



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA POČÍTAČŮ

Bakalářská práce

Komunikační moduly pro senzorové sítě

Štěpán Remeš

vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Pačes Ph.D.

studijní program: Kybernetika a robotika

obor: Systémy a řízení

Praha, květen 2018

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra počítačů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Remeš Štěpán**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Komunikační moduly pro senzorové sítě**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši bezdrátových modulů vhodných pro realizace bezdrátových sítí.
2. V praktické části práce proveďte analýzu variant SW pro modul RowingNetworks WiFly a aktualizujte SW v modulech 3Dbox.
3. Navrhněte možnost vylepšení modulu 3Dbox pomocí jednotky Sensortile pro kterou realizujete základní SW vybavení umožňující spolupráci s existujícím frameworkem.

Seznam odborné literatury:

- [1] Emidio Marchitto, Small Satellite Platform For Illustrating Principles Of Spacecraft Stabilization, 2012, CVUT
[2] Vedral, J.; Fischer, J., „Elektronické obvody pro měřicí techniku,“ Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, vydání 2., 340 s., ISBN 80-01-02966-2.

Vedoucí: doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.«vedouci_katedry_jm»
vedoucí katedry

«dekan_jm»
děkan

V Praze dne 21. 2. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Pačesovi Ph.D., za trpělivost, věnovaný čas, motivaci a cenné rady při vypracování mé bakalářské práce. Taktéž bych rád poděkoval mé rodině za podporu v průběhu celého studia.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je provést rešerši dostupných modulů pro realizace bezdrátových sítí. Následně analyzovat SW pro modul RowingNetworks WiFly 131 a stávající software aktualizovat pro modul 3Dbox. Další částí bakalářské práce je revize stávajícího modulu 3Dbox pomocí jednotky SensorTile od společnosti STMicroelectronics z důvodů minimalizace celého 3Dbox, pro který realizují SW umožňující komunikaci se senzory a spolupráci s již existujícím frameworkem na systému Windows.

Abstract

The aim of this bachelor work is make search available modules for realization of wireless networks. After that analyze SW for module RowingNetworks WiFly 131 and update actual software for module 3Dbox. Another part of bachelor work is renew of current module 3Dbox with SensorTile made by STMicroelectronic, to minimalize whole 3Dbox, for which i realize SW to make available communication between sensors and existing framework on PC for system Windows.

Obsah

Seznam obrázků	ix
1 Úvod.....	1
2 Senzorové sítě a její komunikační moduly	3
2.1 Historie	3
2.2 Evoluce senzorových sítí	4
2.3 Topologie bezdrátových sítí	6
2.3.1 Kruhová (Ring).....	6
2.3.2 Smíšená s částečným a úplným propojením (Mesh)	6
2.3.3 Star	6
2.3.4 Point-to-Point (Line).....	7
2.3.5 Tree	7
2.4 Senzorový uzel.....	8
2.5 Rozhodující parametry	10
2.5.1 Dosah	10
2.5.2 Spotřeba energie.....	10
2.5.3 Velikost sítě (počet uzlů).....	10
2.5.4 Frekvence	10
2.5.5 Objem přenosu dat	10
2.6 Standardy	11
2.6.1 Bluetooth (IEEE 802.15.1)	11
2.6.2 ZigBee (IEEE 802.15.4)	11
2.6.3 WiFi (802.11).....	12
2.6.4 Závěr.....	13
3 Motion capture systémy.....	14
3.1 Aspekty určující kvalitu MoCap	14
3.1.1 Latence.....	14
3.1.2 Přesnost	14
3.1.3 Obnovovací frekvence	14
3.1.4 Rozptyl	15
3.2 Rozdělení dle zpracování dat	15
3.2.1 Online systémy.....	15
3.2.2 Offline systémy	15
3.3 Rozdělení dle snímání pohybu	16
3.3.1 Optické snímací systémy.....	16

3.3.2	Magnetické snímací systémy	19
3.3.3	Mechanické snímací systémy	20
3.3.4	Inerční snímací systémy	21
3.3.5	Výrobci inerciálních systémů	22
3.3.6	Další snímací systémy	24
4	Existující inerciální systém ČVUT	25
4.1	Problémy a nedostatky předcházejících verzí.....	25
5	Nový systém.....	27
5.1	Návrh řešení a požadavky	27
5.1.1	Senzorová technika	27
5.1.2	Přenos dat	27
5.1.3	Baterie.....	28
5.1.4	Ochranné pouzdro pro celý modul	28
5.2	Řešení	29
5.2.1	Hardware - Senzory.....	29
5.2.2	Baterie a napájení	32
5.2.3	Realizace softwaru pro jednotku SensorTile	34
5.2.4	Komunikace.....	39
5.2.5	Nový modul 3Dbox.....	41
5.2.6	Ověření funkce	45
5.2.7	Návod k použití	47
6	Závěr	48
	Použitá literatura	50

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: JEDNA Z PRVNÍCH DISTRIBUOVANÝCH SÍTÍ[41]	3
OBRÁZEK 2: VÝVOJ SENZOROVÝCH UZLŮ[41]	4
OBRÁZEK 3: NĚKTERÉ MECHANICKÉ PRVKY MEMS - OZUBENÁ SOUKOLÍ (VLEVO) NEBO PRUŽNÝ ELEMENT (VPRAVO)[42]	4
OBRÁZEK 4: NEJVÝZNAMNĚJŠÍ VÝROBCI MEMS SEŘAZENÍ DLE ROČNÍHO OBRATU [43]	5
OBRÁZEK 5: TOPOLOGIE BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ - 1)KRUHOVÁ 2)SMÍŠENÁ (ČÁSTEČNĚ) 3)HVĚZDICOVÁ 4)SMÍŠENÁ S ÚPLNÝM PROPOJENÍM 5)LINE (OBVYKLE POUZE POINT-TO-POINT) 6)STROMOVÁ [44]	6
OBRÁZEK 6: TYPICKÁ HARDWAROVÁ ARCHITEKTURA SENZOROVÝCH UZLŮ[45]	8
OBRÁZEK 7: ILUSTRACNÍ OBRÁZEK NÁVRHU STUDIA PRO OPTICKÉ SNÍMACÍ SYSTÉMY OD FIRMY NATURALPOINT, PŘEVZATO Z [18]	16
OBRÁZEK 8: UKÁZKA SNÍMÁNÍ POHYBU BEZ POUŽITÍ ZNAČEK, PŘEVZATO Z [19]	17
OBRÁZEK 9: UKÁZKA PASIVNÍCH ZNAČEK O RŮZNÝCH ROZMĚRECH, PŘEVZATO Z [25]	18
OBRÁZEK 10 AKTIVNÍ ZNAČKA VLEVO KOMPLET, VPRAVO ODDĚLENÁ POLOVINA S EMITORY, PŘEVZATO Z [2]	18
OBRÁZEK 11: OBRÁZEK TYPICKÉHO EXOSKELETU TORSIA SNÍMAJÍCÍ ÚHLY V JEHO KLOUBECH, PŘEVZATO Z [12]	20
OBRÁZEK 12: PRINCIP INERCIÁLNÍHO SNÍMÁNÍ A SNÍMANÁ DATA, PŘEVZATO Z [23]	21
OBRÁZEK 13: PRVNÍ INERČNÍ SNÍMÁNÍ POHYBU ZVÍŘETE FIRMOU XSSENS, PŘEVZATO Z [37]	22
OBRÁZEK 14: PRODUKTY FIRMY SYNERTIAL, VLEVO RUKAVICE S INTEGROVANÝM SENZOROVÝM SYSTÉMEM A VPRAVO KOMPLETNÍ OBLEK COBRA, PŘEVZATO Z [33][7]	23
OBRÁZEK 15: ZÁKLADNÍ SENZOROVÝ SET OF SHADOW MOTION (VLEVO), POUŽITÍ TOHOTO SETU V PRAXI (VPRAVO)[46]	23
OBRÁZEK 16: SESTAVA DODÁVANÁ FIRMOU NOITOM - PERCEPTION NEURON[47]	24
OBRÁZEK 17: UKÁZKA EXISTUJÍCÍHO INERCIÁLNÍHO SYSTÉMU VYTVOŘENÉHO STUDENTEM	25
OBRÁZEK 18: PŮVODNÍ MODUL 3DBOX V POROVNÁNÍ S KRABÍČKOU OD SIREK	26
OBRÁZEK 19: SENZOROVÁ DESKA SENSORTILE, PŘEVZATO Z [31].....	29
OBRÁZEK 20: CRADDLÉ, PODPŮRNÁ DESKA PRO SENSORTILE, PŘEVZATO Z [31]	30
OBRÁZEK 21: OCHRANNÝ MODUL PRO NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ BATERIE, S MOŽNOSTÍ NABÍJENÍ PŘES MINI USB	33
OBRÁZEK 22: CHARAKTERISTICKÝ TVAR ALLANOVY VARIANCE A INFORMACE, KTERÉ Z NÍ LZE VYČÍST[48].....	36
OBRÁZEK 23: NAMĚŘENÉ HODNOTY AKCELEROMETREM V OSE X	37
OBRÁZEK 24: ALLANOVA VARIANCE PRO ZÍSKANÉ HODNOTY Z AKCELEROMETRU V OSE X	37
OBRÁZEK 25: NAMĚŘENÉ HODNOTY AKCELEROMETREM V OSE Y.....	37
OBRÁZEK 26: ALLANOVA VARIANCE PRO ZÍSKANÉ HODNOTY Z AKCELEROMETRU V OSE Y	37
OBRÁZEK 27: NAMĚŘENÉ HODNOTY AKCELEROMETREM V OSE Z.....	38
OBRÁZEK 28: ALLANOVA VARIANCE PRO ZÍSKANÉ HODNOTY Z AKCELEROMETRU V OSE Z.....	38
OBRÁZEK 29: POROVNÁNÍ ALLANOVÝCH VARIANCÍ PRO JEDNOTLIVÉ OSY AKCELEROMETRU Z TÉHOŽ MĚŘENÍ	38
OBRÁZEK 30: JEDNOTKA SENSORTILE - FOTO Z OBOU STRAN S PŘIPÁJENÝMI VODIČI.....	41
OBRÁZEK 31: WI-FI MODUL WIFLY RN131 S PŘIPÁJENÝMI VODIČI KE KOMUNIKACI	41
OBRÁZEK 32: OCHRANNÝ MODUL PRO NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ BATERIE.....	42
OBRÁZEK 33:NÁVRH KRABÍČKY V PROGRAMU GOOGLE SKETCHUP	43

OBRÁZEK 34: PRVNÍ VERZE MODULU 3DBOX	43
OBRÁZEK 35: VÝSLEDNÉ ZAPOUZDŘENÍ MODULU 3D BOX	43
OBRÁZEK 36: VÝSLEDNÝ MODUL - VLEVO OBRÁZEK PRVNÍHO PATRA MODULU, VPRAVO OBRÁZEK DOLE	44
OBRÁZEK 37: ZOBRAZENÍ ZRYCHLENÍ V JEDNOTLIVÝCH OSÁCH, KDY BYLA JEDNOTKA	45
OBRÁZEK 38: DATA Z TŘÍOSÉHO MAGNETOMETRU Z JEDNOTKY SENSORTILE ZAZNAMENANÉ V GRAFU	46

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je aktualizovat nynější podobu modulu 3Dbox, který je již několik let starý a jelikož technika jde každým dnem kupředu, výsledkem by mělo být snížení prostorové náročnosti veškeré elektroniky díky využití jednotky SensorTile. Tuto sensorovou jednotku se pokusím propojit s PC, kde budou data ze sensorů zpracována pomocí již existujícího frameworku. Dále s moduly WiFly od Rowing Networks realizovat bezdrátovou síť pomocí níž bude PC komunikovat s jednotkou ale taktéž zajistit možnost rozšíření o další moduly 3Dbox, které bude možné s PC propojit.

Přesto moduly WiFi nejsou jedinými moduly, jakými lze realizovat síť propojující několik sensorových jednotek s centrální jednotkou, ve které se data zpracovávají. Dokonce lze vytvářet i sítě mnohem složitější. Různé standardy se hodí pro různé využití. Nelze tedy říci, který je obecně nejlepší, ale je dnes možné vhodně vybrat jeden ze standardů pro potřebné používání. Všechny tyto bezdrátové sensorové sítě však lze sloučit pod zkratkou WSN (Wireless sensors network).

Taktéž zaznamenávání pohybu pomocí sensorů připevněných na těle je jeden z vícero způsobů, jakým lze záznam vytvořit. S postupující dobou a rozvojem elektroniky vznikají další a další způsoby zaznamenávání a digitalizace pohybů. Různé způsoby zaznamenávání a zpracování mají své výhody a také nevýhody. Přes všechny odlišnosti těchto systémů se sjednocují pod názvem Motion Capture (zkráceně MoCap).

V dnešní době je spektrum využití zaznamenávání pohybu poměrně široké, například ve filmech, počítačových hrách [10], sportech, medicíně, armádě a jistě lze nalézt mnoho dalších odvětví, kde by bylo možné MoCap využít. Tato problematika mě zaujala, jelikož závodně plavu a od malička mám rád počítačové hry. Překvapuje mě, jak až je možné přiblížit virtuální realitu ke skutečnosti.

Z mého pohledu je nejatraktivnější sport a konkrétně plavání, kde je podrobný záznam pohybu a následná analýza velmi důležitým prvkem ke zlepšení. Aktuálně nejpoužívanější jsou proudové kanály [25], kde dochází ke snímání pohybu kamerami a následné analýze. Dalšími pokusy jak snímat pohyb při plavání, jsou kamerovým

systemem vybavené celé plavecké bazény a ke snímání dochází při běžném plavání i mimo klasický kanál pro snímání určený[21]. Pro oba tyto způsoby analýzy se musí vystavět kompletní nové zařízení a není jej možné aplikovat v běžném plaveckém bazénu. Proto se vymýšlí nové způsoby, jakými lze pohyb zaznamenávat. A jsem si jistý, že plavání není jediný sport, kde by trenér (a ve výsledku i svěřenec) ocenil sledování pohybu v digitální podobě na větší vzdálenost, a ne pouze na jakýchsi simulátorech ve speciálně zbudovaných centrech [15]. Pokud by se podařilo vytvořit systém snímání pohybu, aniž by bylo třeba stavět nová centra a navíc by byla přijatelná i cena, vzrostla by dostupnost i pro menší oddíly, což by bylo velikým přínosem.

Přestože senzory, se kterými pracuji, nejsou určeny pro sportovní snímání pohybu a ještě ve vodě, je to pro mě krůček k nahlédnutí do této problematiky. Proto je pro mě velmi zajímavé sledovat, jakými způsoby se může technika ve sportovním a počítačovém světě ještě ubírat.

2 Senzorové sítě a její komunikační moduly

V této kapitole bude stručně popsána historie, vznik a význam sensorových sítí. Dále bude popsán vývoj těchto sítí, z čeho se sensorové sítě skládají a jejich topologie.

2.1 Historie

Počátky sensorových sítí spadají do 70. let 20. století. Jsou poznamenány vojenským prostředím, kdy z taktických důvodů bylo výhodou znát pohyb nepřátelských vojsk. Jako první bezdrátovou síť nesoucí podobnost s moderními WSN lze považovat systém SOSUS pro sledování pohybu sovětských ponorek pod hladinou oceánů. Jednalo se o volně rozmístěné akustické senzory (hydrofony).

Vývoj a výzkum moderních sensorových sítí začal okolo roku 1980 v programu DSN (Distributed Software Networks) pod záštitou agentury zodpovědné za americký vojenský výzkum DARPAK. Lze tedy předpokládat, že sloužily v první řadě k vojenským účelům.



Mobile Node



Equipment Rack

Obrázek 1: Jedna z prvních distribuovaných sítí[28]

2.2 Evoluce senzorových sítí

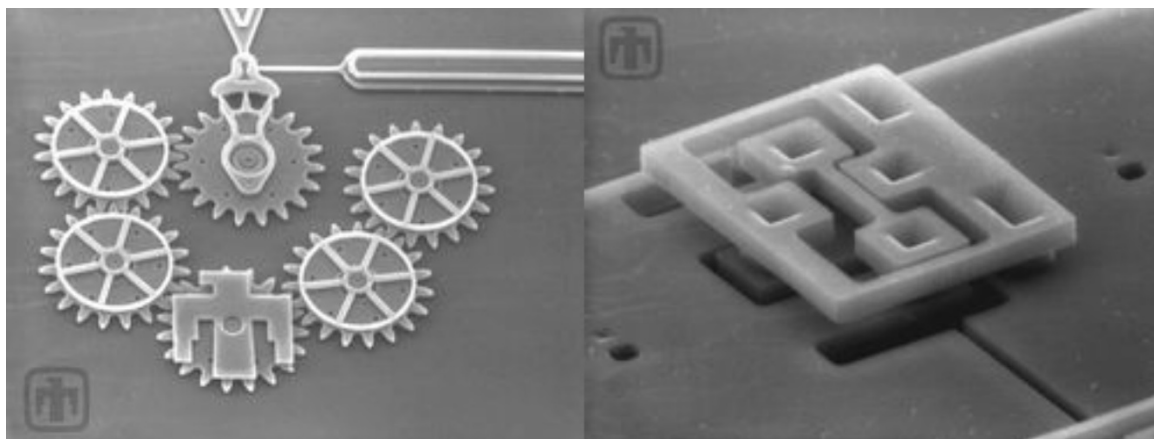
Z čistě vojenského využívání se technologie WSN velmi brzy dostala také do civilního sektoru, a to nejprve do prostředí univerzitního pro nejrůznější výzkumy a monitoring ovzduší, klimatu, přírodních katastrof a popřípadě k předcházení těmto katastrofám apod.

Postupem času a s rostoucí dostupností se začaly WSN dostávat průmyslových aplikací jako například distribuce energie, čištění odpadních vod či speciální automatizace továren. Přestože popularita WSN byla na vzestupu, jejich využití bylo stále omezené, jelikož senzory byly drahé, stále příliš velké a spotřeba energie taktéž vysoká. Postupem času jako s většinou elektroniky se výrazně zmenšila jak velikost jednotlivých komponent pro senzorové sítě, tak spotřeba a snížily se i pořizovací náklady. Tomu napomohl projekt SmartDust - projekt, který měl za úkol vytvořit senzorovou jednotku tvořenou MEMS, která bude schopná komunikovat s okolím, s hlavním parametrem, že se vejde do jednoho čtverečného milimetru.



Obrázek 2: Vývoj senzorových uzlů[28]

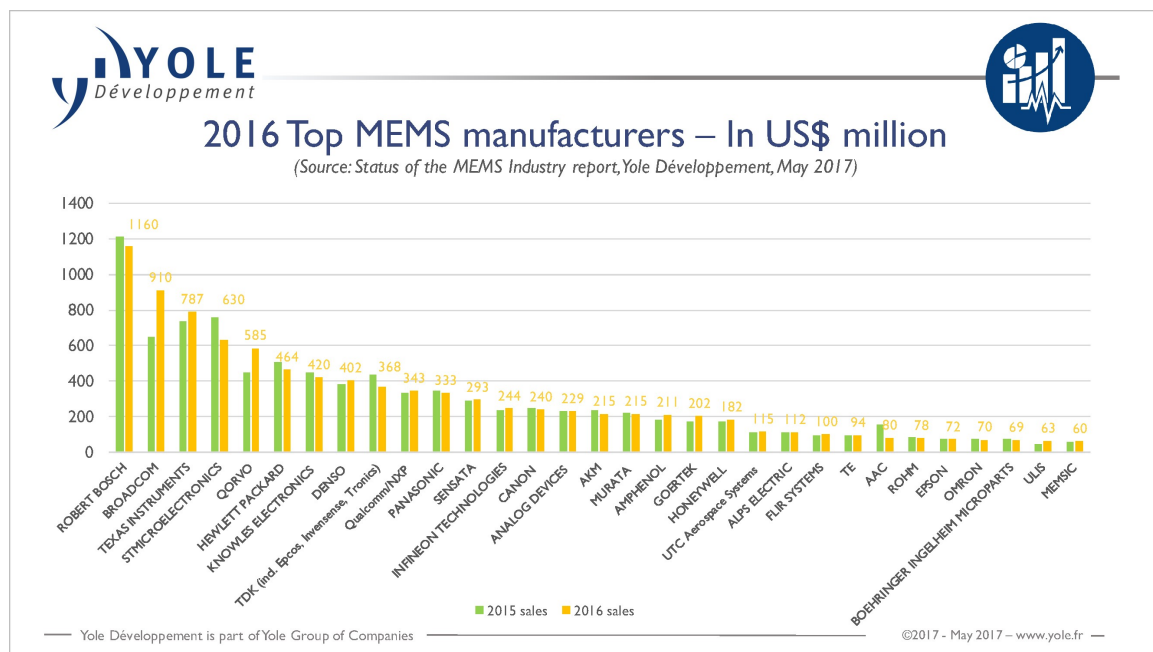
V dnešní době jsou senzory založeny na technologii MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), která představuje propojení integrovaných obvodů a mikromechanických struktur a jejich vzájemnou interakci na jednom čipu.



Obrázek 3: Některé mechanické prvky MEMS - ozubená soukolí (vlevo) nebo pružný element (vpravo)[29]

S technologií MEMS se vyrábí například senzory pro snímání tlaku, zrychlení (akcelerometry), natočení (gyroskopy), magnetického pole (magnetometry), zvuku (mikrofony) a další. Přičemž největší spotřeba těchto senzorů je při výrobě dnešních smartphonů.

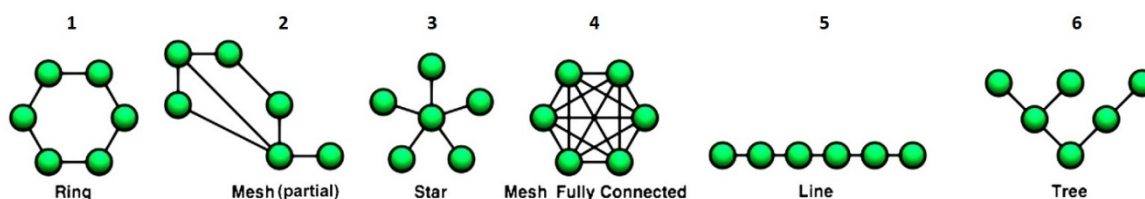
Jako nejvýznamnější výrobce těchto senzorů si můžeme představit Robert Bosch, Broadcom a Texas Instruments.



Obrázek 4: Nejvýznamnější výrobci MEMS seřazeni dle ročního obrátu [30]

2.3 Topologie bezdrátových sítí

V bezdrátových sítích známe 5 základních topologií.



Obrázek 5: Topologie bezdrátových sítí - 1)Kruhová 2)Smíšená (částečně) 3)Hvězdicová 4)Smíšená s úplným propojením 5)Line (obvykle pouze Point-to-Point) 6)Stromová [31]

2.3.1 Kruhová (Ring)

S touto topologií se setkáváme převážně u drátových sítí. Pokud je řeč o bezdrátových sítích, je možné tuto topologii realizovat, avšak tvořit takovou síť je téměř zbytečné a nesmyslné.

2.3.2 Smíšená s částečným a úplným propojením (Mesh)

Tato síť je velmi spolehlivá, uzly jsou spolu vícenásobně propojeny. Zmíněný „full mesh“ říká, že je každý uzel propojený s každým, kdežto „partial mesh“ má taky násobné propojení s uzly avšak ne každý s každým.

Této topologii se využívá, pokud chceme zamezit maximálnímu výpadku. A tedy pokud dojde k nějakému druhu selhání, k cíli lze najít i další cesty.

Tuto topologii využívají primárně standardy Zigbee.

2.3.3 Star

Topologie typu Star je v bezdrátových sítích jedna z nejpoužívanějších (například hotspot). Je charakteristická svým tvarem hvězdice, kdy všechny uzly jsou připojeny k jednomu centrálnímu (AP – access point). Jedná se o velmi jednoduchou topologii, se kterou přichází i výhody jako snadné připojení dalšího uzlu, nebo také, že při výpadku komunikace s jakýmkoliv uzlem (tvořící vrchol hvězdice) síť funguje dál. Nevýhodou ovšem je, že pokud nastane kolaps centrálního uzlu, kolabuje a rozpadá se celá síť.

Této topologii využívá nejčastěji standard WiFi, kdy AP je router, do kterého je připojen internet, a k tomuto routeru se připojují další zařízení (uzly) a sdílí tak internet.

2.3.4 Point-to-Point (Line)

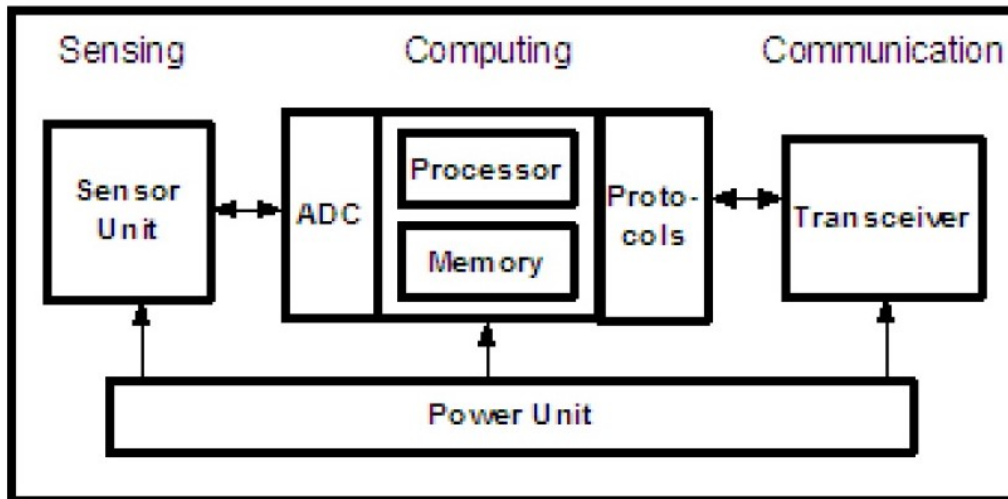
V bezdrátových sítích se užívá spíše pojmu peer-to-peer. Přesto této síti využívá primárně například bluetooth. Rozšíření této typologie do tzv. Line, není příliš časté, přesto jej můžeme nalézt. Pokud se jedná o Line, s největší pravděpodobností jde stále o komunikaci pouze krajních uzlů a všechnu uzly na cestě mezi fungují jako tzv. repeater, které pouze zesilují signál a díky tomu lze komunikovat na větší vzdálenost.

2.3.5 Tree

Topologie tree neboli česky strom je pouze jakýmsi rozšířením hvězdy. Stromová topologie vychází z hvězdy, kdy jednotlivé centrální prvky hvězd jsou propojeny do jednoho nadřazeného prvku.

2.4 Senzorový uzel

V této části budou popsány jednotlivé části typické hardwarové architektury senzorového uzlu na základě obrázku níže.



Obrázek 6: Typická hardwarová architektura senzorových uzlů[32]

Uzel rozdělen do 3 základních částí + napájení:

- **Snímání (Sensing):**

V této části dochází k zaznamenávání dat neboli k převodu fyzikálních veličin na elektrické signály (většinou napětí). Tyto veličiny mohou být zaznamenávány jedním nebo několika senzory.

- **Komunikace (Communication):**

Tato část je určená pro modul umožňující bezdrátovou komunikaci (jak pro odesílání, tak i pro přijímání dat).

- **Výpočetní (Computing):**

V této sekci dochází k výpočtům a obsluze celého uzlu.

Procesorem je zde myšlen například mikroprocesor či mikrokontroler jako výpočetní jednotka. Memory nebo také paměť je v tomto případě myšlená paměť přímo mikroprocesoru a flash paměť chipu, pouze výjimečně bývá využito paměti RAM. Sekce přilehlé jako ADC a Protocols zajišťují komunikaci mezi senzorovou jednotkou či komunikačním modulem a procesorem.

Processor může také řídit spotřebu celé jednotky, jelikož obvykle největší spotřebu z celého uzlu má součástka zajišťující bezdrátovou komunikaci. Je tedy možné ovládat systém tak, že komunikační modul nebude data odesílat nebo přijímat neustále, ale pouze v určitých intervalech. Se správným naprogramováním může dojít k zanedbatelné ztrátě informace, ale k významné úspoře energie.

- **Zdroj (Power unit):**

Zajišťuje napájení celého hardwaru. Jelikož se jedná o bezdrátové moduly, nejčastěji je tedy tímto zdrojem napájení nějaký druh akumulátoru.

2.5 Rozhodující parametry

V této části bude vypsáno několik faktorů, na základě kterých je potřeba se rozhodovat a na základě kterých je vhodné vybrat příslušnou bezdrátovou technologii.

2.5.1 Dosah

Udává vzdálenost, na jakou jsme schopni s daným uzlem komunikovat, aniž by mezi dvěma komunikujícími uzly byla překážka. Pokud mezi uzly překážka je, může se tato vzdálenost výrazně zkracovat. Tyto vzdálenosti jsou typicky v desítkách metrů.

2.5.2 Spotřeba energie

Spotřeba energie je velmi zásadním parametrem, jelikož nám udává jak velký bude potřeba zdroj napájení (baterie), a nebo nás limituje, jak dlouho bude schopný systém fungovat, než bude potřeba baterii dobít či vyměnit. Spotřeba elektrické energie se obvykle u těchto zařízení udává v mAh nebo mWh.

2.5.3 Velikost sítě (počet uzlů)

Udává kolik je možné vytvořit v dané síti uzlů, se kterými lze komunikovat. Tomuto údaji je vhodné věnovat pozornost, pokud máme v plánu síť rozšiřovat, tak předem znát její limity.

2.5.4 Frekvence

Každý ze standardů pro bezdrátovou frekvenci má definované jisté frekvenční pásmo. U standardů jako Wi-Fi, Bluetooth nebo Zig-Bee je nejvíce využíváno bezlicenčního pásma 2,4GHz. A jelikož je toto pásmo v dnešní době v některých místech už zahlcené, je občas potřeba věnovat i tomuto parametru pozornost a zkusit fungovat na jiných frekvencích.

2.5.5 Objem přenosu dat

Objem dat je také velmi důležitou vlastností těchto standardů. Jelikož každý ze standardů je limitován nějakou přenosovou rychlostí.

2.6 Standardy

Všechny níže vypsány standardy jsou standardy komunikující obvykle v bezlicenčním pásmu 2,4GHz. Níže tedy popíšu dle mého názoru 3 neznámější a nejpoužívanější standardy pro bezdrátovou komunikaci. Kde každý z těchto standardů má své charakteristické vlastnosti (výhody i nevýhody), které zde budou uvedeny společně s příklady, kde jich je využíváno v praxi.

2.6.1 Bluetooth (IEEE 802.15.1)

Jedná se o standard, který byl vytvořen v roce 1994 jako náhrada za sériovou linku. Důležitou vlastností Bluetooth je, že dochází vždy ke spárování zařízení. Bluetooth na rozdíl od WiFi, která pracuje na linkové vrstvě, řeší až aplikační vrstvy síťového modelu. Tudíž pro každé zařízení, se kterým by mohlo být propojeno/spárováno, musí mít definován speciální protokol, díky němuž bude možné navázat komunikaci.

Od doby vzniku bylo vytvořeno několik dalších verzí. V dnešní době je stále nejpoužívanější verzí Bluetooth 4.x. Ovšem v roce 2016 přišlo Bluetooth s novým standardem Bluetooth 5.0, od kterého je slibována 2x větší rychlost přenosu dat, 4x větší dosah. Doposud nejpoužívanější verze, zmíněná 4.x, nabízí přenosovou rychlost až 25 Mbit/s s dosahem až 60m. Vzhledem k těmto parametrům je pochopitelné, že k uplatnění tato technologie nalézá převážně ve spotřební elektronice, jako jsou mobilní telefony. U mobilních telefonů dříve sloužil k přenosu dat mezi 2ma spárovanými telefony. V nyní je bluetooth u telefonů využíván ke spárování například s bezdrátovými sluchátky, hodinkami nebo systémem v autě. Nevýhodou tohoto protokolu je, že je možné takto připojit maximálně pouhých 7 zařízení. V praxi bývá propojeno do 5.

2.6.2 ZigBee (IEEE 802.15.4)

ZigBee je relativně novým standardem. Na trhu je od roku 2004. Řadíme jej do skupiny bezdrátových sítí PAN(Personal Area Networks). Hlavním důvodem založení ZigBee byla celá škála průmyslových aplikací, která nebyla pokryta vhodnou bezdrátovou technologií. ZigBee přichází většinou na řadu, jakmile je Bluetooth nedostačující a WiFi zbytečné. ZigBee nabízí bezdrátové sítě pro přenos ne příliš velkých objemů dat ve

standardním bezlicenčním pásmu. V zámoří využívá pásmo 915 MHz s 10 kanály a v Evropě pak pásmo 868 MHz s jediným kanálem. Přestože neumí zpracovávat velké objemy dat je schopno se propojit s velkým množstvím jednotek (omezení pouze velikostí adresy). Tato adresa je nejčastěji šestnácti bitová. Pro 16ti bitovou adresu je možné propojit 2 na šestnáctou zařízení, což je přesně 65 536 zařízení, která spolu mohou komunikovat. Přenosová rychlost této jednotky se pohybuje okolo 20, 40, 250 kbit/s. Mezi další charakteristické vlastnosti patří vysoká spolehlivost, velmi nízká spotřeba energie a taktéž nízká cena. Nevýhodou ZigBee je její nízký dosah, který je obvykle v řádech desítek metrů a zmíněná nízká přenosová rychlost. V ideálních podmínkách někteří udávají, že je možné využívat této jednotky až na 200m.

Standard Zig-bee se zaměřuje hlavně do průmyslu k realizaci bezdrátové komunikace různých senzorů a regulátorů, monitorovací systémy ve zdravotnictví, inteligentní budovy a nyní se dostává tento standard i do běžných domácností k řízení například osvětlení, žaluzií, domácích spotřebičů (topení/klimatizace) a podporuje myšlenku IoT (Internet of Things).

2.6.3 WiFi (802.11)

WiFi je asi neznámějším a nejrozšířenějším standardem v bezdrátových technologiích. Moduly WiFi v dnešní době nalezneme jak v osobních počítačích, tak v novějších telefonech a dalších zařízeních. Přestože standard WiFi byl vytvořen primárně pro bezdrátové připojení přenosných zařízení k následnému propojení na lokální LAN síť, dnes je jeho největší využití na vytváření lokálních hotspotů pro připojení zařízení v dosahu signálu k internetu, kde by mělo být možné teoreticky připojit až 250 zařízení (v praxi však 50). Obrovskou výhodou těchto zařízení je jejich dosah a rychlost přenosu dat. Signál WiFi může dosahovat až několika stovek metrů s přenosovou rychlostí 11Mb/s v bezlicenčním pásmu 2,4GHz nebo 54Mbit/s v bezlicenčním pásmu 5GHz. Nevýhodou WiFi je však vysoká spotřeba energie, která je řádově desetkrát větší než například u standardu Bluetooth 4.x a v porovnání se ZigBee nesrovnatelně vyšší.

2.6.4 Závěr

Nelze konkrétně říci, která z těchto bezdrátových technologií je obecně nejlepší či nejhorší. Jak bylo zmíněno v jednotlivých částech, každý z těchto standardů má své klady, a proto je třeba vždy vhodně vybrat podle využití. V případě řešení problematiky této práce, kdy je třeba odesílat data ze senzorů do počítače a zároveň minimalizovat celý senzor, se jeví jako nejvhodnější Bluetooth, které je navíc integrováno v jednotce SensorTile, čímž dojde k další úspoře místa. Jedinou nevýhodou je, že potřebujeme připojit minimálně 5 zařízení, což Bluetooth ještě stále splňuje, ale mohl by nastat problém při následném rozšíření o další moduly. Pokud bychom chtěli použít více modulů, aby bylo možné pokrýt snímáním celé tělo, musela by být vybrána jiná technologie. Proto je již v zadání této práce vybrán standard WiFi, čehož se budu nadále v řešení práce držet.

V této kapitole - Senzorové sítě a její komunikační moduly bylo čerpáno z: [5], [1], [19], [41], [51], [2], [43], [13], [27],[26],[28],[29]

3 Motion capture systémy

Jelikož výsledkem praktické části této práce by měl být modul sloužící k získávání a přenosu dat a následné realizaci inerčního MoCap systému, rozhodl jsem se, že v práci bude věnována jedna kapitola konkrétně MoCap systémům – na základě čeho se rozdělují, jejich výhody a nevýhody a nakonec bude věnováno nejvíce pozornosti systémům Inerčním, jelikož takový by měl být pomocí vytvořeného modulu 3Dbox vytvořen.

3.1 Aspekty určující kvalitu MoCap

Každý ze systémů má charakteristické vlastnosti určující jeho výhody a nevýhody, popřípadě udávající kvalitu jako jsou latence, přesnost, obnovovací frekvence a rozptyl. Níže podrobněji popíšu jejich význam.

3.1.1 Latence

Latence je časová prodleva mezi provedenou akcí a zaznamenáním této změny snímacím zařízením. Tato veličina se týká hlavně online systémů, kdy se snažíme docílit prodlevy v řádech milisekund, kdy nejde okem jakákoliv prodleva zpozorovat. Snažíme se docílit co nejmenší hodnoty.

3.1.2 Přesnost

Je hodnotou udávající maximální chybu, která může vzniknout při snímání polohy nebo rotace. Tato hodnota se dá ovlivnit například zvýšením počtu snímacích zařízení, nebo například zmenšením vzdálenosti mezi kamerou a subjektem. Je žádoucí docílit maximální přesnosti, tudíž hodnota maximální chyby je žádoucí co nejnižší.

3.1.3 Obnovovací frekvence

Jedná se o frekvenci, udávající, kolikrát dojde k znovu získání dat ze snímačů pohybu. Je žádoucí co nejvyšší frekvence pro maximální plynulost pohybu. Tato hodnota může být limitována například omezenou rychlostí odesílání dat nebo samotnými snímači.

3.1.4 Rozptyl

Rozptyl je odchylka, se kterou kolísají hodnoty na výstupu snímacího zařízení pro objekt v klidu. Tato hodnota je obzvláště důležitá pro systémy inerční z principu, jakým fungují.

3.2 Rozdělení dle zpracování dat

Naprostu základní rozdělení MoCap systémů je dle způsobu zpracování dat na online systémy a offline systémy.

3.2.1 Online systémy

Jedná se o systémy pracující v reálném čase, kdy jsme schopni prakticky okamžitě vidět zdigitalizovaný pohyb nebo jsme schopni tímto pohybem něco ovládat. Typické užití těchto systémů je v dnešní době pro herní konzole jako je Nintendo-Wii. Důležitým prvkem, který ovlivňuje funkčnost těchto systémů a na který bychom se měli zaměřit, je latence.

3.2.2 Offline systémy

U těchto systémů nejprve dojde k zaznamenání dat z pohybu a až poté k jejich zpracování. U těchto systémů bývá důležitá přesnost a vysoká obnovovací frekvence, naopak zde nehraje vůbec žádnou roli latence. Typické využití těchto systémů bývá ve filmovém průmyslu a sportu.

3.3 Rozdělení dle snímání pohybu

V tomto rozdělení bude popsáno, jakých senzorů či snímacích zařízení se u jednotlivých systémů využívá. A na základě principu jejich funkce uvedené výhody i nevýhody.

3.3.1 Optické snímací systémy

Základním znakem těchto systémů je, že pro zaznamenávání pohybů či poloh objektů využívají kamer. Pro záznam je možné využívat od dvou kamer, což je minimální počet snímačů pro vytvoření 3D obrazu, až po desítky kamer, v extrémních případech až stovku. Standardně se však užívá například pro snímání subjektu sedm kamer a pro vícero subjektů od šestnácti do čtyřiceti osmi kamer. Čím větší počet snímacích zařízení budeme mít, tím přesnější bude možné provést digitalizaci. Což je obrovskou výhodou těchto systémů, že jsme schopni snímat více subjektů současně s vysokou přesností, dokonce tímto způsobem lze zaznamenávat i mimiku. Vysoká přesnost s velkým počtem kamer má ale za následek vysokou cenu nejen za vybavení k tomu potřebné, ale také za zpracování záznamů z vícero zdrojů. Další nevýhodou způsobenou používáním kamer je, že je neustále zbytečné mít kamerami "volný výhled" na snímáný subjekt. Každá překážka, která by byla mezi subjektem a kamerou, může kvalitu snímání zhoršit či dokonce znemožnit. Stejně tak nadměrné nasvícení subjektů nebo běžné denní světlo může snímání touto technologií narušit. Proto se využívají pro taková snímání speciální studia, kde by neměly být žádné překážky pro maximální přesnost snímání s alespoň šerým prostředím.



Obrázek 7: Ilustrační obrázek návrhu studia pro optické snímací systémy od firmy Naturalpoint, převzato z [45]

- **Bez značek**

Tato technika je ze všech nejpokrokovější a s největší budoucností, jelikož nyní s rostoucím rozlišením kamer a vývojem techniky možnost navrhnout takové algoritmy, které analyzují optické vstupy a identifikují je jako objekt. Ovšem i přesto je doposud tento způsob nejméně přesnou technikou z kategorie optického snímání. Výhodou je, že není třeba mít nikde na těle připevněné značky, ať už aktivní či pasivní. Tato vlastnost navyšuje komfort a mobilitu snímaného subjektu a je tak možné tvořit realističtější záběry s minimálním omezením.



Obrázek 8: Ukázka snímání pohybu bez použití značek, převzato z [12]

- **S použitím značek**

Značky, kterými si označíme snímaný objekt, nebo objekty dělíme do dvou skupin. Aktivní a pasivní značky. Obecný princip na jakém funguje tato technologie, ať už jde o značení aktivní nebo pasivní - v ideálním případě přímo na daná místa na těle umístěny značky/markery (snímané body). Pokud není možné připevnit markery přímo na tělo, existují obleky speciálně pro tyto účely. Z každé kamery poté dostaneme 2D záznam pohybu těchto značek. V kombinaci se záznamy dalších kamer jsme schopni vytvořit 3D obraz pohybu jednotlivých markerů a následně z pohybů jednotlivých bodů v prostoru vykreslit digitalizovanou siluetu. Pokud dojde k zastínění značky například vlastním tělem, dochází ke ztrátě informace o pohybu, proto se využívá více než jen dvou kamer pro 100% rekonstrukci.

- **Pasivní značky**

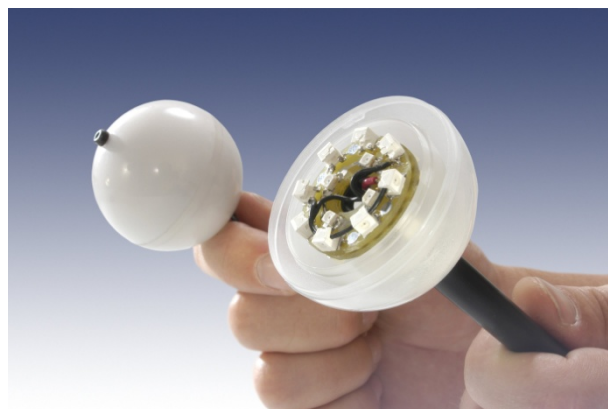
V případě pasivních značek jsou na tělo umístěny reflexní body nejčastěji tvaru koule, které odráží světlo a kamery tak můžou tyto body rozpoznat. Nevýhodou pasivních značek je vzdálenost, na kterou je možné objekt sledovat a další nevýhodou je nutnost alespoň šerého prostředí. Proto se této technologii využívá převážně ve speciálních studiích vytvořených pro tyto účely.



Obrázek 9: Ukázka pasivních značek o různých rozměrech, převzato z [17]

- **Aktivní značky**

Několik nedostatků pasivních značek řeší značky aktivní. Na rozdíl od značek pasivních, značky aktivní světlo emitují. Dochází k emitování konkrétně infračerveného záření kvůli nezaměnitelnosti s jiným zářením, které by mohlo být při zpracování za marker považováno. Jednou z výhod aktivních značek je možnost snímat pohyb pomocí těchto markerů na větší vzdálenosti a v prostředí, kde máme i jiné zdroje záření, takže je možné tuto technologii použít i "v terénu" a není zapotřebí speciálních studií. Nevýhodou aktivního značení je celá souprava představující kabeláž pro napájení jednotlivých markerů, tvořeny zdroji záření nejčastěji LED, a také zdroj napájení pro tyto značky. Všechny tyto věci snižují komfort a mobilitu.



Obrázek 10 Aktivní značka vlevo komplet, vpravo oddělená polovina s emitory, převzato z [40]

3.3.2 Magnetické snímací systémy

K tomuto způsobu měření je zapotřebí stacionárního vysílače. Vysílač takového pole se skládá ze tří na sebe kolmých cívek tvořící tři na sebe kolmá magnetická pole. Podle těchto polí se dále magnetické systémy dělí dle napájení tohoto zdroje a následného zvolení adekvátní sensorové techniky pro snímání intenzity pole.

- **AC systémy**

Při napájení střídavým proudem se jedná o AC systémy a pole, se kterým pracujeme, se nazývá alternující. Pro toto pole je senzor sestaven ze tří na sebe kolmých cívek.

- **DC systémy**

Při napájení stejnosměrným proudem se jedná o DC systémy a elektromagnetické pole je zde pulsující. V tomto případě je zapotřebí tři na sebe kolmých magnetometrů tvořící jeden senzor.

Senzory snímající pohyb je třeba připevnit na těle a ve většině případů propojit kabelem s řídicí jednotkou. Ta zaznamenané natočení a intenzitu pole v daném místě vyhodnotí a předá počítači pro další zpracování. Je důležité si uvědomit, že hodnoty zaznamenané jsou vůči generátoru pole. Výhodou DC systémů je, že díky čtyřem fázím, ve kterých fungují, jsou schopny maximálně potlačit rušení. V prvních třech fázích dochází k vyslání impulsů pokaždé pro jeden směr pole. Čtvrtý impuls zdroj nevysílá nic, ale senzory přesto zaznamenají nějaké hodnoty. Tyto hodnoty slouží ke korekci hodnot z předcházejících tří fází a tím dojde k minimálnímu projevu rušení ve výsledné hodnotě.

Mezi nevýhody magnetických systémů patří krátká vzdálenost, po kterou je možné zaznamenávat hodnoty o relativní poloze s dostatečnou přesností. Záznam mohou ovlivnit feromagnetické materiály v bezprostřední blízkosti zdroje. Další nevýhodou může být připevněná elektronika a veškerá technika k tělu, která omezuje pohyb a snižuje tak motoriku i komfort. Na rozdíl od systémů optických. V tomto případě není potřeba brát ohledy na překážky v cestě (pokud nejsou feromagnetického charakteru) a to ani vlastní tělo. Lze tvrdit, že nemůže dojít k zákryvu nějakého ze sensorů a zapříčinit tak ztrátu informace některého z nich. Mezi výhody patří také nízká cena tohoto systému. [46]

3.3.3 Mechanické snímací systémy

Aktuální princip, na kterém funguje tento systém, je ze všech nejjednodušší. Pro snímání dané části je vždy zapotřebí mít sestavené zařízení připomínající exoskelet s vlastním zdrojem. Obvykle bývá tvořený pevnými plastovými či hliníkovými tyčinkami. Mělo by být možné u takového exoskeletu nastavit délku jednotlivých částí pro univerzálnější použití, protože pro přesnost snímání je důležité, aby exoskelet odpovídal fyzickým parametrům snímané osoby. V kloubech zmíněného exoskeletu, ve kterých chceme sledovat ohyb, jsou umístěny snímače úhlu (nejčastěji potenciometry). Data z těchto potenciometrů jsou odesílány do počítače, v dnešní době nejčastěji bezdrátovou technologií, kde pomocí velmi jednoduchého algoritmu je možné vše digitalizovat. Obrovskou výhodou mechanických systémů je jejich jednoduchost a s ní také spojená nízká cena. Související se způsobem snímání je také přesnost, která je velmi vysoká. Mezi nevýhody těchto systémů patří snížená mobilita snímaného, nutnost nastavení exoskeletu odpovídající fyzickým parametrům subjektu a komplikace spojené s určením snímaného v prostoru. Pro snímání objektu v prostoru je zapotřebí ještě dalších polohových senzorů.

Princip mechanického snímání jeví se jako směr, kterým by se dalo ubírat, přichází ze Saarländské Univerzity v Německu s nápadem připevnit tyto mechanické senzory přímo na tělo tak, že je přilepí přímo na kůži. Například senzor ohybu může vypadat jako tenzometr nalepený na kůži snímaného, jež zaznamenává odpor, který bude následně zpracován a vyhodnocen jako ohyb [6]. Zatím je tato myšlenka a technologie v začátcích, ale lze předpokládat velký rozvoj v následujících letech.

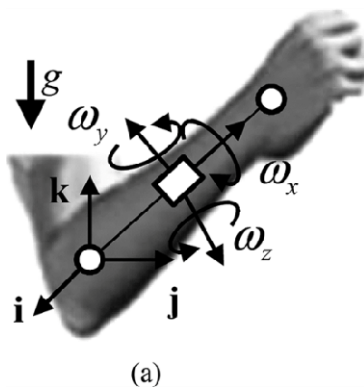


Obrázek 11: Obrázek typického exoskeletu torza snímající úhly v jeho kloubech, převzato z [7]

3.3.4 Inerční snímací systémy

U inerčních snímačů polohy se data obvykle získávají pomocí snímacích modulů skládajících se z tříosého akcelerometru, tříosého gyroskopu, vlastního napájení a bezdrátového modulu odesílající data do počítače, který bude data dále zpracovávat. Princip jakým fungují je následující. Jednotlivé moduly jsou připevněny na různých částech těla, jehož změny pohybu chceme znát. Gyroskop zaznamenává aktuální natočení senzoru a akcelerometr měří zrychlení. Pokud jsou známá data z obou senzorů současně, jsme schopni určit relativní pozici daného senzoru vůči pozici původní. U inerčních systémů tedy sledujeme změnu polohy, ze které se následně po odeslání do počítače vypočítává absolutní pozice. Pro tento výpočet je nutno vždy před začátkem snímání znát počáteční pozici, ze které budou změny vypočítávány. Pro správné fungování je třeba vždy před počátkem snímání nutná kalibrace. Obrovskou výhodou tohoto systému oproti všem ostatním je, že vše co snímá pohyb je připevněno na subjektu. S tímto také klesají náklady na celý systém. V ideálním případě se jedná o malé moduly velikosti krabičky od sirek, které minimálně omezují v pohybu. Další výhodou oproti optickým a magnetickým snímacím systémům je, že prakticky neexistuje žádné stínění či rušení, které by mohlo vnášet do snímání chybu. Pouze při překročení maximálních hodnot, které jsou schopny senzory snímat, dochází k chybám.

Je důležité upozornit na nevýhodu těchto systémů, která plyne z principu jejich fungování a to, že výpočet polohy se dopočítává okamžitou změnou. I při minimálních chybách dochází k jejich integraci těchto chyb a po mnohonásobném načtení malé chyby může dojít k výpočtu nesmyslných hodnot. Proto je u těchto systémů žádoucí minimální rozptyl a maximální přesnost senzorů. I přesto je třeba tyto systémy častěji kalibrovat, nebo využít jiných systémů pro snímání pohybu pro jejich občasnou kalibraci.



Obrázek 12: Princip inerciálního snímání a snímaná data, převzato z [16]

3.3.5 Výrobci inerciálních systémů

V dnešní době zažívají inerciální MoCap systémy rozkvět. Je možné si všimnout, že některé firmy s jinými druhy systémů se začínají intenzivně zabývat inerciálními systémy, jelikož je již možnost dostatečně zmenšit elektroniku pro snadnou manipulovatelnost a s dostatečnou přesností pro naplnění očekávání od tohoto systému. Dalším důvodem, proč se mnoho firem začíná zabývat inerciálními systémy, je jejich čím dál častější využití pro virtuální realitu. Většina těchto firem, které tyto systémy vytváří obvykle vytváří také software, který je možné dokoupit k hardwaru.

Všechny zmíněné firmy propojují jednotlivé inerciální senzory dráty a zaznamenané informace jsou odesílány pomocí jediného bezdrátového modulu Wi-Fi do řídicí jednotky (nejčastěji PC). Toto řešení je hlavně z důvodu úspory energie, protože bezdrátové komunikační moduly bývají součástí s největší spotřebou.

Aktuálně nejznámější firmy jsou: Xsens, Synertial, Shadow Motion, Noitom - Perception Neuron

- **Xsens**

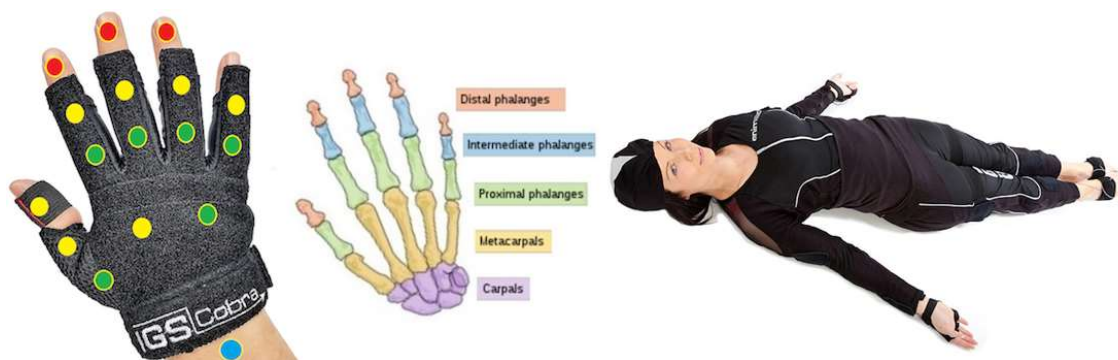
Xsens je firma, která jako první použila inerciální senzory pro snímání pohybu zvířat. Konkrétně se jednalo o snímání pohybu koně včetně pohybu v prostoru, jak můžeme vidět na obrázku níže.[4]



Obrázek 13: První inerciční snímání pohybu zvířete firmou Xsens, převzato z [24]

- **Synertial**

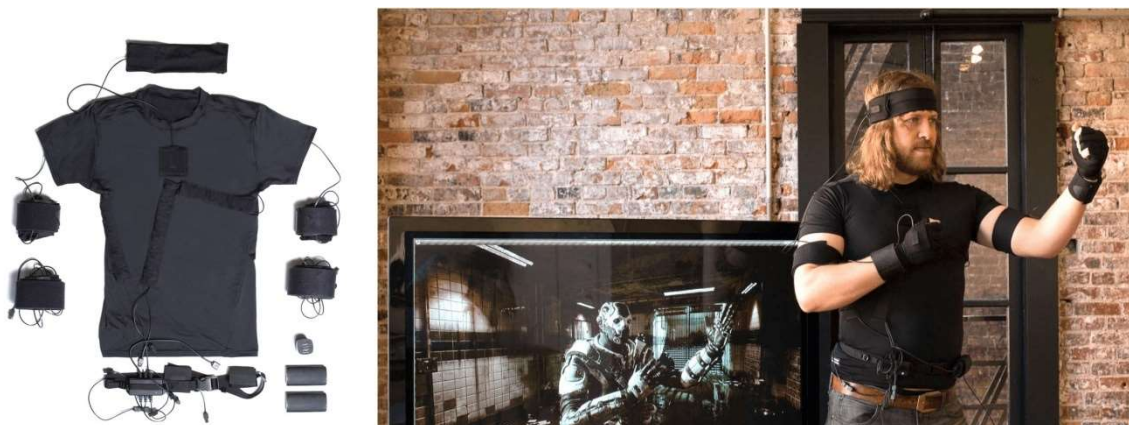
Tato firma je na trhu s inerciálními senzory už dlouho. Jejich produkty jsou vhodné jak pro snímání pohybu celého těla, tak pro snímání jemné motoriky. Pro snímání celého těla jsou navrženy speciální obleky Cobra. Každý z těchto obleků obsahuje od 22 až po 54 inerciálních senzorů. Pro jemnou motoriku jsou vytvořeny rukavice, kterých je opět několik modelů. Liší se v počtu senzorů, které čítají od sedmi až po šestnáct senzorů.



Obrázek 14: Produkty firmy Synertial, vlevo rukavice s integrovaným senzorovým systémem a vpravo kompletní oblek Cobra, převzato z [50][42]

- **Shadow motion**

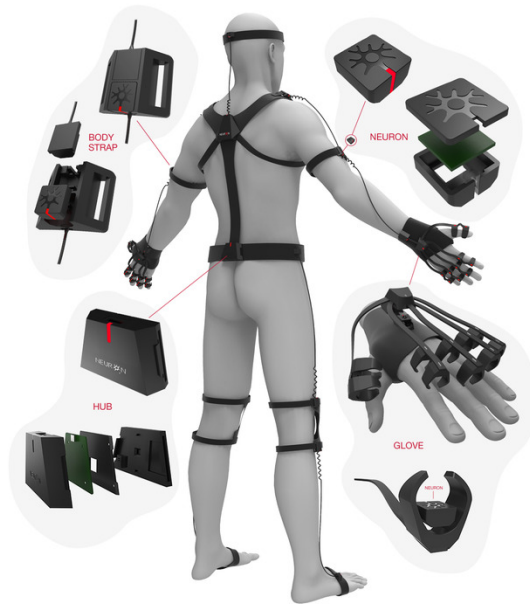
Shadow motion nevyrábí celé obleky pro snímání pohybu. V setu který si lze zakoupit je tričko a dále několik upínacích popruhů s inerciálními senzory, které mají předurčená místa, na které by si je měl člověk připevnit. V základním setu, který je touto firmou nabízen se nachází 17 inerciálních senzorů s možností jak ukládání dat, tak pro odesílání dat do řídicí jednotky.



Obrázek 15: Základní senzorový set of Shadow Motion (vlevo), Použití tohoto setu v praxi (vpravo)[33]

- **Noitom - Perception Neuron**

Hardware od této firmy je řešen „nejvolněji“. Není nutné mít žádné speciální triko či celý oblek. Pouze si na předurčená místa na těle připevníme senzory, které jsou připevněny na páscích se suchým zipem. Taktéž dělají rukavice podobně jako firma Synertial. Data ze sensorů je možné získávat přes USB nebo Wi-Fi.



Obrázek 16: Sestava dodávaná firmou Noitom - Perception Neuron[38]

3.3.6 Další snímací systémy

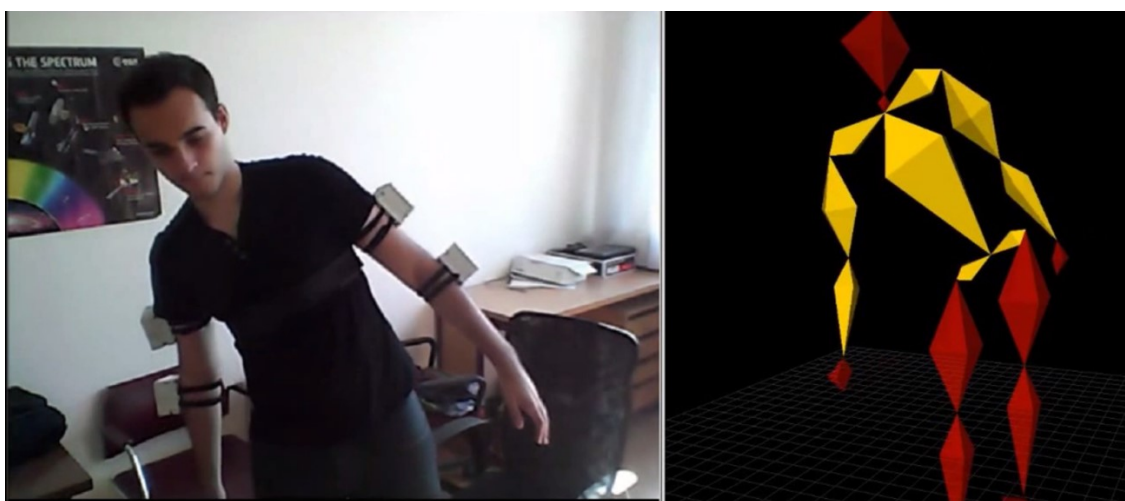
V této části bude pouze upozorněno, že existuje ještě několik dalších a bohužel ne tolik známých systémů pro snímání pohybu. Například Optoelektrické systémy, které vyhodnocují průchodnost signálu skrze optický kabel, nebo systémy Akustické, které fungují na principu odrazu zvuku, podobně jako je tomu u echolokace netopýrů.

V této kapitole - Motion capture systémy bylo čerpáno z: [14], [22], [3], [11], [8], [23].

4 Existující inerciální systém ČVUT

V této krátké kapitole bude stručně představena aktuálně používaná verze tohoto systému a budou převážně představeny její nedostatky, které je žádoucí s každou další verzí alespoň minimalizovat a v ideálním případě eliminovat.

V navazující části bude prezentován návrh řešení většiny problémů a realizace tohoto řešení.



Obrázek 17: Ukázka existujícího inerciálního systému vytvořeného studentem José Magno Mendes Filho pro ČVUT, převzato z [37]

4.1 Problémy a nedostatky předcházejících verzí

- **Přenos dat**

U modulů WiFi se starým firmwarem docházelo k občasné chybě, kdy při zapnutí docházelo ke čtení ze špatného místa v paměti. V této situaci bylo třeba modul restartovat na tovární nastavení a celý znovu nastavit, čímž se stával 3Dbox nefunkčním.

- **Nepřesnost**

V minulé verzi 3Dboxu byl údajně také problém s naměřením velkých odchylek. Jelikož se jedná o pohyby v maximálním rozsahu 1,5m, očekávala se maximální přesnost a zahřívání senzorů způsobovalo naměření nerelevantních hodnot. Dalším důvodem naměření nerelevantních hodnot byla, ačkoliv vysoká, tak pro tento účel nedostatečná přesnost senzorů. Z tohoto důvodu bylo nutné tyto senzory občas v průběhu recalibrovat pro správnou funkčnost.

- **Velikost**

Dalším důvodem byla minimalizace celého sensorového setu. Pokud to technika dovoluje, je zbytečný každý centimetr navíc, který by měl být připevněn k tělu pro jakoukoliv následnou manipulaci. Tento aspekt u starého systému ovlivňuje také napájení, jež je tvořeno čtyřmi AA bateriemi.



Obrázek 18: Původní modul 3Dbox v porovnání s krabičkou od sirek

5 Nový systém

Zde bude popsána celá praktická část této bakalářské práce. Od očekávání, která by měl modul naplnit až po skutečnost, jak byl modul doopravdy realizován. V této části bude popsán nejprve očekávání od software nového systému a jaká jsou očekávání od nového modulu. V druhé části bude popsáno, jak vypadá skutečná realizace. V závěru bude zhodnoceno, jak byla naplněna očekávání.

5.1 Návrh řešení a požadavky

V této části bude popsáno, co se od nového návrhu očekává a co by měla jednotka SensorTile a ostatní hardware splňovat.

5.1.1 Senzorová technika

Pro tento účel byl vybrán senzorový set SensorTile od společnosti STMicroelectronics. Od něho se slibuje nižší prostorová náročnost, co se týče senzorové techniky. Ke snížení prostorové náročnosti přispívá taktéž nižší spotřeba energie, tudíž již nebude potřeba tolik baterií pro napájení. S novou jednotkou taktéž vzrostla přesnost jednotlivých senzorů a snížení odchylek vlivem vnějších jevů od poslední verze. Technické parametry staršího systému lze nalézt na [47][48] a nového na [49], ve všech případech pod záložkou "Mechanical characteristics".

5.1.2 Přenos dat

Pro přenos dat byla již předem vybrána jednotka WiFly, kterou je třeba zprovoznit, a aktualizovat. Poté ji vhodně nastavit, aby bylo možné zajistit komunikaci mezi řídicí jednotkou a senzory. Je možné, že moduly WiFly nebudou vyhovovat a poté bude nutné nalézt řešení buďto v podobě jiných modulů WiFi a poslední možností by mohlo být využití jiných standardů než WiFi.

5.1.3 Baterie

Je třeba, aby byla vybrána nová baterie, zajišťující napájení alespoň 2 hodiny, v ideálním případě až 4 hodin. Zároveň je důležité hledět na prostorovou náročnost zdroje.

5.1.4 Ochranné pouzdro pro celý modul

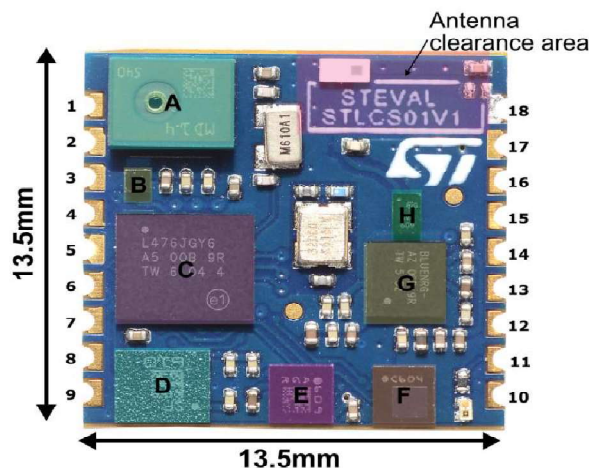
Všechn hardware není možné nechat volně rozložený a je třeba obstarat obal, nebo pouzdro, do kterého budou součástky uloženy.

5.2 Řešení

Nejprve podrobně rozeberu sensorovou destičku SensorTile, co všechno se na této desce nachází a jakým principem funguje. Následně se budu věnovat naprogramování mikroprocesoru a jakým způsobem a jakou technologií je řešen přenos dat z modulu 3Dbox do osobního počítače, kde jsou data následně softwarem v počítači zpracována. Taktéž zmíním napájení celého 3Dbox a na závěr porovnáím změny, jaké byly na novém modelu oproti starému provedení.

5.2.1 Hardware - Sensory

Z dat dodanými výrobcem se potvrdilo, že jednotka SensorTile by měla skutečně naplňovat očekávání na novou sensorovou jednotku. Pro upřesnění budou v této části vypsány jednotlivé části hardwaru.



Obrázek 19: Sensorová deska Sensortile, převzato z [20]

A: Digitální mikrofon

B: Napěťový regulátor pro vstupní napětí 1,5 - 5,5V s výstupním napětím 1,8V

C: Mikroprocesor Arm32-M4

D: iNemo inerciální modul s úsporným tříosým gyroskopem a tříosým akcelerometrem

E: eKompas s tříosým akcelerometrem a tříosým magnetometrem

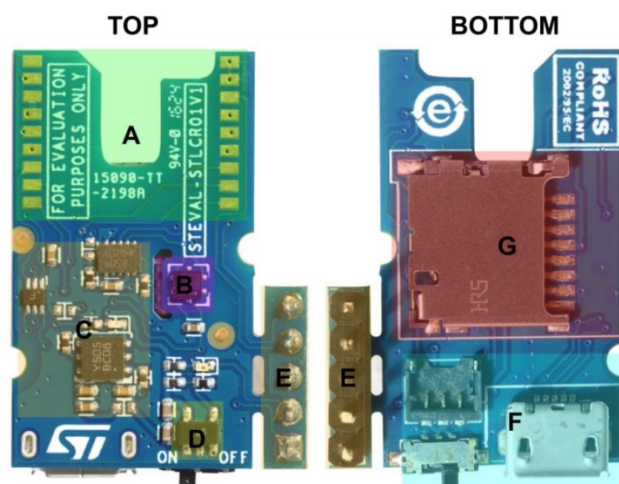
F: Sensor pro měření tlaku s rozsahem od 260 po 1260 hPa

G: Bluetooth Low Energy (BLE)

H: Symetrizační člen s jmenovitou hodnotou 50Ω

Pro splnění účelu, na který byla tato jednotka vybrána nám stačí pouze senzory modulu iNemo označený LSM6DSM. Kde na rozdíl od předcházející verze nyní obsahuje pouze jeden gyroskopický senzor snímající natočení ve všech třech na sebe kolmých osách. Stejně tak obsahuje pouze jeden senzor zrychlení. Podrobnější informace o tomto modulu lze nalézt v dokumentu na odkazu [49].

Pro tento modul je vytvořena rozšiřující deska, na kterou je možné tento modul napájet. Na rozšiřující desce s názvem Craddle se nachází.



Obrázek 20: Craddle, podpůrná deska pro SensorTile, převzato z [20]

A: Slot pro napájení SensorTile modulu

B: Digitální senzor relativní vlhkosti a teploty

C: Elektronika pro ochranu při napájení

D: Spínač napájení

E: Pětipinový SWD konektor sloužící k programování mikroprocesoru na SensorTile

F: Micro USB konektor pro napájení a sériovou komunikaci

G: Slot pro micro-SD kartu k případnému ukládání dat z jednotky SensorTile

Pokud se nyní podíváme zpět do kapitoly 2.4 – Sensorový uzel, zjistíme, že jednotka SensorTile nám reprezentuje kompletně celý sensorový uzel. Na sensorové desce z Obrázek 19. Můžeme vidět jak část Computing reprezentovanou mikroprocesorem Arm32-M4, tak část Snímání několika senzory rozmístěnými po desce a propojené s mikroprocesorem. Část Komunikační jednotkou Bluetooth Low Energy (BLE). A nakonec

část tzv. Zdroje, v tomto případě reprezentován 3,7V Li-Pol baterií s kapacitou 100mAh (0,37Wh), která je dodávána společně v setu k této jednotce. Slot pro toto napájení je na spodní straně Craddlu. Jak bude podrobněji v následujících 3 oddílech této kapitoly, pro splnění všech požadavků bude využita pouze část Snímání a Výpočetní. Pro zbylé 2 části bude muset být vypracováno nové řešení vyhovující požadavkům na nový systém, včetně napsání nového softwaru, který bude zprostředkovávat komunikaci mezi komunikačním modulem a senzory.

5.2.2 Baterie a napájení

Nejprve byly zjištěny parametry jednotlivých komponentů. Napájecí napětí pro jednotku Sensortile z [20] a následně jsem dočetl, jaký odběr má při plném výkonu (zapnuté a propojené BLE s aktivním odesíláním dat), kdy baterie o kapacitě 100mAh s udávaným napětím 3,7V vydržela napájet jednotku přibližně 70 minut. Z těchto údajů jsem vypočetl, že proud dodávaný do jednotky je přibližně 100mA. Pro modul WiFi RN-131 jsem taktéž vyhledal v [44] hodnoty pro napájení bezdrátového modulu, které udávají povolené vstupní napětí 3,3V – 3,7V a dodávaným proudem při maximální zátěži až 212mA. Na základě všech získaných údajů jsem vypočetl, že pro splnění požadavků, aby nová jednotka vydržela bez nabíjení alespoň 2 hodiny (v ideálním případě 4 hodiny), je nutné sehnat baterii s minimální kapacitou 624mAh.

Přestože jsem počítal ve všech případech s rezervou, rozhodl jsem se pro jistotu obstarat baterii Li-Ion s dvojnásobnou kapacitou a to 1200mAh s napětím 3,7V.

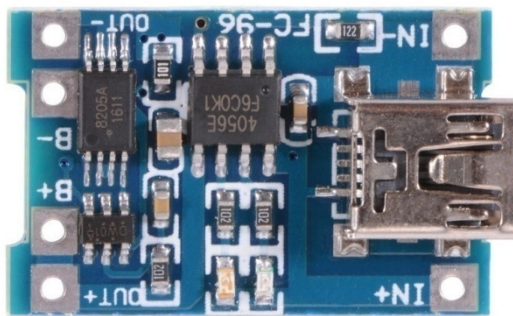
Dalším důležitým parametrem při výběru baterie byly její rozměry, které jsem vybíral s ohledem na budoucí kompaktnost celého systému. Vybral jsem ji tedy na základě rozměrů modulu WiFi. Zjištěné rozměry WiFi z [9] jsou 51,2x26,6x12,8mm. Směrodatné jsou v tomto případě pouze první 2 rozměry (délka a šířka), které by neměla baterie výrazně přesahovat. Baterie naplňující všechny tyto požadavky je Baterie SYMA X5SW PRO s rozměry 53x29x9mm z [18].

Při skutečném zapojení baterie do obvodu jsem naměřil napětí 3,9V při maximálním nabití a 3,5V při jejím vybití. Na základě tohoto zjištění jsem byl donucen vložit mezi výstup z baterie a vstup do WiFi modulu lineární stabilizátor napětí na 3,3V ovšem s maximálním dropem 0,2V aby při vybíjení baterie nedošlo k příliš velkému poklesu napětí. Těmto parametrům vyhovovala součástka LE33CZ [39]. Jediným nedostatkem byla její proudová propustnost 0,1mA. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zapojit 3 tyto stabilizátory paralelně a k nim na výstupu připojit kondenzátor pro vyrovnávání napětí na výstupu.

Na závěr jsem se rozhodl napájet jednotku Sensortile taktéž výstupem z mnou přidaných regulátorů, protože častou manipulací s konektorem ke Craddlu došlo k přelámání vodičůktoru a Sensortile pak přestal správně pracovat. Bylo nutné tedy vymyslet jiné řešení, jak jednotku napájet. Napadlo mě tedy buďto koupit nový konektor od baterie,

nebo odstranit konektor z Craddlu a přímo na plošky připájet vodiče a nebo najít jiný vstup k jednotce než pouze Craddle konektor. Nakonec jsem se držel třetího nápadu a našel jsem vstup pro 3,3V na 3. pinu z obrázku Obrázek 19].

Následně jsem vybral ochranný modul pro baterie typu Li-Ion, jelikož obecně Lithiové baterie jsou velmi choulostivé jak na nabíjecí napětí, tak na úroveň vybití, které dosáhnou. Z tohoto důvodu jsem zvolil ochranný modul TP4056 s mini USB konektorem pro nabíjení. Modul zajišťuje ochranu jak při nabíjení, tak při vybíjení. Další výhodou tohoto rozhodnutí je, že je možné baterii nabíjet přímo v krabičce, aniž by s ní bylo nutné nějak manipulovat. [35]



Obrázek 21: Ochranný modul pro nabíjení a vybíjení baterie, s možností nabíjení přes mini USB

5.2.3 Realizace softwaru pro jednotku SensorTile

Vytvořený software výrobcem

Pro získávání dat snímaných jednotlivými senzory jsou již vytvořené základní softwary. Na stránkách STMicroelectronics jsou aktuálně volně ke stažení zdrojové kódy vydané k jednotce SensorTile, včetně jejich aktualizací. Můžeme zde nalézt zdrojové kódy pro komunikaci přes Bluetooth se zařízením s operačním systémem Android nebo iOS. Taktéž je vytvořený software pro tato zařízení, na kterých můžeme real-time sledovat všechny veličiny snímané jednotkou SensorTile. Pro verzi Android je navíc možnost vypisování konkrétních hodnot s velmi podobným výstupem jako při výpisu do terminálu. Obecně pro oba systémy je možné sledovat časový vývoj hodnot pomocí grafu. Další firmware, který byl vydán pro komunikaci s touto jednotkou, je firmware pro komunikaci přes micro-USB. Zde je možné opět číst data ze všech senzorů v terminálu, například TeraTerm. Třetí možností předpřipravenou firmou STMicroelectronics je ukládání dat na microSD.

Realizace softwaru komunikaci s existujícím frameworkem

Změnu firmwaru jsem prováděl v prostředí IAR. Pro programování mikroprocesoru jsem využíval volně dostupného softwaru STM32 ST-LINK Utility.

Nejprve jsem vyzkoušel předem vytvořenou komunikaci přes Bluetooth spárováním s mobilním telefonem. Jelikož komunikace s jednotkou SensorTile přes Bluetooth byla už realizována přímo výrobcem, této komunikaci nebylo dále věnováno více pozornosti a to ani pro komunikaci s existujícím frameworkem. Přestože modul bluetooth je implementovaný přímo na jednotce SensorTile, k využití modulu 3Dbox pro MoCap je zapotřebí připojení několika zařízení naráz a v rámci rozšíření se může jednat i o desítku modulů. V takovém případě bluetooth není dobrým řešením.

Proto jsem se uchýlil k původnímu zadání mé práce, a to posílání dat přes moduly WiFly RN131. Postup řešení při programování posílání dat přes WiFi byl následující. Jako výchozí software pro mikroprocesor byl zvolen firmware pro posílání dat přes microUSB. První pokusy pro naprogramování mikroprocesoru byly takové, že dojde k předělání softwaru místo standardního odesílání dat na USB, na odesílání dat přes UART. Zprovoznění této komunikace bylo úspěšné, avšak ne tak, jak je vhodné pro splnění

zadané úlohy. Docházelo k odesílání pouze deseti znaků. Bohužel se mi nepodařilo nijak rozšířit buffer, který by se mohl plnit dalšími hodnotami z jednotlivých senzorů.

První úspěšné naprogramování mikroprocesoru opět vycházelo z firmwaru pro posílání dat na USB. Ovšem v tomto případě jsem napsal vlastní takzvaný softwarový UART.

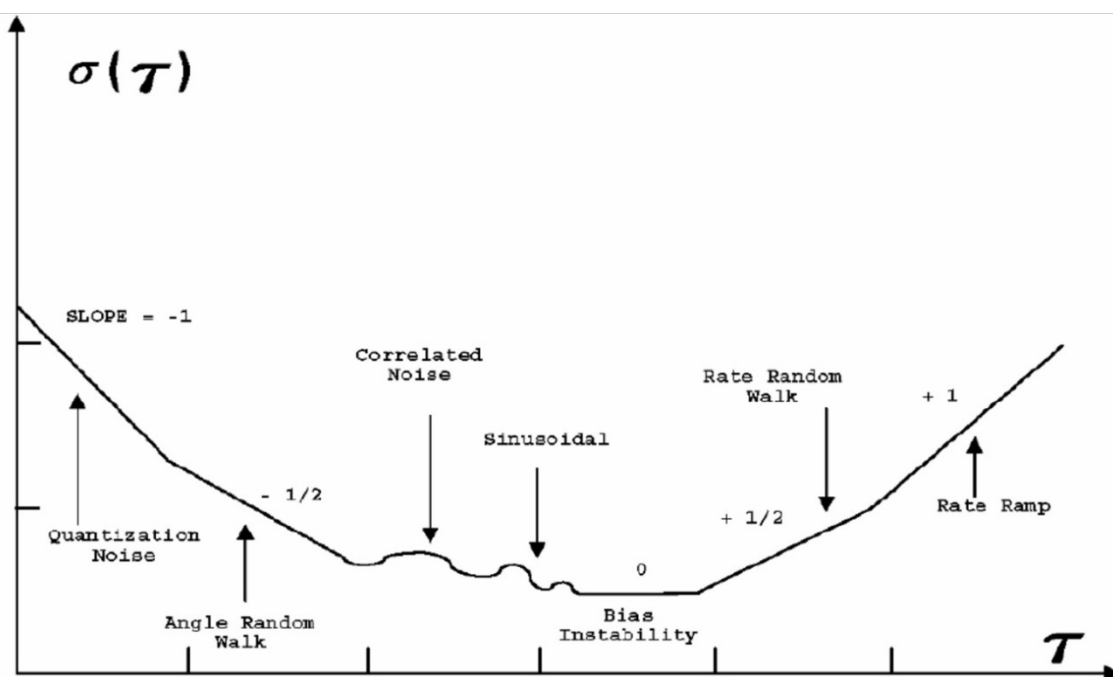
Přestože toto řešení vypadalo jako úspěšné, ukázalo se, že není možné tímto způsobem propojit naprogramovanou jednotku s dodaným frameworkem nejen že se nedařilo úspěšně inicializovat jednotku, ale naprogramování by i po úspěšné inicializaci bylo velmi neefektivní, jelikož nebylo možné vyvolat přerušení (interrupt) a procesor tedy zbytečně vyčkával na vnější požadavek na data.

Nakonec jsem navrhl a napsal poslední a tedy úspěšné řešení této práce a to za využití knihoven HAL. Nyní jednotka SensorTile funguje následujícím způsobem. Program vytvoří s jednotkou spojení přes TCP. Této jednotce zašle požadavek o inicializaci. Inicializační sekvencí je 0x11 a 0x55. Tato sekvence se odešle a správnou odpovědí stvrzující inicializaci je tatáž sekvence. Pokud proběhne vše správně, jednotka odešle stejnou sekvenci zpět a dojde tím k její inicializaci. Po její inicializaci je možné zasílat dotazy na data z jednotky SensorTile. Při odesílání dat nedochází nikdy k odeslání všech dat najednou. Data ze senzorů se odesílají postupně na dotazy, které mají přesný formát. Jelikož jsou data přenášena po bajtech (8bitů) a s daty je v procesoru pracováno jako s daty typu int (16 bitů) je potřeba tento integer rozdělit na polovinu před odesláním a po odeslání dojde v existujícím frameworku k opětovnému složení. Každý dotaz na data ze senzorů obsahuje číslo paketu a další hodnotou přidanou, podle toho, jaká data ze senzoru chceme. Jednotka SensorTile má mnoho senzorů, avšak pro naše potřeby byly přiřazeny hodnoty pouze akcelerometru (0), gyroskopu (1) a magnetometru (2). Z jejichž hodnot je možné vypočítat aktuální pozici senzoru včetně náklonu pro budoucí použití v MOCAP systému.

Na závěr této softwarové části bych rád poznamenal, že pro případné budoucí vylepšení frameworku by se jevilo jako vhodné nastavit odlišnou odpověď na inicializaci než je inicializační sekvence. V průběhu testování jsem se opakovaně setkal s tím, že jednotka byla například chybně naprogramovaná, či dokonce nebyla vůbec připojena k napájení a přesto se inicializovala (zkrat mezi komunikačními kanály RX a TX).

Testování jednotky SensorTile + Allan Variance

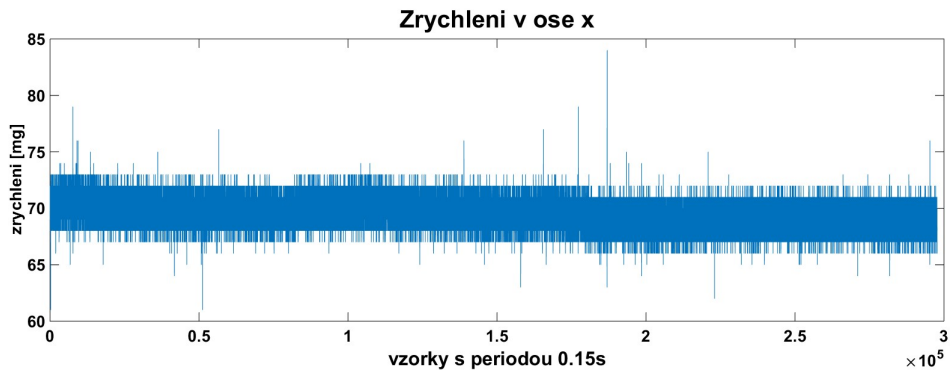
Tímto testováním bylo zjištěno, že realizace softwaru pro jednotku SensorTile byla úspěšná. Jednotka byla testována několikrát po dobu několika hodin. Měření bylo vždy souvislé a nejdelší měření čítá 297696 vzorků s periodou 0,15s (přibližně 12,5h souvislého měření). Z naměřených hodnot byla následně vypočtena Allan Variance, která je zde použita k detekování a měření šumové charakteristiky akcelerometru, kterými data byly naměřeny. Variací existuje několik druhů, pro naše potřeby byla vypočtena Allanova variance s překrýváním, která se používá pro zvýšení přesnosti běžné Allanovy variance.



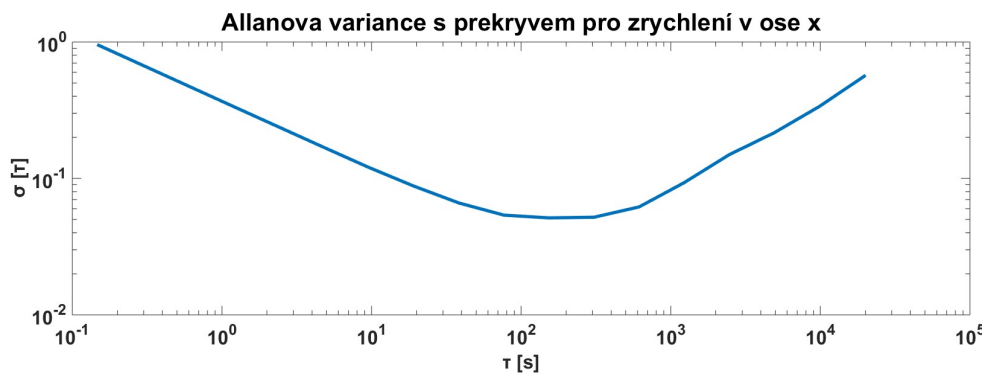
Obrázek 22: Charakteristický tvar Allanovy variance a informace, které z ní lze vyčíst[34]

Na Obrázek 22 můžeme vidět charakteristický tvar Allanovy variance s překrýváním. Díky této varianci jsme schopni zjistit hodnotu biasu, kde bias je konstantní chyba vyskytující se na všech akcelerometrech. Ve většině případů je bias dominantní chybou inerciálních senzorů.

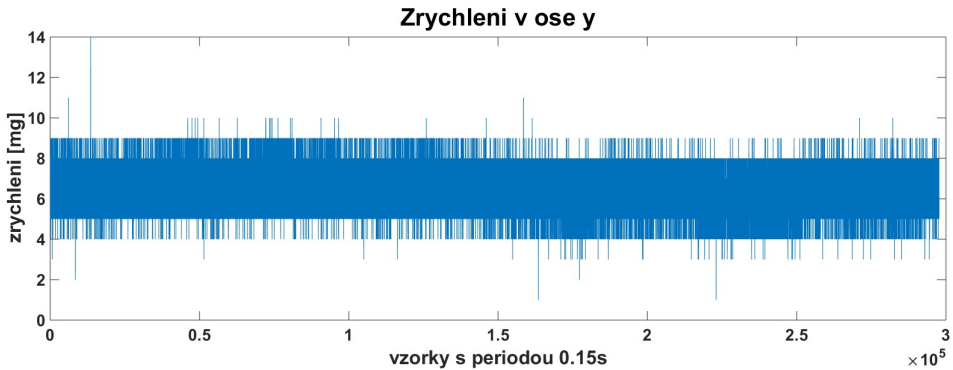
Níže můžeme vidět námi zaznamenané hodnoty z akcelerometru v jednotlivých osách a pro každou tuto osu vykreslenou Allanovu varianci.



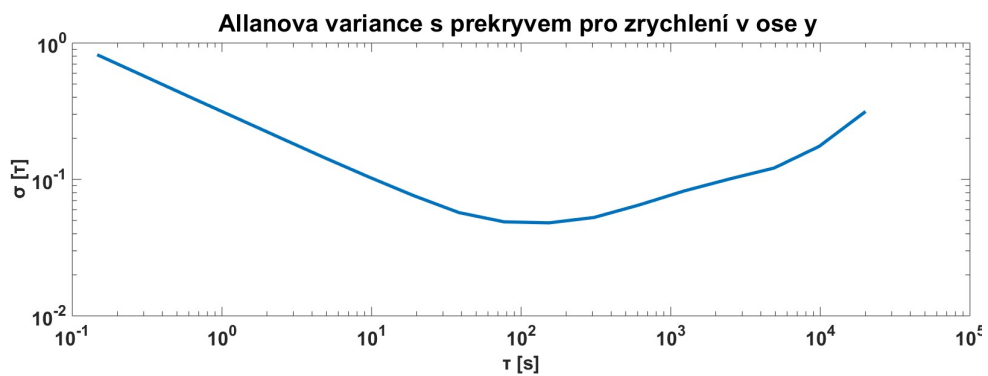
Obrázek 23: Naměřené hodnoty akcelerometrem v ose x



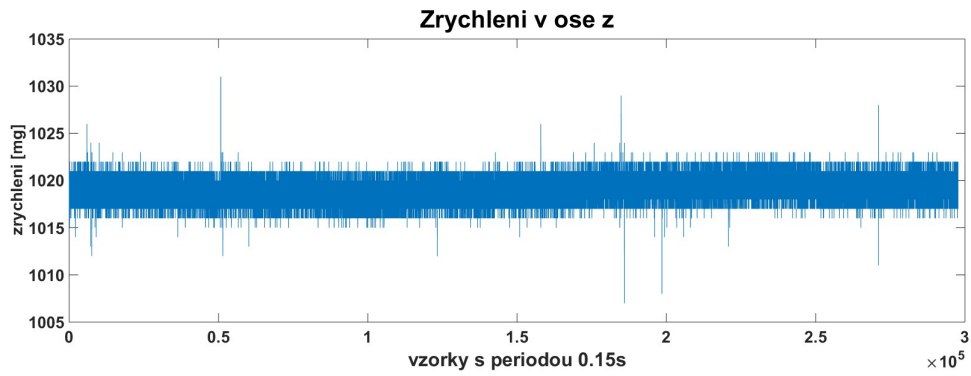
Obrázek 24: Allanova variance pro získané hodnoty z akcelerometru v ose x



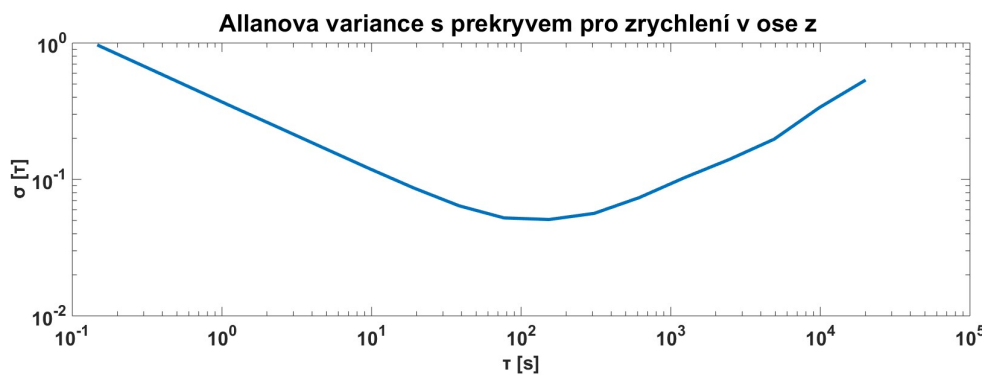
Obrázek 25: Naměřené hodnoty akcelerometrem v ose y



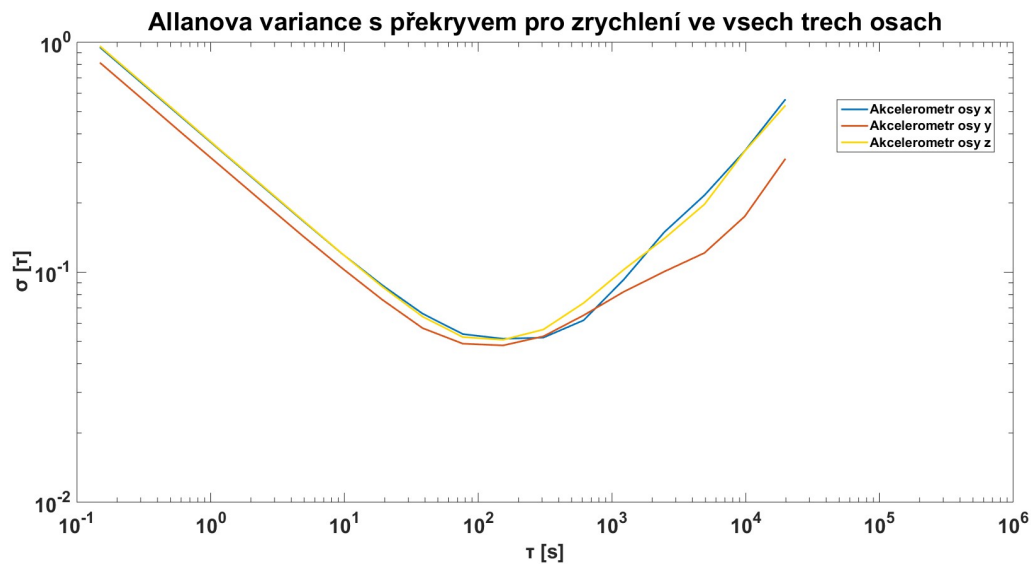
Obrázek 26: Allanova variance pro získané hodnoty z akcelerometru v ose y



Obrázek 27: Naměřené hodnoty akcelerometrem v ose z



Obrázek 28: Allanova variance pro získané hodnoty z akcelerometru v ose z



Obrázek 29: Porovnání Allanových variací pro jednotlivé osy akcelerometru z téhož měření

5.2.4 Komunikace

Aktualizace modulů WiFly a nastavení

Při prvním kontaktu s moduly WiFly, které mi byly dodány, se vyskytlo hned několik zásadních problémů s jejich funkčností. Některé moduly byly zcela zamrzlé a vůbec nereagovaly. Některé posílaly uvítací zprávu do terminálu, avšak často polovina chyběla (nejspíše čtení ze špatného místa v paměti) a nebylo možné aktivovat příkazový řádek tudíž nebylo možné s žádným z modulů komunikovat. Nejprve jsem se pokoušel problém vyřešit sám, ale nakonec jsem navázal komunikaci s podporou od firmy Microchip, která tyto moduly vyrábí.

Na základě této komunikace byl proveden hardwarový factory reset, kdy je nutné před zapnutím zkratovat 2 piny a po zapnutí je 5x rozpojit a znovu zapojit. Tato instrukce zcela chyběla ve všech návodech. Po tomto restartu bylo možné normálně s moduly komunikovat dle návodu. Následně byly moduly aktualizovány na nejnovější verzi, ve které zatím ani u jednoho z modulů nedošlo k podobné chybě.

Po vyřešení těchto problémů a zajištění komunikace s modulem, byl modul nastaven s takovými parametry, aby se automaticky připojoval ke specifické síti a hlavně s nastavením statické IP, různé pro každý modul. IP byla nastavena podle označení jednotlivých modulů, jak můžeme vidět na Obrázek 31. Nastavení této IP adresy je nutné, jelikož TCP spojení v existujícím frameworku se vytváří na základě zadané IP adresy, která je zadávána jako parametr, se kterým modulem má být toto spojení vytvořeno.

Přesto, když už byl modul naprogramován tak, aby se automaticky připojoval ke specifické síti, po několika desítkách odpojení a znovu připojení k napájení došlo k částečnému přemazání nastavení toho modulu. Bylo tedy nutné jej softwarově resetovat na tovární nastavení a znovu celý nastavit. Bohužel, tento problém se stal pouze jednou a není známa jeho příčina. Přesto, pokud by se tyto problémy objevovaly i v budoucnu bylo by vhodné nebo dokonce i nutné moduly vyměnit za jiné. Nejedná se sice o zásadní problém, ale v této aplikaci jsou piny pro napájení a komunikaci napájeny přímo k jednotce SensorTile a potom je tedy programování modulu WiFly komplikované.

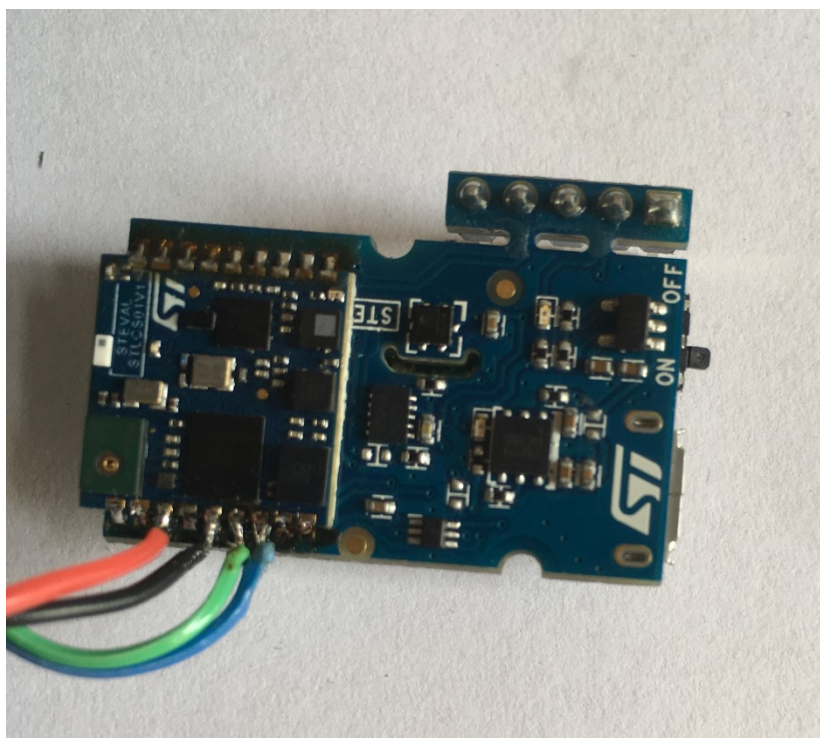
Síť a její realizace

Síť, na které spolu budou zařízení komunikovat bude topologie Star, kde je řídicí jednotkou počítač (AP). K řídicí jednotce (kterou je v našem případě počítač) se budou všechny moduly připojovat. V průběhu vypracování byl požadavek na realizaci Ad Hoc sítě na systému Windows10, ke které se budou moduly automaticky připojovat. Dalším rozšiřujícím požadavkem bylo vytvořit síť pomocí WiFi karty určené do USB. Pro tento účel byly vytvořeny 2 dávkové soubory (jeden pro integrovanou Wifi kartu a druhý pro externí USB WiFi), díky kterým se do příkazové řádky zadá sám příkaz a zapne tak AdHoc síť s takovými parametry, že se nastavené moduly budou automaticky připojovat.

5.2.5 Nový modul 3Dbox

V této části budou ukázány jednotlivé součástky, ze kterých je modul 3Dbox zhotoven, včetně zapouzdření a jejich vzájemné propojení tvořící modul 3Dbox.

Použité součástky + jejich zapojení



Obrázek 30: Jednotka SensorTile - foto z obou stran s připájenými vodiči



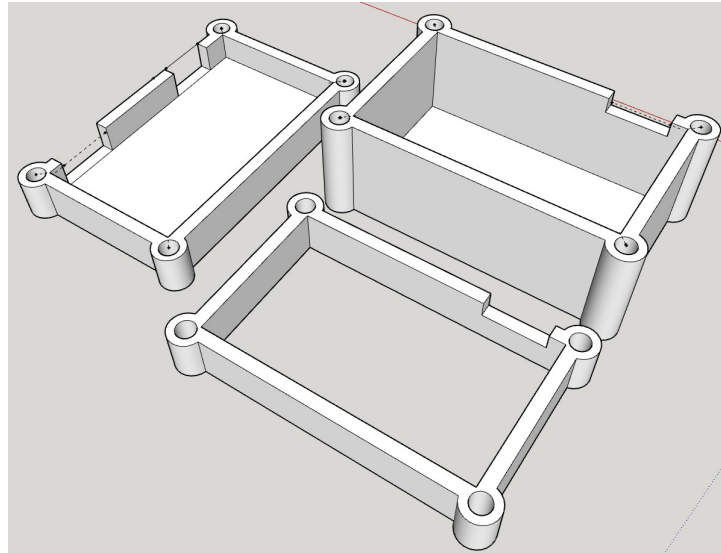
Obrázek 31: Wi-Fi modul WiFly RN131 s připájenými vodiči ke komunikaci s jednotkou SensorTile a k samotnému napájení modulu



Obrázek 32: Ochranný modul pro nabíjení a vybíjení baterie společně s baterií v průběhu nabíjení

Zapouzdření

Všechny součástky jsou ukryty uvnitř krabičky, která byla navržena v programu Google Sketchup a vytištěna na 3D tiskárně. V první verzi krabičky Obrázek 34 byly na sebe jednotlivé komponenty namačkané a bylo tak prakticky nemožné je správně izolovat. Proto jsem vytvořil druhou verzi, ve které jsem pouze přidal jedno „patro“. Patra jsou od sebe oddělena tenkou vrstvou, kterou jsem taktéž vytiskl na 3D tiskárně. Ve spodním patře se nachází baterie a WiFi modul na Obrázek 36. V této části je jeden podélný otvor pro kontrolu diod a tako pro chlazení, jelikož WiFi modul s odběrem 212mA emituje nezanedbatelné množství tepelné energie. V prostředním patře se nachází pouze jednotka SensorTile na Craddlu. V horním patře je už pak pouze ochranný modul pro napájení, stabilizátory napájení s kondenzátorem a vypínač na Obrázek 36 vpravo. Víčko se dnem této krabičky je spojeno pomocí šroubů zakončených matkou, které prochází rozšířenými rohy v krabičce.



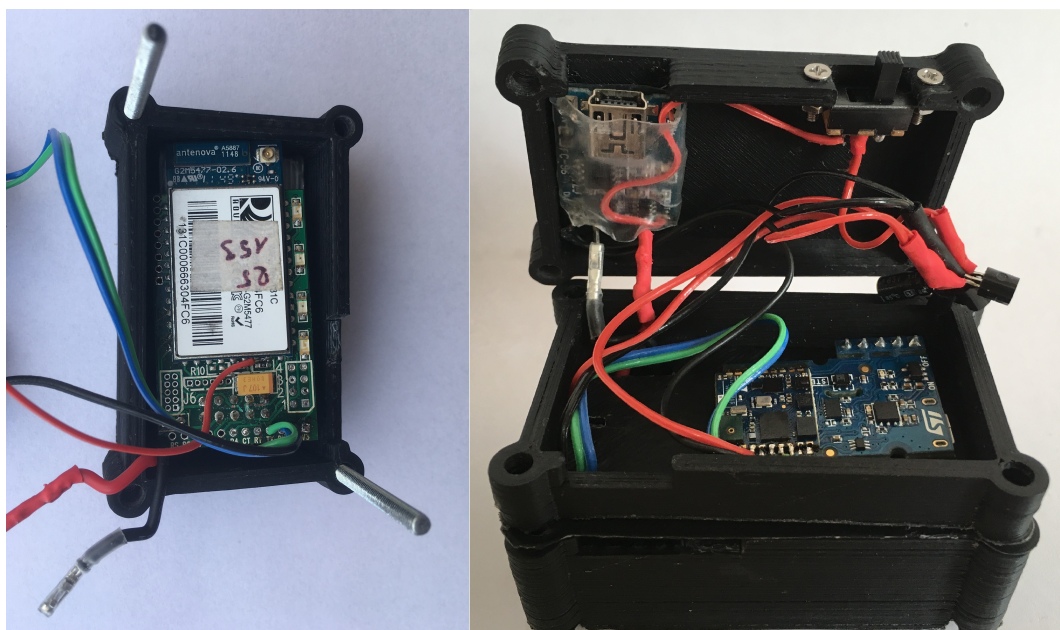
Obrázek 33: Návrh krabičky v programu Google Sketchup



Obrázek 34: První verze modulu 3Dbox



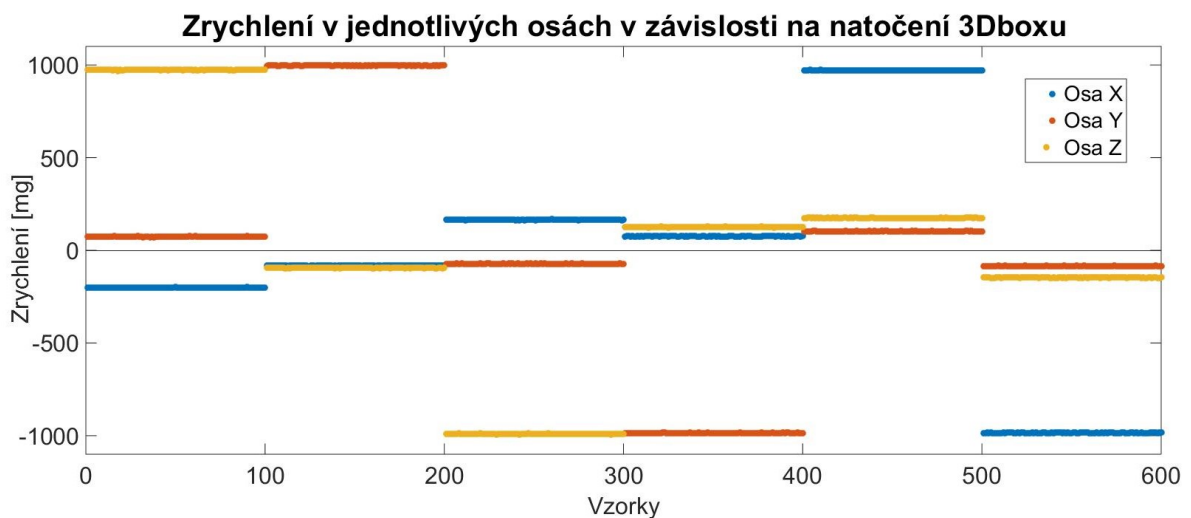
Obrázek 35: Výsledné zapouzdření modulu 3D box



Obrázek 36: Výsledný modul - vlevo obrázek prvního patra modulu, vpravo obrázek dole druhého a nahoře třetího patra modulu

5.2.6 Ověření funkce

Jakmile byla jednotka umístěna v krabici, bylo zajištěno napájení a správné naprogramování, rozhodl jsem se jednotku otestovat. Testování spočívalo primárně k základnímu ověření výstupních dat ze sensorů. Jako první jsem si zkusil ve všech osách (kladným i záporným směrem) změřit gravitační zrychlení. Zapnul jsem tedy snímání vždy pro přesně 100 vzorků. Měření jsem 6x opakoval, pokaždé pro jinou stěnu krabičky (jinou osu nebo jiný směr osy). Všechny data jsem si zaznamenal a následně vykreslil do grafu.

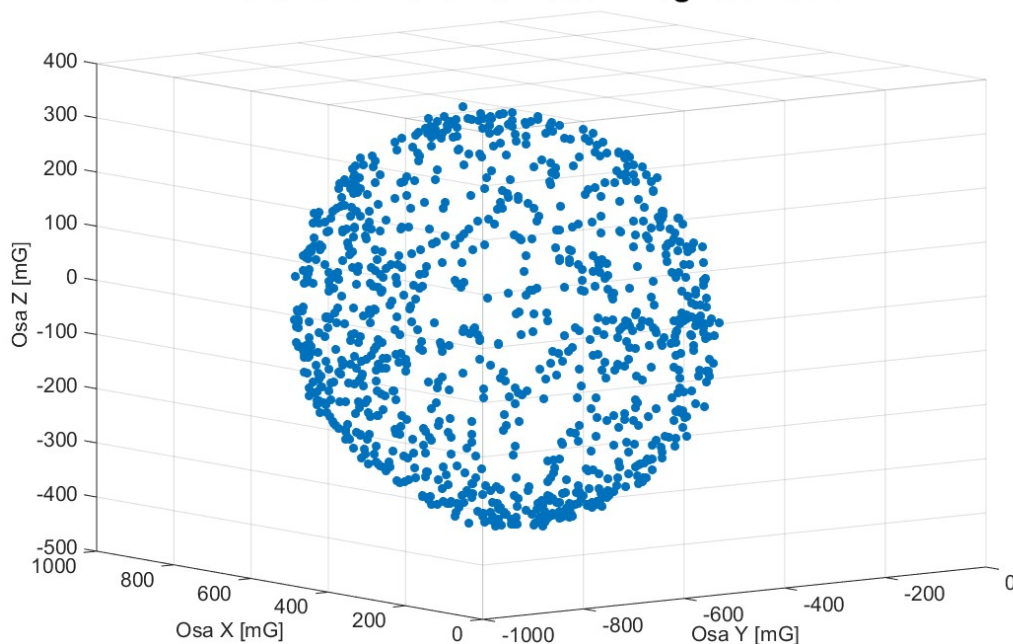


Obrázek 37: Zobrazení zrychlení v jednotlivých osách, kdy byla jednotka vždy otočena na jinou stěnu po sto vzorcích

Jak můžeme vidět, po každých sto vzorcích a tedy po přetočení 3Dboxu na jinou stěnu se vždy jedna osa přibližuje či dokonce dosahuje hodnoty 1000mg což odpovídá hodnotě 1g. A tím jsem si ověřil, že je jednotka schopná měřit zrychlení ve všech osách.

Jako další jsem si chtěl ověřit funkci magnetometru. Pro ověření tohoto senzoru jsem zvolil metodu, že začnu snímat data z magnetometru a modulem 3Dbox budu na jednom místě v prostoru libovolně otáčet a rotovat. Data budu opět zaznamenávat a zpracovávat v programu MATLAB. V naprosto ideálním případě a při nekonečné hustotě vzorků by mělo dojít při vykreslení v 3D grafu k vyobrazení dokonalé koule, se středem v počátku souřadnic. Hodnoty, které by byly na povrchu koule, by znázorňovaly intenzitu magnetického pole Země.

Grafické znázornění dat z magnetometru



Obrázek 38: Data z tříosého magnetometru z jednotky SensorTile zaznamenané v grafu

Můžeme vidět, že došlo opravdu k vykreslení koule ovšem zcela mimo počátek souřadnic. Tento jev je zcela běžný a jen těžko se mu vyhneme. Ať už součástky, ze kterých je 3Dbox sestaven, nebo další zařízení okolo něj mohou generovat různě silná magnetická pole a tím narušují pole geomagnetické. Vychylují tak střed této koule mimo střed souřadnic. Případná kalibrace spočívá v nastavení offsetu, který tyto parazitní zdroje magnetického pole v ideálním případě zcela potlačí a bude tedy počítáno pouze s geomagnetickým polem. Pro spočítání offsetu a nalezení středu koule existuje několik metod, jako například metoda nejmenších čtverců. Po úspěšné kalibraci je možné z hodnot získaných senzorem okamžitě vypočítat náklon senzoru. [36]

Mým cílem nebylo jednotku kalibrovat, ale pouze ověřit jestli data ze senzorů jsou relevantní a díky vykreslení této koule lze říci, že i senzory magnetometru fungují ve všech osách správně.

5.2.7 Návod k použití

Níže popsany návod platí pro počítač s operačním systémem Windows 10 a pro verzi programu MATLAB R2014b.

Modul 3Dbox si položíme matičkami na stůl. A otočíme ho otvory směrem k sobě.

Přesunutím vypínače doleva zapneme napájení a rozsvítí se modrá dioda, jak můžeme vidět na Obrázek 35. V zápětí začne blikat dioda červená, upozorňující, že WiFi modul není připojen. Je tedy potřeba na PC do příkazové řádky zadat příkaz:

```
netsh wlan set hostednetwork mode=allow ssid=papanetcz key=papanetcz
```

(údaje SSID a KEY je možné změnit v nastavení WiFi modulu, ale pro aktuální nastavení je potřeba nastavit síť s těmito parametry). Dále příkaz:

```
netsh wlan start hostednetwork
```

který aktivuje hotspot. Po připojení červená dioda blikat přestane. Nyní můžeme spustit MATLAB R2014b a inicializujeme knihovny pomocí příkazů:

```
CANTBX_InstallToolbox
```

```
CANTBX_InitTxb
```

Po úspěšné inicializaci se vypíše návratová hodnota 1. Následně inicializujeme jednotku 3Dbox pomocí příkazu:

```
SSP_OpenTCP( 0, (poslední číslo z IP WiFi modulu)-128 )
```

Při výpisu návratové hodnoty 1 se jednotka úspěšně inicializovala. Pokud dojde k výpisu 0, inicializace nebyla úspěšná. Současně s vypisáním návratové hodnoty se vypíše i hlášení buď "Socket error" nebo "Init error". Při výpisu "Socket error" je chyba ve spojení mezi WiFi a PC. Při výpisu "Init error" je chyba někde uvnitř modulu 3Dbox.

Pokud dojde k úspěšné inicializaci jednotky, můžeme se dotazovat na data z jednotlivých senzorů pomocí příkazu:

```
[iRetVal fX fY fZ] = SSP_Read_IMU( 0, (číslo pro daný senzor))
```

0 – akcelerometr

1 – gyroskop

2 – magnetometr

A do proměnných fX fY fZ se uloží hodnoty získané ze senzoru pro jednotlivé osy.

6 Závěr

Splnil jsem zadání ve všech bodech a výsledkem je funkční zařízení, které je o polovinu menší, než předchozí verze. Přestože zadání této práce se týká přímo komunikačních modulů pro sensorové sítě a praktická část přímo navazuje na zadání bakalářské práce, bakalářská práce jako taková zasahuje mnoho oblastí, o kterých mohlo být pojednáváno. Proto jsem se rozhodl začátek své práce věnovat čistě teoretickému zpracování bezdrátových komunikačních sítí a jejich komunikačních modulů a v další části přešel k tomu, co by mělo být výsledkem mé praktické části a to je modul 3Dbox, díky němuž bude možné zaznamenávat a digitalizovat pohyb člověka – MoCap. Pro dané zadání této práce, kde měla být provedena rešerše bezdrátových modulů pro příjem a odesílání dat, aktualizován software pro modul 3Dbox a následně realizace nového modelu modulu 3Dbox s jednotkou SensorTile. Dále měl být navržen a realizován základní software pro komunikaci s již existujícím frameworkem. Bylo vypracováno řešení, jehož výsledkem je požadované zmenšení celého modulu s využitím novější řady senzorů umístěných na jednotce SensorTile od firmy STMicroelectronics, umožňující vyšší přesnost snímaných dat. Veškerý přenos dat ze senzorů do počítače a také komunikace počítače se sensorovou jednotkou je zajištěna standardem WiFi, konkrétně jednotkou WiFly RN131 od firmy Microchip.

Při programování mikroprocesoru pro správné zpracování dat ze senzorů a následné odeslání a zpracování dat připraveným frameworkem se mi podařilo vhodně naprogramovat jednotku SensorTile pomocí knihoven HAL a dodanými poklady z předcházejících projektů. Při hledání správného řešení jsem si také vyzkoušel naprogramovat vlastní softwarový UART a přestože se jednalo o slepou uličku, byla mi tato zkušenost přínosem.

Jak WiFi, tak SensorTile je napájen baterií SYMA X5SW PRO, která splňuje podmínku napájení celého setu po dobu minimálně dvou hodin.

Přesto, že byly splněny všechny body zadání, jsem si jistý, že by bylo možné modul dále vylepšovat. Se zlepšující elektronikou bude možné vytvářet lepší moduly. Přesto si myslím, že i s aktuálním hardwarem je zlepšení možné. Pokud bych si vzal příklad od výrobců této kategorie MoCap, tak v naprosté většině se využívá pouze jednoho bezdrátového modulu pro komunikaci s počítačem a zbylé moduly jsou propojeny s řídicí

jednotkou připevněnou na těle. Ta odesílá data přes modul pro bezdrátovou komunikaci do PC (nejčastěji WiFi). Takové řešení má své výhody nejen ve významné úspoře energie, ale také v úspoře za nakoupený hardware. Řešení, kdy by všechny sensorové jednotky byly svedeny do jedné řídicí jednotky, by mohlo být dále rozšířeno o vlastní offline verzi. Veškerý pohyb by byl zaznamenáván například na SSD disk upevněný na těle a data by mohla být zpracována až dodatečně (toto řešení je možné i s nynější podobou systému, byla by ovšem komplikovaná synchronizace dat).

Ač se práce zdála jednoduchá, tak v průběhu vypracovávání vzniklo mnoho nečekaných komplikací. K mému překvapení nejvíce těchto chyb bylo při zdánlivě jednoduchému úkolu - aktualizování WiFi firmwaru. I přes všechny problémy a komplikace, na které jsem při cestě za řešením narazil, mě práce bavila a byla pro mě velikým přínosem.

Použitá literatura

- [1] BEREN ,DAVID. The 8 best routers with the longest range, *Lifewire* [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/best-long-range-routers-4122554>
- [2] BLUETOOTH. Bluetooth 5: What it's all about [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/bluetooth5>
- [3] DIBELKA, JAKUB. *Komunikační rozhraní modulu ST iNemo-M1*. Praha,2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření. [online], [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/62142/F3-BP-2015-Dibelka-Jakub-bakalarska%20prace%20Dibelka.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [4] FRAZER, BRYANT. Xsens revamps, slashes price on its Inertial mocap systems [online], 2014, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <http://www.studiodaily.com/2014/11/xsens-revamps-slashes-price-on-its-inertial-MoCap-systems/>
- [5] KOČMAN ROSTISLAV. Co dokáže technologie Bluetooth?, *iDnes* [online], 2011, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: https://www.mobil.idnes.cz/co-dokaze-technologie-Bluetooth-dae-/mob_tech.aspx?c=A010527_0033353_mob_tech
- [6] LIBERATORE, STACY. Smart tattoos turn shin into phone controls, *Dailymail* [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <//www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4325650/Smart-tattoos-turn-skin-smartphone-controls.html>
- [7] METAMOTION, Gipsy7 torso motion capture system [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <http://metamotion.com/gypsy/Gypsy-6-torso.html>
- [8] METAMOTION, *Optical Motion Capture systems* [online]. 2017. [cit. 21. května 2017] Dostupné z: <http://metamotion.com/motion-capture/optical-motion-capture-1.htm>

- [9] MICROCHIP, *RN-134 WiFly GSX super module surRF board datasheet*, [online], 2012, [cit. 21. května 2017].
Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/WiFly-RN-134-DS.pdf>
- [10] MICROSOFT, Kinect for Windows sensor components and specifications [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>
- [11] NSUBUGA, JIMMY. *Electronic tattoos will turn skin blemishes into smartphone controls*, *Metro* [online], 2017, [cit. 21. května 2017] Dostupné z: <http://metro.co.uk/2017/03/19/electronic-tattoos-will-turn-skin-blemishes-into-smartphone-controls-6520672/>
- [12] OVADIA, DOLLY. Animating with Kinect [online], 2012, [cit. 21. května 2017].
Dostupné z: <https://www.onysus.com/motion-capture/>
- [13] PAVLIS JAKUB. ZigBee-když je pomalejší síť výhodnější [online], 2011, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <http://notebook.cz/clanky/technologie/2011/ZigBee>
- [14] PEDRO, NOGUIRA. *Motion Capture Fundamentals* [online]. 2011. [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: https://paginas.fe.up.pt/~prodei/dsie12/papers/paper_7.pdf
- [15] PETERS, GARRY. *Motion capture technology to be used to train sporting hopefuls*, *Factor* [online]. 2014. [cit. 21. května 2017] Dostupné z: <http://factor-tech.com/3d-modelling/8647-motion-capture-technology-to-be-used-to-train-sporting-hopefuls/>
- [16] PEYONG-GOOK JUNG, SEHOON OH, GUKCHAN LIM, KYOUNGCHUL KONG. A mobile motion capture system based on inertial sensors and smart shoes [online], 2014, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <http://dynamicsystems.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1734670>
- [17] QUINTIC, Quintic hardware and accessories [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <http://www.quinticsports.com/accessories/>

- [18] RCSKLADEM, <https://www.rcskladem.cz>, [online], 2017, [cit. 21. května 2017].
Dostupné z: <https://www.rcskladem.cz/cz-detail-901812240-baterie-li-pol-1200-mah-3.7v-syma-x5sw-pro.html>
- [19] SLINTÁK, VLASTIMIL. Objednávka ZigBee modulů [online], 2012, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <http://uart.cz/652/objednavka-ZigBee-modulu/>
- [20] STM, UM2101 - User manual SensorTile [online], 2016, [cit. 21. května 2017].
Dostupné z:
http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group0/bc/b1/ad/c8/36/de/40/92/DM00320099/files/DM00320099.pdf/jcr:content/translations/en.DM00320099.pdf
- [21] Swimming: A study of biomechanics using underwater motion capture, *Youtube* [online]. 25.8.2013 [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qtXz6qocciM>
- [22] VINKLER MICHAL. *Snímání a rekonstrukce pohybu postavy*, Brno 2009. Bakalářská práce, Masarykova univerzita v Brně [online], [cit. 21. května 2017] Dostupné z: https://is.muni.cz/th/208036/fi_b/bc.pdf
- [23] XSENS, An introduction to the beginning of motion capture technology [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://www.xsens.com/fascination-motion-capture/>
- [24] XSENS, World's first 3D inertial motion capture of a horse in motion [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://www.xsens.com/press-releases/worlds-first-3d-inertial-motion-capture-horse-motion/>
- [25] Simi Reality Motion Systems, Swimming analysis [online], 2018 [cit. 31. března 2018]. Dostupné z: <http://www.simi.com/en/applications/sport/swimming-analysis.html>
- [26] LIBOR KIMPL. *Standardy pro dohledové centrum sensorové sítě*. Olomouc, 2012. Diplomová práce. [online], [cit. 13. dubna 2018]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/icvcz9/KimplDP.pdf>
- [27] Silicon labs, The Evolution of Wireless Sensor Networks [online], 2013, [cit. 13. dubna 2018]. Dostupné z:

- <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>
- [28] CHEE-YEE CHONG, SRIKANTA P. KUMAR. *Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges* [online], 2003, [cit. 13. dubna 2018] Dostupné z: <http://robertdick.org/sensor-nets/papers/chong-sensornets.pdf>
- [29] ANTONÍN VOJÁČEK, MEMS - díl 1. - Co to je a jak to vypadá ?, [online], 2006, [cit. 13. dubna 2018]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz//clanek/2006111901>
- [30] YOLE Développement, *MEMS industry: RF is changing the game...*, [online], 2017, [cit. 13. dubna 2018]. Dostupné z: http://www.yole.fr/MEMSManufacturers_Ranking_2016.aspx#.Ws_c5JcuCUI
- [31] SEBASTIAN BUTTRICH. *Basic Wireless and Infrastructure Topologies* [online], 2006, [cit. 13. dubna 2018] Dostupné z: http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_en/04_Infrastructure_Topology/04_en_mmtk_wireless_basic-infrastructure-topology_slides.pdf
- [32] MOHAMMED ABO-ZAHHAD, MOHAMMED FARRAG, ABDELHAY ALI. *A Comparative Study of Energy Consumption Sources for Wireless Sensor Networks* [online], 2015, [cit. 13. dubna 2018] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/274200328_A_Comparative_Study_of_Energy_Consumption_Sources_for_Wireless_Sensor_Networks
- [33] SHADOW MOTION, Motion Capture System [online], 2018, [cit. 13. dubna 2018]. Dostupné z: <https://www.motionshadow.com/>
- [34] FREESCALE SEMICONDUCTOR, *RN-134 WiFly GSX super module surRF board datasheet*, [online], 2015, [cit. 17. dubna 2018]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN5087.pdf
- [35] NanJing Top Power ASIC Corp, TP4056 datasheet [online], [cit. 16. května 2018]. Dostupné z: <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>
- [36] MICHAL KUCHAR. *Návrh aplikace s implementací algoritmu kalibrace MEMS magnetometru*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky. [online], [cit. 17. května 2018]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70768/F2-BP-2017-Kuchar-Michal-BP_Michal_Kuchar_2017.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

- [37] 3D motion capture system, *Youtube* [online]. 21.8.2013 [cit. 21. května 2017].
Dostupé z: <https://www.youtube.com/watch?v=Tpy9Vtelppk>. Kanál uživatele
Pavel Paces
- [38] NOITOM, VFX And Animation [online], 2018, [cit. 13. dubna 2018]. Dostupné z:
<https://www.noitom.com/>
- [39] STM, LE33CZ datasheet [online], 2005, [cit. 16. května 2018]. Dostupné z:
<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.330-117.1.pdf>
- [40] ART, Markers [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <http://ar-tracking.info/products/markers-targets/markers/>
- [41] COMPUTERHOPE, WiFi, [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z :
<https://www.computerhope.com/jargon/w/WiFi.htm>
- [42] EST, Igs cobra suit [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z: <https://est-kl.com/it/news/265-vicon-bonita-tracking-system-available-from-est.html>
- [43] KYSILKA, RADEK. ZigBee [online], 2003, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z:
<https://www.lupa.cz/clanky/zigbee/>
- [44] MICROCHIP, *RN-131 datasheet*, [online], 2012, [cit. 21. května 2017].
Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/rn-131-ds-v3.2r.pdf>
- [45] OPTITRACK, <https://optitrack.com> [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné
z: <https://optitrack.com/systems/#animation/prime-41/24>
- [46] POLHEMUS, <http://polhemus.com/> [online], 2017, [cit. 21. května 2017]
Dostupné z: <http://polhemus.com>
- [47] STM, L3G4200D datasheet [online], 2010, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/04/46/d6/00/be/d9/46/ae/CD00265057.pdf/files/CD00265057.pdf/jcr:content/translations/en.CD00265057.pdf>
- [48] STM, LSM303DLHC datasheet [online], 2013, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/56/ec/ac/de/28/21/4d/48/DM00027543.pdf/files/DM00027543.pdf/jcr:content/translations/en.DM00027543.pdf>
- [49] STM, LSM6DSM datasheet [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/76/27/>

cf/88/c5/03/42/6b/DM00218116.pdf/files/DM00218116.pdf/jcr:content/translat
ions/en.DM00218116.pdf

[50] SYNERTIAL, Gloves [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z:
[//https://synertial.com/products/gloves/](https://synertial.com/products/gloves/)

[51] WIFIHOMÉ. <https://wifihome.cz> [online], 2017, [cit. 21. května 2017]. Dostupné z:
<https://wifihome.cz/clanky/>