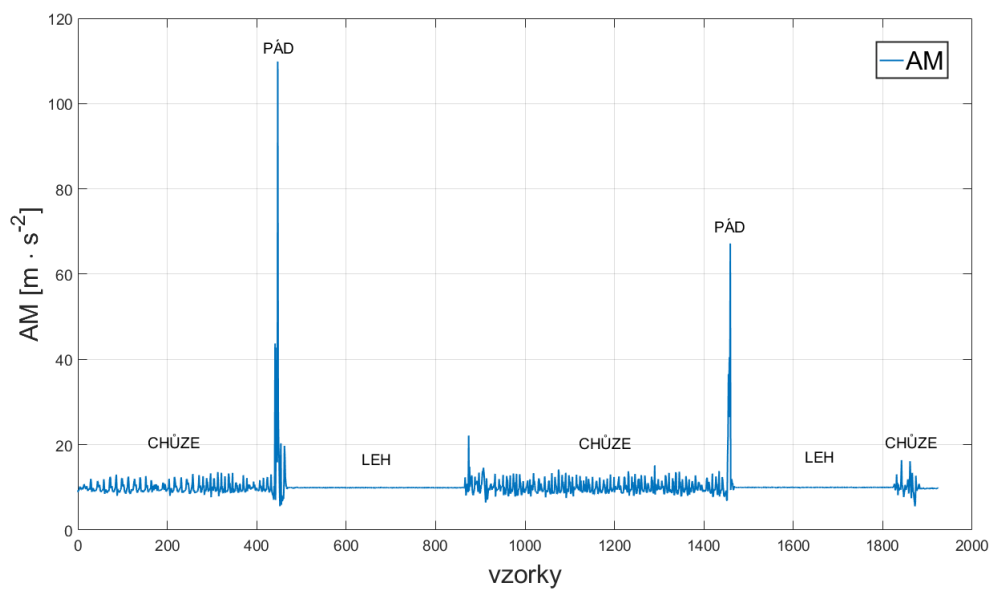
Obr. 3.8: Záznam dat z gyroskopu lokátoru uvedený při stejné situaci jako na Obr.3.7



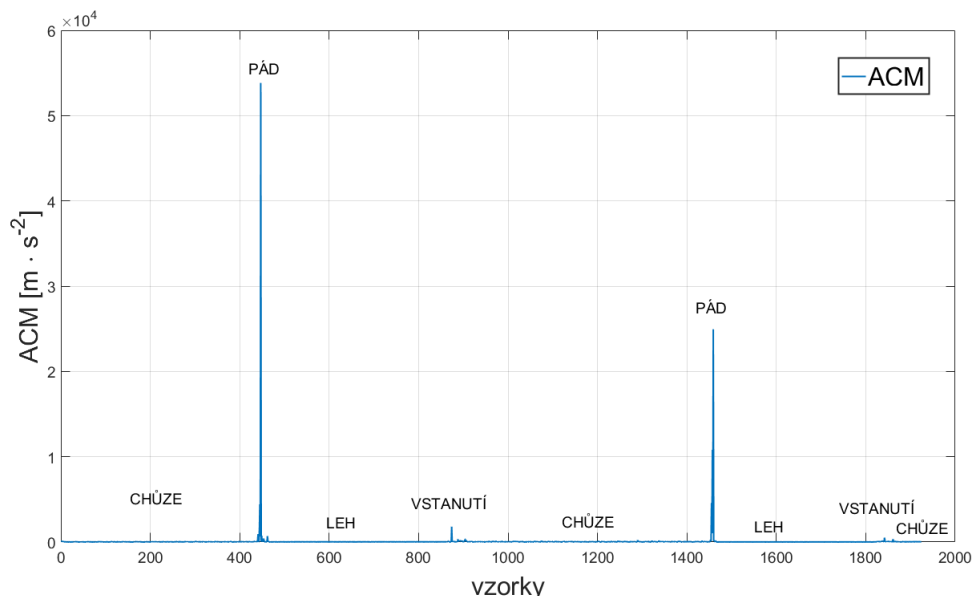
Obr. 3.9: Záznam dat z barometru lokátoru uvedený při stejné situaci jako na Obr. 3.7; data z barometru jsou přepočítány pomocí vztahu 4.1 uvedeného v 4.1



Obr. 3.10: Záznam dat z barometru lokátoru uvedený při stejné situaci jako na Obr. 3.7; data z barometru bez uprav v jednotkách Pa



Obr. 3.11: Záznam dat z akcelerometru lokátoru při stejné situaci jako na Obr. 3.7, vyjádřené pomocí AM



Obr. 3.12: Záznam dat z akcelerometru lokátoru při stejné situaci jako na Obr.3.7, vyjádřené pomocí ACM

3.2 Akvizice dat s nárazy

Na Obr. 3.13 je zobrazen automobil na dálkové ovládání, který sloužil k simulaci pohybu a především nárazu vysokozdvížného vozíku ve skladu.

Při průběhu akvizice jejíž instalační konfigurace je vidět na Obr. 3.14, byl pořízen záznam dat popisující čelní náraz do bariéry vzdálené od automobilu 250 cm. Průběh zrychlení v osách x , y , z pořízených akcelerometrem je uveden na Obr. 3.15. Jelikož náraz automobilu není, tak čitelný, jako byl například pád, je vhodné data z akcelerometru zpracovat. Na Obr. 3.16 je uvedeno zobrazení pomocí kvantifikátoru AM případně pomocí kvantifikátoru ACM ilustrovaného na Obr. 3.17. Nejvhodnější presentování dat nárazu je, ale pomocí diference jedním z důvodů je i velmi jednoduchý výpočet. Pro čelní náraz by měla být největší diference zrychlení v ose x (akcelerometru), proto je na Obr. 3.18 zobrazena právě tato diference. Diference je získána rozdílem zrychlení vzorku aktuálního se vzorkem následujícím. Diferencí je tedy o 1 vzorek méně než je počet vzorků akvizice.

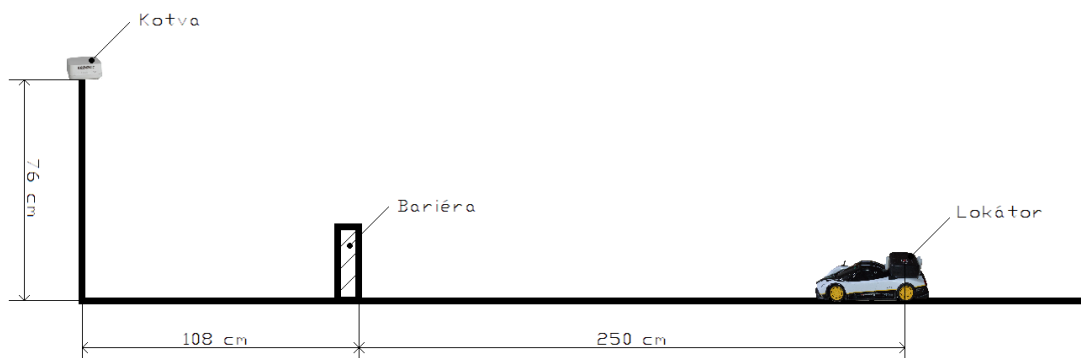
Na Obr. 3.19 je zobrazena druhá situace, kdy data byla pořizována střídavě z čelního nárazu při rozjezdu a zadního nárazu při couvání.

Na Obr. 3.20 je vidět záznam z akvizice presentovaný pomocí diferencí ve směru osy akcelerometru x . V Obr. 3.20 jsou zvýrazněny dvě oblasti. Červeně vyznačená oblast je detailněji zobrazena pomocí záznamu všech tří os akcelerometru na Obr. 3.21.

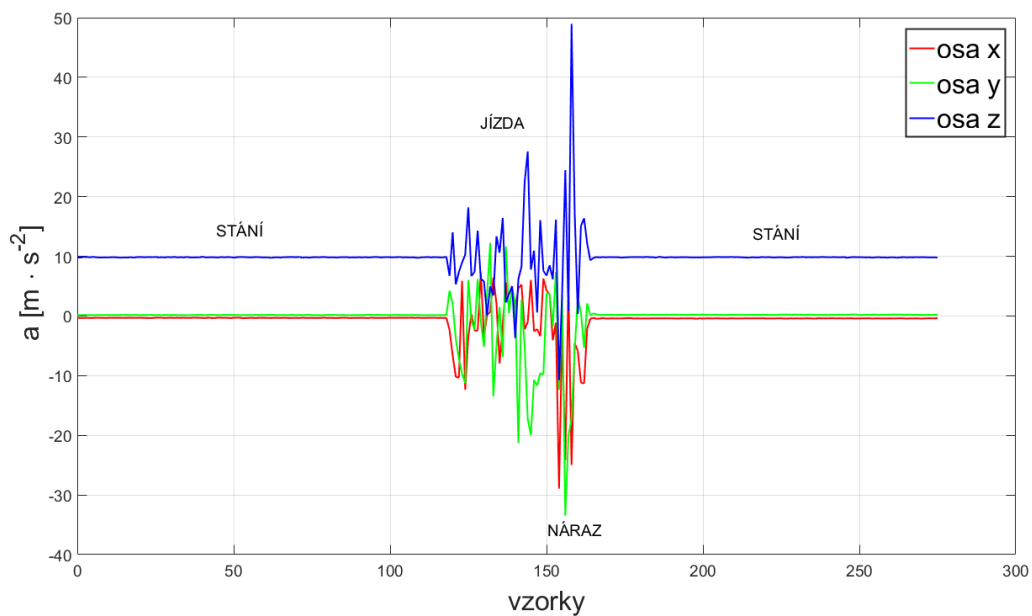
Rostoucí změna zrychlení mezi vzorky 142 a 143 dokazuje, že se jedná o náraz. Naopak zeleně vyznačené oblasti v Obr. 3.20 odpovídá detail uvedený na Obr. 3.22, na kterém je vidět kolize zadní části vozidla při couvání, větší diference mezi vzorky 807 a 808. Poslední ilustrace Obr. 3.23 ukazuje projev nedokonalosti rovné jízdy vozidla, kdy se při nárazu podařilo dosáhnout větší diference v ose y než v ose x.



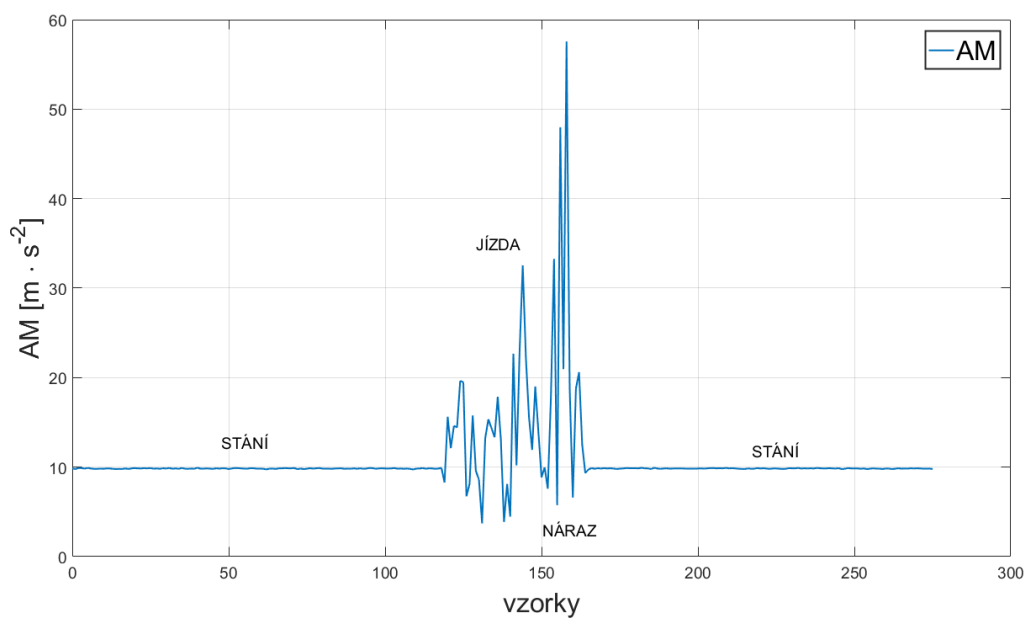
Obr. 3.13: Akvizice dat při nárazu; upravený automobil na dálkové ovládání s lokátorem



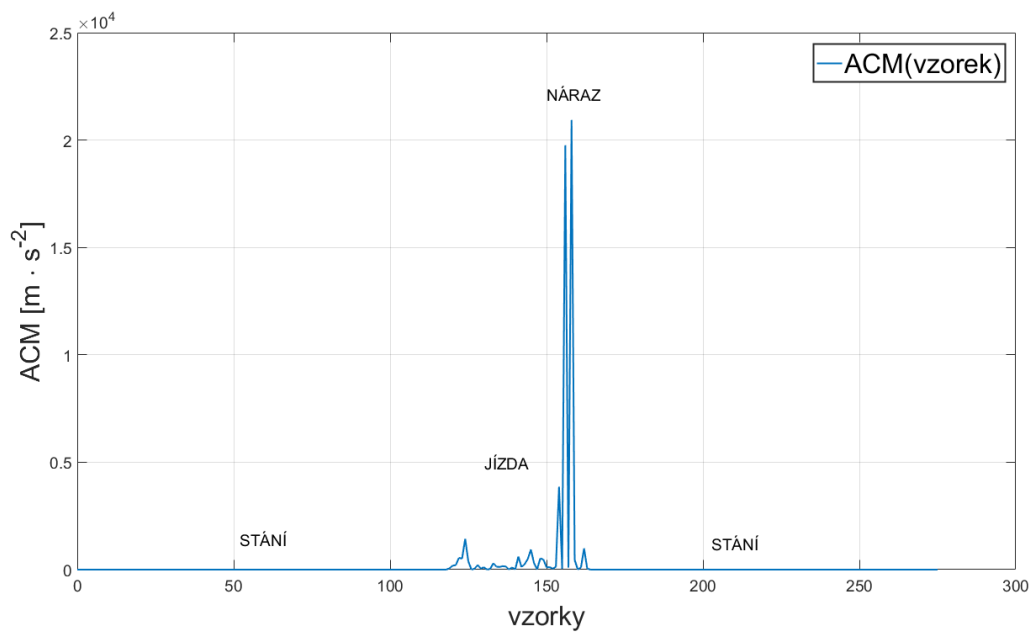
Obr. 3.14: Akvizice dat při nárazu; instalace s popisem



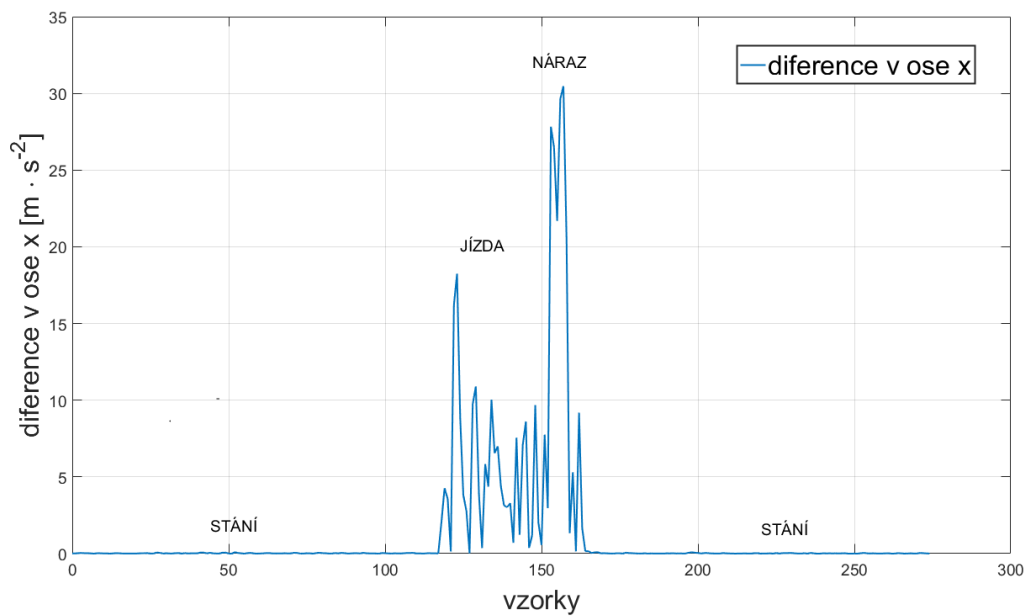
Obr. 3.15: Záznam dat z akcelerometru při čelním nárazu z 250 cm



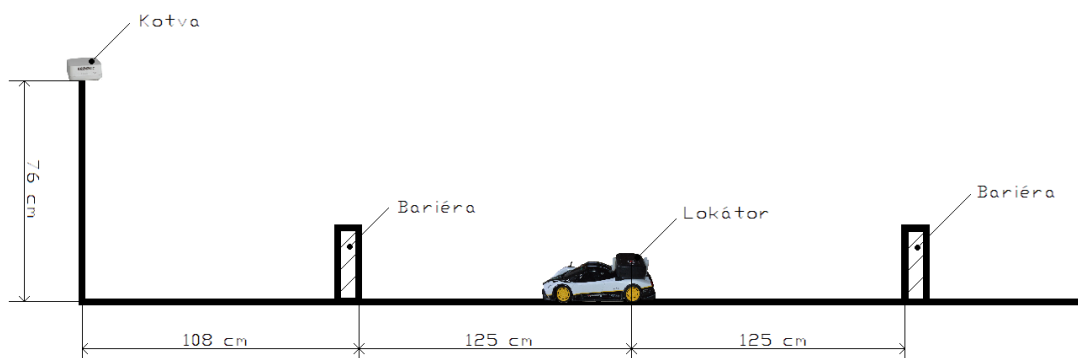
Obr. 3.16: Záznam dat z Obr. 3.15 vyjádřený pomocí AM



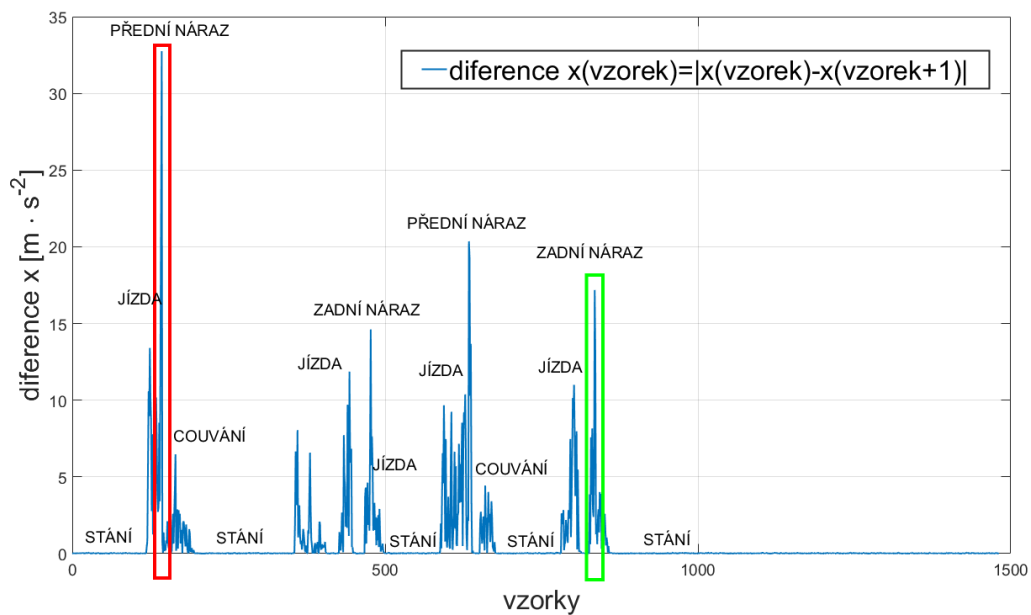
Obr. 3.17: Záznam dat z Obr.3.15 vyjádřený pomocí ACM



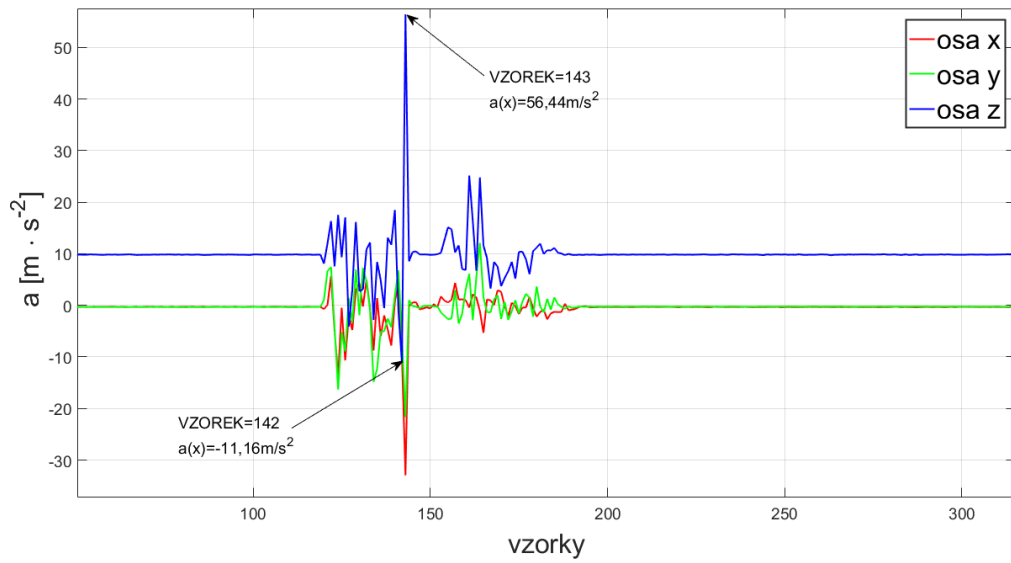
Obr. 3.18: Záznam dat z Obr. 3.15 vyjádřený pomocí vypočítaných diferencí v ose x



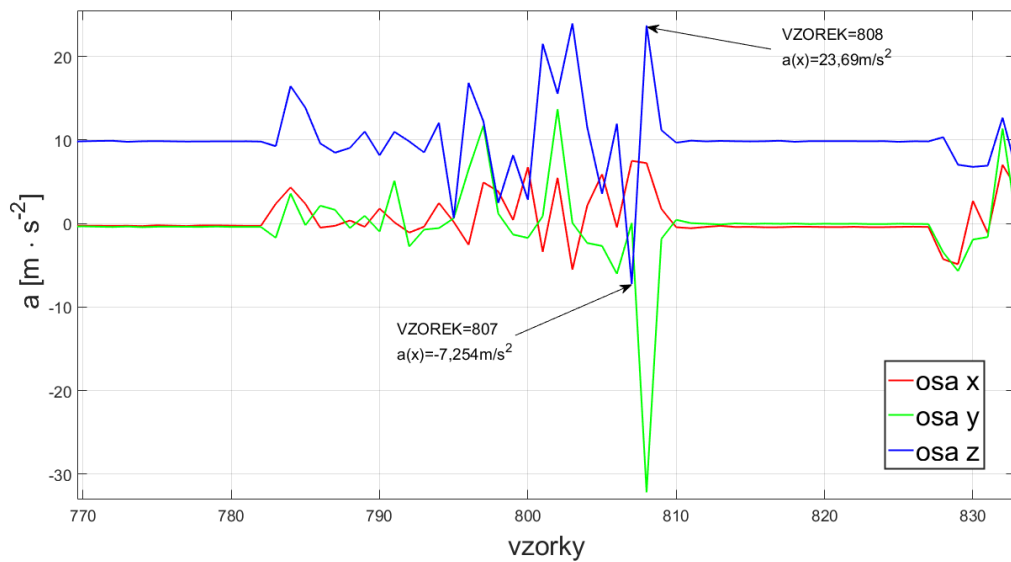
Obr. 3.19: Akvizice dat při nárazu; instalace s popisem



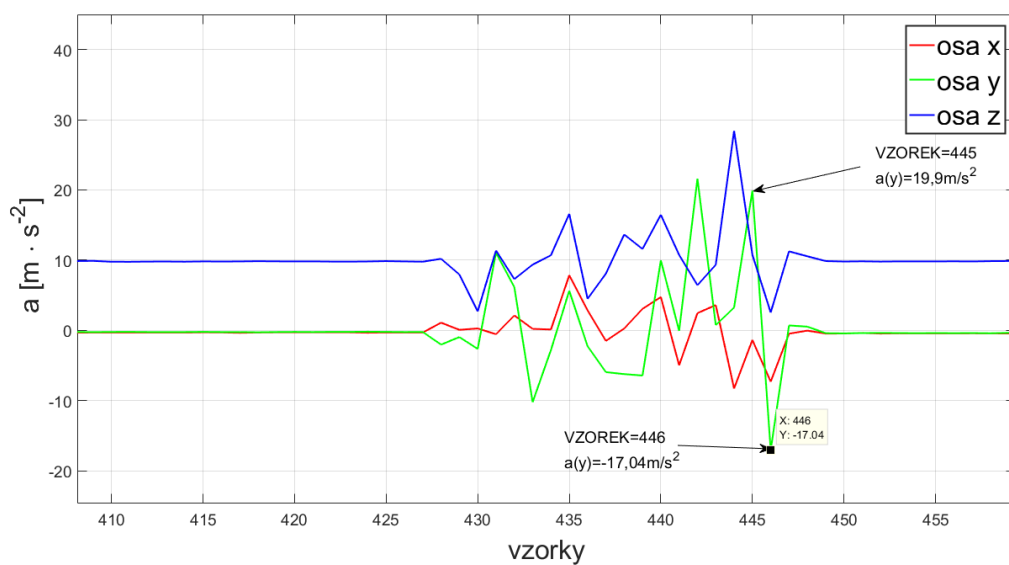
Obr. 3.20: Akvizice dat při nárazu; difference v ose x ze záznamu s více nárazy



Obr. 3.21: Čelní náraz; detail difference v ose x vyznačené červenou oblastí, vyjádřen pomocí zrychlení v jednotlivých osách



Obr. 3.22: Náraz při couvání; detail difference v ose x vyznačené zelenou oblastí v Obr. 3.20, vyjádřen pomocí zrychlení v jednotlivých osách



Obr. 3.23: Náraz při couvání; detail difference v ose x 3.20 (1. zadní náraz), vyjádřen pomocí zrychlení v jednotlivých osách, viditelná větší difference v ose y

4 Koncepce algoritmů pro detekci pádů a nárazů

Po konzultaci s panem Ing. Mrázem, konzultant firmy Sewio, byly zúženy možnosti návrhu algoritmu o využití metod neuronových sítí a jiných sofistikovanějších možností zpracování signálu. Data musí být zpracována v rámci lokátoru a né na straně serveru a to vše nejlépe v reálném čase.

4.1 Návrh algoritmu umožňující detekci pádů

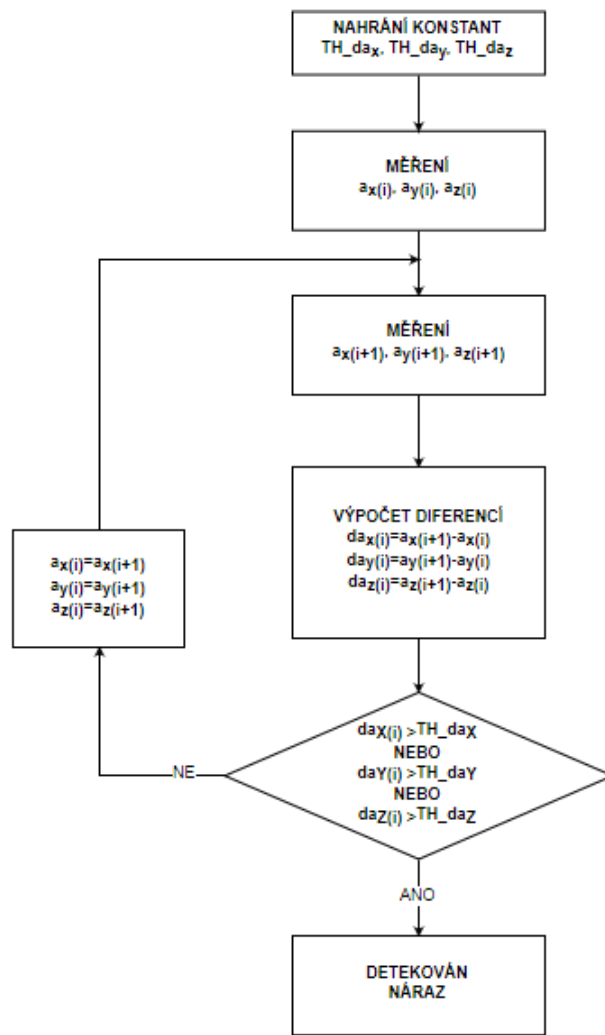
Z důvodů požadavku minimální spotřeby je z návrhu vynechána funkce gyroskopu. Návrh algoritmu, inspirovaný algoritmem uvedeným na Obr. 1.4 z [3], je postaven na datech získaných z akcelerometru a barometru. Protože je výpočetně složité určovat absolutní výšku, podle vztahu 4.1 [8], kde h je absolutní výška v m, P je tlak v hPa a 0,3048 je převodní konstanta z palců na metry), je v navrhovaném algoritmu využito přímo difference tlaku ΔP . Hlavním důvodem je dělení ve vztahu 4.1, které při programování embedit systému dělává problémy.

$$h = \left(\left(1 - \left(\frac{P}{1013,25} \right)^{0,190284} \right) \cdot 145366,45 \right) \cdot 0,3048 \quad [\text{m}] \quad (4.1)$$

Navrhovaný algoritmus využívá dvě prahové konstanty TH_AM a TH_ΔP. Tyto hodnoty jsou stanoveny na základě dat z akvizicí TH_AM=60 a TH_ΔP=10. Tyto konstanty jsou momentálně platné jen pro osobu, která se akvizice účastnila. Pro zobecnění se dá provést buď několik akvizicí osob s odlišnou výškou a váhou pro vytvoření jednoduchého matematického modelu na jehož základě se koeficienty budou upravovat. Další možností je provést kalibrační měření, které se bude skládat z ADL kromě pádu. Prahová hodnota TH_AM, pak bude stanovena na základě mírně navýšené, nejvyšší možné dosažené hodnoty zrychlení ze změřených dat. Poslední konstantou v algoritmu je konstanta R, která je stanovena na rychlosti změny tlaku, ta se v datech z akvizice měnila každým 4. získaným vzorkem. Z tohoto poznatku je čítecí hodnota R=4. Navrhovaný program na základě překročení či nepřekročení prahových hodnot detekuje pád. Vývojový diagram navrhovaného algoritmu je zobrazen na Obr. 4.1.

4.2 Návrh algoritmu umožňující detekci nárazů

Při akvizici dat byly objeveny problémy malé vzorkovací frekvenci, která stejně jako v případě pádů odpovídala cca 20 Hz. Dalším zjištěným problémem byl vliv rušení způsobený vibracemi, tento problém se dá řešit vhodnějším umístěním. Největší problém je v případě prudké změny směru elektromotoru změna jízdy vpřed a vzad případně skluz. Předpokládaný problém se snad vyřeší zvětšením vzorkovací frekvence. Na Obr. 4.2 je uveden vývojový diagram navrhovaného programu. Stanovení prahových hodnot TH_{da_x} , TH_{da_y} a TH_{da_z} je v plánu provést na základě akvizovaných dat, v tomto momentě se hodnota těchto prahů pohybuje okolo 15, ovšem tato hodnota je pro uvedený automobil na dálkové ovládání. V běžném automobilovém provozu je hodnota těchto prahů stanovena na 2000 [4]. Navržený algoritmus pracuje na základě porovnávání diferencí s prahovými hodnotami. Nejprve dojde ke změření zrychlení v jednotlivých osách a následně je vypočítán rozdíl mezi změřenou hodnotou předchozího a aktuálního vzorku. Výsledné diference v jednotlivých osách jsou porovnány s prahovými hodnotami TH_{da_x} , TH_{da_y} a TH_{da_z} a v případě, že je některá z hodnot nad prahovou, je situace hodnocena jako náraz v opačném případě se z aktuálního vzorku stane předchozí vzorek a je změřen vzorek nový. Popsaný princip je na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Vývojový diagram navrhovaného programu pro detekci nárazů

5 Kalkulace spotřeby navrhovaného algoritmu

Kalkulace spotřeby nebude odpovídat celkové spotřebě lokátoru Tag IMU v4r7. Kalkulace zanedbává spotřebu řídicího mikrokontroléru EFM32 spojenou s časovou náročností zpracování navrženého algoritmu, tu bude možné stanovit až po realizaci algoritmu. A dále je nutné připomenout, že pro hlavní funkcionalitu lokátoru je lokalizace, při které také vzniká spotřeba, jak ze strany samotného zpracování obslužného programu, řídicím mikrokontrolérem EFM32, tak modulu Decawave DWM1000 pro zprostředkování komunikace se systémem a dalších drobných spotřeb vzniklých obvodovou realizací.

Pro stanovení teoretické hodnoty spotřeby jsou v katalogových listech integrovaných obvodů uváděny informace o jejich elektrických vlastnostech viz Obr. 5.1.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
SUPPLY VOLTAGES						
VDD		2.4	2.5	3.6	V	
VDDIO		1.71	1.8	VDD	V	
SUPPLY CURRENTS						
Normal Mode	9-axis (no DMP), 1 kHz gyro ODR, 4 kHz accel ODR, 8 Hz mag. repetition rate		3.7		mA	
	6-axis (accel + gyro, no DMP), 1 kHz gyro ODR, 4 kHz accel ODR		3.4		mA	
	3-axis Gyroscope only (no DMP), 1 kHz ODR		3.2		mA	
	6-axis (accel + magnetometer, no DMP), 4 kHz accel ODR, mag. repetition rate = 8 Hz		730		μA	
	3-Axis Accelerometer, 4kHz ODR (no DMP)		450		μA	
	3-axis Magnetometer only (no DMP), 8 Hz repetition rate		280		μA	
Accelerometer Low Power Mode (DMP, Gyroscope, Magnetometer disabled)	0.98 Hz update rate		8.4		μA	1
	31.25 Hz update rate		19.8		μA	1
Full Chip Idle Mode Supply Current			8		μA	
TEMPERATURE RANGE						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	°C	

Obr. 5.1: Tabulka elektrických vlastností integrovaného obvodu MPU9250 stanovených výrobcem při na vstupním napájecím napětí 2,5 V, a teplotě 25 °C [5]

Spotřeba integrovaného obvodu DPS310 v módu s vysokou přesností, s přesností určení relativní výšky ± 0.05 m. Měření talku a teploty v tomto módu probíhá 4 krát za sekundu. Uváděná spotřeba tohoto módu je 200 uA [9]. Možnost využití normálního módu se spotřebou 20 uA a přesností určení relativní výšky ± 0.1 má relativně dlouhou obnovovací dobu (2 krát za sekundu).

Celková spotřeba periférií navrhovaného algoritmu se bude skládat ze spotřeby integrovaného obvodu MPU9250 nastaveného do normálního módu s využitím 3 osého akcelerometru s obnovovací frekvencí 4 kHz, kde je typizovaný proudový odběr 450 uA, a spotřeby barometrického senzoru s proudovým odběrem 200 uA.

Předpokládaný výsledný proudový odběr, spotřeba, periférií užitých v navrhaném algoritmu pro detekci pádů je 650 uA.

Tento odhadovaný proudový odběr je možné případně snížit i na hodnotu 219,75 uA za předpokladu, že bude snížena vzorkovací frekvence na 31,25 Hz při které může akcelerometr pracovat v režimu nízké spotřeby. Jestli bude vzorkovací frekvence 31,25 Hz postačující ukáže až implementace algoritmu do stávajícího zdrojového kódu lokátoru.

Pro výpočet proudového odběru integrovaného obvodu MPU9250 v režimu nízké spotřeby je využit vztah 5.1 [5], kde *Supply Current* odpovídá hodnotě spotřebovaného proudu v uA, *Sleep Current* je proudový odběr v spánkovém režimu uvedený také v uA a *Update Rate* udává vzorkovací frekvenci.

$$Supply\ Current\ in\ \mu A = Sleep\ Current + Update\ Rate \cdot 0,376 \quad (5.1)$$

Příklad výpočtu: V datasheetu MPU9250 je uvedena hodnota *Sleep Current*=8uA a vybrána podporovaná hodnota *Update Rate* = 31,25 Hz. Dosazením do vztahu 5.1 získáme hodnotu výslednou hodnotu proudového odběru v uA viz 5.2.

$$Výsledný\ proudový\ odběr = 8 + 31,25 \cdot 0,376 = 19,75\mu A \quad (5.2)$$

Předpokládaný výsledný proudový odběr, spotřeba, periférií užitých v navrhaném algoritmu pro detekci nárazů je 450 uA, kde se plánované stejné nastavení integrovaného obvodu MPU9250 jako v případě algoritmu pro detekci pádů a nevyužití integrovaného obvodu DPS310. I v tomto případě se dá po implementaci algoritmu vyzkoušet režimu nižší vzorkovací frekvence 31,25 Hz a snížit spotřebu na 19,75 uA.

6 Implementace řešení do firmwaru lokátoru

Pro implementaci navrženého řešení bylo nutné upravit stávající firmware lokátoru Tag IMU v4r7. Od společnosti Sewio jsem obdržel jednu z aktuálních verzí funkčního firmwaru spolu s jeho dokumentací. Úpravy firmwaru byly prováděny ve vývojovém prostředí Simplicity Studio¹ a pro nahrání a debugování nového firmwaru do lokátoru bylo využito vývojového kitu EFM32 Gecko Starter Kit², kompatibilního s vývojovým prostředím Simplicity Studio.

Firmware lokátoru je celý psaný v jazyce C. Pro náročnější zákazníky má společnost Sewio v hlavní smyčce programu vytyčený prostor pro seberealizování svých klientů. V této práci byl prostor využit pro volání samostatných funkcí realizujících detekci pádů, nárazů a měření vzdálenosti zmíněného v následujících kapitolách.

Realizací navrženého řešení v jazyce C, vznikl hlavičkový a zdrojový soubor, Detection.h a Detection.c. Zdrojové kódy těchto souborů jsou součástí přibaleného CD.

Vzniklé funkce `detection_Fall()` a `detection_Impact()`, jež jsou součástí zdrojového souboru Detection.c, korespondují s vývojovými diagramy 4.1 a 4.2.

Kromě zmíněných zveřejněných souborů a úpravy hlavní smyčky bylo nutné provést i několik úprav a zásahů do hlubší struktury nezveřejněného kódu firmware, mezi tyto úpravy patřilo například rozšíření konsolového rozhraní o menu pro aktivaci doplněných funkcí a nastavení jejich prahových hodnot viz 9.1 či nastavení tvaru odesílané zprávy na server.

6.1 Další možnosti snížení spotřeby

Aktuálně je možné snížení spotřeby regulovat vhodným nastavením lokátoru pomocí webového rozhraní RTLS Studia. Vhodným nastavením je myšlená deaktivace všech nepoužívaných senzorů v módech pro detekování pádů a nárazů. Dalším krokem pro snížení spotřeby je možnost využití některého z nabízených režimů spánku, které umožňují šetřit energii lokátoru v klidovém stavu. Z dostupných režimů je možné použít mód "keep alive"u kterého se v případě detekce stacionarity lokátoru prodlouží doba mezi jednotlivými odesílanými zprávami a tím i vykonáním detekčních algoritmů, zároveň je v tomto režimu lokátor kdekoliv dohledatelný, což je vhodné v situaci, kdy klidový stav zavínil pád či náraz.

Algoritmus byl, ale převážně testován s vypnutým stavem režimu spánku. Důvodem bylo snížení možné rizika chybných detekcí. Aktivace a deaktivace spánku je

¹<https://www.silabs.com/products/development-tools/software/simplicity-studio>

²<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/0ec4/0900766b80ec4f59.pdf>

rovněž založená na prahových hodnotách v tomto případě zpracovávaných akcelerometrem.

Pro další snížení spotřeby dané platformy by bylo nutné provést rozsáhlejší zásah do stávajícího firmwaru s využitím interuptů od periférií DPS310 či MPU9250, což by umožňovalo prodloužení doby strávené v režimu "sleep mode", čímž lze dosáhnout menší spotřeby. Takový zásah by, ale potřeboval informace interního zaměstnance společnosti Sewio, je zde velké riziko vzniku nechtěných kolizí a tím i narušení chodu bezpečně fungujícího a dlouhodobě testovaného systému.

7 Měření vzdálenosti pomocí laseru

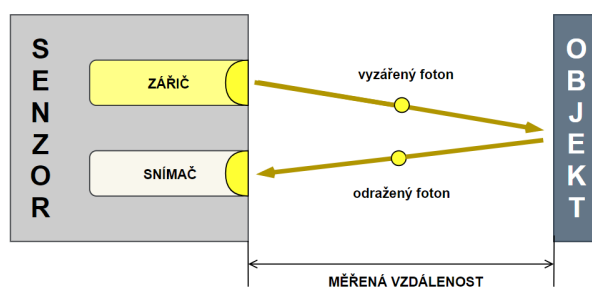
Měření vzdálenosti pomocí laseru¹ je v dnešní době velmi populární a nachází své uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. V rámci této práce byly potřeby měření vzdálenosti specifikovány pro monitorování efektivního využívání nákladních prostor přívěsů skladových vozíků a sledování zdvihu vidlic vysokozdvizných vozíků.

S ohledem na aktuální velikost zařízení, cenu, spotřebu, způsob komunikace a maximální dosaženou vzdálenost, bylo vybráno několik druhů senzorů. Po domluvě se zadavatelem byl pro pilotní projekt zvolen sensor VL53L1X s maximální měřenou vzdáleností 4 m.

Fyzikální princip je u laserových měřičů vzdálenosti v zásadě stejný a liší se jen některými konkrétními parametry, proto je zdrojem k získání základních teoretických poznatků přibližujících princip a některá úskalí této metody měření využito dokumentace k senzoru VL53L1X.

7.1 Princip měření vzdálenosti laserem

Laserové záření je oproti jiným světelným zdrojům vysoce směrové což je ideální vlastnost pro měření vzdálenosti. Na Obr. 7.1 je znázorněn princip fungování měření vzdálenosti použitého u laserového senzoru VL53L1X. Měřicí část senzoru se skládá z laserového zářiče, který emituje fotony a snímače realizovaného pomocí velmi citlivých lavinových diod schopných detekovat dopadající fotony. Zářičem emitované fotony se odrazí od objektu na který jsou nasměrovány a tyto odražené fotony jsou následně detekovány pomocí snímače. Měřená vzdálenost je následně vypočítána na základě doby letu fotonu od jeho emise po jeho detekci. Zmíněný princip měření vzdáleností se proto v anglickém překladu označuje jako Time-of-Flight respektive ToF [23].



Obr. 7.1: Princip měření vzdálenosti laserem, inspirováno [23]

¹laser - light amplification by the stimulated emission of radiation [20]

Velikost změřené vzdálenosti je vypočtena na základě vztahu 7.1 uvedeného v [23].

$$\text{změřená vzdálenost} = \frac{\text{doba letu fotonu}}{2} \cdot \text{rychlost světla} \quad [\text{m}] \quad (7.1)$$

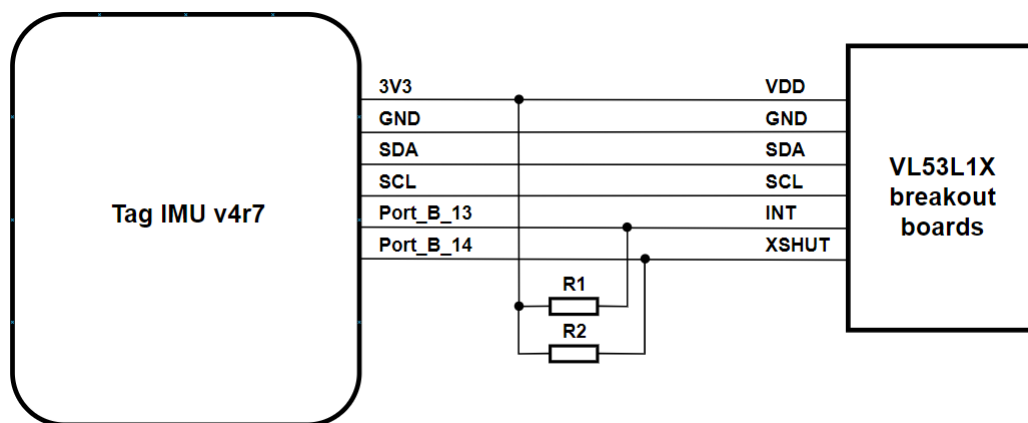
Z principu měření vzdálenosti laserem je zřejmé, že přesnost měření je závislá na světelných podmínkách a materiálu objektu ke kterému je vzdálenost měřena.

7.2 Možnosti nastavení senzoru VL53L1X pro měření vzdálenosti

Senzor VL53L1X umožňuje měřit vzdálenosti do 4 m. S rostoucí vzdáleností se, ale zvětšuje rozměr zorného pole dále v textu označovaného jako FoV. Velikost FoV se v rámci senzoru VL53L1X dá mírně modifikovat. Nominální velikost úhlu FoV pro VL53L1X je 27°. S narůstající vzdáleností se FoV senzoru zvětšuje. Pro lepší představu při měřené vzdálenosti 0,60 m je výrobcem uváděný průměr kuželu FoV 0,29 m, pro vzdálenost 4 m se průměr kuželu FoV zvětší na 0,192 m [23]. Modifikaci FoV je možné provést pomocí nastavení parametru oblasti zájmu dále v textu označovaného jako ROI. Z dokumentace k senzoru je ale možné k měření na vzdálenosti 4 m pouze ROI o velikosti 16x16 což odpovídá celému FoV. Senzor má tři režimy vztahující se k velikosti měřené vzdálenosti. Pro měření vzdáleností okolo 4 m je určen režim pro velké vzdálenosti, který je z ostatních režimů nejcitlivější na světelné podmínky.

8 Návrh hardwarového řešení vhodného pro integraci do lokátoru platformy Sewio

Jak už bylo dříve zmíněno pro rozšíření funkcionality lokátoru o laserové měření vzdálenosti byl vybrán senzor VL53L1X. Meze napájecího napětí senzoru se pohybují v rozmezí od 2,6 do 3,5 V. Komunikačním rozhraním senzoru je sběrnice I²C. Dále senzor disponuje pinem přerušením INT, které informuje o dokončení měření a pinem XSHUT pro možnost vypnutí a zapnutí senzoru k úspoře energie. Jelikož se jedná o optický senzor je vhodné při jeho aplikaci využít krycí sklíčko vhodných vlastností. Standardně si, ale krycí skla k senzorům VL53L1X nelze pořídit při nákupu senzorů. Jedinou možností, jak tyto krycí skla pořídit je koupě vývojového kitu¹ pro senzory VL53L1X, kde jsou součástí balení krycí skla i s distančními podložkami pro zjednodušení návrhu jejich integrace. V případě zájmu o senzory je výrobce ochoten se podělit o kontakt na svého distributora krycích sklíček. V rámci této práce bylo jednodušší pro sehnání krycího sklíčka pořídit vývojový. Součástí tohoto kitu byly i vývojové desky osazené senzory VL53L1X. Z důvodů typu pouzdra senzoru (piny senzoru nejsou umístěny po stranách, ale na spodní straně senzoru) by byla nutná výroba nejen desky plošných spojů, ale i šablony pro jeho osazení, čímž by se cena testovacího kusu zbytečně prodražila a proto bylo nakonec využito vývojových desek.



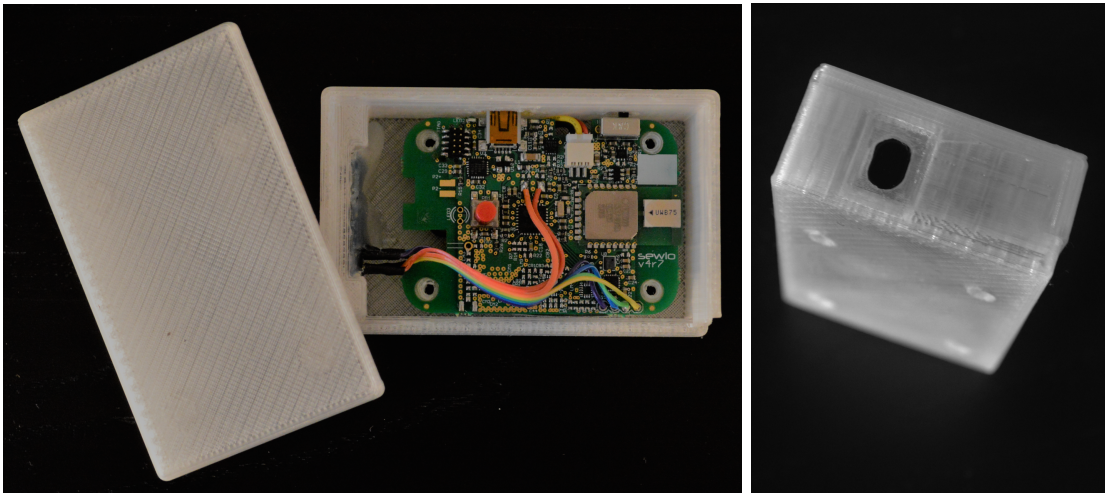
Obr. 8.1: Schéma zapojení lokátoru se senzorem VL53L1X

Na Obr. 8.1 je uvedeno schéma zapojení lokátoru se senzorem VL53L1X. Vzhledem napájecímu napětí lokátoru (3,3 V) a rozsahu povoleného napětí senzoru nebylo

¹https://www.st.com/content/st_com/en/products/ecosystems/stm32-open-development-environment/stm32-nucleo-expansion-boards/stm32-ode-sense-hw/p-nucleo-53l1a1.html

nutné řešit problémy s úpravou napěťových úrovní. Tag IMU v4r7 disponuje volnými piny 3V3, GND, SDA, SCL pro možnost připojení další periférie. V rámci integrace bylo nutné na desce lokátoru nalézt dva volné piny pro možnost ovládání pinů INT a XSHUT senzoru VL53L1X. Důvodem jejich propojení s řídicí jednotkou lokátoru je snaha o snížení energetické náročnosti řešení, jinak lze piny senzoru ošetřit způsobem uvedeným v [21]. K možnosti připojení pinů INT a XSHUT je nakonec využito výstupů na desce lokátoru, dříve určených k umístění krystalu, v schématu na Obr. 8.1 označených jako Port_B_13 a Port_B_14. Pro zajištění správné funkčnosti byl výstupní port senzoru INT i vstupní pin senzoru XSHUT ošetřeny "pull up" rezistory $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ na základě údajů ze schématu z katalogových listů vývojového kitu [24].

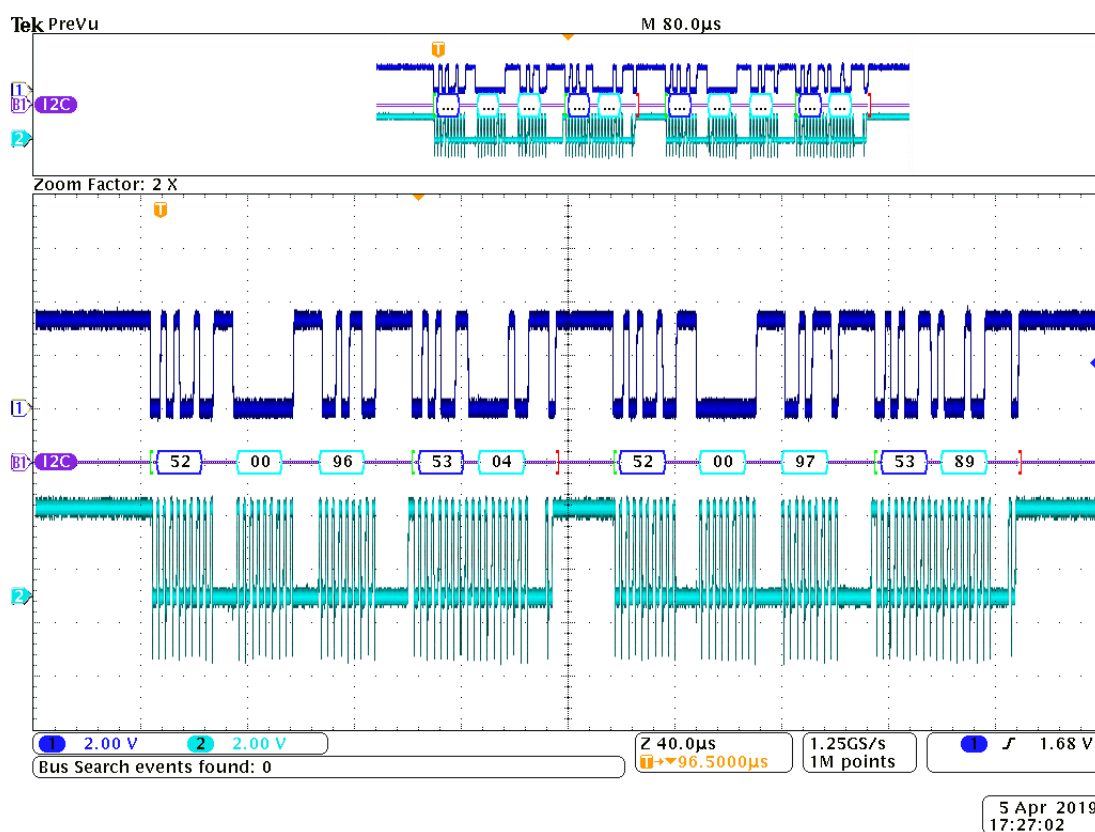
Po hardwarovém rozšíření funkcionality lokátoru o laserový měřič vzdálenosti v podobě integrace vývojové desky se senzorem VL53L1X, bylo nutné zajistit nový obal pro možnost testování. Firma Sewio poskytla za tímto účelem krabičku, kterou využívá pro nové instalace ta ale nebyla vhodná pro případné testování dříve zmíněných detekcí pádů a nárazů z důvodů její velikosti. Z tohoto důvodu byla v rámci práce navržena nová krabička pro inovovaný lokátor. Návrh krabičky byl proveden v programu Fusion 360. Tisk krabičky byl realizován z materiálu ABS, který je pro danou aplikaci vhodnější. Velikost vzniklé krabičky je 8,6x5,4x2,5 cm. Cena tisku krabičky z důvodu použitého materiálu byla 400 Kč.



Obr. 8.2: Navržená krabička lokátoru s implementovaným řešením pro měření vzdálenosti

9 Návrh softwarového řešení vhodného pro integraci do lokátoru platformy Sewio

Pro návrh a implementaci zdrojového kódu rozšiřujících funkcionalitu lokátoru o měření vzdálenosti laserem bylo využito nástrojů uvedených v kapitole 6. Přidáním nové periferie lokátoru vznikla nutnost rozšíření stávajícího firmwaru. V dokumentaci k senzoru není uvedena mapa registrů, ale je možné využít výrobcem dodávané rozhraní pro programování senzoru označované jako API. V rámci práce byla pro vývoj užitá odlehčená verze tohoto rozhraní STSW-IMG009¹. Pro práci s tímto rozhraní bylo nutné implementovat do vyznačených míst povely pro komunikaci přes I²C sběrnici.



Obr. 9.1: Záznam z osciloskopu při rozcházení komunikace procesoru se senzorem VL53L1X po I²C sběrnici

Protože v aktuální verzi firmware lokátoru byla implementována možnost čtení a zápisu maximálně slov, o velikosti 2 byte, bylo nutné upravit některé povely ob-

¹https://www.st.com/content/st_com/en/products/embedded-software/proximity-sensors-software/stsw-img009.html

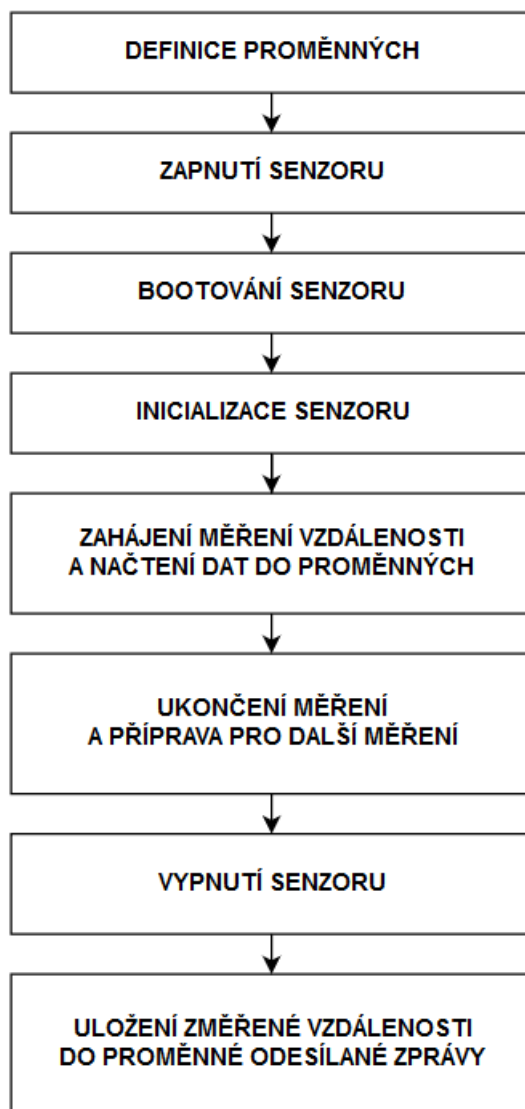
sahující DWORD což je slovo velikosti 4 byte. Protože nebyla v rámci dokumentace dostupná mapa registrů bylo nutné si některé adresy registrů zjistit ze souborů plnohodnotného programového rozhraní STSW-IMG007². Na Obr. 9.1 je uveden záznam osciloskopu Tektronix DPO 4032, zachycující průběh čtení změřené vzdálenosti ze senzoru pomocí lokátoru. Tmavě modrý průběh patří datovému kanálu SDA a světle modrý průběh hodinovému kanálu SCL. Mezi průběhy na fialové lince I²C jsou pak uvedeny číselné hodnoty. Data jsou prezentována v hexadecimální soustavě. Hexadecimální hodnoty 0x0096 a 0x0097 prezentují adresy registrů ve kterých jsou uloženy hodnoty 0x04 a 0x89. První hodnota odpovídá MSB a druhá LSB. Výsledná senzorem změřená dekadická hodnota prezentovaná na Obr. 9.1 je 1161 mm.

Další nutnou úpravou firmware bylo nastavení správných režimů pinů procesoru, konkrétně pinů 13 a 14 portu B, pro možnost sledování příznaků spojených s připravenými daty k vyčtení ze senzoru VL53L1X a možnost vypínání senzoru pro snížení spotřeby energie.

Pro ovládání senzoru řídicí jednotkou lokátoru byla vytvořena knihovna Lidar.h a zdrojový soubor Lidar.c, jež jsou součástí přiloženého CD. Struktura kódu funkce pro měření vzdálenosti `measure_Lidar()` je inspirována pseudokódem uvedeným v dokumentaci k programovému rozhraní STSW-IMG009 [25]. Vývojový diagram vytvořené funkce je uveden na Obr. 9.2 o proti pseudo kódu je v rámci funkce řešené přepínání režimu "HW_standby" a drobné přenastavení senzoru nutné pro měření vzdáleností 4 m.

V rámci úpravy firmware byl vytvořen obsah uživatelské zprávy, definující pořadí dat odesílaných ze senzoru. Zpráva obsahuje označení typu zprávy, data z akcelerometru, data z gyroskopu, změřenou velikost vzdálenosti v mm, příznak detekovaného pádu s rezervou, příznak detekovaného nárazu, dynamický rozsah akcelerometru, data z teploměru a data z barometru. Data na straně serveru je nutné dekodovat více viz kapitola 9.2.

²https://www.st.com/content/st_com/en/products/embedded-software/proximity-sensors-software/stsw-img007.html



Obr. 9.2: Vývojový diagram vytvořené funkce `measure_Lidar()`

9.1 Konsolové uživatelské rozhraní

Tag IMU si může uživatel nastavit pomocí webového rozhraní nebo přes konsoli.

V prvním případě, se uživatelská konfigurace odešla vzdušnou cestou a po restartu tagu je nová konfigurace aktivní a uložena ve flash paměti zařízení. Pro tento způsob rekonfigurace tagu je ale nutné editovat konfigurační zprávu odesílanou ze strany serveru. V rámci této práce nebylo do serveru technologie sewio zasahováno.

Uvedený fakt vedl k úpravě konsolového rozhraní tagu přes nějž je také možné konfigurovat tag a to i bez nutnosti zásahu do serveru.

V případě využití konsole k uživatelskému nastavení tagu je nutné připojit vypnutý tag pomocí USB rozhraní k počítači. Nastavení probíhá pomocí sériové linky. K zahájení komunikace je potřeba konsolové aplikace například TeraTerm. Po zapnutí aplikace a nastavení COM portu ke kterému je tag připojen se v konsolovém oknu objeví nápis "Switch is OFF". V tuto chvíli je příhodné zapnout tag. Více informací o nastavení přes konsoli je uvedeno v [9].

V rámci této práce bylo konsolové rozhraní rozšířeno o výběr jednotlivých přidávaných funkcionalit jako je měření laserem, detekce pádů a nárazů ale i možnost jejich deaktivací. Vždy je možné vybrat pouze jednu z položek. Dále bylo konsolové rozhraní rozšířeno o možnost nastavení jednotlivých prahových hodnot uživatelem, odpadla tak nutnost generování nového firmware při nutnosti změny prahové hodnoty.

Na Obr. 9.3 je uveden výpis z konzolového rozhraní s přidávanými položkami pro práci s přidávanými funkcemi lokátoru. Přidané funkce začínají od položky SELECT ADDED FUNCTION a končí poslední viditelnou položkou.

```
COM8 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
[actual = 3]:
Previous value left

----- MAGNETOMETER DATA SENT -----
Available configs:
0 - Disable
1 - Enable - send RAW data
2 - Enable - send corrected data
[actual = 0]:
Previous value left

----- SELECT ADDED FUNCTION -----
Available configs:
0 - Added function disable
1 - Fall detection
2 - Impact detection
3 - Distance measurement
[actual = 3]:
Previous value left

----- DEFINE THRESHOLD TH_AM FOR FALL-----
Set new threshold TH_AM, this value must be from: 0-2147483646
[actual = 33333333]:
Previous value left

----- DEFINE THRESHOLD TH_dP FOR FALL-----
Set new threshold TH_dP, this value must be from: 0-2147483646
[actual = 44444444]:
Previous value left

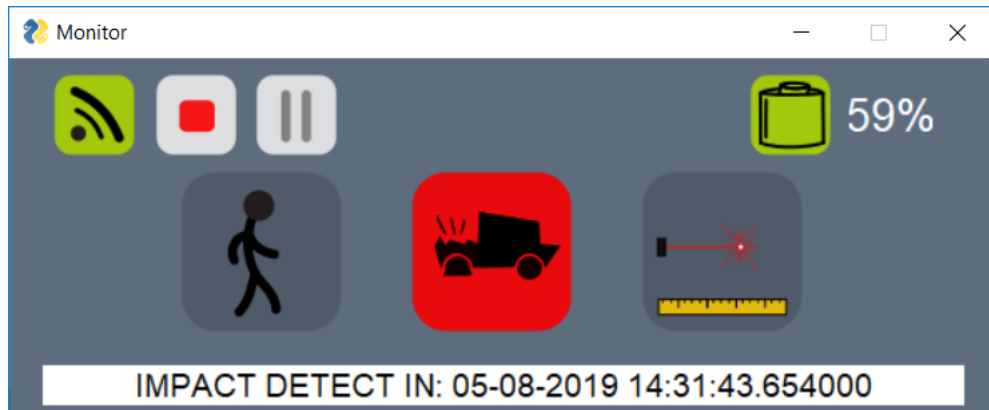
----- DEFINE THRESHOLD TH_dax FOR IMPACT-----
Set new threshold TH_dax, this value must be from: 0-2147483646
[actual = 55555555]:
Previous value left

----- DEFINE THRESHOLD TH_day FOR IMPACT-----
Set new threshold TH_day, this value must be from: 0-2147483646
[actual = 66666666]:
Previous value left

----- DEFINE THRESHOLD TH_daz FOR IMPACT-----
Set new threshold TH_daz, this value must be from: 0-2147483646
[actual = 77777777]:
Previous value left
```

Obr. 9.3: Konsolové rozhraní s rozšířenou nabídkou pro nastavení a výběr přidávaných funkcionalit

Aplikace Monitor byla napsána v jazyce Python 3.7 a pro implementaci grafického uživatelského rozhraní bylo využito balíčku PySimpleGUI³. Aplikace je stabilní a testovaná na operačních systémech Windows 10 a Windows 7. V rámci délky trvání smyčky programu je možný vznik prodlevy mezi událostí a jejím vyhodnocením, čas události pádu či nárazu je dán lokátorem a vzniklá prodleva se zobrazením údaje na něj nemá vliv. Aplikace při spuštění kontroluje, zda-li je umístěna do defaultně



Obr. 9.5: Vzhled aplikace Monitor

známé sítě, v případě že se liší IP adresa sítě serveru je možné ji přenastavit port pro komunikaci, ale musí být nastaven na 5300 jinak aplikace nebude fungovat.



Obr. 9.6: Přehled piktogramů jednotlivých funkcí: šedá = neaktivní stav, zelená = aktivní stav, červená = detekce

Na Obr. 9.5 je prezentován vzhled aplikace Monitor a na Obr.9.6 a 9.7 jsou prezentovány všechny možné signalizační stavy. V levém horním rohu je umístěna signalizace stavu zda probíhá komunikace mezi lokátorem a Monitorem či nikoliv. Směrem doprava se nachází tlačítka pro možnost pořízení vlastního záznamu. V adresáři aplikace pak vznikne soubor s daty nazvaný "recordinglog.dat". V pravém horním rohu je signalizace stavu baterky. Uprostřed jsou piktogramy jednotlivých funkcí: pádu, nárazu a měření vzdálenosti laserem. Spodní část okna aplikace slouží k informování o změřené vzdálenosti případně o poslední detekci pádu či nárazu spolu s časem, kdy se událost přihodila.

³<https://pysimplegui.readthedocs.io/en/latest/cookbook/>



Obr. 9.7: Přehled piktogramů pro signalizaci odpojeného a připojeného lokátoru, tlačítka pro zahájení a ukončení vlastního nahrávání a piktogramy signalizující stav baterie lokátoru: šedá = neznámý, zelená=nabitá, červená=blížící se vybití

10 Akvizice dat s vyhodnocením přesnosti měření vzdálenosti a pojednáním o jeho celkové energetické náročnosti

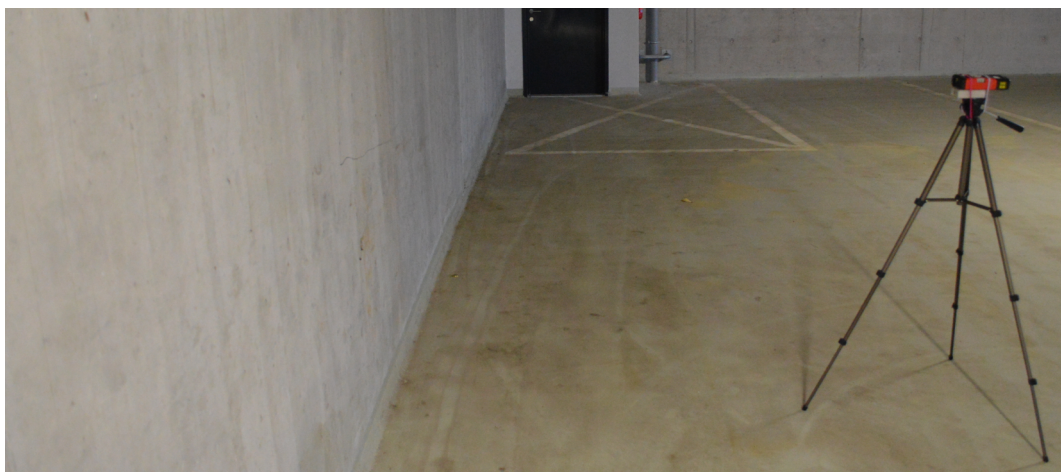
Níže uvedená data jsou pořízena prostřednictvím lokátoru Tag IMU v4r7 s implementovaným senzorem VL53L1X. Konfigurace senzoru VL53L1X při akvizici dat byla následující: mód měření = 2 (dlouhá vzdálenost), délka měření = 200 ms a ROI = 16x16. Zmíněná konfigurace je nalezeným optimem mezi přesností měření a energetickou náročností měření. Nastavení senzoru v průběhu akvizice nebylo měněno pro možnost srovnání dosažených výsledků. Všechna prezentovaná data byla pořízena v prostorách podzemních garáží VUT, při teplotě 7,9 – 8,7 °C. Měření v těchto prostorách bylo zvoleno ze dvou důvodů, prostory se velmi podobají výrobním halám či prostorám skladišť a při akvizici dat bylo možné zajistit prázdné FoV senzoru, které u měření vzdálenosti 4 m odpovídá kruhu o průměru cca 2 m. Při měření nebylo zajištěno konstantních světelných podmínek, důvodem byl způsob osvětlení těchto prostor. Jako referenční měřidlo byl využit svinovací metr odchylka měření senzoru od této referenční hodnoty může být až $\pm 2,4$ cm v závislosti na nepřesnosti odečtu referenční hodnoty. Při vzdálenostech nad 3 m je možná odchylka referenčního měření i ± 10 cm.

V původním plánu měla být referenční hodnota stanovena pomocí komerčně prodávaného multifunkčního zařízení dohledatelného pod IAN 285131 model HG02404 od společnosti POWERFIX, jejímž distributorem je v české republice společnost Lidl. Toto multifunkční zařízení disponuje UZV měřičem vzdálenosti s laserovým zaměřovačem. Přístroj by měl, podle příbalového letáku přístroje, být schopný pracovat v rozmezí od 0,6 m do 16 m. Uvedená šířka ultrazvukového kuželu je asi 6m při vzdálenosti 16 m. Na základě této informace a předpokladu podobnosti by měla být velikost ultrazvukového kuželu při vzdálenosti 4 m menší než FoV laserového měřiče vzdálenosti.¹ Na základě této úvahy je chyba přístroje způsobená například odrazem od země vyloučena. Při prvním měření se, ale ukázal problém s přesností měření tohoto přístroje. První instalace byla postavena na základě údaje z ultrazvukového měřiče do vzdálenosti 2 m od cílové plochy a po přeměření svinovacím metrem se ukázalo, že vzdálenost od cílové plochy je 1,83 m, hodnota naměřená lokátorem se pohybovala v rozmezí 1,829 - 1,837 m. Tento fakt vedl k přehodnocení způsobu stanovení referenční hodnoty a pro následující měření byl využit jako referenční měřidlo svinovací metr.

¹Konkrétní šířka kuželu při vzdálenosti 4 m je $6:4 = 1,5$ m přičemž FoV laserového měřiče vzdálenosti má při stejné vzdálenosti šířku 2 m

10.1 Měření vzdálenosti bez překážek s monotématickým FoV

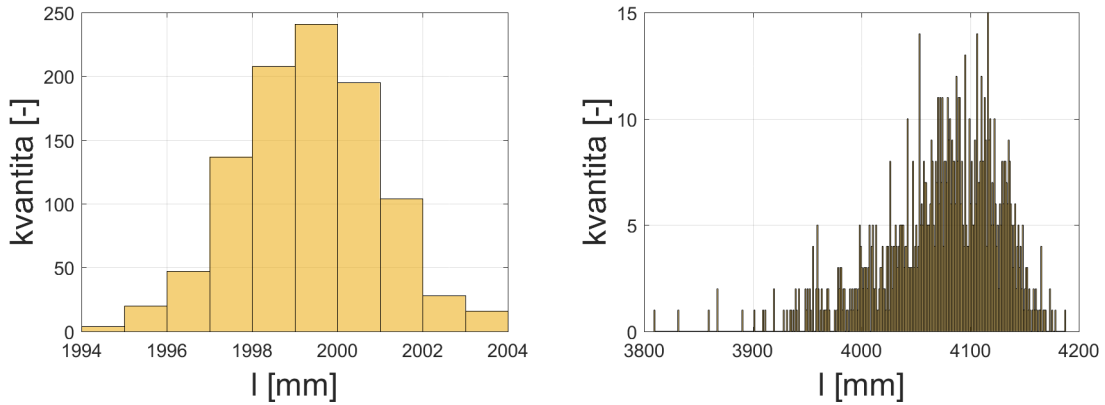
První akvizice probíhala s monotématickým FoV, které realizovala prázdná betonová stěna. Z důvodů velikosti FoV bylo nutné hlídat výšku uložení lokátoru v průběhu měření, aby se tak předešlo případnému zkreslení změřené vzdálenosti odrazem paprsku od země. Obr. 10.1 dokumentuje instalaci při akvizici dat uvedených na Obr.10.2 a 10.3.



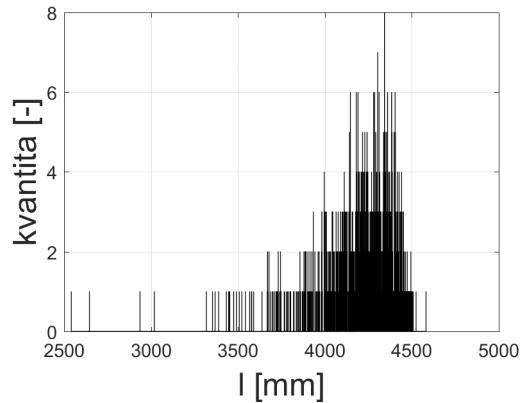
Obr. 10.1: Instalace při měření vzdálenosti 2m pomocí Tagu IMU v4r7 s implementovaným laserovým senzorem VL53L1X

Pro vyhodnocení přesnosti měření vzdálenosti byly z dat vytvořeny histogramy znázorňující četnost výskytu jednotlivých naměřených vzdáleností. Na Obr. 10.2 vlevo je znázorněn histogram naměřených vzdáleností při referenční hodnotě 2 m. Výchylka od referenční hodnoty je v rámci tolerance samotné chyby měření referenčního měření, a proto se toto měření dá označit za velmi přesné. Naměřená vzdálenost lokátorem se pohybovala v rozmezí 1,994 - 2,004 m, změřená vzdálenost ultrazvukem byla při tomto měření 2,16 m. V katalogovém listu [21] laserového měřiče je uvedena dosažitelná chyba okolo 2,5 mm, při nastavení délky měření 200 ms, to je však podmíněno dalšími okolními vlivy, nejvíce záleží na barvě cílového objektu a na světelných podmínkách akvizice.

V případě zvětšení referenční vzdálenosti na 4 m se výchylka měřené vzdálenosti laserem výrazně zvýšila, jak je patrné na Obr. 10.2 vpravo. Naměřené hodnoty lokátorem se pohybovaly v rozmezí 3,8 - 4,2 m, změřená hodnota ultrazvukem byla 4,18 m.



Obr. 10.2: Histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=2$ m (vpravo) a $l=4$ m (vlevo); délka akvizice 1000 vzorků



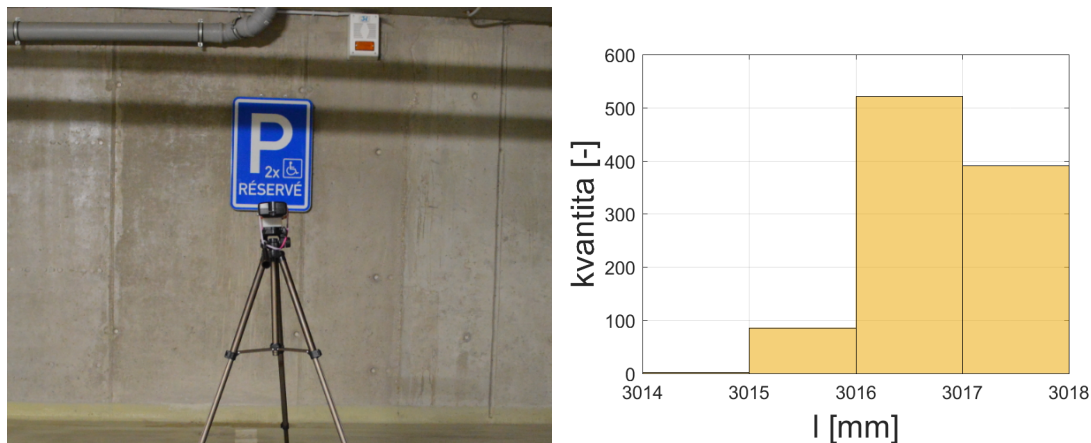
Obr. 10.3: Histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=4,39$ m; délka akvizice 1000 vzorků

Hranice měřitelné vzdálenosti lokátorem byla pomocí referenčního měření stanovena na 4,39 m viz Obr. 10.3. Měření lokátorem této vzdálenosti mělo velmi nepřesné výsledky, hodnoty se pohybovaly v rozmezí 2,5 m - 4,5 m, ultrazvukem byla změřena vzdálenost 4,57 m. Nutno podotknout, že výrobce v katalogovém listu [21] garantuje měření vzdálenosti do 4 m v případě minimálního okolního světla.

Na závěr byl lokátor umístěn do referenční vzdálenosti 5,4 m od cílové plochy za účelem zjištění chování laserového sensoru v případě výrazného navýšení měřitelné vzdálenosti. Sensor vracel převážně hodnotu 0 v některých případech však i náhodné jedno ciferné či dvou ciferné hodnoty, čímž vzniká potřeba ošetření možnosti vzniku takové situace.

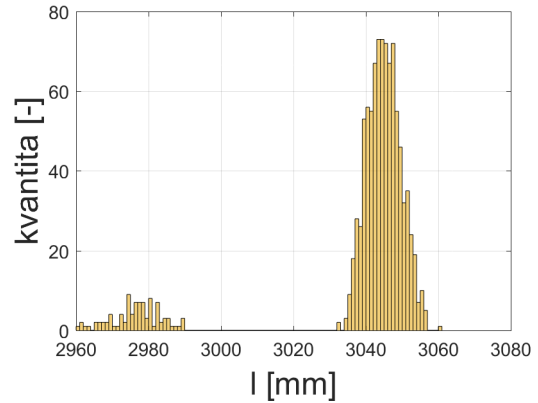
10.2 Měření vzdálenosti 3 m s různorodou scénérií a překážkami

Dalším hodnoceným kritériem při testování přesnosti měření byla schopnost laserového sensoru měřit ve stížených podmínkách, které byly zajištěny nejednotvárnou cílovou plochou či měřením vzdálenosti k objektu který nezakrýval celkovou plochu FoV senzoru. Na následujících obrázcích je v pravo zachycená scénérie při akvizici dat a vlevo histogram četnosti výskytu změřených vzdáleností.



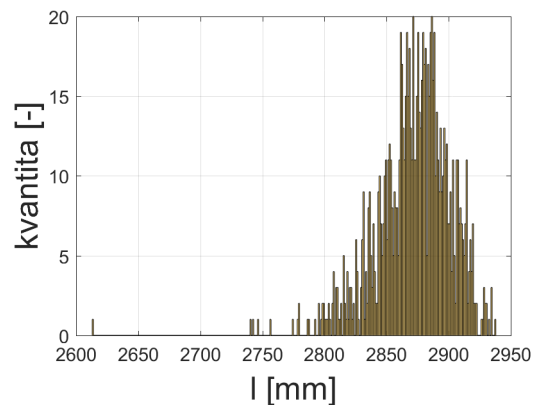
Obr. 10.4: Scénérie měření vzdálenosti, FoV s dopravní značkou (vlevo); histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků

Na Obr. 11.4 je provedeno měření referenční vzdálenosti 3 m s dopravní značkou zasahující do FoV laserového sensoru. Střed FoV laserového sensoru míří 25 cm pod značku. Tloušťka značky je 4,5 cm. Z histogramu je patrná velká přesnost měření, hodnoty zaznamenané lokátorem jsou v rozmezí 3,014 - 3,018 m, celé rozmezí je v rámci chyby referenčního měření. Ultrazvukem změřená vzdálenost činila 3,15 m.



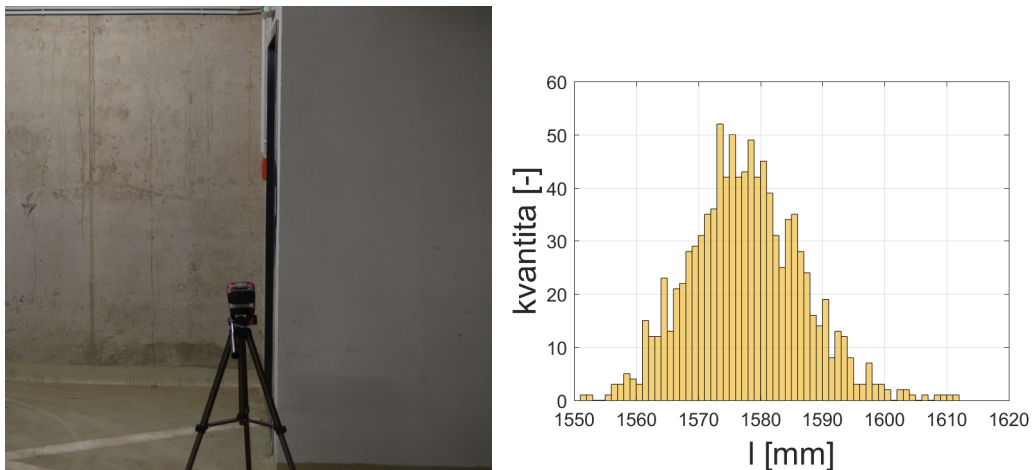
Obr. 10.5: Scénérie měření vzdálenosti, FoV s hasícím přístrojem a trubkou (vlevo); histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků

Na Obr. 10.5 je provedeno měření referenční vzdálenosti 3 m s hasícím přístrojem a trubkami zasahujícími do FoV laserového senzoru. Hasící přístroj vystupuje z cílové plochy maximálně 18 cm, svislá trubka 15 cm a spodní oblouk 32,5 cm. FoV laserového senzoru má střed v prostoru betonového povrchu. Z histogramu je patrné rozdělení naměřených hodnot. Odchylka měření lokátoru od referenční hodnoty je od -4 cm do cca +6 cm z toho se dá usoudit, že ani jeden z předmětů v okolí středu FoV senzoru výrazně nezkreslil výsledek měření přímým odrazem, ale došlo k snížení přesnosti celkového výsledku. Ultrazvukem změřená vzdálenost byla 3,02 m což je o něco přesnější výsledek.



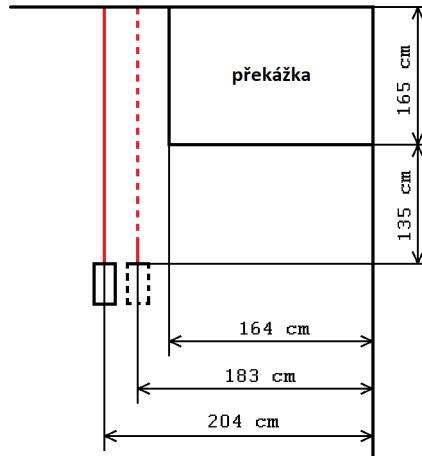
Obr. 10.6: Scénérie měření vzdálenosti, FoV se sloupem (vlevo); histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků

Na Obr. 10.6 je provedeno měření referenční vzdálenosti 3 m (vzdálenost od sloupu k senzoru) s cílovou plochou užší než je FoV laserového měřiče vzdálenosti. Pozadí za sloupem je vzdáleno více než 5 metrů a je tedy senzorem nedetekovatelné. Šířka sloupu je 50 cm. Z histogramu naměřených hodnot je patrná nižší přesnost měření. Rozmezí naměřených hodnot se pohybuje mezi 2,6 - 2,95 m v případě zanedbání jediného výrazně odchylovícího se vzorku můžeme snížit toto rozmezí zhruba o 0,1 m. Tímto měřením je průkazná možnost detekce objektu menšího než je FoV laserového senzoru a určení jeho přibližné vzdálenosti. Což může být za určitých podmínek aplikováno například k monitorování využití nákladového prostoru.



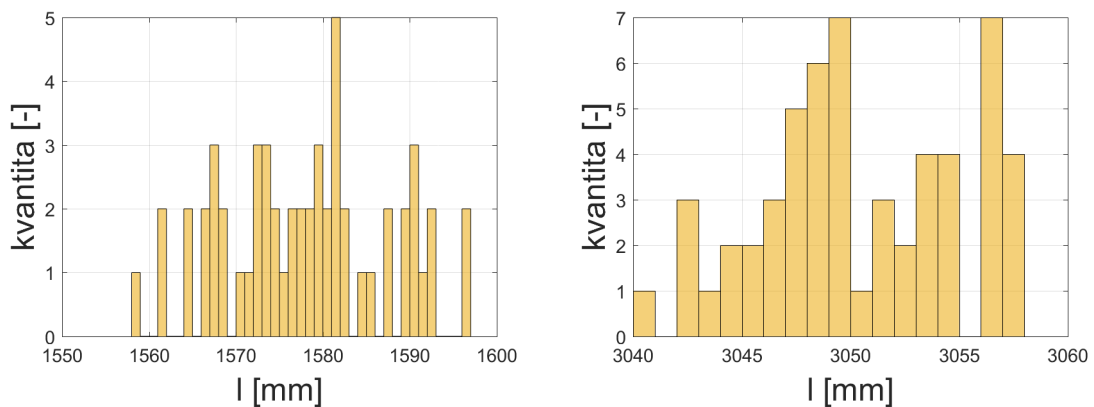
Obr. 10.7: Scénérie měření vzdálenosti, FoV s překážkou (vlevo); histogram naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=3$ m (vpravo); délka akvizice 1000 vzorků

Na Obr. 10.7 je provedeno měření referenční vzdálenosti 3 m při němž je část FoV zakryto překážkou. Pro lepší představu je na Obr. 10.8 situační plán instalace. Histogram na Obr. 10.7 odpovídá měření vyznačenému v situačním plánu čerchovaně. Průměr FoV laserového senzoru byl pro vzdálenost 135 cm (vzdálenost odpovídající umístění překážky od lokátoru) výpočtem stanoven na cca 138 cm. Překážka v tomto případě zakrývala cca 50 cm šířky FoV. Z uvedeného histogramu je patrné, že překážka se stala dominantní objektem ve scéně a změřená vzdálenost s určitou nepřesností odpovídá vzdálenosti k překážce místo k objektu původního zájmu.



Obr. 10.8: Situační plán instalace při měření vzdálenosti s překážkou v FoV senzoru před (čerchovaně) a po posunu lokátoru

Posouváním lokátoru směrem od překážky byla stanovena hranice, kde překážka již neovlivňuje měření viz Obr. 10.8. Překryv FoV laserového senzoru překážkou byl v tomto případě 21 cm. Na Obr. 10.9 je pro srovnání uveden histogram před posunem (vlevo) a po posunutí (vpravo). Měření po oddálení překážky se dá hodnotit jako přesné (nutno podotknout, že délka akvizice v tomto případě činila jen 55 vzorků).

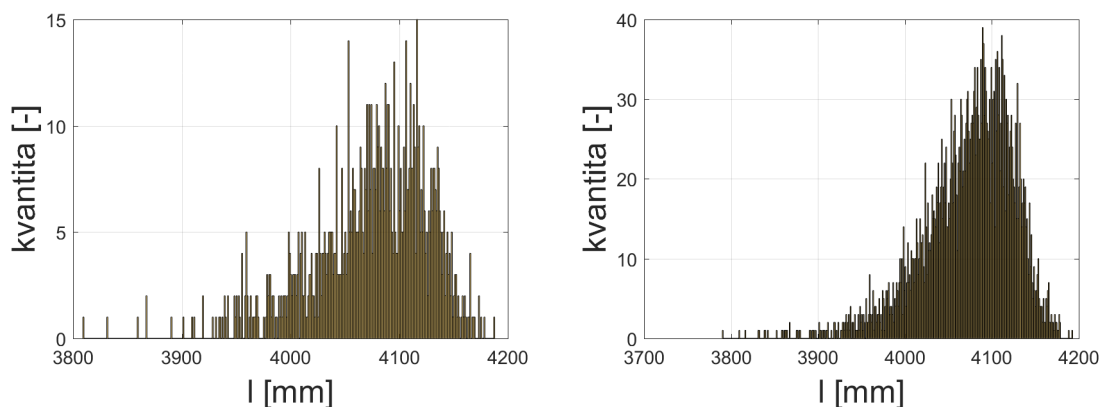


Obr. 10.9: Histogramy naměřených hodnot při měření vzdálenosti l s překážkou, $l=3$ m; překážka ovlivňuje měřenou hodnotu (vlevo); překážka neovlivňuje měřenou hodnotu (vpravo); délka akvizice 55 vzorků

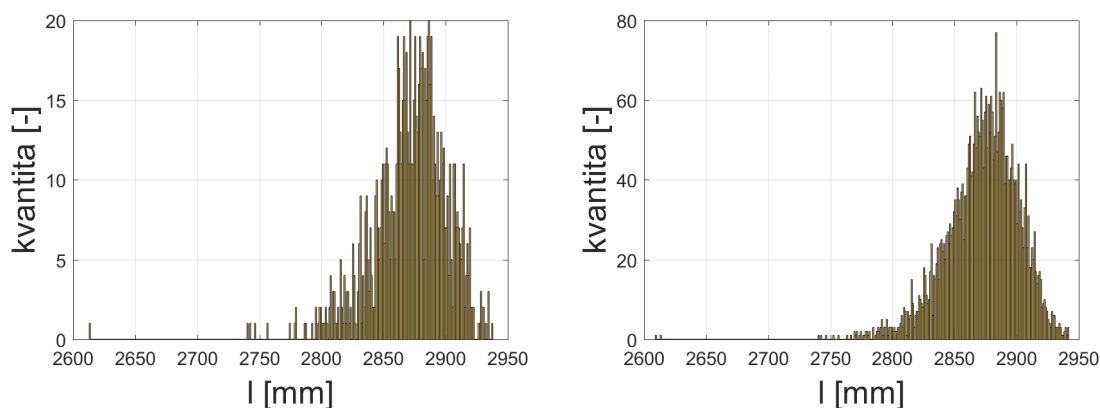
10.3 Vývoj přesnosti měření v závislosti na délce akvizice

V některých případech může délka provozu ovlivňovat měřená data. Na Obr. 10.10 a 10.11 jsou (vlevo) uvedeny histogramy z výše uvedených měření, kde bylo pro srovnání prezentováno jen 1000 vzorků měření (vpravo) jsou histogramy s daty z celého záznamu, který byl i několika násobně delší.

Z histogramů je patrné, že rozmezí naměřených vzdáleností se vlivem delší doby akvizice mění jen nepatrně. Navrhnuté řešení se v tomto směru jeví jako stabilní.



Obr. 10.10: Histogramy naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=4$ m; délka akvizice 1000 vzorků (vlevo); délka akvizice 3439 vzorků (vpravo)

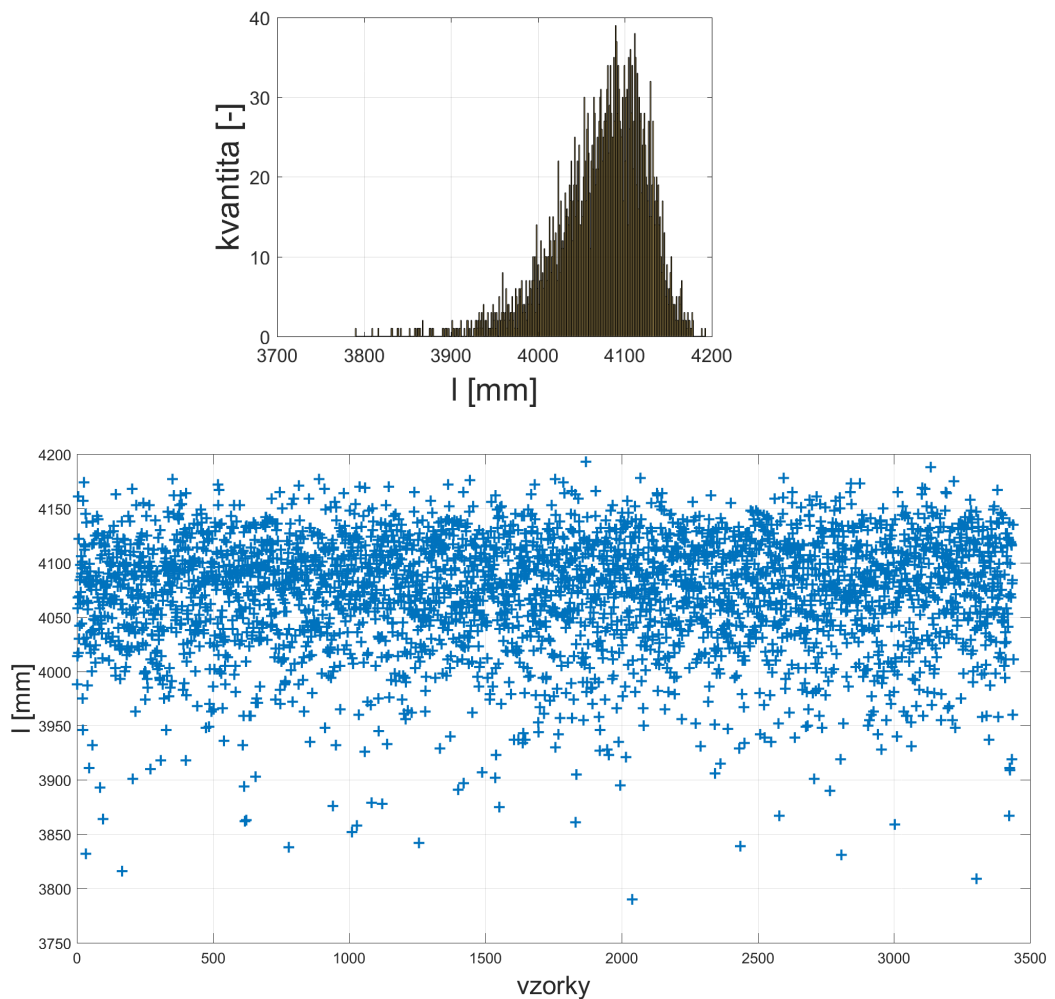


Obr. 10.11: Histogramy naměřených hodnot při měření vzdálenosti l , $l=4$ m; délka akvizice 1000 vzorků (vlevo); délka akvizice 3705 vzorků (vpravo)

10.4 Časový vývoj přesnosti měření

Dalo by se předpokládat, že přesnost měření by mohla být ovlivněna počátečním náběhem senzoru či délkou měření. Z histogramů je patrná malá četnost výskytu některých vzdáleností, které snižují spolehlivost měření. Z tohoto důvodu je na Obr. 10.12 uveden histogram a vývoj měření, na ose x jsou jednotlivé vzorky v původním pořadí v jakém byly pořízeny a na ose y je naměřená vzdálenost těchto vzorků.

Z Obr.10.12 je patrné, že vývoj chybovosti je časově nezávislé a není tudíž možné přesnost měření zvýšit pomocí zkrácením či prodloužením doby akvizice.



Obr. 10.12: Srovnání histogramu s diskretizovaným časovým průběhem měření; s monotóním FoV ve vzdálenosti $l=4$ m; délka akvizice 3439 vzorků

10.5 Dopad měření vzdálenosti na celkovou energetickou náročnost lokátoru

Energetickou náročnost laserového měření vzdálenosti je možné do jisté míry ovlivnit nastavením senzoru a délkou jeho aktivního stavu. Jak už bylo zmíněno v kapitole 8 senzor VL53L1X disponuje pinem XSHUT nímž je možné dát senzor do režimu "HW_standby". V rámci tohoto režimu je maximální odebíraný proud 7 uA. Po zapnutí senzoru a jeho nabootování, které trvá asi 1,2 ms pracuje senzor v režimu "SW_standby", při němž je maximální odebíraný proud 9 uA a v rámci změny velikosti pull up rezistorů je možný nárůst odebíraného proudu až na hodnotu 9,6 uA. Posledním podstatným údajem je proudový odběr v režimu měření s maximální hodnotou 18 mA.

Za předpokladu, že lokátor bude mít nastavený parametr "refresh rate" na 1 s (zprávy z lokátoru při tomto režimu budou chodit 1 za s) a délka měření bude trvat 201 ms, bude energetická náročnost měření vzdálenosti, pro lokátor stanovena výpočtem v příkladu 10.1.

$$\begin{aligned} T &= 1 \text{ s} \\ X_{aktiv} &= 201 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,6 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot 9,6 \cdot 10^{-6} \\ X_{pasiv} &= (1000 \cdot 10^{-3} - (201 \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-6})) \cdot 7 \cdot 10^{-6} \\ I_{prum} &= \frac{X_{aktiv} + X_{pasiv}}{T} \approx 3,624 \text{ mA} \end{aligned} \tag{10.1}$$

Kde T je velikost opakující se periody, X_{aktiv} a X_{pasiv} jsou pomocné proměnné pro přehlednější zápis obsahující hodnoty v aktivním a neaktivním režimu senzoru, I_{prum} je průměrná hodnota odebíraného proudu senzorem VL53L1X v mA. Uvedený výpočet se vztahuje k měření vzdálenosti realizovaného vytvořenou funkcí `measure_Lidar()`.

Aktivní část energetické náročnosti lokátoru, způsobené měřením vzdálenosti, se dá snížit zkrácením doby měření senzoru, ale zároveň se tím sníží buď přesnost měření na dlouhé vzdálenosti nebo dojde ke zkrácení měřitelných vzdáleností.

V případě deaktivace funkce měření vzdálenosti bude běžná spotřeba lokátoru navýšena o průměrnou hodnotu odebíraného proudu senzorem VL53L1X, velikost tohoto odebíraného proudu je v rozmezí 3 až 7 uA.

11 Diskuze získaných výsledků a zhodnoťte účinnost přidaných funkcionalit a využitelnost navrženého řešení.

11.1 Dosažené výsledky z detekce pádů po implementaci

Po rozšíření funkcionality lokátoru o detekci pádů, bylo provedeno několik měření pro možnost vyhodnocení jeho účinnosti. Figurantem pro testování funkčnosti algoritmu byl 182 cm vysoký muž, vážící 90 kg. Figurant měl lokátor připevněn k paži pomocí šátku. Umístění lokátoru, v době klidových stavů akvizice, bylo ve výšce 120-138 cm nad zemí.

Pro získání prahových koeficientů byl vytvořen 5 minutový záznam, při kterém figurant vykonával sérii cviků, skládající se z dřepů, kliků, výskoků, chůze, běhu, lehu, stoje a sedu. Ze záznamů byly vypočítány diference tlaků, z barometru, a velikosti kvantifikátorů AM . Nalezením maximální hodnoty diference tlaků a velikosti upraveného kvantifikátoru AM , ve zpracovaných datech záznamu, byly zajištěny hodnoty pro následnou tvorbu prahových hodnot. V rámci úpravy velikosti kvantifikátoru je vynechán krok odmocnění a v algoritmu firmwaru jsou porovnávány prahové hodnoty označované jako AM ve skutečnosti AM^2 . Nutnost této úpravy vychází ze snahy vyhnout se v lokátoru výpočtům odmocnin, kterým se při práci s mikrokontroléry doporučuje vyhýbat. Dobré by bylo ještě zmínit, že při tvorbě prahových hodnot je nutné pracovat s hodnotami akcelerometru v surovém stavu proto je v případě užití dat z aplikace Monitor nutné tyto hodnoty opět přepočítat na základě vztahu 2.1. Prahovou hodnotu rozdílů tlaků, získanou opět z dat pořízených aplikací Monitor, je pro změnu nutné vynásobit 100 pro získání surového stavu dat, vhodného k porovnávání. Vypočítané prahové hodnoty je opět vhodné navýšit o 5 % v případě diference tlaků a o 10 % prah kvantifikátoru AM , respektive AM^2 . Výsledné hodnoty prahů vhodných pro nahrání do lokátoru jsou v tomto případě $TH_{dP} = 640$, $TH_{AM} = 142640078$

Z 14 detekcí pádů bylo skutečných pádů 10. Algoritmus se jeví jako funkční, ale není v aktuální podobě použitelný ke komerčnímu monitorování bezpečnosti lidí. Pro zajištění větší spolehlivosti by bylo nutné provést rozsáhlejší sběr dat a na základě nich pak zvolit případnou další úpravu firmwaru.

11.2 Dosažené výsledky dat z detekce nárazů po implementaci

Po rozšíření funkcionality lokátoru o detekci nárazu, bylo provedeno několik měření pro možnost vyhodnocení jeho účinnosti. Před zahájením testovacích měření bylo, ale nutné stanovit prahové hodnoty.

Stanovení prahových hodnot bylo provedeno na základě 5 minutového záznamu, při kterém byl model automobilu vystavován extrémním podmínkám zrychlení vzniklých prudkým zatočením či zabrzděním. V průběhu celé akvizice, ale nesmělo dojít k žádné kolizi. Ve srovnání s akvizicemi provedenými v rámci vývoje detekčních algoritmů nebyl lokátor v přímém kontaktu s vibrující karosérií vozidla. Prostor mezi karosérií automobilu a lokátoru by vyplněn tlumícími podložkami z molitanu. V pěti minutovém záznamu byly nalezeny maximální velikosti diferencí ve směrech os x , y a z . Hodnoty těchto diferencí byly navýšeny o 10% a nahrány do lokátoru jako prahové hodnoty TH_dax , TH_day , TH_daz .

Následná akvizice dat měla docela velký počet chybných detekcí v ose y , chybivost při nárazech byla podstatně menší než v případě prudkého brzdění, které bylo detekováno také jako náraz. Po opětovném navýšení prahové hodnoty v ose y o dalších 5%, byl proveden nový test. Z 11 detekovaných nárazů bylo 10 skutečných což je skutečně dobrý výsledek.

Prahové hodnoty diferencí při tomto testu byly $TH_dax=2900$, $TH_day=2800$, $TH_daz=8400$.

V rámci testování byla vypořádována drobná souvislost mezi stavem baterií modelu automobilu a počtem falešně detekovaných nárazů, který s nižší úrovní napětí baterií klesal. V rámci zvýšení účinnosti by se algoritmus detekce nárazů mohl rozšířit o sledování stavu baterie automobilu a na základě něj adaptovat velikost prahových hodnot.

11.3 Dosažené výsledky dat s implementovaným laserovým měřičem vzdálenosti

Dosažené výsledky laserového měřiče vzdálenosti jsou podrobně popsány v kapitole 10. Přesnost měření vzdálenosti lokátorem, byla závislá na barvě, materiálu a velikosti objektu ke kterému byla vzdálenost měřena. Data změřená pomocí lokátoru byla ve většině případů přesnější než data z komerčně prodáváného ultrazvukového měřiče. Nevýhoda laserového měření vzdálenosti je velká citlivost na blízké a silné zdroje světla v okolí měření. Zajištěním dobrých světelných podmínek se výrazně zvyšuje přesnost měření.

11.4 Zhodnocení účinnosti přidaných funkcionalit a využitelnost navrženého řešení

Z kvantitativního hlediska není aplikace detekce pádů, na základě dat získaných z barometru a akcelerometru, moc účinná. Návrh řešení je ale funkční a mohl by sloužit, místo k monitorování lidí, k monitorování předmětů, při kterém se předpokládá i vyšší účinnost navrženého řešení z důvodů menší pohyblivosti předmětů ve srovnání s lidským tělem.

Detekce nárazů má relativně vysokou účinnost v případě, že je dostatek vstupních dat pro správné stanovení prahových hodnot. Aktuální řešení detekce nárazů vyhodnocuje nárazy v osách x y z , což umožňuje ze záznamu zpětně analyzovat průběh nárazu a zvyšuje se tím možnost zjištění příčiny nárazu. Využití navrženého řešení by mohlo najít své uplatnění ve skladech, kde by se pomocí dali nalézt příčiny

Nová funkcionalita lokátoru sloužící k měření vzdálenosti má účinnost závislou na podmínkách měření. V případě dobrých světelných podmínek a hladkých, rovných površích se dá účinnost tohoto řešení klasifikovat jako vysoká viz Obr. . V rámci specifikace zadání je možné navržené řešení využít v případě vysoko zdvižných vozíků se zdvihem do 4 m, a to v případě rovných čistých podlah. Větší využitelnost má navržené řešení v oblasti detekcí překážek, například pro monitorování naloženosti menších skladových přívěsů.

Aktuální koncepce řešení je jednoduchá a uživatelsky přívětivá a není problém ji v případě domnělé možnosti využití, při konkrétní situaci, rychle otestovat v provozu a následně posoudit její využitelnost.

12 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo rozšíření funkcionality lokátoru, konkrétně Tag IMU v4r7, určeného pro pozičního systém reálného času od společnosti Sewio. V rámci práce byla funkcionality lokátoru rozšířena o měření vzdálenosti laserem a detekci pádů a nárazů.

V první části práce je popsána problematika spojená s detekcí pádů a nárazů spolu s principem fungování inerciálních senzorů.

Kapitola prezentuje data pořízená z lokátoru spolu s průběhem jejich akvizice. Na základě těchto dat byl proveden návrh algoritmů zohledňující technické možnosti lokátoru a s důrazem na minimální možnou spotřebu. Dále byla provedena kalkulace spotřeby navrženého algoritmu na základě katalogových listů senzorů. Předpokládaná velikost proudového odběru v aktivním režimu měření pro detekci nárazů byla 490 uA s využitím uspávacího režimu byla plánovaná spotřeba 19,75 uA, tento režim, ale nebyl nakonec v rámci realizace využit z důvodů možného vzniku softwarových kolizí. Obdobně tomu bylo při kalkulaci proudového odběru algoritmu detektoru pádu, kde byl proudový odběr stanoven na 650 uA v případě užití spánkových režimů byla hodnota snížena na 219,75 uA.

V kapitole 7.1 je stručně popsán princip funkčnosti laserového měření vzdálenosti s popisem některých specifík použitého senzoru VL53L1X, kterým je toto měření realizováno.

Po seznámení s principem měření vzdálenosti laserem následuje kapitola 8 obsahující kompletní postup integrace senzoru pro měření vzdálenosti spolu s popisem vývoje kompletního programového vybavení včetně aplikace Monitor, sloužící k zjednodušené práci s lokátorem jež má implementovaný firmware vzniklý rovněž v rámci této diplomové práce.

V rámci kapitoly 10 jsou prezentována data z lokátoru s rozšířenou funkcionalitou o měření vzdálenosti pomocí laseru a dopad této přidané funkce na celkovou energetickou náročnost lokátoru.

V závěru práce je uvedený komentář k dosaženým výsledkům spolu se subjektivním hodnocením účinnosti přidaných funkcionalit a s uvedenými možnostmi využití navrženého řešení.

Literatura

- [1] YAZDANDOOST, K.Y. a R. KOHNO. *Ultra wideband antenna*. IEEE Communications Magazine [online]. 2004, **42**(6), S29-S32 [cit. 2018 11 21]. DOI: 10.1109/MCOM.2004.1304230. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1304230/>>
- [2] WANG, Fu-Tai, Hsiao-Lung CHAN, Ming-Hung HSU, Cheng-Kuan LIN, Pei-Kuang CHAO a Ya-Ju CHANG. *Threshold-based fall detection using a hybrid of tri-axial accelerometer and gyroscope*. Physiological Measurement [online]. 2018, **39**(10) [cit. 2018. 11. 10]. DOI: 10.1088/1361-6579/aae0eb. ISSN 1361-6579. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/0967-3334/39/i=10/a=105002?key=crossref.37722d9fd0e66e3c78f431ff1b88b4e0>>
- [3] CHEN, Diansheng, Yu ZHANG, Wei FENG a Xiyu LI. A wireless real-time fall detecting system based on barometer and accelerometer. In: 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 1816-1821 [cit. 2019. 11. 10]. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6361022. ISBN 978-1-4577-2119-9. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6361022/>>
- [4] IBRAHIM, Hamdy A., Ahmed K. ALY a Behrouz H. FAR. *A system for vehicle collision and rollover detection*. In: 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 1-6 [cit. 09. 11. 2018]. DOI: 10.1109/CCECE.2016.7726720. ISBN 978-1-4673-8721-7. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7726720/>>
- [5] InvenSense Inc. [online katalogový list]. *PS-MPU-9250A-01-v1.1*. ©2014 [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>>
- [6] InvenSense Inc. [online katalogový list]. *MEMS Motion Handling and Assembly Guide* ©2014 [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MEMS%20Motion%20Handling%20and%20Assembly%20Guide.pdf>>
- [7] Infineon Technologies AG. [online katalogový list]. *Infineon-DPS310-DS-v01_00-EN*. © 2016 Infineon Technologies AG. [cit. 17. 11. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-DPS310-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462576f34750157750826c42242>

- [8] BRICE Tim, HALL Todd [online dokument]. *Pressure Altitude* National Weather Service [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.weather.gov/media/epz/wxcalc/pressureAltitude.pdf>>
- [9] Sewio Networks, s.r.o. [online katalogový list]. *AN01_Sensors_rev1.3 (1)*. [cit. 17. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.sewio.net/download/an01-sensors-guide/>>
- [10] Sewio Networks, s.r.o. [online katalogový list]. *Tag IMU User Manual_rev1.2*. [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.sewio.net/download/tag-imu-user-manual/?wpdmdl=42080>>
- [11] Sewio Networks, s.r.o. [online katalogový list]. *Factsheet_Tag IMU_v1.2_1a*. [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.sewio.net/download/tag-imu-factsheet/?wpdmdl=42082>>
- [12] Sewio Networks, s.r.o. [online katalogový list]. *Tag IMU Datasheet_rev1.2*. [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.sewio.net/download/tag-imu-datasheet/?wpdmdl=42084>>
- [13] Sewio Networks, s.r.o. [online katalogový list]. *RTLS TDoA kit - Install Guide_rev1.4*. [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.sewio.net/download/rtls-tdoa-kit-install-guide/?wpdmdl=41925>>
- [14] OLEJÁR, Martin [online]. *Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877* [cit. 10. 11. 2018] Dostupné z URL: <<https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>>
- [15] VOJÁČEK, Antonín [online]. *Integrované MEMS GYROSKOPY | Automatizace.HW.cz* [cit. 10. 11. 2018] Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>>
- [16] VOJÁČEK, Antonín [online]. *Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické | Automatizace.HW.cz* [cit. 10. 11. 2018] Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>>
- [17] LAWRENCE, Anthony. *Modern inertial technology: navigation, guidance and control*. New York: Springer-Verlag, 1993. ISBN 0-387-97868-2.
- [18] MANN, Burkhard. *C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky ...* Praha: BEN - technická literatura, 2003. μ C & praxe. ISBN 80-7300-077-6.

- [19] CROCKFORD, Douglas [online]. *JSON, How JavaScript Works* [cit. 10. 11. 2018] Dostupné z URL: <<https://www.json.org/>>
- [20] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, *ed. Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [21] STMicroelectronics. [online katalogový list]. *DocID031281 Rev 3* © 2018 STMicroelectronics. [cit. 11. 3. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l1x.pdf>>
- [22] STMicroelectronics. [online uživatelský manuál]. *UM2510 - Rev 1* © 2018 STMicroelectronics. [cit. 11. 3. 2019]. Dostupné z URL: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group1/63/e0/7d/f1/0e/52/4d/cd/DM00562924/files/DM00562924.pdf/jcr:content/translations/en.DM00562924.pdf>
- [23] STMicroelectronics. [online aplikační poznámka]. *AN5191 - Rev 1* © 2018 STMicroelectronics. [cit. 11. 3. 2019]. Dostupné z URL: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/53/ea/8b/72/2d/07/4f/21/DM00516219/files/DM00516219.pdf/jcr:content/translations/en.DM00516219.pdf>
- [24] STMicroelectronics. [online katalogový list]. *DocID031498 Rev 1* © 2018 STMicroelectronics. [cit. 11. 3. 2019]. Dostupné z URL: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group0/84/2e/ad/4a/c9/84/45/e5/DM00475642/files/DM00475642.pdf/jcr:content/translations/en.DM00475642.pdf>
- [25] STMicroelectronics. [online dokumentace]. *UM2510 - Rev 1 - December 2018* © 2018 STMicroelectronics. [cit. 11. 3. 2019]. Dostupné z URL: <https://www.st.com/content/st_com/en/products/embedded-software/proximity-sensors-software/stsw-img009.html>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

a	hodnota zrychlení v jednotkách $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
a_{raw}	hodnota zrychlení získaná z akcelerometru MPU9250
g_{dyn}	dynamický rozsah akcelerometru v jednotkách g
g	tíhové zrychlení $g = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ [17]
ω	úhlová rychlost $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ω_{raw}	hodnota úhlové rychlosti získané z gyroskopu MPU9250
ω_{dyn}	dynamický rozsah gyroskopu v jednotkách $^{\circ}/\text{s}$
$a_x(i)$	zrychlení ve směru osy x
$a_y(i)$	zrychlení ve směru osy y
$a_z(i)$	zrychlení ve směru osy z
$\omega_x(i)$	úhlová rychlost při rotaci kolem podélné osy x (roll)
$\omega_y(i)$	úhlová rychlost při rotaci kolem příčné osy y (pitch)
$\omega_z(i)$	úhlová rychlost při rotaci kolem svislé osy z (yaw)
$AM(\mathbf{i})$	acceleration magnitude
$ACM(\mathbf{i})$	acceleration cubic-product-root magnitude
$AVCM(\mathbf{i})$	angular velocity cubic-product-root magnitude
TDoA	Time Difference of Arrival
RTLS	Real-Time Location System
UWB	Ultra-wideband
MEMS	Micro Electro-Mechanical Systems
IMU	Inertial Measurement Unit
I²C	Internal-Integrated-Circuit Bus
ADL	Activities of Daily Life
Δh	absolutní nadmořská výška v m
h	absolutní nadmořská výška v m
T	diskrétní doba, odpovídá počtu vzorků délky trvání této doby
P	tlak v hPa
GPS	Global Positioning System
UDP	User Datagram Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
FoV	Field of View
ROI	Region of Interest
ToF	Time of Flight
MSB	Most Significant Bit
LSB	Least Significant Bit

Seznam příloh

A Použitý script pro první akvizici dat	76
B Obsah přiloženého CD	79

A Použitý script pro první akvizici dat

```
##### import potrebnych modulu #####

import socket
import numpy as np
import simplejson as json
import binascii
import dateutil.parser

##### parsovaci funkce #####
def parse(message):
    message = message.decode('ASCII')
    message = \
str(message[message.index('{'):message.rindex('}')+1])
    js = json.loads(message)
    data = {}
    values = {}

    #filtrace paketu se zpravami o stavu lokatoru
    if len(js['datastreams'])>4:

        #hledani dat dle popisku

        for key in ['acc', 'gyro', 'temperature', 'pressure']:
            values[key] = list(filter(lambda x: x['id'] == key, \
js['datastreams']))[0]['current_value']
            values[key] = \
[float(x) for x in values[key].split(";") if x!=0]

        # ukladani dat do pole data

        data['time'] = \
dateutil.parser.parse(js['datastreams'][0]['at'])
        data['accX'] = values['acc'][0]
        data['accY'] = values['acc'][1]
        data['accZ'] = values['acc'][2]
        data['gyrX'] = values['gyro'][0]
        data['gyrY'] = values['gyro'][1]
        data['gyrZ'] = values['gyro'][2]
        data['temper'] = values['temperature'][0]
        data['pressureB'] = values['pressure'][0]
    else:
        data=0
```

```

        #vraceni zpracovanych dat
        return data
##### funkce pro prijem dat #####
def data_recieving():
    try:
        # 4096 je velikost bufferu
        message, addr =sock.recvfrom(4096)
        return message
    except socket.timeout:
        # zprava v pripade dlouheho cekani na data
        print("Tag is lost")
        message=b'0'
        return message

##### hlavni program #####

UDP_IP = "192.168.225.5" #nastaveni IP adresy
UDP_PORT = 5300          #nastaveni portu

# UDP
sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
sock.bind((UDP_IP, UDP_PORT))

# otevreni souboru pro ukladani dat z akvizice
with open("output.dat","a") as f:
    # nekonecna smycka pro akvizici dat
    while True:
        message=data_recieving() #prijem zpravy
        m=parse(message) #parsovani prijate zpravy

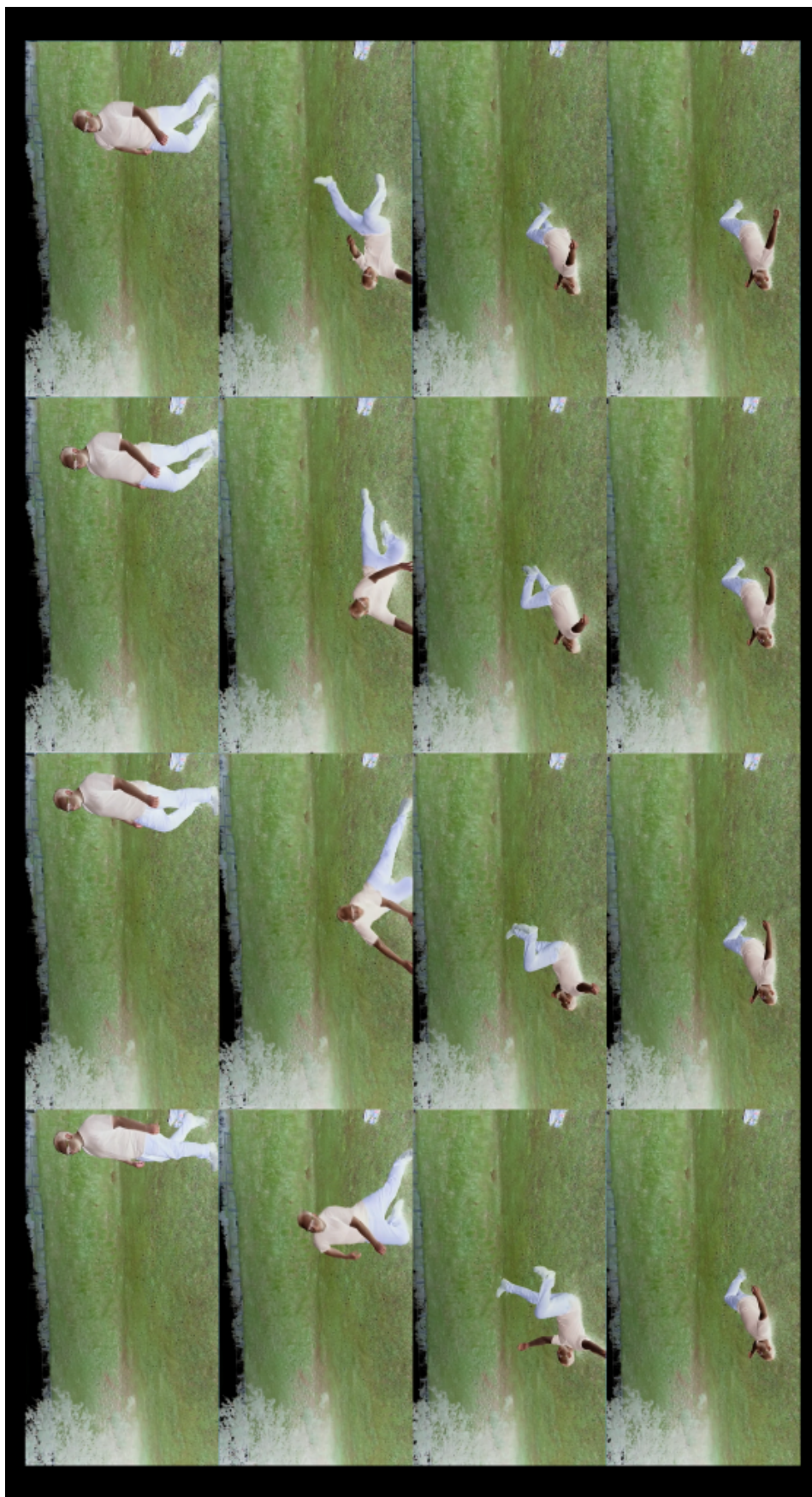
        if m!=0:

            ##### vypis dat do konzole #####

            print(m['time'],\
                  "akcelerometr:",m['accX'],m['accY'],m['accZ'],\
                  'gyroskop:',m['gyrX'],m['gyrY'],m['gyrZ'],\
                  'teplota:',m['temper'],'tlak',m['pressureB'])

            ## ulozeni dat z akvizice do souboru "output.dat" ##
            f.write('{:4.18f} {:4.18f} {:4.18f} {:4.18f} {:4.18f} \
                   {:4.18f} {:4.18f} {:4.18f}\n'.format(m['accX'],\
                   m['accY'],m['accZ'],m['gyrX'],m['gyrY'],m['gyrZ'],\
                   m['temper'],m['pressureB']))
            f.close() # zavreni souboru

```



Obr. A.1: Záznam průběhu pádu; uvedené snímky jsou pořízeny z jednoho video záznamu se vzorkovací frekvencí 120 fps, snímky jsou uspořádány postupně zleva doprava od prvního snímku je každý následující 20 snímek z pořízeného video záznamu.

B Obsah příloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář příloženého CD
├── Firmware ..... vytvořený firmware pro Tag IMU v4r7 v rámci DP
├── Knihovny ..... vytvořené knihovny v rámci DP
│   ├── Detection.c
│   ├── Detection.h
│   ├── Lidar.c
│   └── Lidar.h
├── Monitor.zip ..... aplikace Monitor vytvořená v rámci DP
├── Readme.txt ..... soubor s popisem obsahu CD
└── xstude14_diplomovaprace.pdf ..... text diplomové práce
```