

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Komunikační rozhraní modulu ST
iNemo-M1

Praha, 2015

Autor: Jakub Dibelka

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 svému vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Pavlu Pačesovi Ph.D., za věnovaný čas, podnětné rady a připomínky při vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za jejich podporu během celého studia.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je návrh elektroniky rozhraní modulu iNemo M1, které umožní přenos změřených dat do počítače pomocí vhodné bezdrátové technologie a jejich využití v programu pro 3D Motion Capture System. Součástí práce je také softwarový návrh vlastního programu pro ARM Cortex-M3 procesor, který je součástí modulu a také zapouzdření vytištěné na 3D tiskárně. Tato práce se nejprve zabývá rozbořem jednotlivých systémů pro Motion Capture, následuje porovnání iNemo M1 s jeho předchůdcem, popis návrhu elektroniky rozhraní a návrh softwaru. V závěru práce je vybrána nejvhodnější bezdrátová technologie, které předcházelo testování.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to design electronics of module interface iNemo M1. The interface enables transmission of measured data to the computer using wireless technology. Data will be used in the programme for 3D Motion Capture System. Part of the thesis is also the software design of programme for ARM Cortex-M3 processor, which is a part of the module and design of the case printed on a 3D printer. In the beginning of the thesis is explanation of each system for Motion Capture followed by comparison of iNemo M1 with its ancestors and the description of the design of electronics of module interface with software design. In the end of the work the best wireless technology were chosen and testing of each technology is described there.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jakub Dibelka**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Komunikační rozhraní modulu ST iNemo-M1**

Název tématu anglicky: **ST iNemo-M1 Communication Interface**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte desku plošných spojů a základní SW vybavení umožňující využití modulu iNemo-M1 ve výukové platformě SSP a v systému snímání pohybu člověka 3D Motion Capture. Modul bude umožňovat připojení k bezdrátovému rozhraní WiFi nebo Bluetooth a bude umět přenášet základní data do osobního počítače. Součástí práce je i návrh zapouzdření modulu, který bude následně vytištěn na 3D tiskárně.

Seznam odborné literatury:

- [1] MENDES FILHO, José Mango: Visualization of a 3D Motion Capture Sensor Network, 2013, Report

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 12. listopadu 2014

Platnost zadání do¹: 31. srpna 2016


Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

L. S.


Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 11. 2014

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
1 Úvod	1
2 Technologie 3D Motion Capture System	3
2.1 Systémy dle zpracování dat	3
2.1.1 On-line systém	3
2.1.2 Offline systém	4
2.2 Systémy dle technologie	4
2.2.1 Optický systém	4
2.2.2 Optoelektrický systém	6
2.2.3 Mechanický systém	7
2.2.4 Inerciální systém	7
2.2.5 Magnetický systém	8
2.2.6 Ostatní systémy	8
2.3 Vlastnosti systémů	9
2.4 Porovnání technologií	9
2.5 Existující systémy	10
2.5.1 Optický systém	10
2.5.2 Optoelektrický systém	12
2.5.3 Mechanický systém	13
2.5.4 Inerciální systém	14
3 Návrh řešení	17
3.1 Požadavky na nový systém	17
3.1.1 Hardware	17

3.1.2	Estetika	18
3.1.3	Funkčnost	18
4	Řešení	19
4.1	Návrh rozhraní	19
4.1.1	iNemo M1	20
4.1.2	Obvod dohledu baterie	22
4.1.3	Regulátor napětí	23
4.1.4	Akumulátor	23
4.1.5	Ostatní součástky a konektory	25
4.2	Porovnání starého a nového systému	25
4.2.1	Porovnání elektroniky obou systémů	26
4.2.2	Chování starého systému	27
4.3	Prototyp	28
4.3.1	Schéma zapojení	28
4.3.2	Návrh desky plošného spoje	28
4.3.3	Zjištění nedostatků	29
4.3.4	Testování prototypu	30
4.4	Rozbor bezdrátových technologií	30
4.4.1	Bezdrátové technologie	30
4.4.2	Metodika testování	32
4.4.3	Výsledek testování	33
4.5	Popis snímací jednotky	38
4.5.1	Hardware	38
4.5.2	Zapouzdření systému	40
4.5.3	Software	41
5	Závěr	43
	Literatura	49
A	Schéma zapojení	I

Seznam obrázků

2.1	Obrázek aktivní značky a napájecího zdroje, převzato z [35]	5
2.2	Obrázek pasivní reflexní značky s různými rozměry, převzato z [36]	5
2.3	Ilustrace principu optického systému s více objekty [37]	6
2.4	Ilustrace principu optoeletrického systému, převzato z [12]	6
2.5	Ilustrace principu mechanického systému, převzato z [11]	7
2.6	Ilustrace principu inerciálního systému, převzato z [33]	8
2.7	Obrázek kamer od firmy Viscon: zleva Bonita a T-Series, převzato z [52] a [50]	11
2.8	Obrázek kamer od firmy Motion Analysis: zleva Raptor, Kestrel a Osprey, převzato z [32], [30] a [31]	11
2.9	Obrázek technologií nabízených firmou NaturalPoint: zleva Trackir, Op- tiTrack a SmartNav, převzato z [28], [26] a [27]	12
2.10	Obrázek technologie ShapeWrap III od firmy Measurand, převzato z [16],	12
2.11	Obrázek technologie ShapeHand od firmy Measurand, převzato z [15], . .	13
2.12	Obrázek exoskeletonu ke snímání pohybu prstů od firmy Dexta Robotics, převzato z [4] a [3]	13
2.13	Obrázek exoskeletonů od firmy Motionwerx: zleva GYPSY 6 a GYPSY 7, převzato z [23] a [24]	14
2.14	Obrázek systému ČVUT, převzato z [17, strana 10]	15
2.15	Obrázek obleku s inerciálními snímači od firmy Synertial, převzato z [48]	15
2.16	Obrázek rukavic s inerciálními snímači od firmy Synertial, převzato z [46]	16
4.1	Obrázek skutečného modulu iNemo M1, převzato z [44]	20
4.2	Blokové schéma modulu iNemo M1, převzato z [43]	21
4.3	Obrázek obvodu dohledu baterie MCP73833, převzato z [21]	22
4.4	Obrázek regulátoru napětí MCP1702T3302ECB, převzato z [19]	23
4.5	Obrázek Li-Ion akumulátoru, převzato z [49]	24

4.6	Obrázek iNema V2, převzato z [42]	27
4.7	Obrázek prototypu elektroniky rozhraní	29
4.8	Ilustrace bezdrátových modulů, který byly použity při testování: zleva XBEE WiFi S6B, RN 41, XBEE PRO, převzato z [8], [7] a [39]	32
4.9	Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u sériové linky	33
4.10	Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u sériové linky	34
4.11	Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u WiFi modulu XBEE	34
4.12	Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u WiFi modulu XBEE	35
4.13	Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u Bluetooth modulu RN 41	35
4.14	Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u Bluetooth modulu RN 41	36
4.15	Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u ZigBee modulu Xbee PRO	36
4.16	Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u ZigBee modulu Xbee PRO	37
4.17	Obrázek elektroniky rozhraní modulu iNemo M1	39
4.18	Obrázek vytisknutého zapouzdření systému	40
4.19	Vývojový diagram programu snímací jednotky	42

Seznam tabulek

2.1	Porovnání technologií	10
4.1	Tabulka základních parametrů	22
4.2	Tabulka základních parametrů baterie	24
4.3	Tabulka rozměrů v 5 třídě přesnosti	29
4.4	Tabulka tříd Bluetooth	31
4.5	Tabulka teoretické rychlosti WiFi	31
4.6	Tabulka testovaných modulů	32
4.7	Tabulka popisu hardwaru	38
4.8	Tabulka indikace nabíjení, kde X znamená, že LED dioda svítí	40

Kapitola 1

Úvod

Cílem bakalářské práce je návrh elektroniky rozhraní modulu iNemo M1, které umožní bezdrátový přenos dat do počítače. V počítači dojde ke zpracování změřených dat a jejich následné využití v programu 3D Motion Capture System.

Vlivem neustálého rozvoje elektroniky vzniklo několik systémů, které dokáží nahrát a zdigitalizovat pohyby živých osob či zvířat nebo neživých předmětů. Tyto systémy souhrnně nazýváme 3D Motion Capture System, také MOCAP systémy. Do češtiny lze termín přeložit jako systémy pro zachycení pohybu nebo systémy snímání pohybu. Herní a filmoví fandové dozajista vědí, že tyto systémy se hojně využívají při vytváření podkladů pro tvorbu počítačových her, kde se nahraná sekvence pohybu člověka přiřadí hrdinovi, který se posléze pohybuje, gestikuluje a celkově se chová přirozeněji. Ve filmovém průmyslu se pro natočení epických scén kombinuje „zelené plátno“ a nahrané pohyby z MOCAP systému. Dnes situace zašla až tak daleko, že se nenahrávají pouze pohyby lidí, ale využívají se i pohyby zvířat. Sportovní trenéři rádi nahrávají pohyby svých chovanců při konání sportovním výkonu [40], pohyby zpětně analyzují a provádějí úpravy cvičebního plánu. Na leteckém simulátoru umístěném na ČVUT na fakultě elektrotechnické v Praze se nahrávají pohyby pilotů, jakým způsobem se chovají při pilotování a jaké přístroje v průběhu letu sledují. Dále tyto systémy nalezneme ve zdravotnictví, vojenství, vědě, reklamě, zoologii a dalších odvětvích [34].

MOCAP systémy jsou založeny na několika rozdílných technologiích se svými specifickými vlastnostmi. V současné době se primárně používají optické, mechanické, magnetické, akustické, rádiové a inerciální snímací systémy. Tato práce se zabývá inerciálním snímacím systémem, jež používá dvojici senzorů, tedy akcelerometr a gyroskop.

V navrhovaném systému je použit modul iNemo M1 od firmy STMicroelectronics. Tento modul obsahuje tříosý gyroskop, tříosý akcelerometr a tříosý magnetometr.

Práce obsahuje popis, jakým způsobem bylo postupováno při návrhu elektroniky rozhraní modulu, která dovolí naprogramování modulu a připojení bezdrátového zařízení umožňující přenesení změřených dat ze senzoru do osobního počítače. Vzhledem k tomu, že existuje velké množství technologií umožňujících bezdrátový přenos jsou zde jednotlivé technologie rozebrány a porovnány. Dále je zde porovnán starý funkční systém, který využívá předchůdce iNema M1, jež se nazývá iNemo V2.

Kapitola 2

Technologie 3D Motion Capture System

V této kapitole rozdělím a popíši jednotlivé technologie používané v MOCAP systémech od nejvyužívanějších po méně užívané a také se zaměřím na jejich výhody a nevýhody. MOCAP systémy dělíme do několika skupin dle určitých specifikací. Nejprve podle toho, jestli jsou změřená data zpracována a zobrazena okamžitě nebo se počká na dokončení záznamu a následně se zobrazí pohyb. Tedy online a offline systémy [38]. Z technologického hlediska dělíme systémy na optické, mechanické, inerciální, magnetické, akustické a rádiové. Dále se zmíním o vlastnostech každého systému a v závěru kapitoly porovnáám jednotlivé technologie navzájem.

2.1 Systémy dle zpracování dat

2.1.1 On-line systém

On-line neboli realtime systémy nebo také systémy s okamžitou odezvou jsou založeny na snímání pohybu reálné postavy a jeho zobrazení na virtuálním modelu současně, mnohdy vzniká zpoždění, které je však nežádoucí.

2.1.2 Offline systém

Offline systémy nejdříve nahrají pohyb, uloží, zpracují, především z důvodu odstranění šumu a poté se přiřadí virtuálnímu modelu.

2.2 Systémy dle technologie

V dnešní době existuje velké množství technologií použitých v MOCAP systémech. Liší se především způsobem měření pohybu, využívající rozdílných fyzikálních principů. Tyto systémy jsou optické, optoeletrické, mechanické, inerciální, magnetické a akustické.

2.2.1 Optický systém

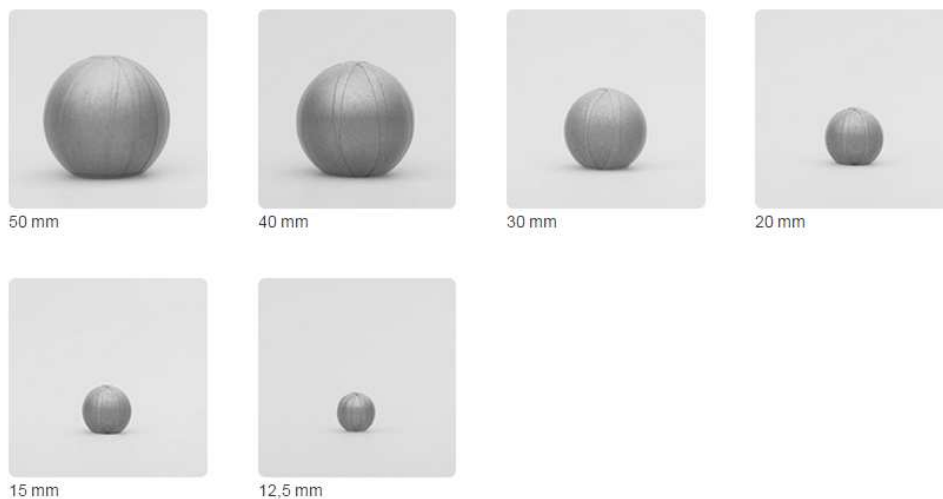
V dnešní době jsou optické systémy ve velké hojnosti používány. V prostoru je rozmístěno několik kamer, tak aby snímaly daný objekt z několika pohledů a poté, pomocí vhodného algoritmu je vytvořen virtuální model, představující pohybující se objekt. Ve většině případech se jedná o CCD nebo CMOS kamery, jejichž počet je od 4 do desítek (stovek) v závislosti na aplikaci. Kamery snímají význačné body, které mohou mít různé tvary. Význačné body (dále jen „značky“) mohou být aktivní a emitovat světlo nebo světlo pouze odrážet. Pasivní značky mají na svém povrchu reflexní vrstvu, která odráží světlo. V případě, že nepoužijeme značky ať už aktivní nebo pasivní, kamery snímají celý objekt a o vyhodnocení se stará několik algoritmů, které objekt rozpoznají a parametrizují pohyb. Společnou nevýhodou optického systému je zablácení či zakrytí značky nebo jakékoliv části snímaného objektu. Společnou výhodou systému využívající značky je vysoká přesnost, využití v systémech s okamžitou odezvou, rychlost snímání a možnost snímání více objektů v prostoru.

- **Aktivní značky:** Aktivní značky mají svůj světelný zdroj a emitují světlo. Díky tomu je možné sledovat pohyb objektu i na větší vzdálenosti. Z důvodu zamezení rušení vlivem světla ve viditelném spektru, zdroj vyzařuje infračervené záření. Jak je již naznačeno, velkou výhodou je zvýšená rozpoznatelnost jednotlivých značek. Nevýhoda je zde snížení komfortu herce z důvodu použití obleku, na kterém jsou přidělány značky, potřeba kabeláže, napájecího zdroje a rozlehlejší prostředí, kde je umístěna soustava kamer.



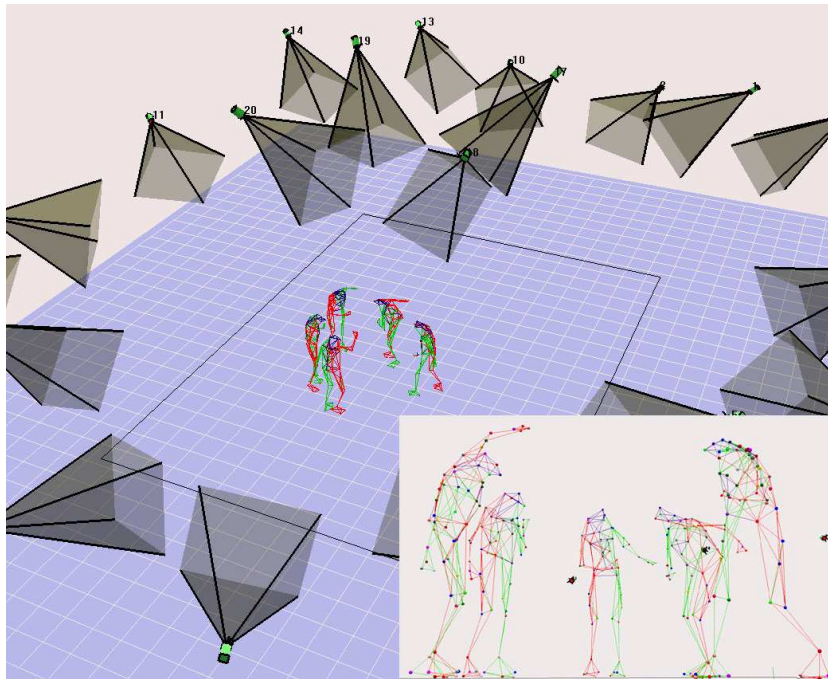
Obrázek 2.1: Obrázek aktivní značky a napájecího zdroje, převzato z [35]

- **Reflexní značky:** Pasivní reflexní značky pouze odráží světlo a nemají takový do-
sah jako předchozí typ značek, tudíž se používají na kratší vzdálenosti. Nevýhodou
je rušení vlivem dopadajícího světla z jiných zdrojů a tedy následné nerozpoznání
reflexní značky.



Obrázek 2.2: Obrázek pasivní reflexní značky s různými rozměry, převzato
z [36]

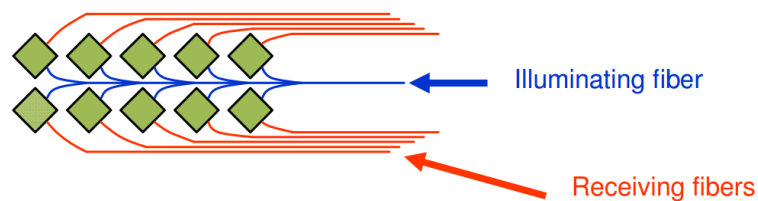
- **Bez značek:** Systémy bez značek nejsou zdaleka tak přesné, jako typy se značkami.
Jak bylo zmíněno výše, využívají pokročilé algoritmy, které jsou schopny detekovat a
posléze nahrát pohyb objektu. Výhodou je absence speciálního obleku, který snižuje
komfort herce.



Obrázek 2.3: Ilustrace principu optického systému s více objekty [37]

2.2.2 Optoelektrický systém

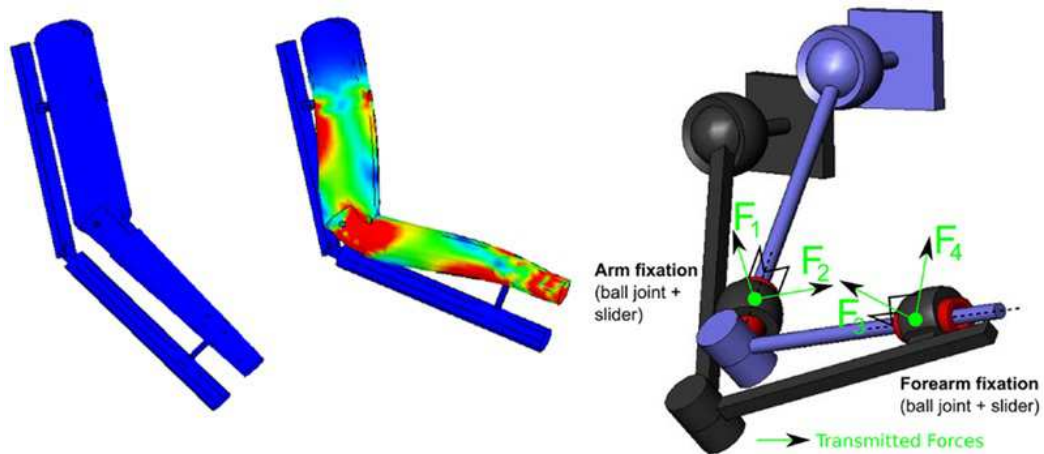
Optoelektrický systém je principiálně založen na deformaci optického vlákna, kde dochází k útlumu světla. Ve většině případech se využívá místo optického systému se značkami na částech těla, kde je vyžadována vysoká přesnost, minimální chyba a zároveň dochází k zakrytí. Výhodou je přesnost, vyskytuje se i možnost bezdrátového přenosu dat, odolnost proti různým druhům rušení.



Obrázek 2.4: Ilustrace principu optoelektrického systému, převzato z [12]

2.2.3 Mechanický systém

Mechanický systém má omezení plynoucí z jeho konstrukce, kdy si osoba na své tělo připevní exoskeleton, který se skládá z pevných částí a kloubů. Klouby obsahují snímače pro určení úhlu mezi částmi exoskeletonu. Exoskeleton je navržen tak, aby úhly mezi kluby na exoskeletonu a na kostře člověka odpovídaly co s největší přesností. Nejčastější senzory pro snímání úhlu jsou potenciometry a Hallovy sondy. Mezi hlavní výhody patří nízká cena v porovnání s optickými systémy, jednoduchý algoritmus výpočtu, možnost použití v systémech s okamžitou odezvou, mohou být i bezdrátové, nejsme omezeni okolím a nedochází k zakrytí. Největší nevýhodou je velké nepohodlí osoby a potřeba přesného nastavení a seřízení, aby exoskeleton odpovídal tělu osoby.

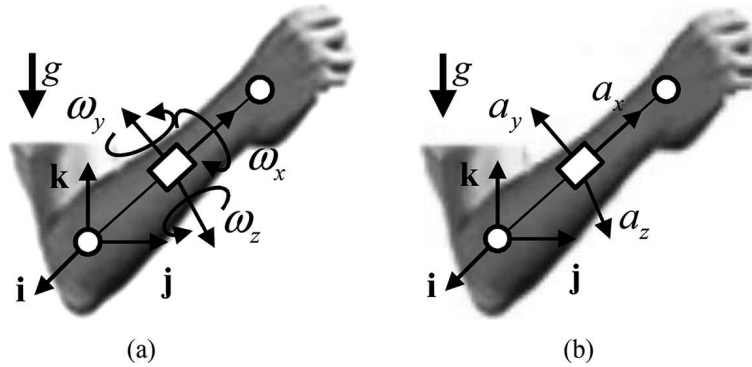


Obrázek 2.5: Ilustrace principu mechanického systému, převzato z [11]

2.2.4 Inerciální systém

Inerciální systémy využívají dvou typů senzorů k určení pohybu objektu. První je gyroskop, ten určuje úhlové zrychlení a druhý, lineární akcelerometr k určení pohybového zrychlení, požadavkem u obou senzorů při využití v MOCAP systémech je fakt, že senzory musí umět snímat ve třech osách. Na části sledovaného objektu se umístí několik snímacích jednotek obsahující jmenované senzory a změřená data se přenášejí po kabelu nebo bezdrátově. Výhodou inerciálního systému je jednoduchý výpočet, vysoká obnovovací frekvence, nízká latence a cena, nevadí zakrytí senzorů v případě použití bezdrátového přenosu dat nejsme omezeni prostorem, pro zajištění větší přesnosti lze kombinovat s jinými systémy. Hlavní nevýhodou je akumulace chyb, velké zašumění sen-

zorů a z toho plynoucí nepřesnosti systému.



Obrázek 2.6: Ilustrace principu inerciálního systému, převzato z [33]

2.2.5 Magnetický systém

Magnetický systém využívá senzorů, které snímají magnetické pole, tyto senzory jsou připojeny k řídicí jednotce. Senzory obsahují tři na sebe kolmé cívky, nebo tříosé magnetometry v závislosti na použití stejnosměrného nebo střídavého proudu. Princip je takový, že zdroj generuje tři na sebe kolmá elektromagnetická pole. Senzory přenesou změřená data do řídicí jednotky a zde dochází k vyhodnocení. Výhodou je cena, nevadí zakrytí senzorů nekovovými předměty, přesnost, nízká cena, vhodné využití v aplikacích s okamžitou odezvou. Nevýhodou je omezený dosah, velká náchylnost na rušení externím elektromagnetickým polem a blízkosti kovových předmětů, potřeba kontrolovaného a v nejlepší případě odstíněného prostředí, malý dosah a vzhledem k použití kabeláže nižší komfort osoby.

2.2.6 Ostatní systémy

V současné době existuje několik systémů, které by mohly být použity v MOCAP systémech a jsou stále ve vývoji jako akustický systém a rádiový systém.

2.3 Vlastnosti systémů

Každý MOCAP systém má několik hlavních vlastností, podle kterých určíme vhodnou technologii pro danou aplikaci. Tyto hlavní vlastnosti jsou latence, přesnost, obnovovací frekvence a aktivita/pasivita. Další vlastnosti jsou cena, váha, energetická náročnost, počet snímaných objektů a rozměry.

- **Latence:** Čas, jež určuje zpoždění mezi skutečným pohybem objektu a jeho zaznamenání snímacím zařízením. Tato vlastnost hraje velkou roli v systémech s okamžitou odezvou, kde se žádá minimální latence.
- **Přesnost:** Hodnota, která udává chybu při snímání pohybu objektu. Aby bylo možné rekonstruovat pohyb s co největší přesností je potřeba, aby chyba byla co nejmenší.
- **Obnovovací frekvence:** Počet měření změny pohybu objektu za jednu sekundu. Vyšší frekvence pro nás znamená plynulejší nahraný pohyb.
- **Rozsah:** Rozsah pohybu, který dokáže systém měřit, požadavkem je co největší rozsah.
- **Pasivní/Aktivní:** Jedná se o skutečnost, jestli prvky umístěné na objektu jsou aktivní, emitují světlo (optický s aktivními značkami) nebo pasivní, kdy jsou na objektu umístěny reflexní značky, či odrazné plochy a data se změří v jiném zařízení.
- **Rozlišení:** Minimální hodnota změny pohybu, kterou je systém schopný zaznamenat.

2.4 Porovnání technologií

Vzhledem k velkému množství vlastností systému jsem vybral několik nejdůležitějších a porovnal technologie.

Tabulka 2.1: Porovnání technologií

Technologie	Vzdálenost	Pas./Aktiv.	Omezení	Přesnost	Cena
Optický s. s aktivní značkou	Vysoká	Aktivní	Zakrytí	Vysoká	Vysoká
Optický s. s reflexní značkou	Nízká	Pasivní	Zakrytí, světlo	Vysoká	Vysoká
Optický systém bez značek	Nízká	Pasivní	Zakrytí	Vysoká	Vysoká
Optoelektrický systém	Neomezeno			Vysoká	Střední
Inerciální systém	Neomezeno			Střední	Nízká
Mechanický systém	Neomezeno			Střední	Nízká
Magnetický systém	Nízká	Pasivní	El.mag. pole	Vysoká	Nízká

Z tabulky plyne, že nejlepší, nejpřesnější systémy jsou optické s aktivní značkou, které jsou velmi drahé, nejčastěji se používají ve filmovém průmyslu, zdravotnictví, sportu a tam, kde se vyžaduje velmi vysoká přesnost zachycení pohybu. V případě snímání určité části těla jako prsty na ruce, kdy nevyhovuje optický systém z důvodu zakrytí značek se použije optoelektrický nebo mechanický systém. V závislosti na aplikaci snímání pohybu celé osoby můžeme použít mechanický systém, inerciální systém a v případě, že nedochází k rušení vlivem externího elektromagnetického pole lze využít magnetický systém. Pro dosažení ještě větší přesnosti lze některé systémy kombinovat: optický systém s inerciálním systémem, optický systém s magnetickým systémem a optický systém s mechanickým systémem.

2.5 Existující systémy

V této části se stručně zmíním o několika existujících systémech, jež jsou komerčně dostupné a využívají technologie výše zmíněné.

2.5.1 Optický systém

- **Vicon:** Vicon se primárně zabývá optickými systémy pro Motion Capture. Jejich kamery jsou jedny z nejlepších, které se na trhu nabízejí. V nabídce mají 2 typy kamer, Bonita a T-Series [51].



Obrázek 2.7: Obrázek kamer od firmy Viscon: zleva Bonita a T-Series, převzato z [52] a [50]

- **Motion Analysis:** Opět špička na trhu, v nabídce mají řadu kamer Raptor, Kestrel, Osprey. Z nichž nejvýkonnější a nejlepší jsou kamery typu Raptor. Všechny jmenované kamery se zabývají reálným záznamem pohybu [29].



Obrázek 2.8: Obrázek kamer od firmy Motion Analysis: zleva Raptor, Kestrel a Osprey, převzato z [32], [30] a [31]

- **NaturalPoint:** Nabízí 3 možné aplikace, kde se kamery specializují, Trackir se uplatní v herním průmyslu, sleduje hlavu při hraní. OptiTrack při klasickém Motion Capture, celé osoby či objektu. Posledním je SmartNav, nahrává pohyby hlavy a přiřadí je pohybu myši na obrazovce [25].



Obrázek 2.9: Obrázek technologií nabízených firmou NaturalPoint: zleva Trackir, OptiTrack a SmartNav, převzato z [28], [26] a [27]

2.5.2 Optoelektrický systém

- **Measurand:** Zaměřuje se na optoelektrický systém, v nabídce mají dva druhy specializace. První, ShapeWrap III, se specializuje na Motion Capture celé osoby a druhá, ShapeHand, jsou speciální rukavice, které obsahují několik optických vláken a vyhodnocují i ty nejmenší změny pohybu prstů [14].



Obrázek 2.10: Obrázek technologie ShapeWrap III od firmy Measurand, převzato z [16],



Obrázek 2.11: Obrázek technologie ShapeHand od firmy Measurand, převzato z [15],

2.5.3 Mechanický systém

- **Dexta Robotics:** Jedná se o společnost, která se zaměřuje na výrobu mechanických exoskeletonů na celou ruku, aby snímala i ty nejmenší pohyby prstů. Jejich systém se nazývá Dexmo [5].



Obrázek 2.12: Obrázek exoskeletonu ke snímání pohybu prstů od firmy Dexta Robotics, převzato z [4] a [3]

- **Motionwerx:** Tato firma vyvinula exoskeleton GYPSY 6 a GYPSY 7, který je sestaven k snímání celého těla. Zvláštností je fakt, že nová verze je podstatně levnější než stará [9] a [10].



Obrázek 2.13: Obrázek exoskeletonů od firmy Motionwerx: zleva GYPSY 6 a GYPSY 7, převzato z [23] a [24]

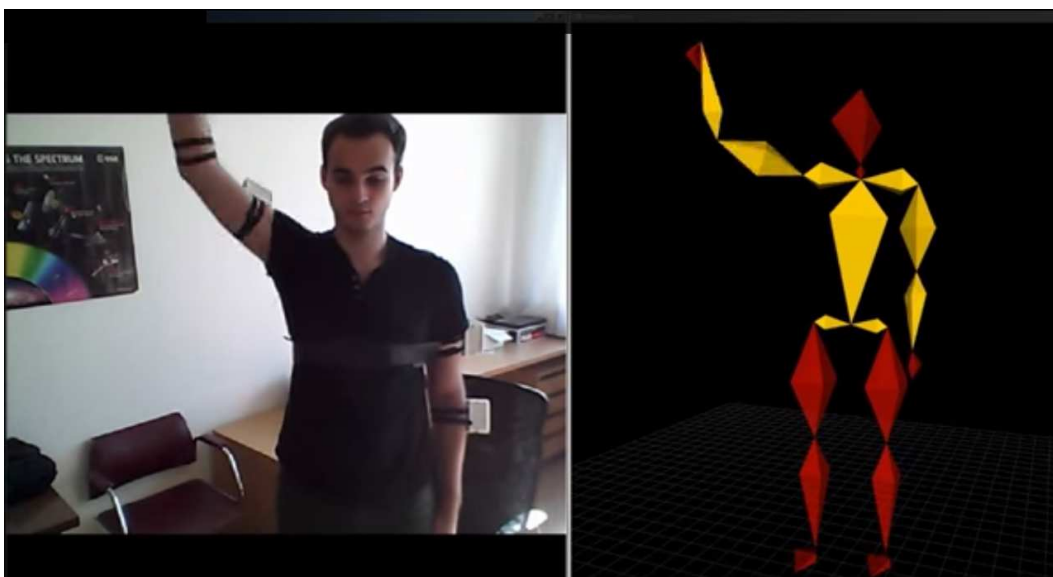
2.5.4 Inerciální systém

- **Systém ČVUT:** V rámci projektu SSP (Small satellite platform) vznikl systém, který se skládá z patnácti senzorových jednotek.

Každá jednotka obsahuje:

- iNemo V2, modul obsahující gyroskop, magnetometr a akcelerometr
- Wifi modul RN-134
- Procesorová deska s procesorem MC9S12XET128
- 4x akumulátor AA

Tento systém používá speciální vizualizační program, který navrhl student José Mendes Filho v rámci svého projektu. Změřená data se z jednotky přenášejí pomocí WiFi AD-HOC sítě do počítače a tam se následně zpracují a zobrazí nahraný pohyb [17].



Obrázek 2.14: Obrázek systému ČVUT, převzato z [17, strana 10]

- **Synertial:** Tato firma nabízí speciální oblek, na kterém je umístěno 15 senzorů na snímání celého těla. Také nabízí precizní rukavice s inerciálními snímači na zaznamenání pohybu prstů ruky [47].



Obrázek 2.15: Obrázek obleku s inerciálními snímači od firmy Synertial, převzato z [48]



Obrázek 2.16: Obrázek rukavic s inerciálními snímači od firmy Synertial, převzato z [46]

Kapitola 3

Návrh řešení

V této kapitole shrnu hlavní požadavky na systém, jaké parametry a vlastnosti hrají největší roli při návrhu elektroniky rozhraní modulu.

3.1 Požadavky na nový systém

Při návrhu nového systému je potřeba brát v potaz několik aspektů. Tyto aspekty jsou rozděleny do několika následujících skupin. Jedná se o hardware, pokračuje estetika a poslední funkčnost.

3.1.1 Hardware

Tato skupina zahrnuje veškeré součástky umístěné na desce plošných spojů. Napájení zajistí interní akumulátor, který bude možné nabíjet přes standardní USB konektor. Aby nedocházelo k zbytečnému ničení akumulátoru vlivem přebíjení, je vhodné přidat integrovaný obvod, který poskytuje funkci správy nabíjení. Vzhledem k tomu, že iNemo M1 má velké množství GPIO pinů, je žádoucí většinu pinů vyvést ven a připravit si pro ně rozhraní na desce plošných spojů. Dále předpokládáme, že k desce bude připojený modul, či moduly nebo zařízení, které bude vyžadovat větší odebíraný proud než dokáže integrovaný regulátor na iNemu zvládnout, tedy přidání napěťového regulátoru, který bude přímo připojen na baterii. Poslední součástí je výběr konektoru a způsobu programování modulu umístěném na desce plošných spojů. Programování modulu bude řešeno pomocí USB a SWD neboli Serial Wire Debug.

3.1.2 Estetika

Tento aspekt má jediný požadavek. Tím požadavkem je minimalizace. Navržený systém musí být co nejmenší. Malá deska plošných spojů, malý modul bezdrátového rozhraní, malá baterie, avšak brána s ohledem na maximální kapacitu, kterou může poskytnout, malé pouzdro systému, které bude mít oblé hrany a moderní design.

3.1.3 Funkčnost

Systém musí být jednoduchý, pro programátora, ale i pro osobu, která ho bude používat. Po sepnutí spínače, celý systém, tedy součástky na plošném spoji, modul bezdrátové technologie začnou komunikovat a změřená data se zobrazí v programu pro vizualizaci MOCAP systému.

Kapitola 4

Řešení

V této kapitole se budu zabývat postupně celkovým návrhem elektroniky rozhraní modulu iNemo M1, návrhu softwaru a testováním.

První část se věnuje popisu rozhraní modulu, jaké elektronické součásti byly vybrány, jakým způsobem jsem vyřešil napájení a programování modulu. Vzhledem k tomu, že iNemo M1 má GPIO piny, neboli general purpose input output piny, je zde také popsáno jaká skutečnost ovlivnila výběr vstupních/výstupních periférií.

Stručně porovnám již stávající systém s novým. Jakým způsobem se projevila evoluce firmy STM u řady iNemo, co daná řada nabízí a jakým směrem se nejpravděpodobněji vývoj bude ubírat.

Následná podkapitola popíše mnou navržený prototyp elektroniky rozhraní, poukáže na chyby a nedostatky, které předcházely návrhu finálního řešení.

Vzhledem ke skutečnosti, že každý modul (snímací jednotka) přenáší změřená data do počítače pomocí bezdrátové technologie, jsou zde jednotlivé technologie vysvětleny a zdůvodněn finální výběr.

Předposlední podkapitola dopodrobna líčí finální systém a jednotlivé moduly v němž obsažené. Dále je zde popsáno softwarové vybavení modulu.

4.1 Návrh rozhraní

V této části vysvětlím, jaké součástky byly vybrány a jakou plní funkci v rámci celého systému.

4.1.1 iNemo M1

Srdce celého systému je modul iNemo M1 vyrobený firmou STMicroelectronics. Tento modul také nazýváme SOB, neboli system on board. INemo obsahuje následující senzory jako tříosý gyroskop, tříosý magnetometr a tříosý akcelerometr. Dále zde nalezneme oscilátor a napěťový regulátor. Rozměry modulu jsou 13x13x2 mm [44].

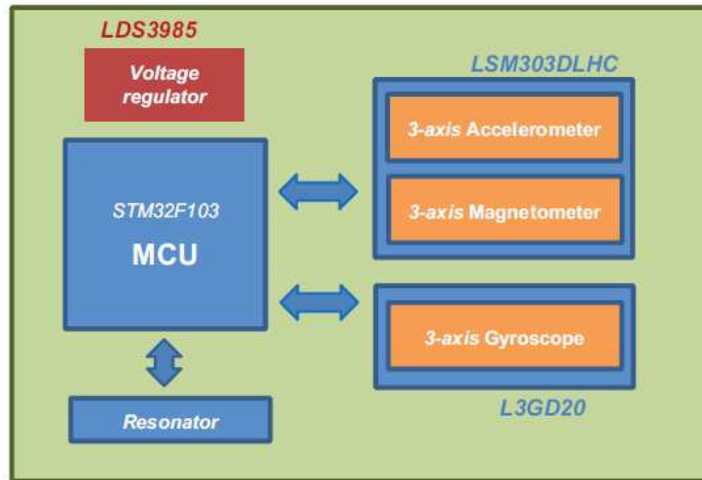
- **Základní charakteristiky modulu:**

- **Maximální frekvence:** 72 MHz
- **Flash paměť:** 512 kB
- **SRAM paměť:** 64 kB



Obrázek 4.1: Obrázek skutečného modulu iNemo M1, převzato z [44]

- **L3G4200D:** Jedná se o senzor, který obsahuje tříosý gyroskop, který měří rychlost otáčení. Senzor je připojený k mikroprocesoru pomocí SPI sběrnice.
- **LSM303DLHC:** Senzor, který obsahuje tříosý akcelerometr a tříosý magnetometr. Senzor je připojený k mikroprocesoru pomocí I²C sběrnice.
- **STM32F103REY:** ARM 32-bitový mikroprocesor Cortex M3.
- **LDS3985M33R:** ULDO napěťový regulátor. ULDO znamená ultra-low dropout. Maximální výstupní proud je 300 mA a výstupní napětí je 3,3 V.
- **Oscilátor:** Krystalový oscilátor, jehož frekvence je 8 MHz.



Obrázek 4.2: Blokové schéma modulu iNemo M1, převzato z [43]

- **Rozhraní:** Modul disponuje několika rozhraními: SPI, I²C, CAN, 2x UART, USB 2.0 pro externí komunikaci a pro interní komunikaci slouží další SPI a I²C.
- **Časovače/čítače:**
 - Procesor obsahuje také řadu časovačů a čítačů.
 - 8 základních časovačů/čítačů
 - 2 Watchdog
 - SysTick
- **ADC/DAC převodník:**
 - **ADC:** Na procesoru nalezneme také tři 12-bitové analogové číslicové převodníky.
 - **DAC:** Procesor obsahuje dva číslico-analogové převodníky 8 nebo 12 bitové.
- **DMA:**

V procesoru jsou dva DMA. DMA celkově řídí 12 kanálů a může být užito pro SPI, UART, časovače/čítače, ADC, DAC, GPIO piny a I²C. DMA znamená direct memory acces neboli přímý přístup do paměti. Ve stručnosti funguje na principu přenosu dat mezi pamětí a GPIO piny bez potřeby průchodu dat přes procesor.
- **BOOT mód:** Speciálním nastavením pinů lze program uložit do dvou typů paměti.

- Hlavní Flash paměť
- Systémová paměť

4.1.2 Obvod dohledu baterie

Navržený systém obsahuje mnou vybraný obvod pro správu baterie. Výběr obvodu dohledu baterie provázelo několik kritérií. První je vstupní napětí, jehož velikost je rovna výstupnímu napětí z USB, které je 5 V. Druhé kritérium, je výstupní napětí z obvodu dohledu baterie, které bude nabíjet akumulátor. Požadavkem je, aby výstupní napětí z obvodu dohledu bylo větší než napětí na baterii. Výběru vyhověl MCP73833 od firmy Microchip. Tento typ obvodu má pevně stanovené výstupní napětí. V tabulce níže jsou uvedeny základní parametry [20].



Obrázek 4.3: Obrázek obvodu dohledu baterie MCP73833, převzato z [21]

Tabulka 4.1: Tabulka základních parametrů

	Označení	Hodnota	Jednotka
Maximální vstupní napětí	U_{DD}	7	V
Maximální výstupní proud	I_{REG}	1200	mA
Výstupní napětí	U_{REG}	4,2	V

Pro ověření, zdali vstupní napětí z USB bude dostačující, slouží rovnice. Napájecí napětí je rovno 5 V a pevně nastavené napětí U_{REG} je rovno 4,2 V.

$$U_{DD} = U_{REG} + 0,3V \quad (4.1)$$

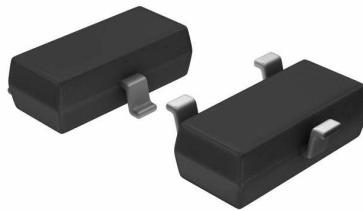
Po dosazení hodnot je jasné, že $U_{DD} \leq 5 V$. Výstupní napětí také splňuje podmínku že $4,2 V \geq 3,7 V$. Nyní následuje výpočet proudu. Tento proud ovlivňuje rezistor R_{PROG} . V případě že do rovnice zadáme R_{PROG} v Ω výsledek je proud v mA .

$$I_{REG} = \frac{1000000V}{R_{PROG}} \quad (4.2)$$

Záměrně jsem vybral odpor o velikosti $R_{PROG} = 2000 \Omega$. Velikost nabíjecího proudu je tedy $I_{REG} = 500 mA$.

4.1.3 Regulátor napětí

Předpokládá se, že regulátor napětí bude připojen přímo na baterii a výstup bude veden přímo na výstupní piny z desky plošného spoje. Uživatel si bude moc vybrat, zdali si vybere napájení z interního regulátoru, který je umístěn na modulu nebo z externího regulátoru. Vzhledem k tomu, že akumulátor dodává napětí $3,7 V$ a na výstupu z desky plošného spoje požadujeme $3,3 V$ byl vybrán LDO regulátor od firmy Microchip MCP1702T3302ECB. Tento regulátor má pevně stanovené napětí a to $3,3 V$. $3,3 V$ jsou zvoleny schválně, protože iNemo M1 a převážná většina modulů bezdrátové technologie jsou napájeny $3,3 V$ [18].



Obrázek 4.4: Obrázek regulátoru napětí MCP1702T3302ECB, převzato z [19]

4.1.4 Akumulátor

Výběr akumulátoru závisí na dvou parametrech. Tyto dva parametry jsou výstupní napětí a kapacita baterie. Výstupní napětí je tedy $3,7 V$. Nyní výpočet kapacity. V úvahu jsem

vzal maximální možný odebíraný proud z modulu iNema M1 I_{iNemo} a maximální možný proud z ULDO napěťového regulátoru I_{ULDO} . Celkový možný proud I_{CEL} je

$$I_{CEL} = I_{iNemo} + I_{ULDO} = 550mA. \quad (4.3)$$

Vypočtený celkový proud je roven 550 mA. Což je hodnota, která se s minimální pravděpodobností vyskytne v reálných podmínkách. Ve skutečnosti se odebíraný proud pohybuje od 100 do 200mA. S těmito fakty jsem vybral Li-Ion akumulátor ACCU-LP753850/CL od firmy Cellevia Batteries. Parametry akumulátoru jsou uvedeny v tabulce [49].



Obrázek 4.5: Obrázek Li-Ion akumulátoru, převzato z [49]

Tabulka 4.2: Tabulka základních parametrů baterie

	Označení	Hodnota	Jednotka
Jmenovité napětí	U_J	3,7	V
Kapacita	W	1600	mAh
Šířka	S	38	mm
Výška	V	7,5	mm
Délka	D	50	mm

V případě odběru 200 mA baterie vydrží obvod zásobovat 8 hodin.

4.1.5 Ostatní součástky a konektory

Dalšími součástkami na desce plošných spojů jsou odpory a kondenzátory, kondenzátory především slouží jako lokální zdroje pro integrované obvody, které mají impulzní spotřebu. Tyto součástky jsou v SMD, typ velikosti pouzdra je 0805. Nalezneme zde i řadu vstupních a výstupních konektorů.

- **Konektory**
 - **USB:** Mini USB konektor k připojení napájení
 - **SWD:** Z klasického 20 pinového konektoru pro SWD s roztečí 2,54 mm je vyveden 10 pinový SWD konektor s roztečí 1,27 mm.
- **Výstupní periferie:** Řada oboustranných kolíků připájených k desce plošného spoje. Kolíky jsou vyvedeny pro tyto periferie:
 - **2x UART**
 - **SPI**
 - **CAN**
 - **I²C**

Ke každé periférii je vyveden extra kolík pro napájení a zem.

- **Jumpery**

Jsou vyvedeny 2 jumpery:

 - **Výběr externího/interního regulátoru napětí**
 - **Výběr Flash/systémové paměti pro BOOT a uložení programu**

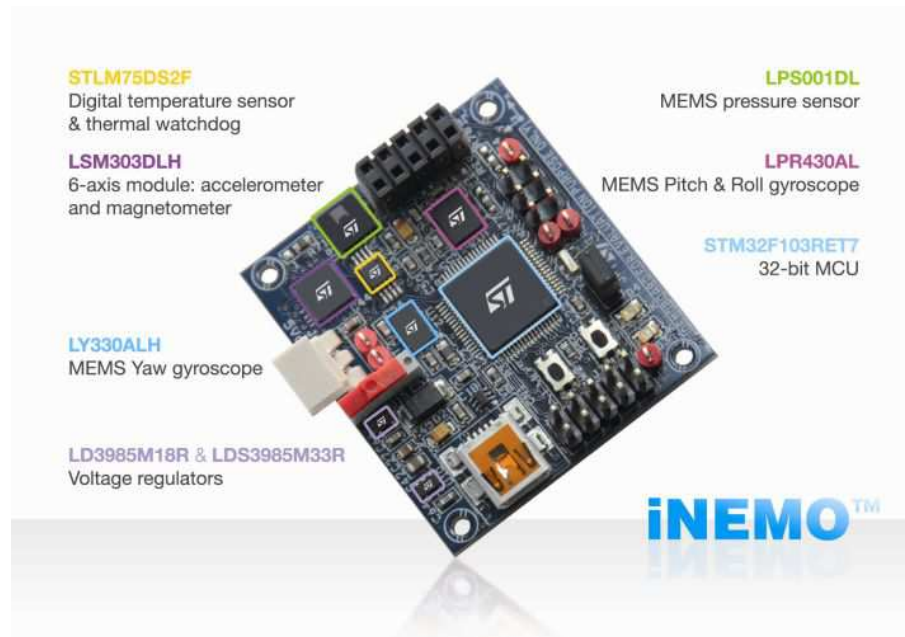
4.2 Porovnání starého a nového systému

Nejprve porovnám nový iNemo M1 se starým iNemo V2, vylíčím základní rozdíly a následně popíši systémy pro MOCAP systémy, kde jsou jednotlivé moduly využity a jakým způsobem přenáší data do počítače.

4.2.1 Porovnání elektroniky obou systémů

Na úvod vysvětlím zkratku iNemo. Zkratka iNemo vznikla ze složení části slov *iNertial module*. Vlivem rozvoje elektroniky a následném zmenšování integrovaných obvodů se z desky plošných spojů o rozměrech 40x40 mm, který představuje iNemo V2 vznikl modul iNemo M1 o rozměrech 13x13 mm. Nyní následuje porovnání jednotlivých komponent na iNemech [42].

- **Processor:** Oba typy iNema využívají procesor STM32F103. Tento procesor disponuje dostatečným výkonem a množstvím rozhraní rozdílný je použitý typ pouzdra procesoru. K úspoře místa se používají pouzdra typu WLCSP. Tyto pouzdra mají na spodní straně vyvedené malé kuličky, které se připájí na desku plošného spoje. Naopak u staršího typu je použito pouzdro typu LQFP. Toto pouzdro má po všech 4 stranách vyvedeny nožičky ve tvaru L.
- **Akcelerometr a magnetometr:** Oba typy iNema mají téměř identické snímače okamžitého zrychlení a magnetického pole. U nového typu nalezneme snímač LSM303DLHC a u staršího LSM303DLH. Rozdíl snímačů spočívá v typu pouzdra, kde LSM303DLH má pouzdro typu LGA-28L s 28 piny a nový typ snímače LSM303DLHC používá pouzdro typu LGA-14, které má poloviční počet pinů než starý typ [45] a [41].
- **Gyroskop:** Největší rozdíl je u gyroskopu. U nového snímacího systému je použit jediný integrovaný obvod L3G4200D, který dokáže snímat naklonění ve třech osách. U staršího systému je použita dvojice snímačů. První z nich je LPR430AL tento snímač snímá příčný náklon, podélný sklon a druhý LY330ALH snímá otočení.
- **Ostatní:** Na iNemu V2 jsou navíc umístěné další dva senzory. LPS001DL je senzor tlaku a STLM75 je digitální senzor teploty. Dále je zde přidaná jednotka pro ukládání dat na SD kartu.



Obrázek 4.6: Obrázek iNema V2, převzato z [42]

Z předchozího porovnání je jasné jakým způsobem se ubírá vývoj. Hlavní roli hraje miniaturizace. Dříve, kdy bylo zapotřebí pro každou snímanou veličinu jeden senzor. Dnes se senzory spojují do jednoho integrovaného obvodu. Rozměry tohoto integrovaný obvodu jsou tak malé, že se velmi hodí do různých typů zařízení, od fotoaparátů, přes mobilní telefony, navigace a ovladače pro herní konzole. Zajímavá aplikace je použití v chytrých hodinkách. Novinkou jsou hodinky od firmy Apple, v nichž je umístěný senzor C451 [13] od firmy STM, který obsahuje tříosý gyroskop a tříosý akcelerometr.

4.2.2 Chování starého systému

Nejprve popíši starý systém, z jakých částí se skládá a jakou plní funkci. Dále se také zmíním podrobněji o programu, který znázorňuje změřená data. Poslední částí je celkový popis celého nového systému. Jak bylo zmíněno, v hlavní části starého systému je měřící jednotka iNemo V2. K této jednotce je připojen WiFi modul dnes od již neexistující společnosti Roving Networks RN 134, dále čtveřice nabíjecích akumulátorů velikosti baterie AA. Nejprve pár slov k celému systému MOCAP. Celý systém se celkově skládá z 15 samostatných měřících jednotek připojených k počítači pomocí WiFi AD HOC sítě. Každý WiFi modul má svoji specifickou adresu. Tato adresa začíná 192.168.2.xxx, kde

xxx se vypočte následovně

$$xxx = 128 + N_M, \quad (4.4)$$

kde N_M znamená číslo WiFi modulu, kde toto číslo modulu se zadá do konfiguračního XML souboru a přiřadí se mu určitá část lidského těla. Program pro vizualizaci je napsaný v jazyku C++. Před zavedením měřící jednotky je nutná kalibrace. Po zapnutí programu se za každou zapnutou jednotku vytvoří vlákno, které reprezentuje určitou část těla. Komunikace s osobním počítačem je řešena pomocí WiFi rozhraním, které ale trpí občasným zaseknutím. Toto zaseknutí se stává z důvodu špatné latence. Tedy vytvořením vlákna minimalizujeme zaseknutí pouze na jednu část těla a neovlivní ostatní.

Nyní se několika slovy zmíním o novém systému. Základní součástí je měřící jednotka, umístěna na desce s plošnými spoji, přidaný plochý Li-Ion akumulátor a WiFi modul. Lze tedy konstatovat, že nový systém funguje stejným způsobem, s tím že snímací jednotka je podstatně menší a vybavena novější technologií.

4.3 Prototyp

V průběhu vývoje byl vytvořen prototyp, který by umožnil naprogramování modulu a ověření správnost návrhu elektroniky rozhraní. Tato část je zaměřena jeho popis.

4.3.1 Schéma zapojení

V rámci návrhu desky plošného spoje bylo vytvořeno schéma zapojení v programu OrCad Capture, které umožnilo vytvoření popisu spojení součástek neboli netlistu, který umožní další práci při návrhu desky s plošnými spoji.

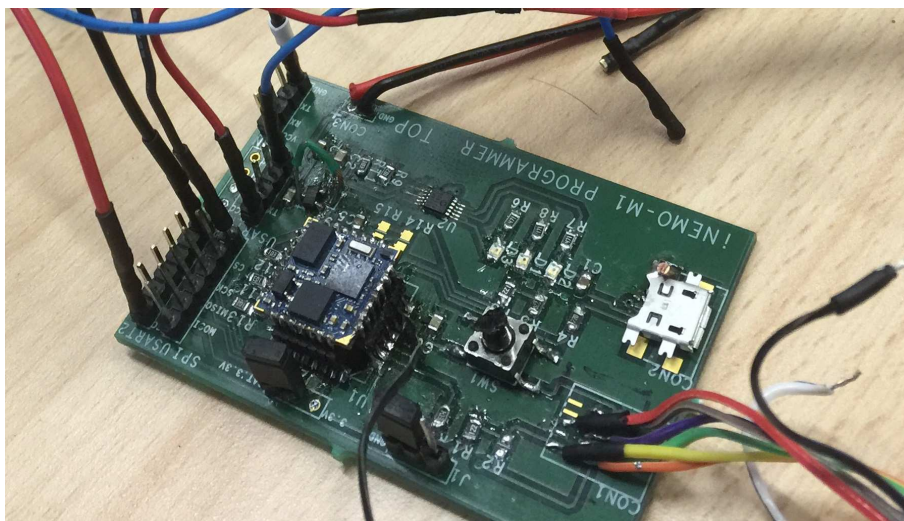
4.3.2 Návrh desky plošného spoje

Při návrhu desky plošného spoje byla vybrána konstrukční třída přesnosti 5. Konstrukční třída přesnosti udává minimální šířku spoje, izolační vzdálenost, minimální průměr vrtaného otvoru, minimální rozměr pájecí vrtané plošky a minimální průměr nepájivé masky [53].

Tabulka 4.3: Tabulka rozměrů v 5 třídě přesnosti

Označení	Hodnota	Jednotka
Minimální šířku spoje	8	mil
Izolační vzdálenost	8	mil
Minimální průměr vrtaného otvoru	20	mil
Minimální rozměr pájecí vrtané plošky	Průměr vrtáku + 16	mil
Minimální průměr nepájivé masky	Průměr pájecí vrtané plošky + 8	mil

V tabulce je uvedena tabulka v milech. 1 mil je roven tisícině palce. Tedy 1 mil = 0,0254 mm. Návrh byl proveden OrCad PCB Designer. V návrhu byla vybrána oboustranná deska s plošnými spoji, aby byl splněn požadavek na co nejmenší systém.



Obrázek 4.7: Obrázek prototypu elektroniky rozhraní

4.3.3 Zjištěné nedostatky

Při prvotním návrhu byly zjištěny nedostatky, kterým je potřeba se vyhnout ve finálním návrhu. Tyto nedostatky jsou: špatně vyvedené pouzdro pro USB, prohozené piny u stabilizátoru napětí a chybějící Pull-up rezistor u resetovacího tlačítka.

4.3.4 Testování prototypu

Po dodatečných úpravách mi funkční prototyp elektroniky rozhraní, umožnil naprogramování modulu, který následně dokázal změřit požadované veličiny. Vedoucím mé práce byly dodány skripty vytvořeny v prostředí Matlab a program, který je napsaný pro procesor umístěný v SSP platformě. Tento program slouží jako inspirace pro program, který bude uložen v procesoru iNema M1.

Fyzická vrstva komunikace s modulem pomocí WiFi je založena na AD HOC síti, kterou je nutné založit s následujícími parametry: statická adresa 192.168.2.11 a maska podsítě 255.255.255.0. Na tuto síť se připojí měřící jednotka s WiFi modulem, jehož číslo je 17. Pro testování v prostředí Matlab je potřeba instalace toobloxu *CANTBX_InstallToolbox* a inicializace *CANTBX_InitTx*. Po úspěšné inicializaci následuje vytvoření TCP komunikace mezi počítačem a snímací jednotkou příkazem *SSP_OpenTCP(0, 17)*. V případě správně implementace *SSP_OpenTCP* vrátí 1 a jednotka je inicializovaná. Inicializovaná jednotka zpřístupní příkaz *SSP_ReadIMU*.

SSP_ReadIMU(0, x), kde $x = 0$ vrátí data z akcelerometru, $x = 1$ vrátí data z gyroskopu a pokud $x = 2$ vrátí data z magnetometru.

4.4 Rozbor bezdrátových technologií

Z důvodu potřeby nahrazení WiFi modulu RN 134 [22] od firmy Rowing Networks se v této části zaměřím na rozbor několika bezdrátových technologií, které by mohly být použity pro přenos změřených dat do osobního počítače. Tyto technologie stručně charakterizují, vhodným způsobem otestuji a vyberu finální řešení.

4.4.1 Bezdrátové technologie

V dnešní době existuje velké množství technologií, které dokáží přenášet data bezdrátově. Vybral jsem několik technologií, které jsou nejvíce rozšířeny.

- **Bluetooth:** Vznikl v roce 1994 firmou Ericsson jako náhrada za sériové rozhraní RS232. Bluetooth dělíme podle vyzařovaného výkonu na třídy.

Tabulka 4.4: Tabulka tříd Bluetooth

Třída	Vyzařovaný výkon	Jednotky	Dosah	Jednotky
1	100	mW	100	m
2	2,5	mW	10	m
3	1	mW	1	m

Od první verze vzniklo několik nových verzí. Každá verze oproti svému předchůdci nabízí větší teoretickou a i reálnou přenosovou rychlost se zvětšující se energetickou úsporností. Například verze 4.0 má teoretickou rychlost 24Mbit/s . Poslední verze 4.2, která byla vydána v závěru roku 2014 slibuje 2x větší přenosovou rychlost a 10x větší energetickou úsporu než předešlé verze. Každé zařízení má definovanou svojí adresu. Bluetooth zařízení pracuje podobně jako AD HOC ve WiFi síti s tím rozdílem, že WiFi pracuje na spojové vrstvě a Bluetooth na aplikační vrstvě protokolu OSI/ISO, proto Bluetooth musí mít definované protokoly, kterými komunikuje [1] a [2].

- **Wifi:** Nejrozšířenější bezdrátovou technologií je WiFi. Wifi je bezdrátová síť, která slouží jako alternativa k lokálním počítačovým sítím. Výhodou je cena, protože dnes většina zařízení disponuje WiFi. Na konci 90. let vznikl standard IEEE 802. Následující standardy označujeme IEEE 802.11X. V tabulce jsou poukázány teoretické přenosové rychlosti.

Tabulka 4.5: Tabulka teoretické rychlosti WiFi

Standard	Propustnost dat	Jednotky
IEEE 802.11	2	Mbit/s
IEEE 802.11a	54	Mbit/s
IEEE 802.11b	11	Mbit/s
IEEE 802.11g	54	Mbit/s
IEEE 802.11n	600	Mbit/s
IEEE 802.11ac	1300	Mbit/s

- **ZigBee:** Vznikl v roce 2004 a je postaven na standardu IEEE 802.15.4. Obrovská výhoda je minimální energetická náročnost a velmi vysoký dosah. Od jednotek metrů po jednotky kilometrů. ZigBee podporuje 3 typy sítě jako hvězda, strom a

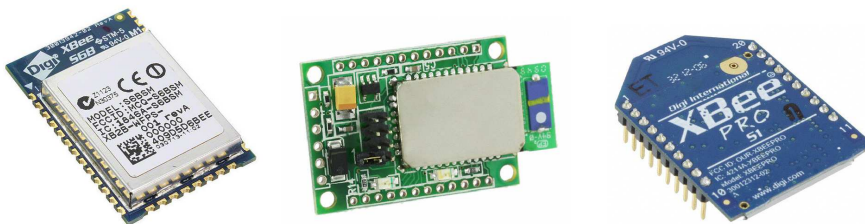
mesh. Je možno použít 16 nebo 64 bitovou adresu a tady počet ZigBee zařízení v síti může být 65536 případě použití 16 bitové adresy a 2 na 64 v případě použití 64 bitové adresy. Velmi vhodné pro monitorování a řízení. ZigBee síť se skládá z jednoho koordinátoru, dále z několika routerů a koncových zařízení. Každá síť musí mít pouze jednoho koordinátora [6].

4.4.2 Metodika testování

Vedoucím práce mi byl dodán script k inspiraci napsaný v Matlabu. Tento script měří dobu, jak dlouho trvá nežli přijde odpověď na zadaný požadavek. Tímto způsobem se otestuje několik desítek až stovek požadavků a vykreslí se dva grafy. První graf zobrazuje závislost času na počtu vzorků, jinými slovy jak dlouho trvalo než přišly všechny odpovědi na dané požadavky. Druhý graf zobrazuje závislost požadavků a doby zpoždění pro daný vzorek. Čím menší celková doba a doba zpoždění tím lépe. Testována byla tato zařízení:

Tabulka 4.6: Tabulka testovaných modulů

Technologie	Modul
WiFi	XBEE WIFI S6B
Bluetooth	RN 41
ZigBee	XBEE PRO
Sériová linka	-



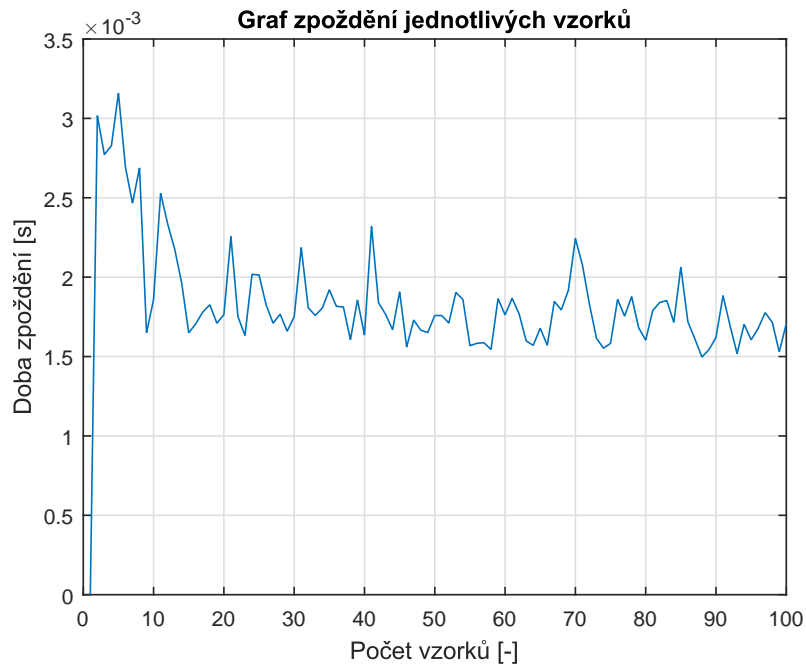
Obrázek 4.8: Ilustrace bezdrátových modulů, který byly použity při testování: zleva XBEE WiFi S6B, RN 41, XBEE PRO, převzato z [8], [7] a [39]

Testování jsem prováděl dvěma způsoby. První je vytvoření TCP spojení a otestování. Druhý platí pro sériovou linku, Bluetooth a ZigBee. Na elektronice rozhraní nového

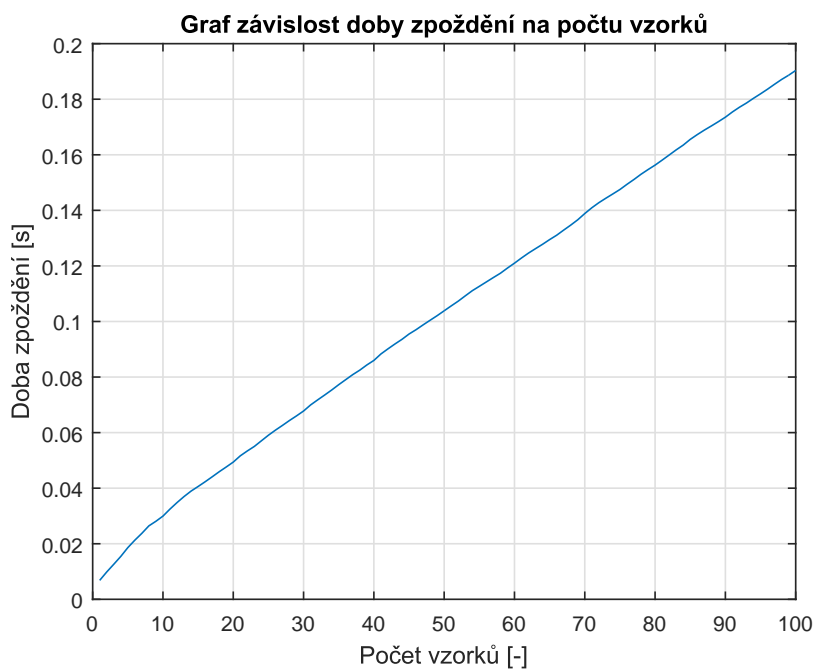
systemu byla vybrána sériová linka, tato linka je připojena k bezdrátovému modulu nebo přímo na převodník sériová linka/USB. V případě, že byl použit bezdrátový modul neboli Bluetooth nebo ZigBee jsou data přijata/vyslána dalším bezdrátovým modulem, který je připojen k sériové lince a posléze předem převodníkem sériová linka/USB. Pro tento test bylo vybráno 100 vzorků. Modulová frekvence je 115200, vypnutí kontroly toku dat. Testovací požadavek je poslat data z gyroskopu pomocí funkce *SSP_Read_IMU(0, 1)*.

4.4.3 Výsledek testování

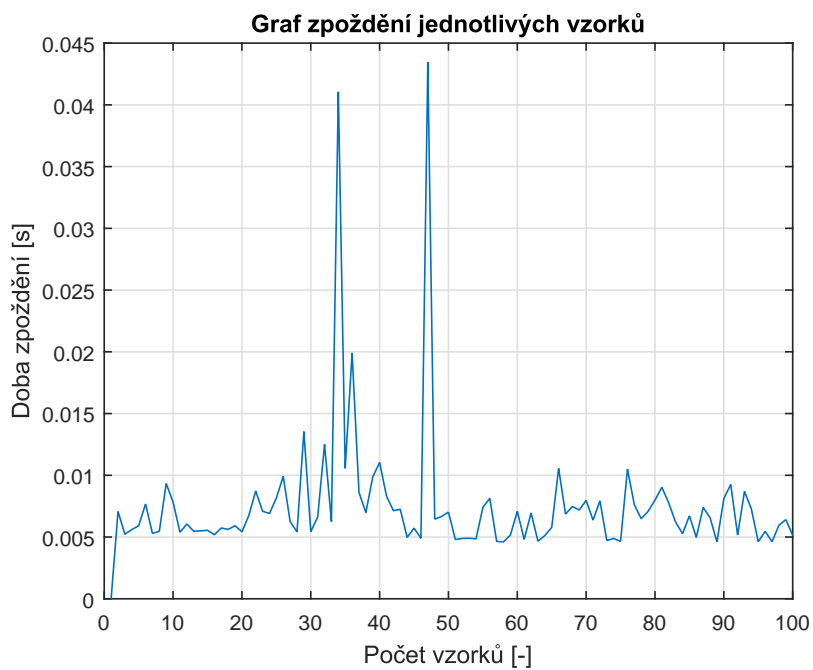
Naměřená data zobrazena v grafech:



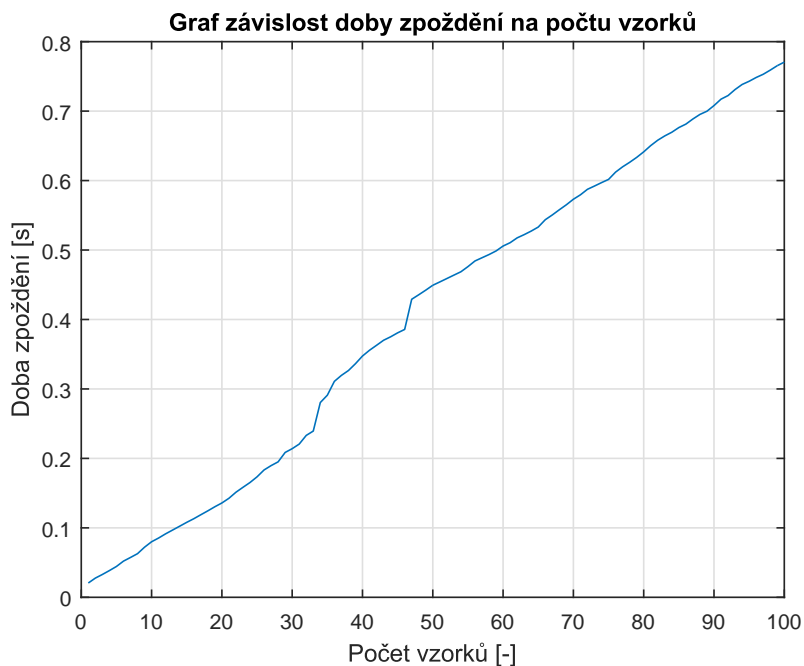
Obrázek 4.9: Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u sériové linky



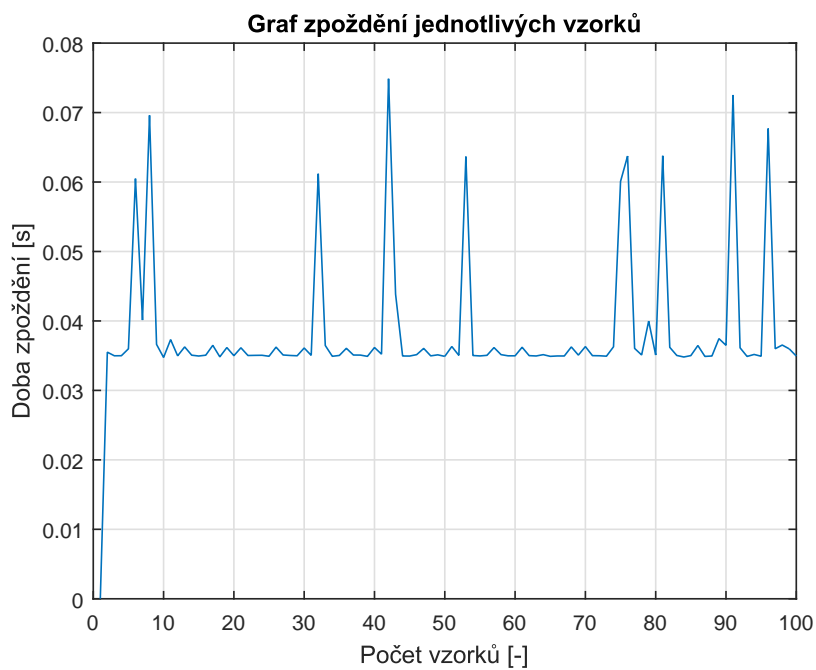
Obrázek 4.10: Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u sériové linky



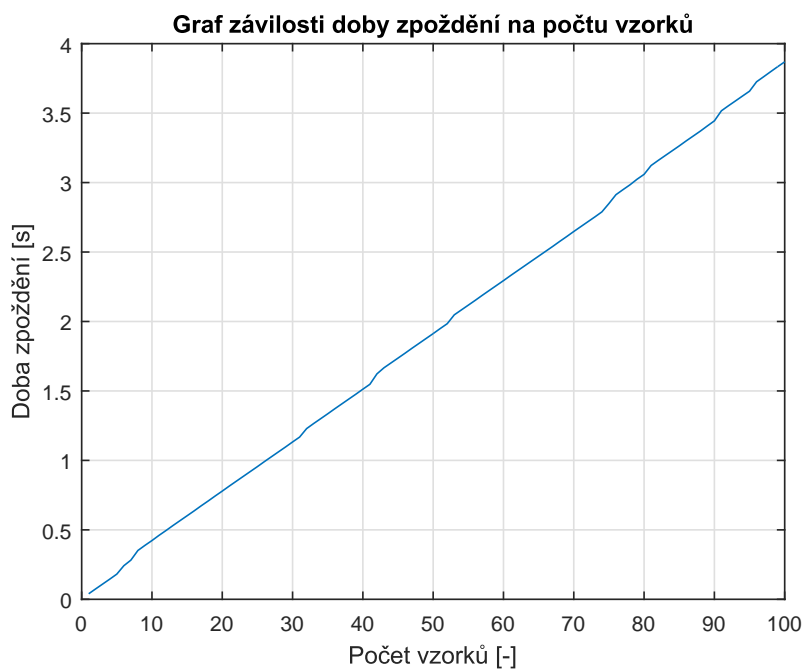
Obrázek 4.11: Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u WiFi modulu XBEE



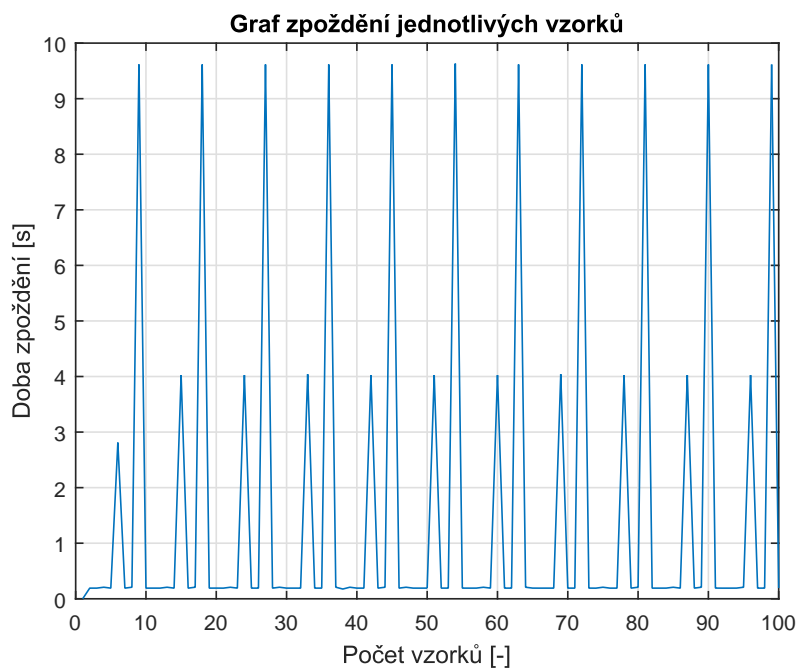
Obrázek 4.12: Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u WiFi modulu XBEE



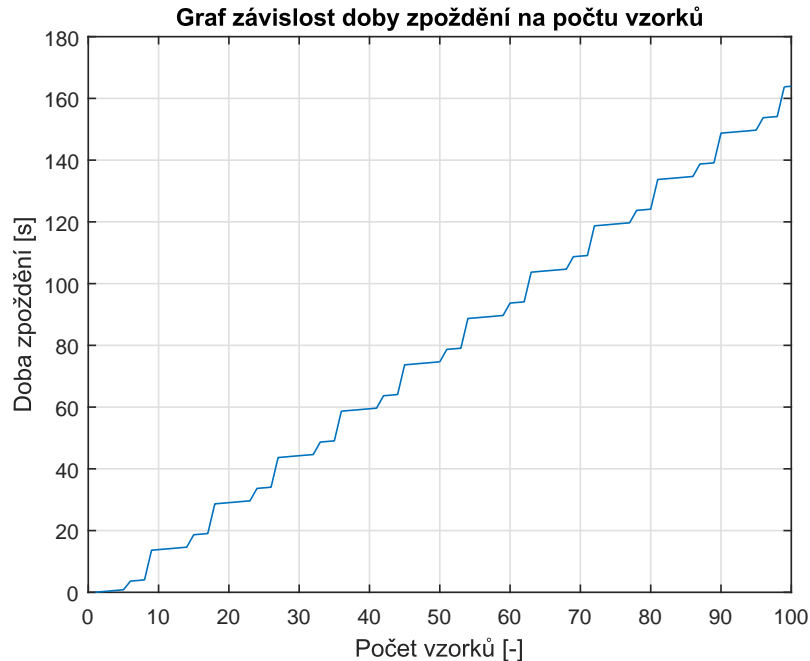
Obrázek 4.13: Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u Bluetooth modulu RN 41



Obrázek 4.14: Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u Bluetooth modulu RN 41



Obrázek 4.15: Graf zpoždění přenosu jednotlivých vzorků u ZigBee modulu Xbee PRO



Obrázek 4.16: Graf závislosti doby zpoždění na počtu vzorků u ZigBee modulu Xbee PRO

Dle změřených dat se nejlépe jeví komunikace přes sériovou linku, dle testu má nejmenší latenci. Bohužel, ale hledáme přenos dat bezdrátovou cestou tedy tento způsob nevyhovuje. Jako další má nejlepší parametry rozhraní Bluetooth. Bluetooth vykazuje velmi nízkou latenci, vypadá velmi stabilně, ale nastává problém s počtem připojených zařízení. V katalogovém listu výrobce uvádí až 7 připojených Bluetooth zařízení simultánně, avšak v praxi se většinou používají maximální 3 až 4 připojené zařízení najednou. Vzhledem k tomu, že celý systém může mít až 15 připojených snímacích jednotek, je zřejmé, že Bluetooth pro tuto aplikaci lze využít v případě použití tří nebo čtyř master modulů, ke kterým se budou Bluetooth jednotky připojovat. Výtečných výsledků dosahuje i Wifi rozhraní. V rámci vytvoření AD HOC sítě lze bez problému připojit 15 snímacích jednotek. Latence je na velmi dobré úrovni. Výhodou je zde možnost zakomponovat nový systém do existujícího konceptu a naopak. Čas od času nastane problém, kdy se změřená data zpozdí a místo desítek milisekund přijdou po několika sekundách. ZigBee v testu skončilo nejhůře, v grafu je vidět, že ZigBee má vysokou latenci, změřená data se do osobního počítače dostávají s velkým zpožděním, tudíž ZigBee je nevyhovující. Na základě testu byla pro finální realizaci vybraná technologie WiFi.

4.5 Popis snímací jednotky

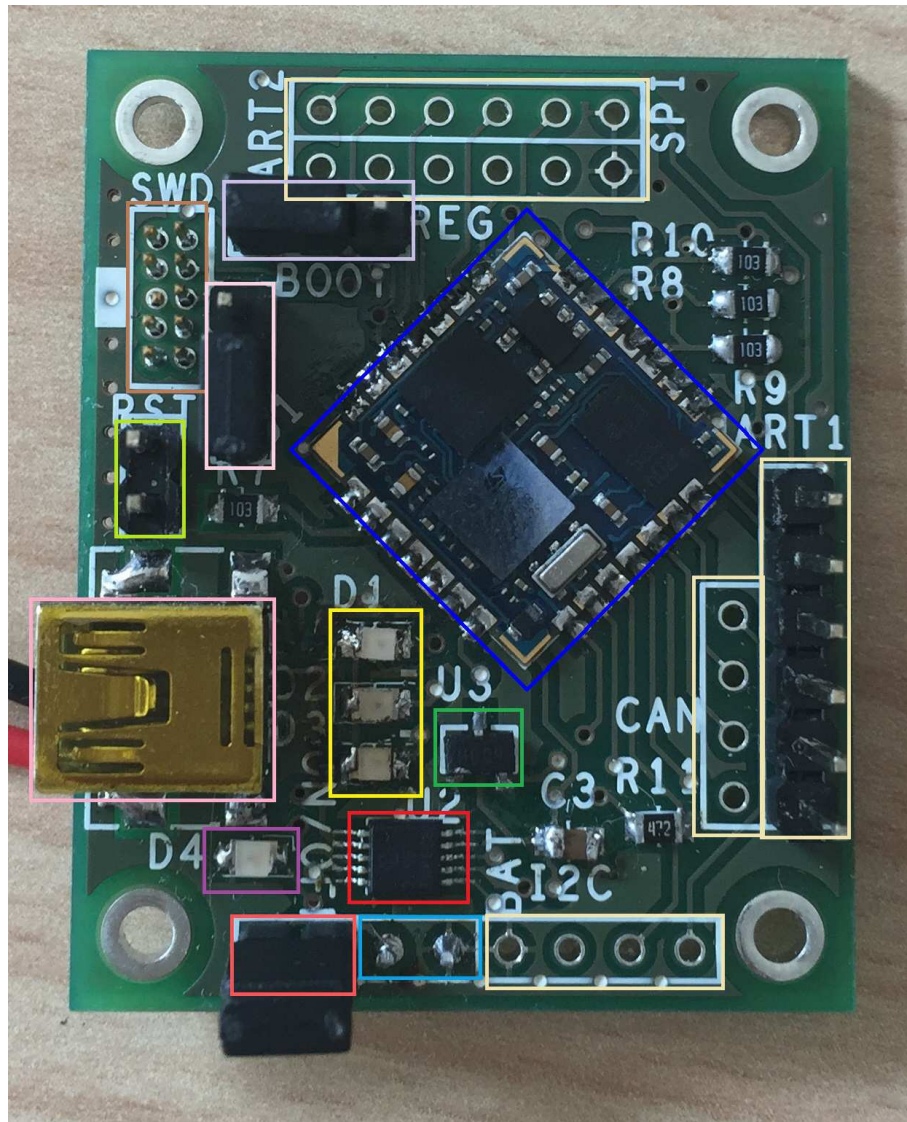
Tato část líčí finální snímací jednotku. Nejprve podrobné vysvětlení, kde na desce plošného spoje se nachází jednotlivé součásti a jak je propojen Wifi modul. Následuje ukázka zapouzdření modulu. Poslední část popisuje softwarové vybavení snímací jednotky.

4.5.1 Hardware

Na obr. 4.17 je finální deska s plošnými spoji. Na obrázku jsou barevně označeny součástky, vstupy/výstupy a konektory. V tabulce 4.7 jsou tyto součásti vysvětleny. Rozměry elektroniky rozhraní jsou 33 x 41 mm.

Tabulka 4.7: Tabulka popisu hardwaru

Barva	Typ součástky	funkce
Modrá	iNemo M1	Snímací jednotka
Červená	MCP73833	Obvod dohledu
Zelená	MCP1702T	Regátor napětí
Žlutá	Led diody	Indikace nabíjení
Fialová	Led dioda	Indikace zapnutí
Růžová	Micro USB	Napájení
Hnědá	SWD konektor	Programování
Světle modrá	Konektor	Připojení baterie
Světle červená	Konektor	Zapínání jednotky
Světle zelená	Konektor	Reset
Světle žlutá	Konektory	Výstupní rozhraní sběrnice
Světle fialová	Jumper	Výběr napájení rozhraní
Světle růžová	Jumper	Výběr úložiště a BOOT



Obrázek 4.17: Obrázek elektroniky rozhraní modulu iNemo M1

Základní konfigurace jumperů na obr. 4.17 je nastavena na ukládání do paměti Flash a napájení rozhraní interním regulátorem. Reset konektor není připojený a to z toho důvodu, že při programování pomocí SWD debugger modul automaticky resetuje, ale i tak v případě potřeby resetu modulu je potřeba propojit vyvedený konektor. Systém se zapíná připojením USB kabelu a nebo propojením konektoru označeném fialovou barvou, v případě úspěchu se rozsvítí led dioda představující indikaci napájení. Indikace stavu nabití akumulátoru označuje tabulka 4.8.

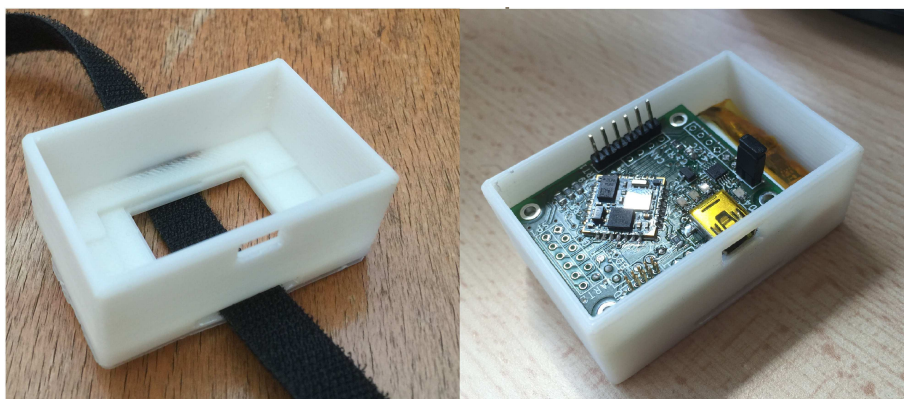
Tabulka 4.8: Tabulka indikace nabíjení, kde X znamená, že LED dioda svítí

Funkce	Zelená	Oranžová	Červená
Vypnuto			
Pohotovost			X
Nabíjení	X		X
Nabíjení dokončeno		X	X
Chyba časovače			X
Test mód	X	X	X

K sériovému rozhraní UART1 je připojen WiFi modul XBEE S6. Tento modul vyrobila firma Digi. Modul je připravený na osazení SMT, tedy bylo potřeba napájet vodiče přímo na jednotlivé piny.

4.5.2 Zapouzdření systému

Návrh zapouzdření vychází opět z požadavku minimalizace, tedy vhodně uspořádat baterii, elektroniku rozhraní a WiFi modul. Návrh byl proveden v programu Sketchup a výslednou podobu nalezneme na obr. 4.18.



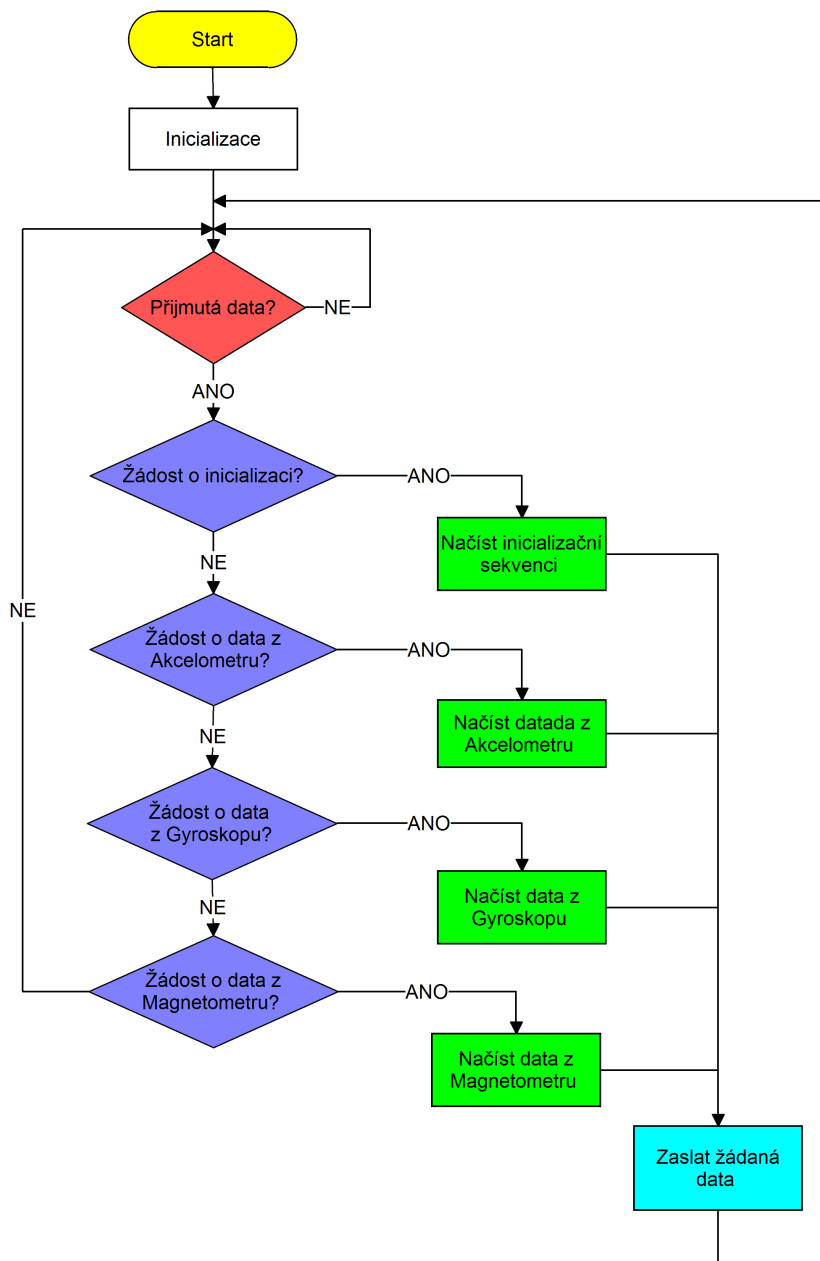
Obrázek 4.18: Obrázek vytisknutého zapouzdření systému

4.5.3 Software

Programovací prostředí, kde probíhal vývoj programu pro modul iNema, je IAR Embedded Workbench. Wifi moduly jsou nositeli čísla snímací jednotky, v podkapitole 4.2.2 byl krátce poukázán výpočet ip adresy jednotlivého modulu, přiřazení části těla snímací jednotce a princip komunikace. Na řídicím počítači se vytvoří WiFi AD HOC síť. Uživatel přiřadí WiFi kartě statickou IP adresu a masku podsítě. Nyní se Wifi moduly snímacích jednotek mohou připojit. Před spuštěním programu pro vizualizaci pohybu 3D Motion Capture se přiřadí části těla snímacím jednotkám. V případě nekalibrované jednotky je potřebná kalibrace, která probíhá v 6 krocích. Program s každou snímací jednotkou vytvoří spojení přes TCP a zašle požadavek k inicializaci. Po inicializaci si osoba nasadí snímací senzory a spustí se vizualizace pohybu. Každé vytvořené vlákno se neustále dotazuje snímací jednotky o dodání změřených dat z gyroskopu a akcelerometru.

Vývojový diagram, který je na obr. 4.19 ukazuje jakým způsobem pracuje program umístěný v procesoru iNema. Po spuštění snímací jednotky program načte knihovny, které připravil výrobce, inicializuje rozhraní mezi mikroprocesorem a senzory. Následuje inicializace GPIO rozhraní a rozhraní UART1, na které je připojený Wifi modul. Nyní se čeká na požadavek na inicializaci. Žádost o inicializaci značí série znaků 0x11 a 0x33, kde v případě pozitivní odpovědi vygeneruje iNemo stejnou posloupnosti znaků 0x11 a 0x33. Nyní následuje čekání na příjem zprávy, která má svůj předdefinovaný tvar. Software vychází z projektu SSP, kde funguje stejný princip při dotazování a přijímání odpovědí. Každá zpráva obsahuje i číslo paketu, které iNemo rozpozná a podle toho zjistí, jaké informace má odeslat zpět a v jaké formě. V případě žádosti dat ze sensorů se posílá číslo paketu, které značí hodnota 513, se speciálním hodnotou udávající typ senzoru, tyto hodnoty jsou: 0 pro akcelerometr, 1 pro gyroskop a 2 pro magnetometr.

Měřená data se v mikroprocesoru ukládají jako čísla typu float. Z důvodu zmenšení datového toku a kompatibility se floatové číslo přetypuje na číslo typu integer. Vzhledem k tomu, že po sériové lince, lze poslat pouze jeden ASCII znak, tedy maximálně 8bit, je potřeba 16bit integerové číslo rozdělit na dvě 8bit hodnoty, poslat a v počítači opět spojit.



Obrázek 4.19: Vývojový diagram programu snímač jednotky

Kapitola 5

Závěr

Cílem práce je návrh elektroniky rozhraní modulu iNemo M1 a softwarového vybavení, které umožňuje využití modulu iNemo M1 v MOCAP systému. Pomocí WiFi nebo Bluetooth rozhraní bude modul umět přenášet data do osobního počítače. Součástí práce je i návrh zapouzdření, které bude vytištěno na 3D tiskárně.

V rámci této práce vznikl prototyp desky plošného spoje, který umožnil oživit modul iNema M1 a zbytku elektroniky. Prototyp napomohl návrhu finálnímu řešení desky plošných spojů při vyvarování se chyb a celkové minimalizaci. Navržená finální deska s plošnými spoji, jejichž rozměry jsou 33 x 41 mm, umožňuje naprogramovat modul iNemo M1, spravovat nabíjení Li-Ion akumulátoru a volit napájení pro sériové sběrnice. Rozdíl finálního řešení oproti návrhu řešení spočívá v tom, že byl odebrán způsob programování přes USB z důvodu úspory místa na desce plošného spoje.

Navržené softwarové vybavení umožňuje změřit data z akcelerometru, gyroskopu, magnetometru a hodnoty odeslat do osobního počítače. S příkazy pro měření a odeslání dat z jmenovaných senzorů jsou identické jako v projektu SSP.

Pro testy použitelnosti bezdrátové technologie byly vybráni tři kandidáti: WiFi, Bluetooth, ZigBee. K porovnání bylo přidáno i drátové rozhraní, které mělo samozřejmě nejlepší výsledky. Vítězem testu se stal WiFi modul Xbee S6, z důvodu nízké odezvy a možnost zakomponovat jednotky do starého systému. Následoval Bluetooth modul RN 41, latence byla výtečná, ale jeho nevýhoda byla v počtu připojených zařízení simultánně. Nejhuře skončil ZigBee modul XBEE PRO. Tento modul měl nejhorší latenci, která trvala několik sekund, tedy pro tuto aplikace velmi nevhodné.

Zakomponované nové měřicí jednotky do starého systému jsou funkční a splňují předpokládané funkce s tím, že nové jednotky jsou oproti starým menší o šest sedmin.

Myslím si, že stávající systém je zbytečně složitý a drahý, možné ulehčení by mohlo

být uděláno tím způsobem, že by mohla být jedna řídicí jednotka, která by po sběrnici spojovala senzory umístěné na těle. Sensorová jednotka by obsahovala Bluetooth modul a zasílala změřená data do osobního počítače.

V rámci bakalářské práce jsem splnil zadání: návrh elektroniky rozhraní modulu, osazení desky plošného spoje, návrh softwaru pro procesor modulu iNemo M1, zakomponování nového systému do systému stávajícího a návrh zapouzdření modulu.

Literatura

- [1] BLUETOOTH. BLUETOOTH [online]. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://www.bluetooth.com/SiteCollectionDocuments/4-2/bluetooth4-2.aspx>⟩,
2015.
- [2] BLUETOOTH RF POWER CLASSES. <http://www.althos.com/> [online].
[cit. 2015-05-20], ⟨<http://www.althos.com/tutorial/Bluetooth-tutorial-RF-Power-Classes.html>⟩, 2009.
- [3] DEXTRA ROBOTICS. DEXMO [online], 2014. [cit. 2015-05-20],
⟨http://www.dextrarobotics.com/images/20141002_2.png⟩.
- [4] DEXTRA ROBOTICS. DEXMO[online], 2014. [cit. 2015-05-20],
⟨http://www.dextrarobotics.com/images/20141002_5.png⟩.
- [5] DEXTRA ROBOTICS. <http://www.dextrarobotics.com/> [online].
[cit. 2015-05-20], ⟨<http://www.dextrarobotics.com/products/Dexmo>⟩, 2014.
- [6] DIGI. <http://ftp1.digi.com/> [online]. [cit. 2015-05-20],
⟨http://ftp1.digi.com/support/documentation/html/90001399/90001399_A/Files/XBee-concepts.html⟩, 2014.
- [7] DIGI. XBEE PRO [online], 2015. [cit. 2015-05-20],
⟨http://www.digi.com/images/products/xbee-pro-pcb-ant_lg.jpg⟩.
- [8] DIGI. XBEE S6 [online], 2015. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://www.digi.com/images/products/xbee-wi-fi-s6b-pcb-smt.jpg>⟩.
- [9] ELECTROMECHANICAL MOTION CAPTURE SYSTEM.
<http://www.metamotion.com/> [online]. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://www.metamotion.com/motion-capture/electro-mechanical-motion-capture.htm>⟩, 2015.

- [10] ELECTROMECHANICAL MOTION CAPTURE SYSTEM. <http://www.metamotion.com/> [online]. [cit. 2015-05-20], [⟨http://www.metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm⟩](http://www.metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm), 2015.
- [11] EXOSKELETON. <http://www.frontiersin.org//> [online], 2015. [cit. 2015-05-20], [⟨http://www.frontiersin.org/files/Articles/111678/fnhum-08-00947-HTML/image_m/fnhum-08-00947-g001.jpg⟩](http://www.frontiersin.org/files/Articles/111678/fnhum-08-00947-HTML/image_m/fnhum-08-00947-g001.jpg).
- [12] G. DE MARIA, A. MINARDO, C. NATALE, S. PIROZZI, L. ZENT. Opto-electronic Tactile Sensor Based on Micromachined Scattering Wells [online], 2015. [cit. 2015-05-20], [⟨http://www.dexmart.eu/fileadmin/dexmart/public_website/downloads/-Publications/SUN_1stmeditPhotonConf.pdf⟩](http://www.dexmart.eu/fileadmin/dexmart/public_website/downloads/-Publications/SUN_1stmeditPhotonConf.pdf).
- [13] IFIXIT. Apple watch teardown [online]. [cit. 2015-05-20], [⟨https://www.ifixit.com/Teardown/Apple+Watch+Teardown/40655⟩](https://www.ifixit.com/Teardown/Apple+Watch+Teardown/40655), 2015.
- [14] MEASURAND. <http://www.motion-capture-system.com/index.html> [online]. [cit. 2015-05-20], [⟨http://www.motion-capture-system.com/index.html⟩](http://www.motion-capture-system.com/index.html), 2009.
- [15] MEASURAND. SHAPEHAND [online], 2009. [cit. 2015-05-20], [⟨http://www.motion-capture-system.com/gallery.html⟩](http://www.motion-capture-system.com/gallery.html).
- [16] MEASURAND. SHAPEWRAPIII[online], 2009. [cit. 2015-05-20], [⟨http://www.motion-capture-system.com/gallery.html⟩](http://www.motion-capture-system.com/gallery.html).
- [17] MENDES FILHO, J. M. *Visualization of a 3D Motion Capture Sensor Network*. Praha: ČVUT, 2013.
- [18] MICROCHIP. Mcp1702t datasheet [online]. [cit. 2015-05-20], [⟨http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22008a.pdf⟩](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22008a.pdf), 2006.
- [19] MICROCHIP. MCP1702T [online], 2006. [cit. 2015-05-20], [⟨http://media.digikey.com/Renders/Microchip%20Tech%20Renders/SOT-23-3%20PKG.jpg⟩](http://media.digikey.com/Renders/Microchip%20Tech%20Renders/SOT-23-3%20PKG.jpg).
- [20] MICROCHIP. Mcp73833 datasheet [online]. [cit. 2015-05-20], [⟨http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22005b.pdf⟩](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22005b.pdf), 2009.
- [21] MICROCHIP. MCP73833[online], 2009. [cit. 2015-05-20], [⟨http://www.microchip.com/_images/ics/medium-MCP73833-MSOP-10.png⟩](http://www.microchip.com/_images/ics/medium-MCP73833-MSOP-10.png).

- [22] MICROCHIP. Rn 134 datasheet [online]. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/WiFly-RN-134-DS.pdf>⟩,
2009.
- [23] MOTIONWERX. GYPSY6 [online], 2008. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://pubs.sciepub.com/ajme/1/7/12/image/fig1.png>⟩.
- [24] MOTIONWERX. GYPSY7[online], 2015. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://www.d3dweb.com/documents/documentspic/201082515372220812.jpg>⟩.
- [25] NATURAL POINT. <http://www.naturalpoint.com/> [online]. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://www.naturalpoint.com/>⟩, 2015.
- [26] NATURAL POINT. OPTITRACK[online], 2015. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://www.optitrack.com/static/productImg/prime41/prime41-perspective-hero.png>⟩.
- [27] NATURAL POINT. SMARTNAV [online], 2015. [cit. 2015-05-20],
⟨<http://www.naturalpoint.com/smarnav/images/products/smarnav4-sideangle.jpg>⟩.
- [28] NATURAL POINT. TRACKIR [online], 2015. [cit. 2015-05-20],
⟨http://www.naturalpoint.com/trackir/images/products/trackir5/trackir5-front_m.jpg⟩.
- [29] OSPRAY DIGITAL REALTIME SYSTEM. <http://www.motionanalysis.com/>
[online]. [cit. 2015-05-20], ⟨<http://www.motionanalysis.com/html/products.html>⟩,
2015.
- [30] OSPRAY DIGITAL REALTIME SYSTEM. KESTREL [online], 2015.
[cit. 2015-05-20], ⟨<http://www.motionanalysis.com/images/general/kestrel.jpg>⟩.
- [31] OSPRAY DIGITAL REALTIME SYSTEM. OSPRAY [online], 2015.
[cit. 2015-05-20], ⟨<http://www.motionanalysis.com/images/general/osprey.jpg>⟩.
- [32] OSPRAY DIGITAL REALTIME SYSTEM. RAPTOR [online], 2015.
[cit. 2015-05-20],
⟨http://www.motionanalysis.com/images/general/R12HS_strip.jpg⟩.

- [33] PYEONG-GOOK JUNG, SEHOON OH, GUKCHAN LIM, KYOUNGCHUL KONG. A Mobile Motion Capture System Based on Inertial Sensors and Smart Shoes [online], 2013. [cit. 2015-05-20], <https://www.google.cz/>.
- [34] QUALISYS. <http://casri.cz/> [online]. [cit. 2015-05-20], <http://casri.cz/qualisys/applications.htm>, 2012.
- [35] QUALISYS. <http://www.qualisys.com> [online], 2013. [cit. 2015-05-20], <http://www.qualisys.com/products/accessories/active-markers/long-range/>.
- [36] QUALISYS. <http://www.qualisys.com> [online], 2013. [cit. 2015-05-20], <http://www.qualisys.com/products/accessories/passive-markers/hard/>.
- [37] RAPTOR 4 MOTION CAPTURE. <http://www.motionanalysis.com/> [online], 2015. [cit. 2015-05-20], http://www.motionanalysis.com/images/animation/five_with_cameras.jpg.
- [38] REAL TIME MOTION CAPTURE. <http://www.cs.cmu.edu/> [online]. [cit. 2015-05-20], <http://www.cs.cmu.edu/halzahaw/Project.html>, 2002.
- [39] SEMICONDUCTOR STORE. RN 41 [online], 2015. [cit. 2015-05-20], <https://www.semiconductorstore.com/images/items/Roving/rn-41-sm.jpg>.
- [40] SPORT SCIENCE QUALISYS MOCAP. <http://www.qualisys.com> [online]. [cit. 2015-05-20], <http://www.qualisys.com/applications/biomechanics/sport-science/>, 2013.
- [41] STM. Lsm303dlh datasheet [online]. [cit. 2015-05-20], <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00260288.pdf>, 2009.
- [42] STM. Inemo v2 datasheet [online]. [cit. 2015-05-20], http://www.stmicroelectronics.com.cn/st-web-ui/static/active/cn/resource/-sales_and_marketing/presentation/product_presentation/inemov2_marketing_pres.pdf, 2011.
- [43] STM. BLOKOVÉ SCHEMA [online], 2013. [cit. 2015-05-20], http://www.ebvnews.ru/img13/inemo_m1_bd.jpg.

- [44] STM. Inemo m1 datasheet [online]. [cit. 2015-05-20], (<http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00056715.pdf>), 2013.
- [45] STM. Lsm303dlhc datasheet [online]. [cit. 2015-05-20], (<http://www.farnell.com/datasheets/1786049.pdf>), 2013.
- [46] SYNERTIAL. GLOVES[online], 2015. [cit. 2015-05-20], (<http://synertial.com/brochure-gloves/>).
- [47] SYNERTIAL. <http://synertial.com/> [online]. [cit. 2015-05-20], (<http://synertial.com/>), 2015.
- [48] SYNERTIAL. SUITS[online], 2015. [cit. 2015-05-20], (<http://synertial.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/01/IGS-207-Suits-slider.jpg>).
- [49] TME. CELLEVIA BATTERIES L753850 [online], 2015. [cit. 2015-05-20], (<http://www.tme.eu/sk/details/accu-lp753850-cl/akumulatory/cellevia-batteries/l753850/>).
- [50] VICON. Bonita [online], 2015. [cit. 2015-05-20], (<http://www.vicon.com/Content/images/systems/Bonita/Bonita%20Camera.jpg>).
- [51] VICON. <http://www.vicon.com/> [online]. [cit. 2015-05-20], (<http://www.vicon.com/System/TSeries>), 2015.
- [52] VICON. T-Series [online], 2015. [cit. 2015-05-20], (<http://www.vicon.com/Content/images/systems/TSeries/T-Series%20Camera.jpg>).
- [53] ZÁHLAVA, V. Navrh dps [online]. [cit. 2015-05-20], (http://www.micro.feld.cvut.cz/home/zahlava/ppn/prednasky/Technologie_DPS.pdf), 2015.

Příloha A

Schéma zapojení

