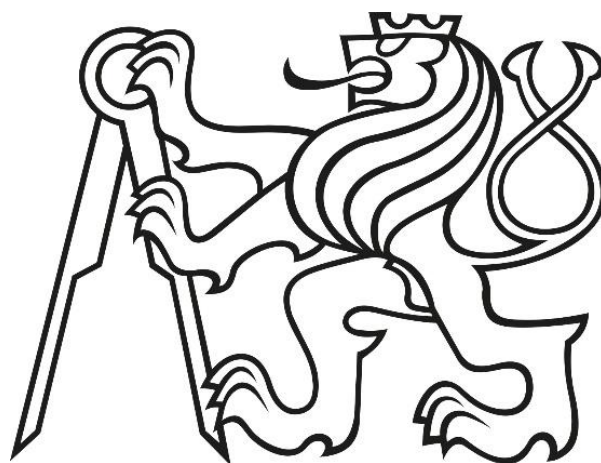


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky



Odstraňování šumu z pohybových dat
Motion Capture Data Denoising

Bakalářská práce

2018

Adam Kubíček



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubiček** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **434777**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Odstraňování šumu z pohybových dat

Název bakalářské práce anglicky:

Motion Capture Data Denoising

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši všech možných artefaktů, které se objevují v pohybových datech získaných optickým motion capture systémem Vicon, uveďte jejich příčiny a možná řešení. Navržené filtry popište a zdůvodněte vybrané parametry. Vypracujte v prostředí Matlab grafické rozhraní, které umožní načíst c3d pohybový soubor, zobrazí pohybová data jako markery v 3D prostoru s možností zobrazit kostru (spojnice určitých markerů) a umožní filtraci jednotlivých typů artefaktů včetně zobrazení. Jednotlivé kroky ponechte v paměti rozhraní, aby bylo možné je zobrazit opakovaně.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Tobón, R.: The Mocap Book - A Practical Guide to the Art of Motion Capture. Foris Force. 2010.
- [2] Daniš, S.: Základy programování v prostředí Octave a Matlab. Matfyzpress. 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Zatloukal, katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Petr Zatloukal
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Petru Zatloukalovi za férový přátelský přístup, pomoc a cenné rady při tvorbě bakalářské práce.

A Ing. Martinu Bernasovi, CSc. za možnost pracovat na tak zajímavém tématu jako je zadání této práce.

Abstrakt

Snímání pohybu, neboli Motion Capture, je odborný termín označující proces zaznamenávání pohybu reálného objektu, či interpreta a takto nasnímaná data se aplikují na digitální model, který se posléze pohybuje tak, jako objekt snímaný. Tato práce se zabývá artefakty dat nasnímaných optickým mocap systémem a jejich možnou eliminací. Především jsou zde zmíněny metody za účelem odstranění často se u tohoto typu dat vyskytujícího vysokofrekvenčního šumu pomocí různých typů dolnoproustných filtrů, konkrétně Butterworthova filtru a Čebyševova filtru 2. typu. Tyto dva filtry jsou mezi sebou porovnány na základě změny jejich charakteristických vlastností v souvislosti se změnou vstupních argumentů. V této práci je dále popsán a realizován Hampel filtr ve spojení s eliminací artefaktu typu spike. Veškerá filtrace a zobrazení dat probíhá v programu Filtrace MOCAP dat s grafickým rozhraním, který byl vytvořen pro účely této bakalářské práce.

Klíčová slova - Motion Capture, artefakty, filtrace, šum, Butterworthův filtr, Čebyševův filtr typu 2, Hampel filtr, grafické rozhraní

Abstract

Motion capture is a technical term indicating a process of recording movement of a real object or artist, and thus scan data is applied to a digital model, which is subsequently moving so as scanned object. This thesis deals with artifacts which are contained in scanned mocap data created with optical motion capture system and their possible removal. Above all, in this work are mentioned methods for removing high frequency noise, namely Butterworth filter and Chebyshev filter type 2. These two filters are compared between each other based on changes in their characteristics in relation to the change of input arguments. In this thesis, a Hampel filter is described and implemented in conjunction with the removal of a spike artifact. All filtering and displaying of data takes place in a graphical interface program created for the purpose of this bachelor thesis.

Key words - Motion Capture, Artifacts, Filtration, Noise, Butterworth filter, Chebyshev type 2 filter, Hampel filter, Graphical interface

Obsah

Seznam zkratk a pojmů	- 8 -
Seznam příloh.....	- 8 -
Seznam obrázků.....	- 8 -
1 Úvod	- 10 -
2 Motion Capture	- 11 -
2.1 Základní teorie.....	- 11 -
2.2 Dělení metod snímání pohybu	- 11 -
2.2.1 Magnetické systémy.....	- 12 -
2.2.2 Mechanické systémy	- 12 -
2.2.3 Optické systémy (OMC).....	- 12 -
2.3 Kalibrace OMC systému	- 12 -
2.3.1 Kalibrace kamer.....	- 13 -
2.3.2 Nastavení pozadí scény	- 14 -
2.3.3 Kalibrace snímaného subjektu a rozmístění markerů.....	- 14 -
2.4 Artefakty vyskytující se v pohybových datech a jejich odstranění.....	- 16 -
2.4.1 Labeling	- 16 -
2.4.2 Nadměrná data (Overlying data).....	- 16 -
2.4.3 Záměna markerů (Marker swapping).....	- 17 -
2.4.4 Mezery v datech (Gaps).....	- 17 -
2.4.5 Spikes.....	- 20 -

2.4.6	Vysokofrekvenční šum	- 21 -
3	Filtrace dat.....	- 23 -
3.1	Filtrace vysokofrekvenčního šumu.....	- 24 -
3.1.1	Butterworthův filtr	- 24 -
3.1.2	Inverzní Čebyševův filtr	- 30 -
3.1.3	Porovnání výsledků odstranění vysokofrekvenčního šumu za použití Butterworthova a inverzního Čebyševova filtru	- 34 -
3.2	Odstranění artefaktu typu spike	- 38 -
3.2.1	Hampel filtr.....	- 38 -
4	Grafické rozhraní.....	- 40 -
4.1	Načíst c3d	- 41 -
4.2	Zobrazit markery / Zobrazit markery po filtraci	- 41 -
4.3	Filtrace.....	- 42 -
4.4	Zobrazit trajektorii markeru	- 43 -
5	Závěr.....	- 44 -
	Reference	- 45 -
	Přílohy.....	- 46 -

Seznam zkratk a pojmů

MoCap / mocap – Motion Capture

OMC – Optical Motion Capture

Marker – Snímaný bod (značka) osazená na interpretovi provádějící pohyb

Artefakt spike - Chyba v nasnímaných datech mající charakteristický tvar úzké špičky vystupující svým vrcholem směrem nahoru, či dolů.

Okluze markeru – zastínění markeru

Seznam příloh

Tabulka č. 1 – Seznam užitých markerů s kódovým označením a korespondujícím umístěním

Seznam Obrázků

Obrázek 1: <i>Stereo triangulace</i>	11
Obrázek 2: <i>Ukázka zanalyzované scény spolu s vytvořeným virtuálním skeletem</i>	14
Obrázek 3: <i>Artefakt mezera v datech</i>	17
Obrázek 4: <i>Příklad artefaktu spike</i>	19
Obrázek 5: <i>Toleranční schéma filtru typu dolní propust</i>	23
Obrázek 6: <i>Řád Butterworthova filtru</i>	24
Obrázek 7: <i>Butterworthův filtr – ampl. a fázová frek. charakteristika</i>	26
Obrázek 8: <i>Butterworthův filtr - skupinové zpoždění</i>	26
Obrázek 9: <i>Butterworth. filtr – porovnání vstupního a výstupního signálu</i>	28
Obrázek 10: <i>Butterworth. filtr – porovnání vstupního a výstupního signálu 2</i>	28
Obrázek 11: <i>Inversní Čebyševův filtr – ampl. a fázová frek. char.</i>	30
Obrázek 12: <i>Inversní Čebyševův filtr – skupinové zpoždění</i>	30
Obrázek 13: <i>Inversní Čebyševův filtr – porovnání vstupního a výstupního signálu</i>	32
Obrázek 14: <i>Inversní Čebyševův filtr – porovnání vstupního a výstupního signálu 2</i>	32
Obrázek 15: <i>Porovnání vstupního s výstupním signálem Butterworthova a inverzního Čebyševova filtru</i>	36
Obrázek 16: <i>Porovnání vstupního s výstupním signálem Butterworthova a inverzního Čebyševova filtru 2</i>	36
Obrázek 17: <i>Hampel filtr filtrace</i>	38
Obrázek 18: <i>Program MOCAP filtrace</i>	39
Obrázek 19: <i>Zobrazené markery v prostoru</i>	41
Obrázek 20: <i>Zobrazení virtuálního skeletu</i>	41
Obrázek 21: <i>Zobrazení trajektorie vybraného markeru</i>	42

1 Úvod

Se stále se zvyšující technologickou kvalitou výpočetních a snímacích zařízení se vyskytují nové možnosti pro realizaci stále se zdokonalujících metod snímání pohybu. Snímání pohybu, neboli Motion Capture (zkráceně MoCap, či mocap), je odborný termín označující proces zaznamenávání pohybu reálného objektu a takto nasnímaná data se aplikují na digitální model, který se posléze pohybuje stejně jako objekt reálný. Je možné snímat pohyb pevného předmětu (rigid object), například vozidla, míče či zbraně, tak také měkkých ohebných objektů (soft body) jako je člověk, či zvíře. Díky této vlastnosti je pole působnosti pro využití takovéto technologie značně rozsáhlé.

Tato bakalářská práce se zabývá artefakty nasnímaných pohybových dat znakové řeči získaných optickým motion capture systémem Vicon, zejména řešením odstraňování šumů (vysokofrekvenční šum, artefakt typu spike) pomocí vhodně navržené digitální filtrace. Práce porovnává různé typy filtrů jak v teoretické, tak v empirické oblasti. Dále je v prostředí Matlab navrženo grafické rozhraní, které umožňuje práci s daty jako je například snadná realizace filtrace nebo zobrazení pohybu pomocí markerů v 3D prostoru spojených do modelu kostry.

Bakalářská práce je rozdělena do pěti hlavních kapitol. Následující kapitola se zabývá teorií snímání pohybu s výčtem možných artefaktů a navržením jejich řešení. V kapitole číslo tři je rozebrána teorie a realizace digitálních filtrů užitých k eliminaci jednotlivých typů artefaktů. Čtvrtá část se věnuje grafickému rozhraní vytvořené v prostředí Matlab. A závěrečná pátá kapitola obsahuje závěr, kde jsou zhodnoceny výsledky práce a možné budoucí užití.

2 Motion Capture

V této kapitole dochází k podrobnějšímu seznámení se s technologií snímání pohybu a s druhy metod realizace této technologie. Dále je zmíněna problematika snímání pohybu znakového jazyka, jsou zmíněny možné artefakty nasnímaných dat a je nastíněno jejich možné řešení. Podrobnějšímu řešení odstraňování určitých artefaktů se zabývá kapitola 3.

2.1 Základní teorie

Motion Capture je proces zachycení pohybu reálného objektu jakožto sekvenci souřadnic v 3D prostoru. Cílem je získat dostatečný počet relevantních dat pro jednotlivé části snímaného objektu, aby byla možná rekonstrukce translace a rotace v prostoru. Hlavní aplikace této technologie se nachází v počítačové grafice za účelem zpracování věrného pohybu postav, ve virtuální realitě k realizaci virtuálního prostředí ovládaného člověkem a v neposlední řadě ve zdravotnictví.

Pro účely syntézy a analýzy lidského pohybu je vyžadován realistický pohyb interpreta. Pohybová syntéza spočívá v simulaci, ovládní nebo vytváření pohybu nového objektu, či subjektu. Nasnímaná data pomáhají uvěřitelnosti pohybu uměle vytvořených postav a dodávají jim osobitost.

V pohybové analýze je zachycená informace využita k vyhodnocení některých aspektů muskuloskeletálního systému. Optické snímání pohybu je vhodné pro extrahování detailních informací týkajících se pohybu měřeného subjektu. Takto nasnímaná data mohou odkrýt různé anomálie pohybu snímaného interpreta.

2.2 Dělení metod snímání pohybu

Mocap systémy mohou být rozděleny na magnetické, mechanické a optické. Data využitá v této práci byly nasnímany pomocí optického systému, proto se tomuto typu bude tato práce věnovat podrobněji.

2.2.1 Magnetické systémy

Tento druh realizace Motion Capture využívá elektromagnetické senzory připojené k počítači, který dokáže generovat 3D data v reálném čase s poměrně malým výpočetním zatížením. Nicméně tato metoda omezuje rozsah a přirozenost pohybu v důsledku nutnosti kabeláže systému.

2.2.2 Mechanické systémy

Mechanické systémy využívají speciální obleky s integrovanými mechanickými senzory, které zaznamenávají pohyb v reálném čase s žádnými výpočty.

2.2.3 Optické systémy (OMC)

Optické systémy pro zachycení pohybu jsou založeny na fotogrammetrických metodách. Fotogrammetrie je vědní obor zabývající se zpracováním informací z fotografických snímků. Což znamená, že optické systémy využívají kameru nebo systém kamer k rekonstrukci postavení těla interpreta. Tento typ systému poskytuje vysokou přesnost, relativně neomezený pohyb a možnost interakce mezi různými aktéry za cenu nutnosti vyššího výpočetního výkonu.

Optické systémy se dělí v závislosti na počtu snímajících pohledů (monocular nebo multi-view OMC) a v závislosti na použití značek, neboli markerů (marker-based nebo markerless). Monokulární systémy používají snímky pořízené pouze jednou kamerou, zatímco multi-view systémy využívají snímky pořízené současně a synchronně dvěma a více kamerami. Monokulární technika se musí zabývat nejednoznačností při rekonstrukci 3D pózy způsobené reflexní nejednoznačností [2] a kinematickou singularitou [3]. Marker-based snímání zaznamenává trajektorie bodů (markerů) na těle interpreta, zatímco markerless způsob snímání počítá pohybové parametry z extrahované siluety, případně z dalších funkcí (např. okrajů). V této práci byl užit multi-view marker-based OMC systém od společnosti Vicon.

2.3 Kalibrace OMC systému

Kalibrace se rozumí nastavení systému realizující optické snímání pohybu tak, aby nakalibrovaný systém dokázal učít správně polohu markerů v prostoru. Tudiž, aby nasnímaná data odpovídala co možná nejvíce reálnému pohybu a bylo je možné označit za relevantní. Kalibruje se mnoho aspektů OMC systému, kdy počáteční nastavení vyžaduje kalibraci kamer ke zjištění vnějších a vnitřních kamerových parametrů, metrické nastavení pro stanovení soustavy souřadnic

definující okolní svět, nastavení pozadí pro dosažení korektní identifikace markerů a kalibraci skeletonu pro vytvoření korektního kinematického lidského modelu (kinematic human body model). V následujících bodech jsou popsány kalibrace některých aspektů ovlivňující korektnost a kvalitu nasnímaných dat.

2.3.1 Kalibrace kamer

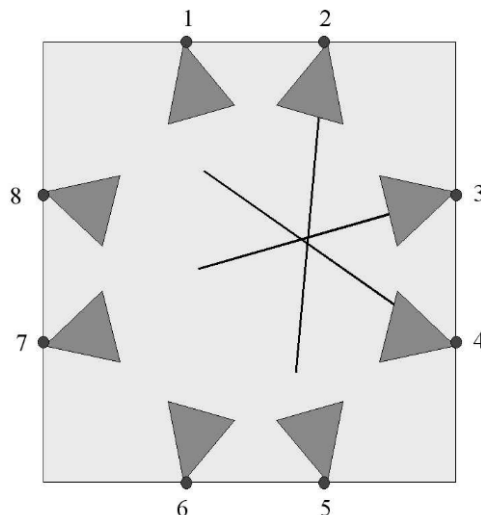
Nastavení kamer se skládá ze dvou hlavních atributů. Nastavení vnitřních kamerových parametrů popisující ohniskovou vzdálenost, formát obrazového snímáče a střed obrazu, slouží k minimalizování zkreslení způsobené vlastnostmi obrazového snímáče a objektivu. A nastavení vnějších kamerových parametrů popisující pozici a rotaci kamer v prostoru.

2.3.1.1 Kalibrace vnitřních parametrů kamery

Nastavení vnitřních parametrů je uskutečněno pomocí kalibrační procedury využívající referenční objekt. V tomto případě je referenčním objektem myšlen tvrdý panel osazený definovaným černobílým šachovnicovým vzorem sloužící k realizaci Tsaiova algoritmu.

2.3.1.2 Kalibrace vnějších parametrů kamery a detekce markeru

Ke korekci těchto parametrů slouží obvykle referenční zařízení dodávané spolu s OMC systémem. Jedná se obvykle o hůl osazenou předdefinovanými markery. Rozmístění markerů na kalibračním zařízení je známé systému OMC. Jakmile jedna z kamer zaznamená takto uspořádané markery, systém dokáže vyhodnotit, že je snímán kalibrační předmět a díky tomu je schopný říci jaký marker snímáný kamerou odpovídá markeru známého kalibračního zařízení. Jakmile všechny kamery zaznamenají markery na kalibračním zařízení, systém vyhodnotí v jakém je vztahu jedna kamera ke druhé v prostoru. Jakmile systém zná polohu jednotlivých kamer, dokáže vypočítat triangulaci markeru, který je snímán dvěma a více kamerami (viz Obrázek 1). [4]



Obrázek 1: Stereo triangulace [6] (Na obrázku je znázorněna scéna využívající OMC systém s osmi kamerami snímající markery. Kamera 2, 3 a 4 zaznamenala jeden marker. Pomocí průsečíku jednotlivých paprsků všech tří kamer spojující střed dané kamery s markerem se určí pozice markeru v prostoru.)

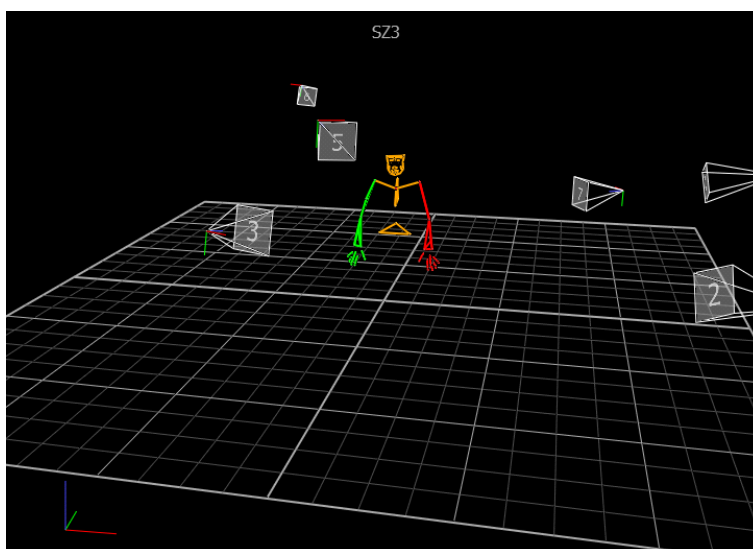
2.3.2 Nastavení pozadí scény

Separace subjektu snímaného v popředí od pozadí je nezbytná pro správnou identifikaci jednotlivých markerů na daném subjektu. Je doporučeno, aby pozadí mělo unifikovanou barvu velmi rozdílnou od barvy markerů a snímaného subjektu. Pro systém je takovýto model snímání vhodný, jelikož pixely mající velkou odchylku od barvy pozadí jsou označeny za popředí, tudíž za snímaný subjekt osazený markery. Dochází tak ke snadné diferencii pozadí a popředí.

2.3.3 Kalibrace snímaného subjektu a rozmístění markerů

Před každým započítím snímání subjektu a po skončení dané sekvence je vhodné provést takzvanou T pózu, což je označení pro dané postavení člověka, kdy je zaujat stoj vzpřímený rozkročný na šíři ramen, horní končetiny jsou v abdukci a obličej je směřovaný dopředu. Toto charakteristické postavení odkrývá rozsah pohybu jednotlivých kloubů a nedochází k zakrývání markerů na těle, tudíž systém je schopný provést identifikaci markerů a správně je jednotlivě přiřadit k odpovídajícím částím virtuálního skeletu reprezentující digitální obraz snímaného subjektu [4].

Správné rozložení markerů by mělo pokrýt všechny hlavní klouby. Optický motion capture systém zaznamená data translací každého individuálního bodu korespondujícího s daným markerem. Nastavení rozmístění markerů by mělo být takové, aby bylo možné zaznamenat vnitřní rotace hlavních kloubů včetně čtyř částí páteře (v našem případě kost křížová, 7. krční obratel, 10. hrudní obratel a hrudní kost). Pro potřeby této práce v rámci nasnímání dat znakové řeči postačilo snímat horní polovinu těla, která byla osazena celkem devadesáti markery (viz Tabulka 1). 23 markerů bylo rozmístěno po těle spolu se 4 markery na hlavě. Všech 10 prstů bylo osazeno celkem 38 markery. Obličej byl reprezentován 29 markery, aby bylo možné zaznamenat mimiku, která je důležitým aspektem ve znakové řeči při rozeznávání znaků. Seznam všech užitých markerů, jejich kódové označení a jejich pozice osazení na těle interperta je uveden v Tabulce 1 nacházející se v kapitole Přílohy na konci této bakalářské práce.



Obrázek 2: Ukázka zanalyzované scény spolu s vytvořeným virtuálním skeletem

2.4 Artefakty vyskytující se v pohybových datech a jejich odstranění

Většina optických motion capture systémů vyžaduje lidský zásah do nasnímaných dat za účelem čištění a opravy chybných informací. Hlavními problémy jsou nadměrná data, záměna markerů, mezery v datech, vysokofrekvenční šum a výstřelový šum (spikes). Tato podkapitola se zabývá příčinami a možným řešením jednotlivých artefaktů. Realizace odstraňování chyb nasnímaných dat optického mocap systému bylo uskutečněno pomocí softwaru Nexus od společnosti Vicon a v prostředí programu Matlab, kde byly navrženy digitální filtry za účelem odstranění vysokofrekvenčního šumu a výstřelového šumu.

2.4.1 Labeling

Labeling neboli označení markerů není v žádném případě artefakt, ale jedná se o velmi důležitého pomocníka při řešení chyb zmíněných v podkapitolách 2.4.2 a 2.4.3. Označení markerů svými kódovými jmény, která korespondují s jejich pozicí na těle snímaného subjektu (viz *Tabulka 1*) probíhá v softwaru Nexus od firmy Vicon. Slouží především k přehlednosti a snadné identifikaci jednotlivých markerů v čase a prostoru. Mocap systémy potřebují znát jaký marker patří k jaké části těla a správný labeling dokáže tuto informaci poskytnout.

2.4.2 Nadměrná data (Overlying data)

Problém nadměrných dat nastane když OMC systém rozhodne, že určitý marker existuje na dvou místech současně a vytvoří duplicitní marker. Tyto dva kusy segmentu dat se překrývají v čase. [4] Hlavní příčinou je zakrytí markeru částí těla při určité fázi pohybu. Daný marker se stane neviditelný pro kamery, tudíž není možné provedení triangulace s následným určením pozice markeru v prostoru. Při další fázi pohybu začne být marker znovu viditelný pro kamery z různých úhlů a díky výpočetní chybě se zdá že jeden marker jsou ve skutečnosti dva markery na stejné části těla.

Pro jeden marker máme tedy dva překrývající se segmenty v čase. Řešení je rozhodnout se jaký segment je ten pravý pro daný marker. Prohlédnutí si grafu trajektorie markeru v čase před začátkem překrytí a po skončení segmentu nadměrných dat nám poskytne základní informace

k rozhodnutí jaký segment dat je náš chtěný a jaký segment dat bude vymazán. Celá operace řešení probíhá v prostředí programu Nexus. Závísí na úsudku osoby zodpovědné za čištění dat.

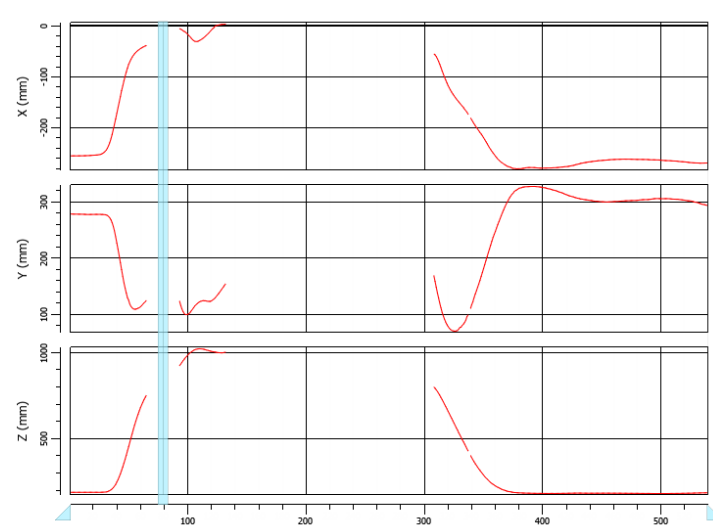
2.4.3 Záměna markerů (Marker swapping)

Dalším běžným problémem při realizaci optického snímání pohybu je takzvaný marker swapping neboli záměna kódového označení (labelu) dvou markerů. K této chybě dochází při kritickém přiblížení, či překrytí markerů ležících blízko sebe v průběhu pohybu. Následkem je špatné vyhodnocení systému označení takto postižených markerů a záměna dat. Příkladem kdy nastane marker swapping je pohyb záklonu hlavy, při kterém dochází ke kontaktu markeru na zadní straně hlavy a markeru ležící na horní části krční oblasti páteře.

Důležitým kritériem pro úspěšné řešení tohoto artefaktu je správná identifikace času kdy nastane marker swapping pomocí subjektivní analýzy průběhu nasnímaných dat. Po stanovení tohoto bodu počátku chyby je nutné ruční přiřazení správného kódového označení postižených markerů.

2.4.4 Mezery v datech (Gaps)

Nejčastěji se vyskytujícím problémem postihující data optického snímání pohybu jsou mezery (gaps) způsobené absencí dat potřebných pro správný výpočet pozice markeru v prostoru. Ideální průběh 3D trajektorie markeru trvá po celou dobu snímané sekvence, ale obecně platí, že trajektorie postižených markerů tímto artefaktem obsahují mezery v trajektoriích. Takto vzniklé mezery mohou být automaticky identifikovány softwarem pro OMC systém. Důvody pro nastání této chyby jsou různé, ale za hlavní důvod je považována takzvaná okluze markeru [4]. Okluze nastane v důsledku zastínění markeru částmi těla v průběhu pohybu a daný marker se stane neviditelný pro snímající kamerový systém. V takovém případě není možná triangulace a tudíž je znemožněno definovat pozici markeru v prostoru do doby než se marker stane viditelným pro kamerový systém. Následkem je vytvořená mezera v nasnímaných datech.



Obrázek 3: Graf zachycující trajektorii markeru v jednotlivých prostorových rovinách v závislosti na čase. Trajektorie by měla být spojitá po celou dobu sekvence, ale zde je patrná nepřítomnost dat v určitých časových úsecích, tedy přítomnost artefaktu mezery v datech (gap).

Řešení odstranění vzniklých mezer v datech je možné uskutečnit různými způsoby, které jsou zmíněny v následujících podkapitolách.

2.4.4.1 Lineární interpolace

Nejrychlejším způsobem odstranění gap artefaktu je užití lineární interpolace. Lineární interpolace je myšleno spojení posledního relevantního bodu v datech před nastáním mezery a prvního bodu po konci mezery v datech pomocí přímého spoje mezi nimi. Výsledkem může být pohyb vypadající příliš nepřirozeně.

2.4.4.1.1 Matematické vyjádření lineární interpolace

Jestliže jsou zadány dva známé body souřadnicemi (x_0, y_0) a (x_1, y_1) , pak lineární interpolant je přímka spojující tyto dva body. Pro hodnoty x v intervalu (x_0, x_1) je hodnota y podél přímky dána rovnicí (2.1).

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (2.1)$$

Vyřešení rovnice (2.1) pro neznámou proměnnou y , dostaneme rovnici (2.2).

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (2.2)$$

Výsledná rovnice (2.2) je vzorec pro lineární interpolaci v intervalu (x_0, x_1) .

2.4.4.2 Interpolační spline

Dalším možným způsobem odstranění artefaktu typu gap je užití interpolačního splinu. Nejčastěji implementovaným typem spline interpolace v oblasti úpravy grafických dat je takzvaný kubický spline definovaný pozicí a směnicí tečny v bodě na počátku a konci mezery [4]. Tím pádem interpolační spline interpoluje nejen pozici krajních bodů, ale také rychlost změny pozice. Jelikož tento typ interpolace využívá více informací z dat před a po mezeře než lineární interpolace, dopočítaná data mají více přirozený průběh. Interpolační spline se nedoporučuje využívat na mezery dat, které mají v oblasti krajních bodů mezery netypické (neočekávané) zakřivení (například v důsledku přítomnosti šumu). To má za následek nechtěné (nepřirozené) zakřivení interpolantu. Na odstraňování takovýchto mezer v datech se využívá ruční odstranění netypických krajních dat, což má za následek rozšíření mezery, kterou ale úspěšně vyplní interpolant.

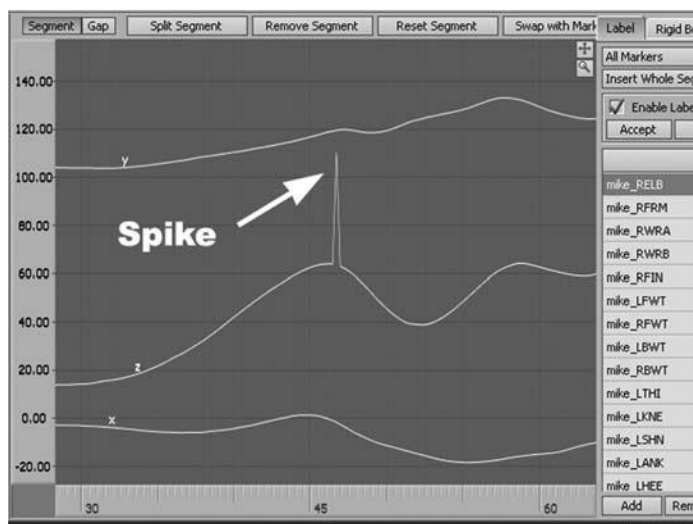
2.4.4.3 Rigid body

Metoda Rigid body je vhodná při odstranění velkých mezer v informaci o markeru a když výstupy metod zmíněných výše nejsou uspokojující při řešení těchto mezer. Tato metoda využívá relevantní data okolních markerů části subjektu, které můžeme označit za rigidní (například hlava) nebo relativně rigidní (například žebra a kyčle) a tyto data napomáhají při rekonstrukci chybějících informací postiženého markeru chybou gap. Tato metoda je možná díky vlastnosti rigidní části těla. Tedy, že markery v této sekci nemění relativní pozici vůči sobě při pohybu.

K vytvoření rigidní části těla je potřeba nejméně tří markerů a to proto, že by pouze 2 markery nezohlednily rotaci kolem přímky mezi nimi a jeden marker nedokáže definovat orientaci [4]. Tyto alespoň tři markery definují rigidní část těla a pohyb této části je odvozen od pohybu markerů v této rigidní sekci. Jestliže jeden marker z rigidní části těla obsahuje mezeru v datech, je možné ji dopočítat daty odvozených od pohybu a orientace dané rigidní sekce se zohledněním pozice postiženého markeru v sekci.

2.4.5 Spikes

Dalším chybou zatěžující mocap data je přítomnost takzvaných spike artefaktů. Spike je část dat (obvykle jeden až dva samplu), která náhle skokově opustí normální rozsah dat [4]. To má za následek zkreslení informace a náhlý skok v trajektorii markeru. Za příčinu výskytu tohoto typu artefaktu lze považovat krátké zastínění markeru, který se jeví OMC systému jako neviditelný. Systém se snaží vyhodnotit danou situaci a dopočítat danou pozici markeru, ale daný problém vyhodnotí chybně [4].



Obrázek 4: [6] Příklad spike artefaktu v nasnímaných datech pomocí OMC systému

Při použití grafického znázornění trajektorie markeru je poměrně jednoduché detekovat chybu typu spike (viz Obrázek 4). Chyba má charakteristický tvar úzké špičky vystupující svým vrcholem směrem nahoru, či dolů. V následujících podkapitolách jsou zmíněny techniky umožňující odstranění tohoto artefaktu.

2.4.5.1 Eliminace pomocí lineární interpolace

Metoda využívající lineární interpolaci k odstranění spiků z nasnímaných dat je nejjednodušší metoda co se realizace týče, ale při velkém kvantu dat je časově velice náročná. V podstatě se jedná o ruční odstranění té části dat podílejících se na vytvoření takovýchto nechtěných artefaktů. Obvykle se odstraní jeden až dva samplý dat, tedy ty samplý, jež jsou obsaženy v nechtěném spiku. Po odstranění těchto nežádoucích samplů vznikne mezera mezi krajními body artefaktu, tedy posledním a prvním bodem obsahující relevantní data. K doplnění dat v mezeře slouží lineární interpolace, jejíž princip je popsán v kapitole 2.4.4.1.

2.4.5.2 Eliminace pomocí Butterworthova filtru

Butterworthův filtr typu dolní propust je užít primárně k eliminaci vysokofrekvenčního šumu (kapitola 2.4.6). Užitá literatura [4, 6] však ale zmiňuje dolnoproputný Butterworthův filtr jakožto vhodný nástroj pro odstranění spike artefaktu z nasnímaných dat. Při aplikaci tohoto řešení v této práci ale nedošlo k uspokojivým výsledkům a docházelo spíše ke snížení amplitudy spiku a jeho zaoblení, nikoliv však k úspěšnému odstranění zkreslení signálu. Proto tento algoritmus nebyl užít k odfiltrování tohoto typu chyby.

2.4.5.3 Eliminace pomocí hampel filtru

Digitální filtr hampel je speciálně navržen pro detekci a odstranění artefaktu spike ze souboru dat pomocí identifikátoru Hampel. Identifikátor Hampel je variace statistického pravidla tří sigma, jež říká, že u přibližně normálně rozděleného statistického souboru by se měly téměř všechny relevantní hodnoty nacházet do tří směrodatných odchylek od aritmetického průměru [8]. Výsledky po aplikaci filtru hampel byly uspokojivé, jelikož filtr ve většině případů správně detekoval chybná data, která posléze odfiltroval. Tato metoda je podrobně popsána v kapitole 3.

2.4.6 Vysokofrekvenční šum

Data nasbíraná během realizace snímání pohybu pomocí optického systému jsou zatížena přídavným šumem. Přítomnost vysokofrekvenčního šumu má za následek zkreslení dat takovým způsobem, že výsledný pohyb virtuálního skeletu se zdá být roztřesený díky kmitání markerů o malé amplitudě (rámcově desetiny milimetrů) s vysokou frekvencí. Díky tomuto jevu neodpovídá výsledný průběh pohybu virtuálního skeletu pohybu snímaného interpreta. V užitých literaturách [4, 6, 7] se důvody vzniku takového přídavného šumu liší, proto jsou zde zmíněny ty důvody, jež

se jeví jakožto nejvíce pravděpodobné. Za jeden z důvodů vzniku je považována přesnost užitého hardwaru OMC systémem [4]. Například výstupy kamer užitých pro snímání scény mohou obsahovat digitální šum, který zvyšuje nepřesnost výpočtů triangulace za účelem určení pozice markeru v 3D prostoru z 2D obrazových dat. Jeden z možných důvodů mohou být i vibrace způsobené okolím, které mají za následek nestálost pozice kamer, což má dopad na zvýšení chybovosti ve výpočtech matematických operací sloužících k realizaci určení pozice markeru. Samotné matematické algoritmy implementované v softwaru OMC systému mohou mít určitý podíl na vzniku tohoto artefaktu. Jakožto dalším důvodem je označována chyba způsobená lidským faktorem v kalibraci OMC systému [7] .

Řešením odstranění vysokofrekvenčního přídavného šumu je aplikace digitálního filtru typu dolní propust pro zvýšení hodnoty odstupe signálu od šumu. Dle literatury zabývající se dynamikou a kinematikou pohybu a zejména znakového jazyka víme, že pásmo znakového jazyka sahá pouze k cca 6 – 10 Hz. Tento poznatek využijeme při stanovení mezní frekvence propustného pásma. Všechny vyšší frekvence, které obsahují i frekvence vysokofrekvenčního šumu, jsou odfiltrovány a data reprezentující nasnímaný pohyb jsou vyhlazena. Existuje však speciální znak, při kterém se chvějí rty, dosahující frekvence až 30 Hz. V takovémto případě, kdy by signál obsahoval tento znak, bychom museli realizovat dolnoproputný filtr s mnohem vyšším mezním kmitočtem propustného pásma. Problematice odstraňování vysokofrekvenčního šumu se zabývá podrobněji kapitola 3.

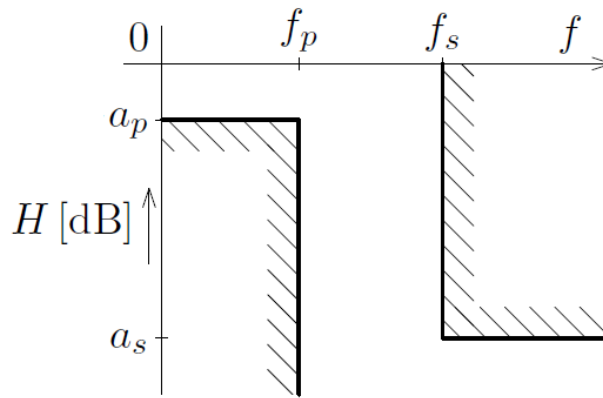
3 Filtrace dat

Tato kapitola se věnuje návrhu a realizaci filtrů k odstranění dvou typů artefaktů vyskytujících se v datech nasnímaných pomocí OMC systému. V kapitole 3.1 je rozebrána problematika filtrace vysokofrekvenčního šumu, přičemž následující kapitole 3.2 je realizován filtr užitý k odstranění artefaktu typu spike.

Filtrací se rozumí potlačení nebo zesílení určitých signálových složek jak v časové, tak ve frekvenční oblasti. Právě ve frekvenční oblasti jsou pomocí filtrace měněny fourierovy koeficienty některých frekvenčních složek v souladu s přenosovou funkcí filtru. Při použití mezních kmitočtů f_{c1} a f_{c2} rozeznáváme u přenosové funkce tři pásma frekvenčního spektra.

- I. Propustné pásmo ležící v intervalu $(0; f_{c1})$
- II. Přechodové pásmo ležící v intervalu $(f_{c1}; f_{c2})$
- III. Nепropustné pásmo ležící v intervalu $(f_{c2}; \infty)$

Propustné pásmo je takový rozsah frekvencí, ve kterém zůstane energie signálu téměř nezměněna. V přechodovém pásmu dochází ke snížení výkonu frekvenčních složek ležících ve frekvenčním rozsahu přechodového pásma. Pásmo nepropustné eliminuje všechny ostatní frekvence. Proces filtrování zahrnuje násobení spektrální výkonové hustoty přenosovou funkcí. Zvolením správného typu aproximace filtru a mezní frekvence jsou hlavními problémy při realizaci návrhu digitálního filtru. Při špatně zvolené aproximaci dochází například k výraznějšímu zkreslení informací v propustném pásmu a tedy deformaci užitečného signálu. Volba příliš vysoké hodnoty mezní frekvence má za následek průchodu nežádoucích frekvencí filtrem a při zvolení mezní frekvence příliš nízké hodnoty dochází k potlačení části užitečného signálu. Data lidského pohybu se pohybují v nízkých frekvencích, jejichž hodnoty se přibližně pohybují v rozmezí 5 - 20 Hz [7]. Rušivý šum je predominantní v oblasti vyšších frekvencích, než je frekvence lidského pohybu. Díky tomuto poznatku byl použit dolnoproputný filtr (Obrázek 5) k odstranění vysokofrekvenčního šumu a zachování dat popisujících nasnímaný pohyb.



Obrázek 5: Toleranční schéma filtru typu dolní propust, kdy

f_p je označení pro mezní frekvenci propustného pásma s útlumem a_p , přechodové pásmo definované mezi frekvencemi f_p a f_s , kde f_s je označení pro mezní frekvenci nepropustného pásma s útlumem o hodnotě a_s .

3.1 Filtrace vysokofrekvenčního šumu

Možné příčiny vzniku a následky vysokofrekvenčního šumu v datech nasbíraných pomocí optického systému pro snímání pohybu jsou rozebrány v kapitole 2.4.6. Tato kapitola je věnována řešení odstranění tohoto šumu při co možná nejmenším zkreslení pohybových dat. Jsou zde popsány dva užité typy dolnopropustného filtru v teoretické rovině a po následném užití jsou výsledky kvality filtrace vyhodnoceny. Jmenovitě se jedná o Butterworthův filtr (kapitola 3.1.1) a inverzní Čebyševův filtr neboli Čebyševův filtr typu 2 (kapitola 3.1.2). Kapitola 3.1.3 hodnotí dopad hodnot definujících vlastnosti filtru a následně srovnává výstupy obou filtrů mezi sebou. Veškerý návrh filtrů a následná filtrace dat probíhaly v prostředí programu Matlab.

3.1.1 Butterworthův filtr

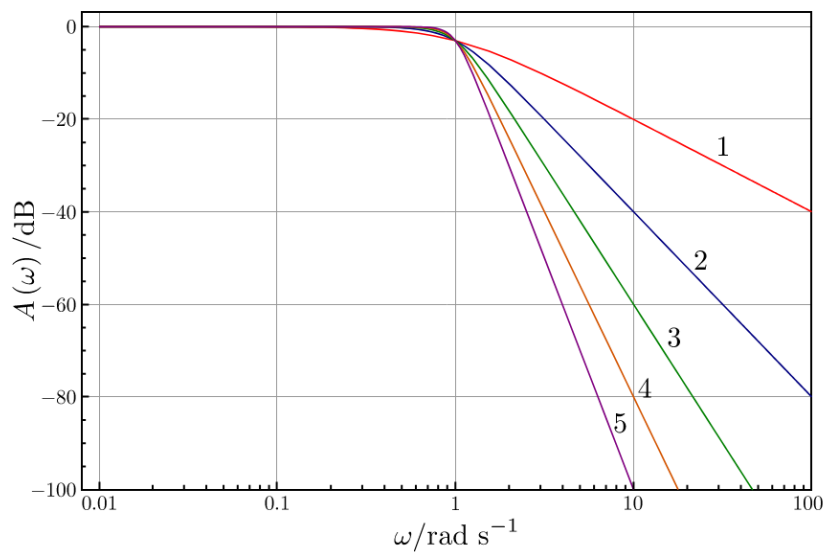
Butterworthův filtr je typ filtru navržený za účelem zpracování signálu tak, aby byla jeho frekvenční odezva co možná nejplošší v propustném pásmu (nezvlněná). Mezi charakteristické vlastnosti Butterworthova filtru patří:

- I. Plochá amplituda frekvenční charakteristiky v propustném pásmu,

- II. Společný průsečík frekvenčních charakteristik filtrů libovolného řádu o stejné frekvenci zlomu. Průsečík leží na frekvenci zlomu v úrovni -3dB . Pro libovolný řád filtru je stejný mezní kmitočet a stejná šířka pásma [10],
- III. V propustném pásmu plynulá změna fáze s frekvencí, skupinové zpoždění (derivative fáze podle frekvence) je bez zvlnění,
- IV. Asymptota frekvenční charakteristiky bude od kritického kmitočtu klesat se strmostí -20dB/dek pro filtr prvního řádu [10]. Tato strmost je závislá na řádu filtru, pak je tedy vyjádřena pro libovolný řád filtru n poklesem

$$20 \cdot n \text{ dB/dek.} \quad (3.1)$$

Zvýšením řádu filtru n dosáhneme větší selektivity díky strmějšímu poklesu asymptoty amplitudové charakteristiky (viz Obrázek 6). Řád filtru určuje, s jakou přesností jsou modelovány přenosové charakteristiky filtru. Větší řád má za následek vyšší dopad na výpočetní obtížnost.



Obrázek 6: Graf závislosti zisku dolnoproústného filtru na normované frekvenci zobrazená pro řád filtru n od 1 do 5 s mezní frekvencí propustného pásma $\omega_c = 1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$. Je vidno, že zvýšením řádu filtru se zvýší selektivita díky strmějšímu poklesu asymptoty charakteristiky v bodě mezní frekvence dané vzorcem (3.1).

Funkce frekvenční charakteristiky Butterworthova dolnoproustného filtru řádu n je dána následujícím vztahem, kde ω_c je mezní frekvence propustného pásma.

$$H(j\omega) = \left(\frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} \right)^n \quad (3.2)$$

Mezní frekvence ω_{cn} takového filtru n -tého řádu nalezneme vyřešením následující rovnice.

$$\left| \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} \right|^n = \left| \frac{\omega_c}{\omega^2 + \omega_c^2} \right|^n = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

$$\omega = \omega_{cn} = \omega_c \sqrt{2^{1/n} - 1} \quad [rad/s] \quad (3.4)$$

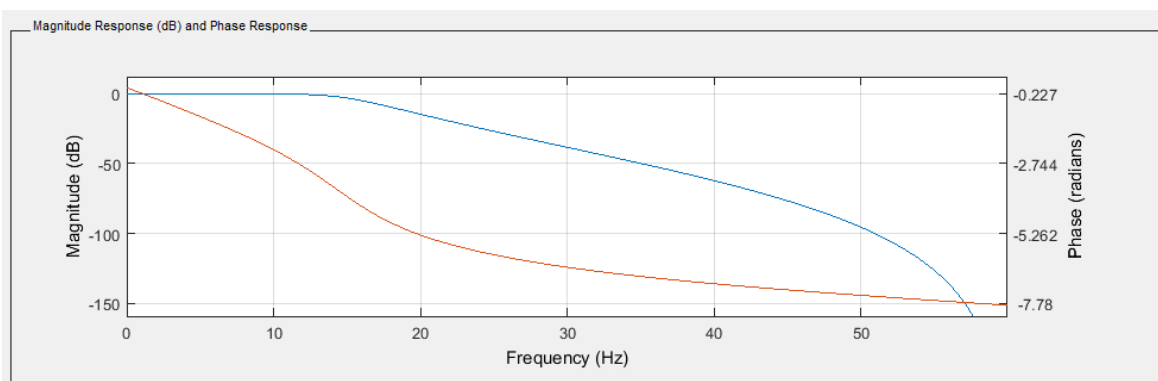
Amplituda frekvenční charakteristiky dolnoproustného Butterworthova filtru n -tého řádu je definována následujícím průběhem.

$$|H_{lp}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} = \begin{cases} 1 & \omega = 0 \\ 1/\sqrt{2} & \omega = \omega_c \\ 0 & \omega = \infty \end{cases} \quad (3.5)$$

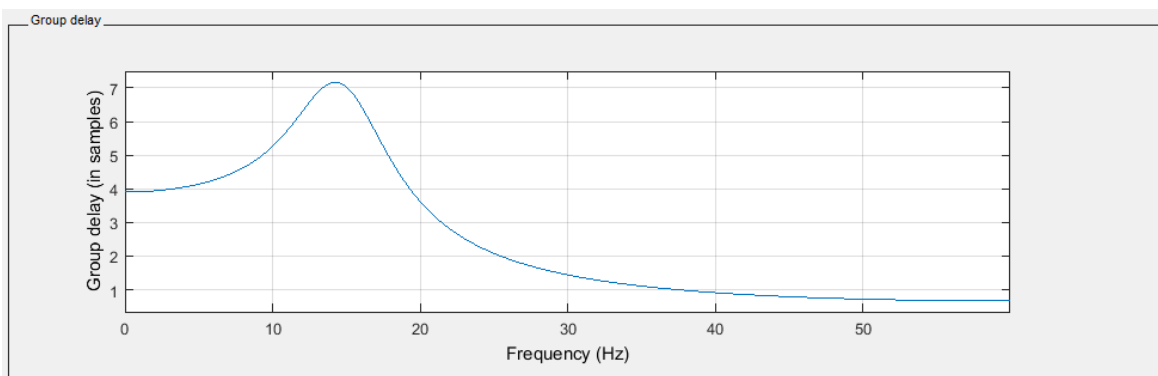
Skupinové zpoždění je definováno jakožto záporná první derivace fázové frekvenční charakteristiky podle úhlové frekvence a je měřítkem fázového zkreslení signálu způsobené fázovými rozdíly pro různé frekvence. Skupinové zpoždění je dalším kvalitativním faktorem při návrhu filtru.

Literatura [7] zkoumající kinematiku znakového jazyka zmiňuje užití Butterworthova dolnoproustného filtru pátého řádu s mezní frekvencí $f_c = 6$ Hz jako nejvhodnější filtr pro odstranění vysokofrekvenčního šumu a zároveň nezkraslení pohybu nasnímaného interpreta. Po aplikaci filtru s takovýmto nastavením ale docházelo k výraznému zkreslení užitečného signálu, které se projevovalo nadměrným vyhlazením dat. Důsledkem byl nepřírozně plynule vypadající pohyb, který nekorespondoval s pohybem snímaného interpreta. Po sériích pokusů se nejlépe osvědčil Butterworthův filtr pátého řádu s mezní frekvencí propustného pásma $f_c = 15$ Hz, který

úspěšně eliminoval vysokofrekvenční šum, ale nezakreslil průběh pohybu. Příčinou nevhodnosti nastavení filtru podle literatury může být fakt existence velké nejistoty u stanovení frekvence znakové řeči, která se může lišit u různých interpretů. Průběh amplitudové charakteristiky spolu s fázovou charakteristikou takto navrženého filtru je zobrazen na obrázku 7. Průběh skupinového zpoždění je zobrazen na obrázku 8.



Obrázek 7: Graf zachycující průběh amplitudové (modrá) a fázové (červená) frekvenční charakteristiky použitého Butterworthova filtru 5. řádu s mezní frekvencí $f_c = 15$ Hz pro odstranění vysokofrekvenčního šumu.



Obrázek 8: Graf zachycující průběh skupinového zpoždění použitého Butterworthova filtru 5. řádu s mezní frekvencí $f_c = 15$ Hz pro odstranění vysokofrekvenčního šumu.

Realizace dolnoprostupného Butterworthova filtru proběhla v prostředí programu Matlab pomocí následujícího kódu.

```
[z,p,k] = butter(n,Wn);  
[b,a] = zp2tf(z,p,k);  
y = filtfilt(b,a,x);
```

Funkce `butter(n, Wn)` vytvoří dolnoprostupný Butterworthův digitální filtr o řádu n s mezní normalizovanou frekvencí W_n . Mezní frekvencí f_c rozumíme takovou frekvenci, ve které má frekvenční charakteristika hodnotu amplitudy $1/\sqrt{2}$ (tedy pokles o 3 dB). Hodnoty normalizované frekvence se musí pohybovat v intervalu $(0; 1)$, kde 1 odpovídá Nyquistově hodnotě, tedy hodnotě rovnající se polovině vzorkovací frekvence f_s .

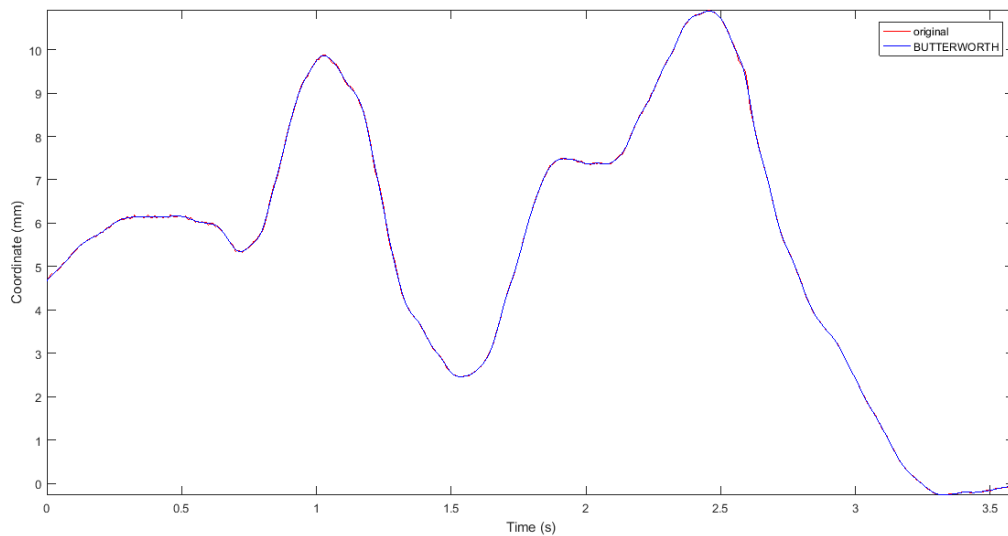
$$W_n = \frac{f_c}{f_s/2} \quad (3.6)$$

V případě této bakalářské práce byla užitá vzorkovací frekvence $f_s = 120$ Hz, jelikož snímkovací rychlost kamer OMC systému Vicon užitých k zachycení pohybu byla rovna 120 snímkům za sekundu. Argumenty funkčního výstupu $[z, p, k]$ popisují nuly, póly a zisk přenosové funkce daného vytvořeného filtru v souladu s rovnicí (3.7). Hodnoty z, p mají charakter dvou sloupcových vektorů o velikosti m a hodnota k je vrácena jakožto skalár.

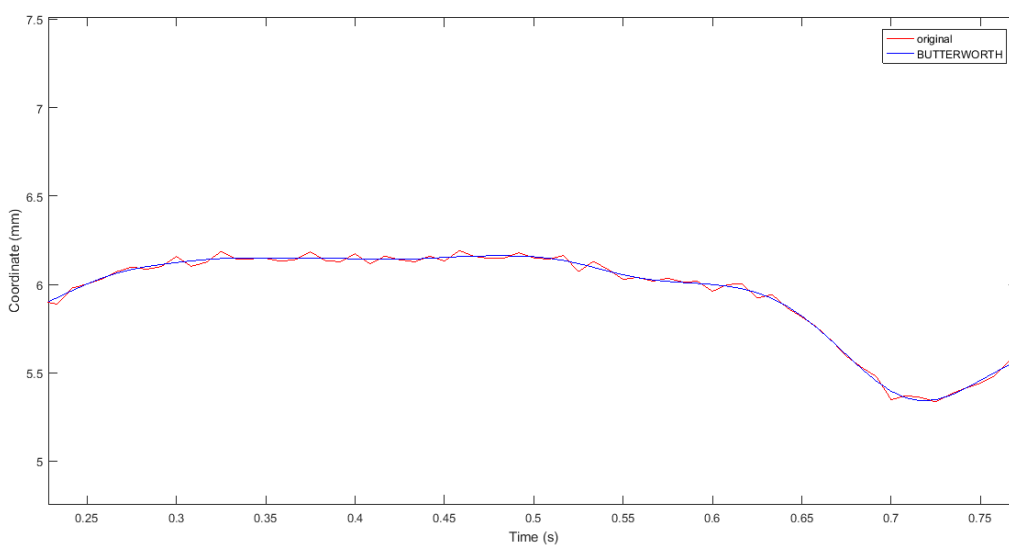
$$H(z) = k \frac{(1 - z(1)z^{-1})(1 - z(2)z^{-1}) \dots (1 - z(m)z^{-1})}{(1 - p(1)z^{-1})(1 - p(2)z^{-1}) \dots (1 - p(m)z^{-1})}. \quad (3.7)$$

Funkce `zp2tf(z, p, k)` vytváří polynomy přenosové funkce pomocí argumentů z, p a k za účelem stanovení racionální přenosové funkce.

Samotné filtrování vstupního signálu x je prováděno pomocí funkce `filtfilt(b, a, x)`, která provádí fázově nezkreslenou filtraci a minimalizuje počáteční a konečné přechodové stavy. Výsledky odstranění vysokofrekvenčního šumu pomocí Butterworthova filtru jsou zaznamenány na grafech Obrázek 9 a Obrázek 10.



Obrázek 9: Graf zobrazující porovnání originálního signálu zatíženého vysokofrekvenčním šumem (červený) a signál po filtraci tohoto šumu za použití Butterworthova dolnoproustného filtru 5. řádu s mezní frekvencí $f_c = 15$ Hz (modrý).



Obrázek 10: Přibližný pohled na část grafu (graf Obrázek 9), který dokazuje úspěšné odstranění vysokofrekvenčního šumu z nasnímaných dat v důsledku použití Butteworthova filtru.

3.1.2 Inversní Čebyševův filtr

Čebyševovy filtry jsou dvojího typu. První typ je Čebyševův filtr I, který má zvlněné propustné pásmo frekvenční charakteristiky a je tedy pro naše účely nevhodný k použití. Zatímco Čebyševův filtr typu II, někdy také označovaný jako inverzní Čebyševův filtr, se vyznačuje plochou frekvenční charakteristikou v propustném pásmu a zvlněním v pásmu nepropustném, což je vhodným předpokladem k užití v případě této bakalářské práce jakožto dolnoproputný filtr. Oproti Butterworthovu filtru má kratší přechodové pásmo, tedy strmější pokles od mezní frekvence, ale vyznačuje se větším fázovým zkreslením. Stejně jako u Butterworthova filtru větší hodnota řádu zvyšuje selektivitu filtru, tedy strmější pokles asymptoty frekvenční charakteristiky v mezním kmitočtu propustného pásma.

Závislost hodnoty zisku na frekvenci dolnoproputného filtru n -tého řádu (frekvenční charakteristika) je dána následujícím vztahem (3.8), kde ε je parametr zvlnění, T_n Čebyševovým polynomem n -tého řádu a ω_0 je mezní frekvence nepropustného pásma filtru.

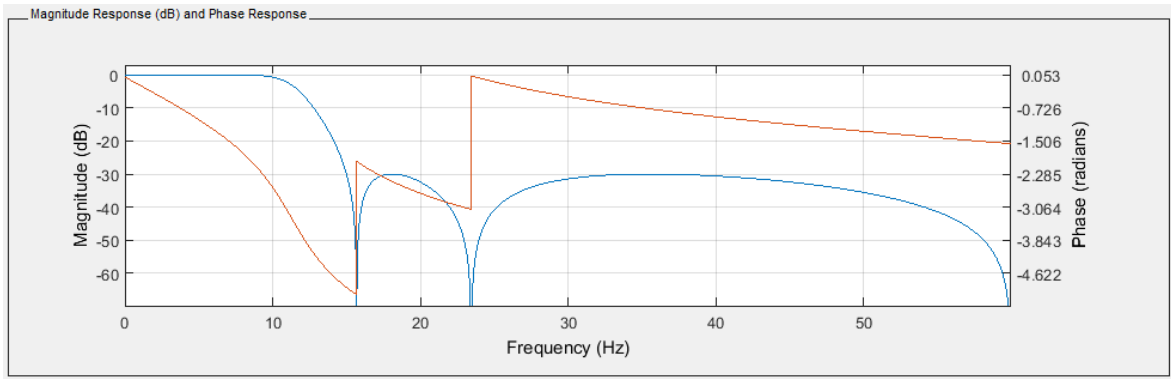
$$G_n(\omega, \omega_0) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)}}} \quad (3.8)$$

V nepropustném pásmu osciluje Čebyševův polynom mezi hodnotami -1 a 1, což má za následek oscilace zisku mezi nulou a hodnotou výslednou ze vztahu (3.9), který definuje minimální útlum v nepropustném pásmu. Nejnižší frekvence s takovýmto ziskem je mezní frekvence nepropustného pásma ω_0 .

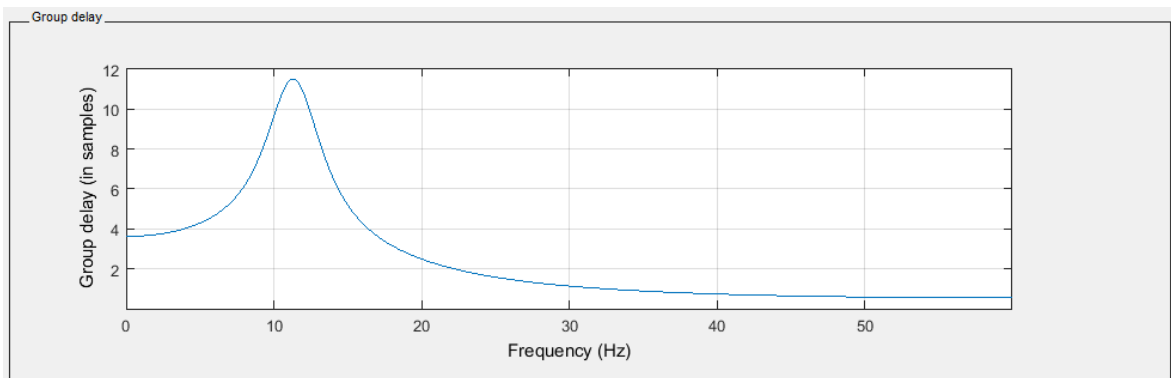
$$G_{stopmax} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}}} \quad (3.9)$$

Parametr zvlnění ε je tudíž spojen s minimálním útlumem v nepropustném pásmu γ vyjádřeným v dB vztahem (3.10).

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{0.1\gamma} - 1}} \quad (3.10)$$



Obrázek 11: Graf zachycující frekvenční (modrá) a fázovou (červená) charakteristiku inverzního dolnoproustného Čebyševova filtru 5. řádu s nastavenou mezní frekvencí nepropustného pásma 15 Hz a minimálním útlumem nepropustného pásma 30 dB. Z grafu je patrná přítomnost zvlnění v nepropustném pásmu.



Obrázek 12: Graf zachycující průběh skupinového zpoždění použitého Čebyševova filtru typu II dolní propust 5. řádu s mezní frekvencí nepropustného pásma $f_s = 15$ Hz pro odstranění vysokofrekvenčního šumu.

Čebyševův filtr typu II byl realizován v prostředí programu Matlab následujícím kódem.

```
[z, p, k] = cheby2(n, Rs, Ws, ftype);
```

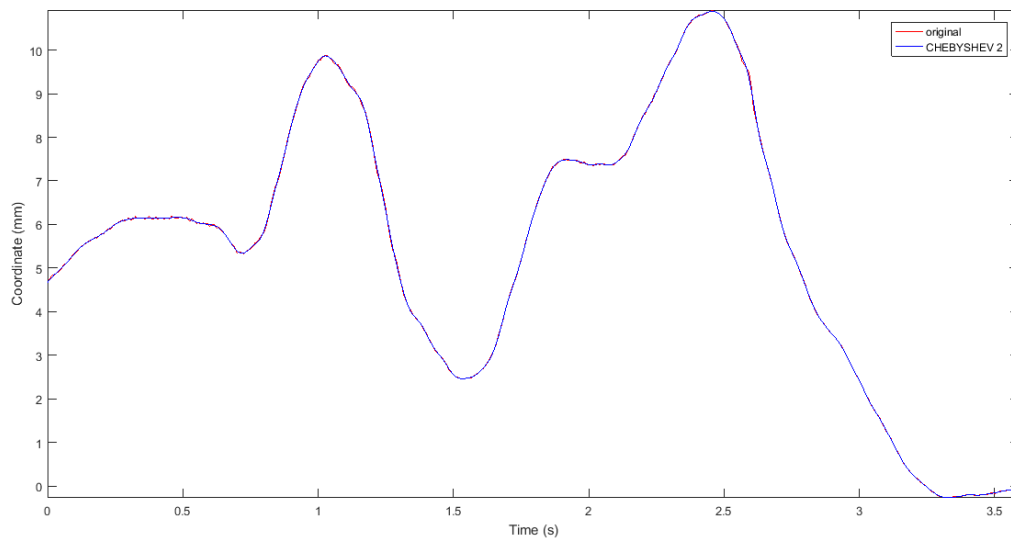
```
[b, a] = zp2tf(z, p, k);
```

```
y = filtfilt(b, a, x);
```

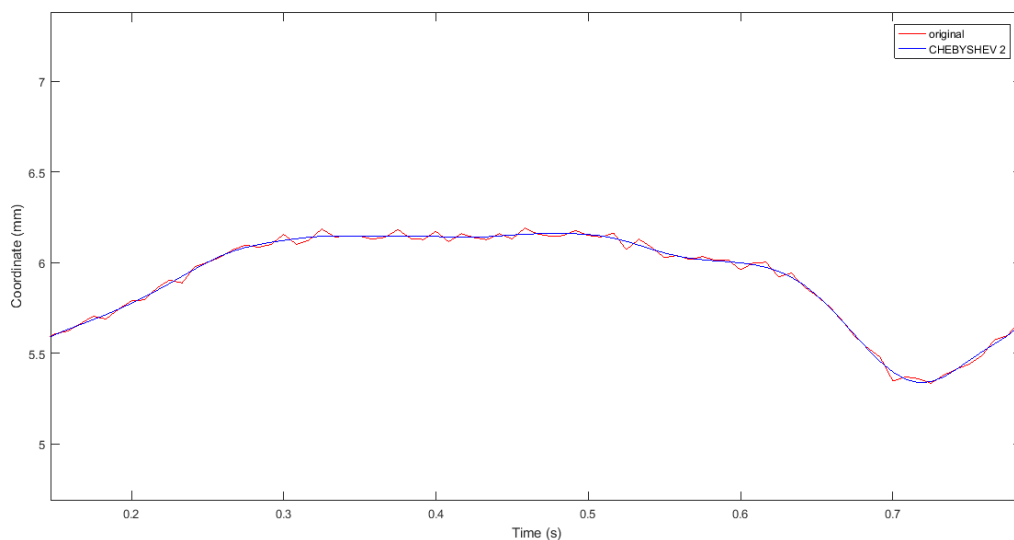
Podstata jednotlivých užitých funkcí je obdobná jako u realizace Butterworthova filtru, která je zmíněna v kapitole 3.1.1. Jediným rozdílem je užitá funkce `cheby2` a její vstupní argumenty, jež slouží k návrhu inverzního Čebyševova filtru s parametry popisující vlastnosti filtru. Vstupní argument n určuje řád filtru, tedy přesnost modelování přenosové funkce filtru a následnou větší selektivitu se zvyšující se hodnotou n . V této bakalářské práci jsme stanovili stejný řád filtru jako byl řád Butterworthova filtru, tedy $n = 5$ za účelem provedení kompromisu mezi výpočetní náročností při provádění filtrace a vyšší selektivitou. Argument R_s definuje minimální hodnotu útlumu v nepropustném pásmu v decibelech. Námi navržený dolnoprostopustný Čebyševův filtr druhého typu měl definovanou hodnotu minimálního útlumu v nepropustném pásmu $R_s = 30$ dB, což je hodnota pro dostatečné potlačení nechtěných informací. Vstupní argument W_n stanovuje normovanou mezní frekvenci nepropustného pásma, tedy první frekvenci, kde bude hodnota zisku -30 dB. To je velký rozdíl oproti návrhu Butterworthova filtru, kde se stanovuje mezní frekvence propustného pásma. Pro řešení odstranění vysokofrekvenčního šumu pomocí dolnoprostopustného filtru je v tomto případě ne příliš praktické využívat mezní frekvenci nepropustného pásma k návrhu filtru, jelikož neznáme přesný frekvenční rozptyl šumu, tedy interval frekvencí, který chceme potlačit. Ale je znám přibližný frekvenční rozsah, který chceme zachovat a tím jsou všechny frekvence až do krajně horní hodnoty kmitočtu definující dynamiku znakového jazyka (přibližně 6 Hz). Tudíž je výhodnější definovat mezní frekvenci propustného pásma, tedy frekvenci, jež je nám známa, než definovat mezní frekvenci nepropustného pásma. Existuje vztah (3.11) popisující provázanost mezní frekvence propustného pásma inverzního Čebyševova filtru s hodnotou mezní frekvence nepropustného pásma, ale při jeho aplikaci v praxi nebylo dosaženo požadovaných výsledků.

$$f_{-3dB} = \frac{f_s}{\cosh\left(\frac{1}{n} \cosh^{-1}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\right)} \quad (3.11)$$

Hodnota f_{-3dB} je mezní frekvence propustného pásma udávána v [Hz], f_s je mezní frekvence nepropustného pásma v [Hz], n stanovuje řád filtru a ε je parametr zvlnění daný vztahem (3.10). Posledním vstupním argumentem funkce je `ftype`. Tento argument stanovuje, zda se jedná o realizaci dolnoprostopustného, hornoprostopustného, pásmově zádržného nebo pásmově propustného filtru. V případě odstranění vysokofrekvenčního šumu, který se pohybuje ve vyšších frekvencích, než je tomu u pohybu znakové řeči, jsme použili typ dolní propust.



Obrázek 13: Graf zobrazující porovnání originálního signálu zatíženého vysokofrekvenčním šumem (červený) a signál po filtraci tohoto šumu za použití invdrůhersního Čebyševova dolnoproputného filtru 5. řádu s mezní frekvencí propustného pásma $f_c = 15$ Hz a frekvencí nepropustného pásma $f_s = 20,4$ Hz (modrý).



Obrázek 14: Přibližný pohled na část grafu (graf Obrázek 13), který dokazuje úspěšné odstranění vysokofrekvenčního šumu z nasnímaných dat v důsledku použití inverzního Čebyševova filtru.

3.1.3 Porovnání výsledků odstranění vysokofrekvenčního šumu za použití Butterworthova a inverzního Čebyševova filtru

Charakteristické vlastnosti a princip realizace dolnoproústného Butterworthova a inverzního Čebyševova filtru jsou popsány v kapitole 3.1.2 a 3.1.3. Cílem této kapitoly je porovnání vlastností a výstupů těchto dvou typů dolnoproústného filtru pro účely odstranění vysokofrekvenčního šumu z nasnímaných dat znakové řeči optickým systémem snímání pohybu Vicon.

Hlavním rozdílem těchto dvou typů provedení dolnoproústného filtru je v definici vstupního argumentu funkce provádějící návrh filtru. U Butterworthova filtru je mezní frekvencí myšleno taková frekvence, u níž je pokles zisku o 3 dB, tedy mezní frekvence propustného pásma. Zatímco u inverzního Čebyševova a filtru je mezní frekvence označení pro frekvenci u níž je definovaný pokles zisku o hodnotu dalšího vstupního argumentu funkce, tedy argumentu R_s , který definuje hodnotu útlumu v nepropustném pásmu. Mezní frekvence inverzního Čebyševova filtru je nejnižší frekvence, u níž je pokles zisku roven hodnotě R_s . Takovouto frekvenci nazýváme mezní frekvence nepropustného pásma. Vzhledem ke znalosti hodnot útlumu definující mezní frekvence propustného a nepropustného pásma je možné porovnat tyto dva filtry za účelem určení šířky pásma přechodu filtru (Tabulka 2).

Hodnoty mezní frekvence f_c propustného pásma jsou zadány v rozmezí 5 až 20 Hz s krokem 1 Hz. Tyto hodnoty jsou vybrány na základě znalosti dynamiky pohybu lidského těla vycházející z literatury [7], jež zmiňuje takovýto frekvenční rozsah jakožto rozsah definující dynamiku normálního pohybu lidského těla. Tato frekvence f_c je vstupním argumentem Butterworthova filtru typu dolní propust a z vlastností tohoto filtru je patrné, že tato frekvence je zároveň opravdu frekvencí definující pokles o 3 dB, tedy mezní frekvencí propustného pásma (f_{-3}). Ze vstupních argumentů inverzního Čebyševova filtru je známo, že je třeba definovat hodnotu útlumu R_s v nepropustném pásmu. Pro potřeby této bakalářské práce byla hodnota útlumu nepropustného pásma stanovena na hodnotu poklesu zisku o 30 dB. Nejnižší frekvence s takovýmto útlumem je mezní frekvence nepropustného pásma, tedy další potřebný argument pro úspěšné provedení realizace inverzního Čebyševova filtru. Z frekvenční charakteristiky Butterworthova filtru tedy byla odečtena hodnota mezní frekvence nepropustného pásma f_{-30} , která sloužila jakožto vstupní argument reprezentující mezní frekvenci dolnoproústného inverzního Čebyševova filtru. Po následné realizaci Čebyševova filtru typu II byla odečtena hodnota frekvence f_{-3} pro tento typ

filtru, tedy mezní frekvence propustného pásma. Výsledný rozdíl mezních frekvencí nepropustného a propustného pásma definuje šířku přechodového pásma. Typ obou filtrů byl dolní propust a řád filtru byl pro oba typy shodný, tedy $n = 5$.

Butterworth f_{-3} [Hz]	Butterworth f_{-30} [Hz]	Butteworth - šířka přechod. pásma [Hz]	Čebyšev 2 f_{-3} [Hz]	Čebyšev 2 f_{-30} [Hz]	Čebyšev 2 - šířka přechod. pásma [Hz]
5	9.8	4.8	7.3	9.8	2.6
6	11.7	5.7	8.7	11.7	3.0
7	13.5	6.5	10.1	13.5	3.4
8	15.4	7.4	11.5	15.4	3.9
9	17.1	8.1	12.9	17.1	4.2
10	18.8	8.8	14.3	18.8	4.5
11	20.4	9.4	15.6	20.4	4.8
12	22.0	10.0	17.0	22.0	5.0
13	23.4	10.4	18.2	23.4	5.3
14	25.0	11.0	19.6	25.0	5.4
15	26.4	11.4	20.7	26.4	5.6
16	27.8	11.8	22.0	27.8	5.7
17	29.1	12.1	23.3	29.1	5.7
18	34.0	16.0	26.3	34.0	7.7
19	31.5	12.5	26.6	31.5	4.9
20	32.7	12.7	26.8	32.7	5.8

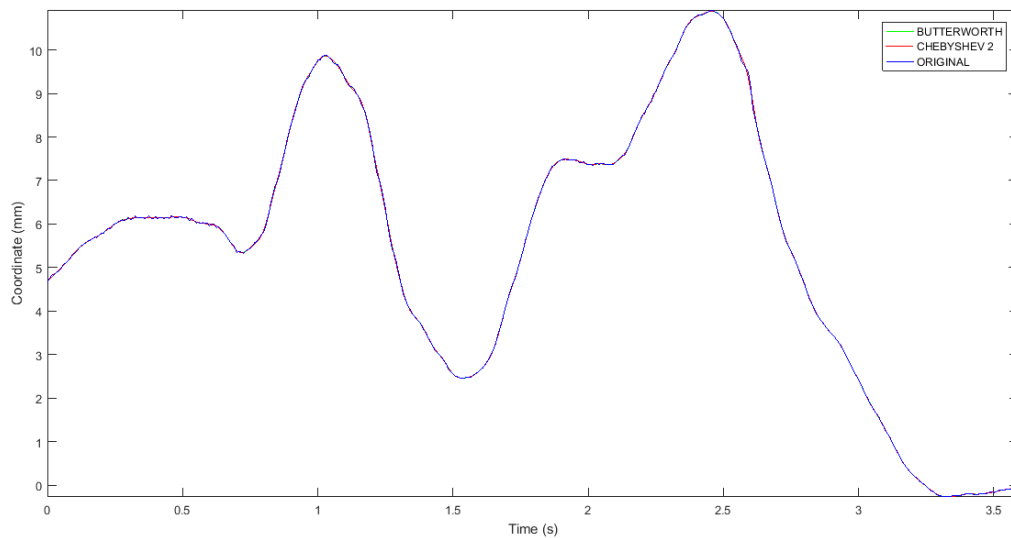
Tabulka 2: Tabulka reprezentující vliv rozdílných vlastností filtrů na šířku přechodového pásma Butteworthova (Butterworth) a inverzního Čebyševova (Čebyšev 2) filtru typu dolní propust o identickém řádu $n = 5$. Hodnoty f_{-3} definují mezní frekvenci propustného pásma a hodnoty f_{-30} definují hodnoty mezní frekvence nepropustného pásma. Jejich rozdíl je roven šířce přechodového pásma. Šířka přechodového pásma je kvalitativní ukazatelem selektivity daného typu filtru (čím menší hodnota šířky přechodového pásma, tím lepší selektivita). Je vidno, že při stejné mezní frekvenci nepropustného pásma (f_{-30}) je šířka propustného pásma u inverzního Čebyševova filtru větší, než u Butteworthova dána mezní frekvencí f_{-3} .

Dalším kvalitativním ukazatelem je vliv řádu filtru na šířku přechodového pásma. Řád filtru zvyšuje selektivitu daného typu filtru, což má za následek strmější klesání frekvenční charakteristiky od mezní frekvence propustného pásma dolnopropustného filtru a tedy přesnějšího potlačení nechtěných frekvencí. Vliv řádu filtru n na šířku přechodového pásma zobrazuje Tabulka 3. U dolnopropustného Butterworthova filtru 5. řádu byla nastavena frekvence propustného pásma 15 Hz, čemuž odpovídá přibližně mezní frekvence 20,4 Hz nepropustného pásma s útlumem 30 dB definující inverzní Čebyševův filtr stejného řádu (viz Tabulka 2). S těmito konstantními vstupními parametry jsme měnili hodnotu řádu filtru n v rozmezí hodnot od 1 do 9 s krokem 2.

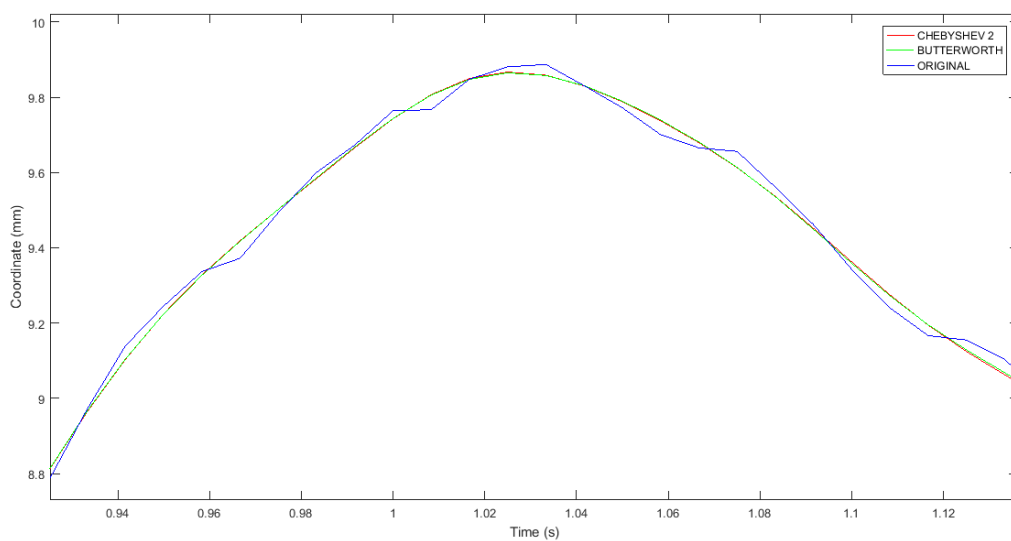
n	BUTTER. f_{-3} [HZ]	BUTTER. f_{-30} [HZ]	BUTTERWORTH Šířka přechod. Pásma [HZ]	ČEBYŠ. 2 f_{-3} [HZ]	ČEBYŠ. 2 f_{-30} [HZ]	ČEBYŠEV 2 Šířka přechod. Pásma [HZ]
1	15	57.2	42.2	0.7	20.4	19.7
3	15	44.5	29.5	5.5	20.4	14.9
5	15	26.4	11.4	15.6	20.4	4.8
7	15	22.7	7.7	17.7	20.4	2.7
9	15	20.9	5.9	18.8	20.4	1.7

Tabulka 3: Závislost šířky přechodného pásma na stanoveném řádu filtru. Tato tabulka exaktně podporuje teorii, že s řádem filtru se zvyšuje selektivita (snižování šířky přechodného pásma) filtru. Hodnoty f_{-3} definují mezní frekvenci propustného pásma a hodnoty f_{-30} definují mezní frekvenci nepropustného pásma. Rozdíl těchto dvou hodnot určuje šířku přechodového pásma.

Srovnání originálního vstupního signálu zatíženého vysokofrekvenčním šumem s výstupním signálem Butterworthova a inverzního Čebyševova dolnopropustného filtru o stejném řádu $n = 5$ s přibližně stejnou šířkou propustného pásma, kdy mezní frekvence propustného pásma je rovna 15 Hz je zobrazeno na následujících grafech (Obrázek 15, Obrázek 16). Z těchto grafů je vidno, že výstupní signály filtrů mají téměř totožnou trajektorii, což navíc podtrhává hodnota střední čtvercové chyby popisující odlišnost těchto dvou signálů, která je rovná hodnotě $3,58 \cdot 10^{-6}$.



Obrázek 15: Porovnání vstupního signálu s výstupním signálem Butterworthova filtru a inverzního Čebyševova dolnoproústného filtru stejného řádu $n = 5$ s mezní frekvencí propustného pásma přibližně 15 Hz.



Obrázek 16: Přibližný pohled na porovnání vstupního signálu s výstupním signálem Butterworthova filtru a inverzního Čebyševova dolnoproústného filtru stejného řádu $n = 5$ s mezní frekvencí propustného pásma přibližně 15 Hz.

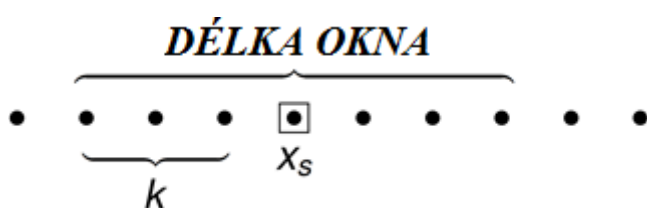
3.2 Odstranění artefaktu typu spike

Možné příčiny vzniku a následky artefaktu typu spike v datech nasbíraných pomocí optického systému pro snímání pohybu jsou rozebrány v kapitole 2.4.5. Tato kapitola je věnována řešení odstranění tohoto artefaktu při co možná nejmenším zkreslení pohybových dat. Je zde popsán typ užitého filtru s jeho následnou aplikací. Veškerá realizace filtru s následným filtrováním dat probíhala v programovém prostředí softwaru Matlab.

3.2.1 Hampel filtr

Blok digitálního filtru Hampel detekuje a odstraňuje odlehlé hodnoty (artefakt typu spike) vstupního signálu pomocí identifikátoru Hampel. Identifikátor Hampel je variací pravidla statistiky tří sigma, která je robustní vůči odlehlým hodnotám. Pro každý vzorek vstupního signálu blok vypočítává střední hodnotu okna skládajícího se z aktuálního vzorku a vzorků sousedních o počtu $\frac{Len-1}{2}$ na každé straně aktuálního vzorku. *Len* je délka okna zadaná parametrem délky okna. Blok také odhaduje směrodatnou odchylku každého vzorku vzhledem k jeho mediánovému průměru pomocí mediánové absolutní odchylky. Pokud se vzorek liší od střední hodnoty o více než je nastavená prahová hodnota vynásobená směrodatnou odchylkou, filtr nahradí vzorek střední hodnotou.[11]

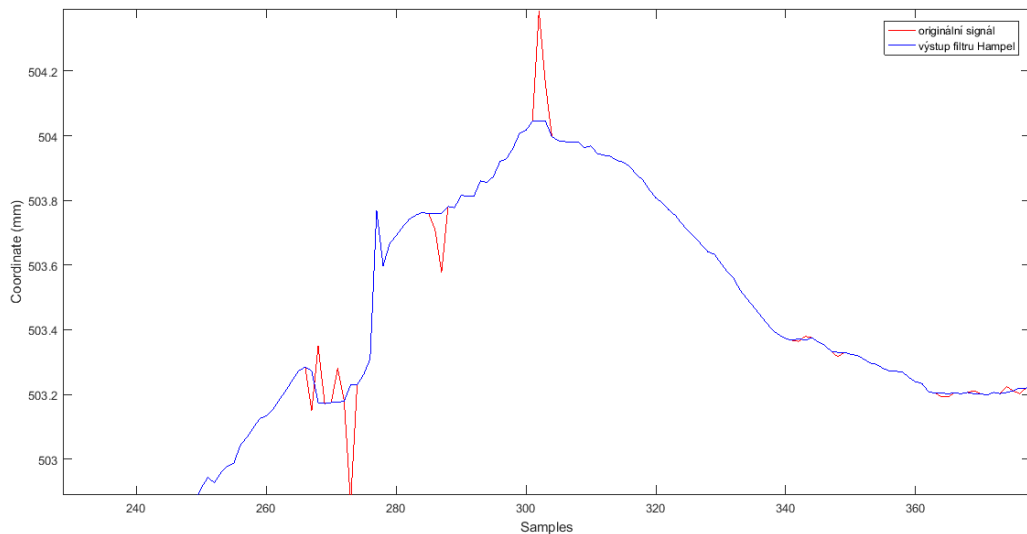
3.2.1.1 Algoritmus



Při zkoumání určitého vzorku dat podrobujících se lokalizaci a následného odstranění artefaktu spike platí pro zkoumaný vzorek X_s následující algoritmus.

- I. Okno o délce $2k + 1$ je vycentrováno na zkoumaný vzorek X_s ,

- II.* je vypočten lokální průměr m_i a standardní odchylka σ_i z *dat obsažených v okně*,
- III.* proběhne porovnání zkoumaného vzorku X_s s hodnotou směrodatné odchylky σ_i vynásobené prahovou hodnotou n_σ . Jestliže platí $|X_s - m_i| > \eta_\sigma \cdot \sigma_i$, filtr posléze identifikuje zkoumaný vzorek jakožto vzorek zatížený artefaktem spike a nahradí jeho hodnotu střední hodnotou m_i .

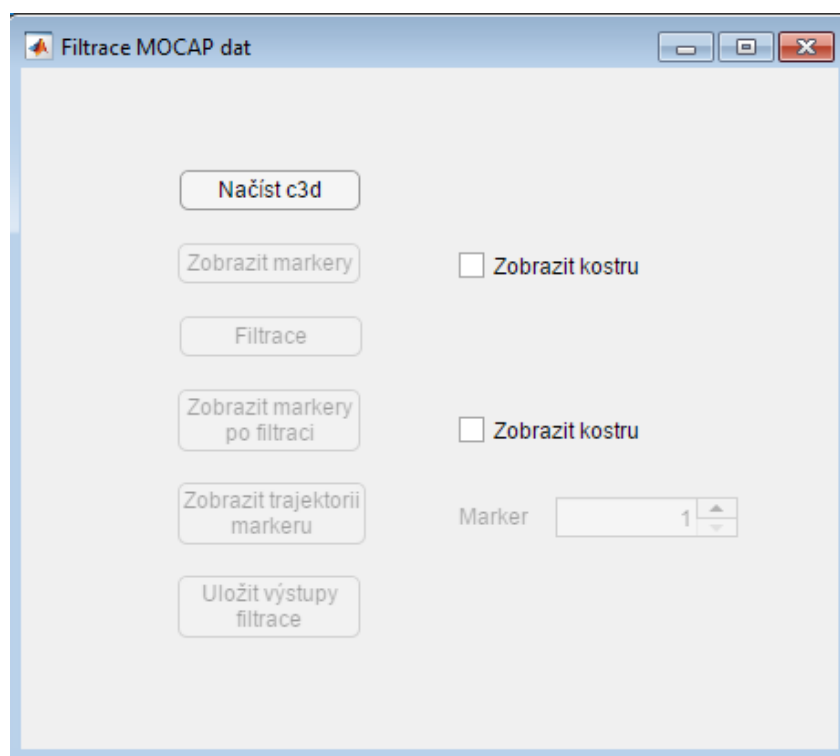


Obrázek 17: Graf zachycující relativně úspěšnou detekci a odstranění artefaktu typu spike za použití Hampel filtru s délkou okna 3 z nasnímaných dat pomocí OMC systému Vicon. Červeně označený je vstupní signál a modře je označen výstupní signál filtru.

Další metody odstranění tohoto typu artefaktu zmíněné v užití literatuře [4, 6, 7] jsou užití mediánového filtru nebo užití Butterworthova filtru. Bohužel po aplikaci těchto typů filtrů nebyly výsledky uspokojivé díky silnému zkreslení užitečného signálu v případě mediánového filtru a nedostatečného potlačení artefaktu typu spike pomocí Butterworthova filtru. Proto tyto metody nebyly použity v této práci.

4 Grafické rozhraní

Předposlední kapitola této bakalářské práce je věnována popisu grafického rozhraní. Jsou zde zmíněny výstupy jednotlivých segmentů programu provádějící dané operace a popsány funkce vytvořené k uskutečnění požadovaných kroků. Program Filtrace MOCAP dat umožňuje načíst data z c3d souboru, provést odstranění nežádoucích šumů z načtených dat pomocí filtrace, zobrazení markerů v prostoru s možností znázornění virtuálního skeletu, vygenerovat trajektorii vybraného markeru ve směru os 3D prostoru a uložit výstup filtrace, tedy vyhlazená data, do souboru pro účely dalšího užití. Celý program byl uskutečněn v prostředí Matlab, přičemž grafické rozhraní bylo navrženo v jeho nástroji App Designer.



Obrázek 18: Program Filtrace MOCAP dat s grafickým rozhráním. Jednotlivé funkce tlačítek jsou popsány v následujících podkapitolách kapitoly 4.

4.1 Načíst c3d

Tlačítko “Načíst c3d” slouží k načtení souboru formátu c3d do programu v takové formě, aby s ním mohlo být dále operováno v rámci programu Filtrace MOCAP dat. Po úspěšném načtení vybraného souboru jsou aktivována tlačítka “Zobrazit markery” a “Filtrace”.

Po stisku tlačítka je spuštěna funkce READC3DBUTTON.m, jejíž výstupní parametry popisují pozice všech 90 markerů v prostoru (Markers) spolu s délkou snímané sekvence vyjádřené v počtu snímků (numFrames) a počtu markerů (numMarkers). Samotné vytvoření těchto proměnných má za následek užití funkce readc3d, což je volně šiřitelný open-source kód od autorů Alana Morrise a Jaapa Harlaara získaný z webových stránek c3d.org. Výstupem této funkce jsou proměnné popisující atributy snímané scény, jako je například informace o kamerách nebo informace o užití snímkovací frekvenci. V této práci se užíla pouze výstupní proměnná popisující chování markerů v prostoru (Markers). Z této proměnné se odvodila délka sekvence ($\text{numFrames} = \text{size}(\text{Markers},1)$) a počet osazených markerů ($\text{numMarkers} = \text{size}(\text{Markers},2)$).

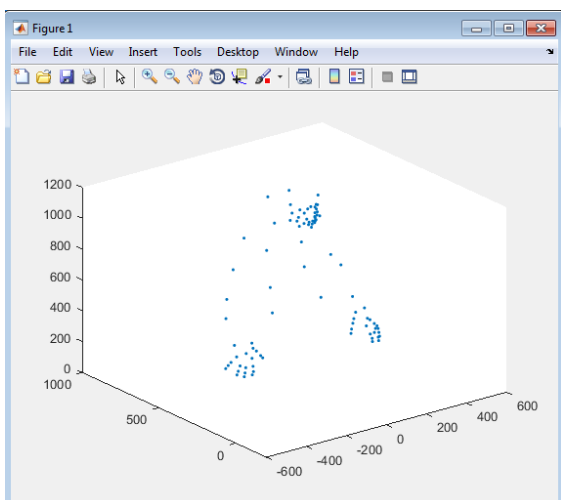
4.2 Zobrazit markery / Zobrazit markery po filtraci

Funkcí tlačítka “Zobrazit markery” programu Filtrace MOCAP dat je grafické znázornění pozice markerů v 3D prostoru (Obrázek 19) v celém trvání snímané scény. Případné zaškrtnutí políčka “Zobrazit kostru” generuje prostorovou reprezentaci markerů spojených mezi sebou v definovaném pořadí za účelem vytvoření virtuálního skeletu (Obrázek 20). Po dokončení provedení grafické prostorové reprezentace pozice markerů je vytvořen video soubor formátu avi za účelem možnosti přehrání nezpomaleného znaku, jelikož program není schopný dosáhnout požadované snímkovací frekvence, se kterou byl znak snímán, tím pádem je zobrazený znak programem zpomalen.

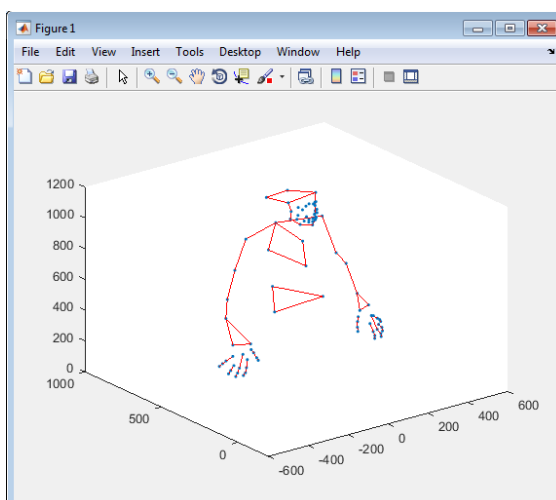
Pro realizaci prostorového znázornění všech markerů byla vytvořena funkce originalMarkers, jejímž vstupem je proměnná Markers z kapitoly 4.1. Následný for cyklus, s definovanou podmínkou trvání od prvního do posledního snímku nasnímaného znaku, generuje pozici všech markerů v prostoru pomocí příkazu plot3. Virtuální skelet je realizován pomocí funkce originalMarkersKostra, jejíž podstata je totožná s funkcí originalMarkers jen s tím rozdílem, že tato funkce spojuje jednotlivé markery v definovaném pořadí úsečkou, jejíž krajní body jsou markery, které chceme propojit. Tyto úsečky jsou vytvořeny pomocí příkazu `plot3([Ax Bx],[Ay By],[Az Bz])`,

kde bod A je definován v prostoru jeho souřadnicemi $[A_x, A_y, A_z]$ a bod B souřadnicemi $[B_x, B_y, B_z]$.

Princip provedení úkonu po stisku tlačítka “Zobrazit markery po filtraci” je obdobný jako je tomu u zobrazení neupravených markerů. Rozdíl je ve vstupní proměnné do funkce zobrazující markery v prostoru. Tato proměnná je výstupem funkce realizující filtraci dat (kapitola 4.3).



Obrázek 19: Zobrazení markerů v prostoru pomocí programu Filtrace MOCAP dat.



Obrázek 20: Zobrazení markerů v prostoru propojených do virtuálního skeletu pomocí programu Filtrace MOCAP dat.

4.3 Filtrace

Tlačítko “Filtrace” slouží k odfiltrování artefaktu typu spike a vysokofrekvenčního šumu z načtených dat c3d souboru popisující průběh snímaného pohybu. Po úspěšném dokončení filtrace jsou aktivována tlačítka “Zobrazit markery po filtraci”, “Zobrazit trajektorii markeru” a “uložit výstupy filtrace”.

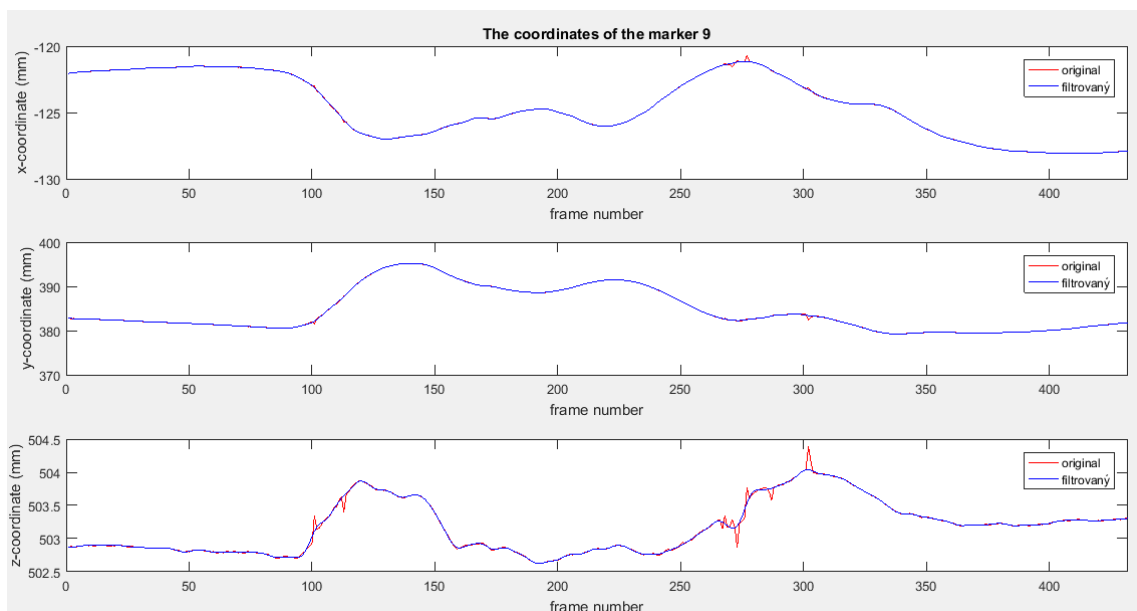
Samotná realizace odfiltrování nechtěných dat probíhá pomocí funkce Filtrace, jejíž vstupem je proměnná popisující filtrovaný signál (v našem případě Markers), proměnná popisující délku signálu (v našem případě numFrames) a funkčním výstupem je signál zbavený zmíněných artefaktů. Tato funkce se skládá ze dvou částí. V první je realizována filtrace artefaktu spike

pomocí filtru Hampel a v druhé části je provedena filtrace vysokofrekvenčního šumu pomocí dolnoproústného Butterworthova filtru.

Teorie zabývající se objasnění principu fungování Hampel filtru je uvedena v kapitole 3.2.1. Nejlepších výsledků při odstraňování artefaktu spike jsme dosáhli s parametry $k = 2$ a $\text{nsigma} = 1$, což jsou vstupní parametry filtru definující jeho vlastnosti. Tyto parametry jsou užity při provádění detekce a následného odstranění artefaktu spike. Objasnění teorie Butterworthova filtru naleznete v kapitole 3.1.1 a 3.1.3. Nejlepších výsledků jsme dosáhli pro Butterworthův filtr 5. řádu ($n = 5$) s mezní frekvencí propustného pásma 15 Hz. Vstupním signálem do tohoto dolnoproústného Butterworthova filtru je signál s již odstraněným spike artefaktem. Důvodem je fakt, že Butterworthův filtr spíše špičky artefaktu spike zaobluje a následkem tohoto zaoblení je nemožná identifikace chybných dat Hampel filtrem. Proto je tato hierarchie postupného užití filtrů nejefektivnějším způsobem úspěšného odstranění obou artefaktů.

4.4 Zobrazit trajektorii markeru

Následkem užití toho tlačítka je zobrazení původní a filtrací vyhlazené trajektorie vybraného markeru (korespondující hodnoty v Tabulce 1) ve všech třech rovinách prostoru (Obrázek 21). Důvodem je subjektivní vyhodnocení kvality filtrace z tohoto grafického znázornění.



Obrázek 21: Zobrazení původní (červená) a filtrací vyhlazené (modrá) trajektorie markeru 9.

V rovině z si můžeme povšimnout úspěšné eliminace artefaktu spike.

5 Závěr

V této bakalářské práci je provedena rešerše možných artefaktů vyskytujících se v datech nasnímaných pomocí optického systému pro snímání pohybu, jejich příčiny a jsou vysvětlena možná řešení jejich odstranění. Dále jsou popsány a porovnány vlastnosti dolnoproustného filtru Butterworthova a inverzního Čebyševova typu za účelem eliminace vysokofrekvenčního šumu z nasnímaných dat. Je popsán princip Hampel filtru, který je posléze aplikován k odstranění artefaktu typu spike. Bylo vytvořeno grafické rozhraní programu realizující filtraci z načtených dat.

Za účelem filtrace vysokofrekvenčního šumu byl vybrán Butterworthův filtr, jelikož při výsledném porovnání s inverzním Čebyševovým filtrem se výstupní signály těchto filtrů téměř vůbec nelišily. Butterworthův filtr má menší dopad na výpočetní náročnost při realizaci filtru. Jeho vstupní argument mezní frekvence definuje mezní frekvenci propustného pásma, což je pro účely této bakalářské práce vhodnější způsob, než je tomu u inverzního Čebyševova filtru, kde se stanovuje mezní frekvence nepropustného pásma. Literatury zabývající se filtrací mocap dat nejčastěji zmiňují Butterworthův filtr jakožto nejvhodnější typ filtru pro eliminaci vysokofrekvenčního šumu.

Eliminace artefakt typu spike byla realizována pomocí Hampel filtru. Tento typ filtru se jeví, v porovnání s literaturou častěji zmiňovaným mediánovým filtrem, jakožto vhodný nástroj pro tento typ filtrace. U Hampel filtru nedochází ke zkreslení užitečných dat jako je tomu u mediánového filtru. Avšak neidentifikace dat zatížených artefaktem spike neprobíhá příliš spolehlivě, jelikož některé očividné artefakty tohoto typu nejsou označeny jakožto artefakt. Avšak jeho užitím nic nezkažíme, protože u tohoto typu filtru nedochází ke zkreslení užitečných dat a v kombinaci s Butterworthovým filtrem jsou výsledky filtrace uspokojující.

Výsledky a poznatky této bakalářské práce mohou být využity nejen za účelem filtrace mocap dat optického systému znakového jazyka, ale také pro širší spektrum snímaného pohybu. V budoucnu by byla teoreticky možná takováto filtrace probíhat v reálném čase při snímání pohybu, což by jistě napomohlo k ještě lepším výstupním datům, než je tomu dnes.

Reference

- [1.] D. Winter, H. Sidwall, D. Hobson, „ Measurement and reduction of noise in kinematics of locomotion“, *Jornal of Biomechanics*, 1974
- [2.] N. Shimada, Y. Shirai, Y. Kuno, J. Miura, „ Hand gesture estimation and model refinement using monocular camera – ambiguity limitation by inequality constraints“, *In Proc. of Automatic Face and Gesture Recognition*, 1998
- [3.] D. Morris, J. Reehg, „Singularity analysis for articulated object tracking“, *In Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, 1998
- [4.] Midori Kitagawa, Brian Windsor, „MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture“, *Focal Press*, 2008.
- [5.] Michiel Hazewinkel, „Encyclopedia of Mathematics“, *Springer Science+Business Media B.V. / Kluwer Academic Publishers*, 1994
- [6.] Gutemberg B. Guerra-filho, „Optical motion capture: Theory and implementation“, *Journal of Theoretical and Applied Informatic*, 2005
- [7.] Chemuttaai C. Koech, „A kinematic analysis of sign language“, *New Jersey Institute Technology* , 2007
- [8.] Leonard Kazmier, „Schaum's Outline of Business Statistics“, *McGraw Hill Professional*, 2003
- [9.] Giovanni Bianchi and Roberto Sorrentino, „Electronic filter simulation & design“, *McGraw-Hill Professional*, 2007
- [10.] Richard W. Daniels, „Approximation Methods for Electronic Filter Design“, *New York: McGraw-Hill*, 1974
- [11.] Náповěda programu Matlab

Přílohy

Tabulka č. 1 – Seznam užitých markerů s kódovým označením a korespondujícím umístěním

Marker	Označení	Popis umístění
1	RFHD	Prává přední část hlavy
2	LFHD	Levá přední část hlavy
3	LBHD	Levá zadní část hlavy
4	RBHD	Prává zadní část hlavy
5	CLAV	Klíční kost
6	STRN	Sternum neboli hrudní kost
7	T10	10. hrudní obratel
8	C7	7. krční obratel
9	RASI	Prává kyčel
10	LASI	Levá kyčel
11	SACR	Kost křížová
12	LSHO	Levé rameno
13	RSHO	Pravé rameno
14	LELB	Levý loket
15	LUPA	Levá horní část ruky
16	RELB	Pravý loket
17	RUPA	Prává horní část ruky
18	LWRA	Levé zápěstí A
19	LWRB	Levé zápěstí B
20	LFRA	Levé předloktí
21	RWRA	Pravé zápěstí A
22	RWRB	Pravé zápěstí B
23	RFRA	Pravé předloktí
24	RTH1	Pravý palec 1
25	RTH2	Pravý palec 2
26	RTH3	Pravý palec 3
27	RTH4	Pravý palec 4
28	RIF1	Pravý ukazováček 1
29	RIF2	Pravý ukazováček 2
30	RIF3	Pravý ukazováček 3
31	RIF4	Pravý ukazováček 4
32	RMF1	Pravý prostředník 1
33	RMF2	Pravý prostředník 2
34	RMF3	Pravý prostředník 3
35	RRF1	Pravý prsteníček 1
36	RRF2	Pravý prsteníček 2

37	RRF3	Pravý prsteníček 3
38	RLF1	Pravý malíček 1
39	RLF2	Pravý malíček 2
40	RLF3	Pravý malíček 3
41	RLF4	Pravý malíček 4
42	RHAND	Pravá dlaň
43	LTH1	Levý palec 1
44	LTH2	Levý palec 2
45	LTH3	Levý palec 3
46	LTH4	Levý palec 4
47	LIF1	Levý ukazováček 1
48	LIF2	Levý ukazováček 2
49	LIF3	Levý ukazováček 3
50	LIF4	Levý ukazováček 4
51	LMF1	Levý prostředník 1
52	LMF2	Levý prostředník 2
53	LMF3	Levý prostředník 3
54	LRF1	Levý prsteníček 1
55	LRF2	Levý prsteníček 2
56	LRF3	Levý prsteníček 3
57	LLF1	Levý ukazováček 1
58	LLF2	Levý ukazováček 2
59	LLF3	Levý ukazováček 3
60	LLF4	Levý ukazováček 4
61	LHAND	Levá dlaň
62	MIDBROW	Mezi obočím
63	LBROW1	Levé obočí 1
64	LBROW2	Levé obočí 2
65	RBROW1	Pravé obočí 1
66	RBROW2	Pravé obočí 2
67	RSPANEK	Pravý spánek
68	REYE	Pravé oko
69	LEYE	Levé oko
70	LSPANEK	Levý spánek
71	RPODOKEM	Pod pravým okem
72	TOPNOSE	Špička nosu
73	LPODOKEM	Pod levým okem
74	RNOSE	Pravá část nosu
75	LNOSE	Levá část nosu
76	RLICE	Pravá líce
77	RUJAW	Pravá horní čelist
78	LLICE	Levá líce

79	LUJAW	Levá horní čelist
80	LPUSA	Levý koutek úst
81	LUPUSA	Levá část horního rtu
82	MIDPUSA	Prostřední část horního rtu
83	RUPUSA	Pravá část horního rtu
84	RPUSA	Pravý koutek úst
85	RBPUSA	Pravá část spodního rtu
86	BOTTOMPUSA	Prostřední část spodního rtu
87	LBPUSA	Levá část spodního rtu
88	LBJAW	Levá čelist
89	CHIN	Brada
90	RBJAW	Pravá čelist