

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra informačních technologií



## Diplomová práce

Využití chytrých hodinek při hře na kytaru

Bc. Marek Přitasil

© 2022 ČZU v Praze



# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Provozně ekonomická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Marek Přitasil

Systémové inženýrství a informatika  
Informatika

Název práce

**Využití chytrých hodinek při hře na kytaru**

Název anglicky

**Doplnit**

---

### Cíle práce

Hlavní cíl

Cílem práce je navrhnout postupy, jak analyzovat a využít data získaná pomocí senzorů chytrých hodinek pro kontrolu rytmu při hře na kytaru.

Dílčí cíle práce jsou:

- návrh a provedení experimentů
- sběr dat ze senzorů
- popis dat

### Metodika

Metodika řešené problematiky diplomové práce je založena na studiu a analýze odborných informačních zdrojů. Praktická část je založena na vlastním návrhu experimentů, sběru a analýze dat získaných z chytrých hodinek při hře na kytaru. Dále budou hledány optimální metody automatické analýzy dat. Na základě syntézy teoretických poznatků a výsledků praktické části budou formulovány závěry práce.

**Doporučený rozsah práce**

60 – 80 stran

**Klíčová slova**

Chytré hodinky, nositelnosti, rytmus, kytara, neuronové sítě

---

**Doporučené zdroje informací**

GÉRON Aurélien. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, Inc., 2019. ISBN 978-1-4920-3264-9

MEREDITH, David. Computational music analysis. Cham : Springer, 2016. ISBN 978-3-319-25929-1

ONEIL, Cathy and SCHUTT, Rachel. Doing data science. Beijing : O'Reilly, 2013. ISBN 978-1449358655

---

**Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – PEF

**Vedoucí práce**

Ing. Jan Masner, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra informačních technologií

Elektronicky schváleno dne 29. 7. 2020

**Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2020

**Ing. Martin Pelikán, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 29. 11. 2021

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Využití chytrých hodinek při hře na kytaru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31. 3. 2022

---



# Využití chytrých hodinek při hře na kytaru

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím chytrých hodinek při hře na kytaru. Cílem práce je navržení experimentu pro sběr dat, jejich analýza a následné využití. Práce obsahuje stručný úvod do hudební teorie a hudebního značení, který je nutný pro její pochopení. Dále se práce zaměřuje na současný způsob využití chytrých zařízení při výuce hry na kytaru. Jsou rozebrány způsoby využití chytrých mobilních telefonů, chytrých hodinek a jiných zařízení a diskutován přínos těchto využití. Dále je probrán výzkum v oblasti využití chytrých hodinek při hře na kytaru. V práci jsou též rozebírány druhy kytar, princip vzniku zvuku při hraní a je diskutován výběr vhodné kytary pro navržený experiment.

Na základě předností chytrých hodinek je navržen způsob jejich využití s důrazem na to, aby k potřebným výpočtům nebylo potřeba jiných externích zařízení. Dále je formulován experiment pro sběr dat, následně je navržena a provedena jejich analýza. V rámci analýzy jsou určeny důležité měřitelné veličiny a další parametry, které se projevují při hře na kytaru s hodinkami. Výsledkem práce je algoritmus pro kontrolu hraného kytarového rytmu (opakující se sekvence úderů plektrem) na akustickou kytaru, který při středním tempu dosahuje přesnosti přes 90 %. Funkčnost navrženého algoritmu je demonstrována v jednoduché aplikaci pro kontrolu hraného rytmu, určené pro začínající kytarové hráče.

**Klíčová slova:** chytré hodinky, nositelnosti, rytmus, kytara, neuronové sítě

# Use of smartwatch during guitar playing

## Abstract

The thesis deals with the use of smartwatches when playing the guitar. The aim is to design a data collection experiment, analyse the data, and put them into practice. An indispensable part of the thesis is a brief introduction to music theory and notation. The thesis then looks at the current use of smart devices in guitar lessons. The possibilities of using smartphones, smartwatches, and other devices are summed up and their benefits discussed. Research on smartwatch use in guitar lessons is then summarised. The thesis examines types of guitars and the principle of guitar sound generation, discussing the selection of a suitable guitar for the proposed experiment.

Taking into account the advantages of the smartwatch, a method of use without any additional computing devices is proposed. A data collection experiment is presented and the data analysed. The analysis is based on measurable quantities and other parameters that are important when playing the guitar while wearing the smartwatch. The result of the thesis is an algorithm for controlling the strumming pattern (a repetitive sequence of strokes with a pick) played on an acoustic guitar, which achieves an accuracy of over 90% at a medium tempo. The functionality of the proposed algorithm is demonstrated in a simple app for strumming pattern control designed for beginner guitar players.

**Keywords:** smartwatch, wearables, rhythm, strumming pattern, guitar, neural network



# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 Cíl práce a metodika</b>	<b>11</b>
2.1 Cíle práce . . . . .	11
2.2 Metodika . . . . .	11
<b>3 Teoretická východiska</b>	<b>12</b>
3.1 Hudební teorie . . . . .	12
3.1.1 Tón . . . . .	12
3.1.2 Akord . . . . .	12
3.1.3 Notový zápis . . . . .	13
3.1.4 Takt a doby . . . . .	14
3.1.5 Rytmus . . . . .	15
3.1.6 Tempo . . . . .	15
3.2 Kytara . . . . .	15
3.2.1 Stručná historie . . . . .	15
3.2.2 Princip hry na kytaru . . . . .	15
3.2.3 Druhy kytar . . . . .	16
3.2.4 Specifika záznamu zvuku jednotlivých druhů kytar . . . . .	18
3.3 Chytré hodinky . . . . .	20
3.3.1 Apple Watch . . . . .	21
3.4 Akcelerometr . . . . .	21
3.5 Gyroskop . . . . .	22
3.6 Výzkum využití chytrých hodinek . . . . .	24
3.7 Současné využití chytrých zařízení . . . . .	24
3.8 Návrhy využití chytrých hodinek . . . . .	27
3.9 Kontrola hraného rytmu . . . . .	29
3.9.1 Identifikace pohybu . . . . .	30
3.9.2 Detekce zahrání . . . . .	32
3.9.3 Identifikace směru pohybu . . . . .	32

3.9.4	Shrnutí . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Praktická část</b>	<b>34</b>
4.1	Experiment . . . . .	34
4.1.1	Sběr dat . . . . .	34
4.1.2	Kytarové rytmy . . . . .	35
4.1.3	Zpracování dat . . . . .	36
4.2	Identifikace pohybu . . . . .	36
4.2.1	Rytmy dvoudobého taktu . . . . .	37
4.2.2	Rytmy třídobého taktu . . . . .	41
4.2.3	Rytmy čtyřdobého taktu . . . . .	44
4.2.4	Závěry analýzy . . . . .	48
4.2.5	Analýza orientace . . . . .	50
4.2.6	Závěry analýzy orientace . . . . .	51
4.3	Detekce zahrání . . . . .	51
4.4	Identifikace směru úderu . . . . .	53
4.5	Návrh algoritmu . . . . .	54
4.5.1	Detekce zahrání . . . . .	54
4.5.2	Porovnání profilu pohybu . . . . .	55
4.5.3	Určení směru úderu . . . . .	56
4.6	Implementace algoritmu . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Výsledky a diskuze</b>	<b>63</b>
5.1	Výsledky . . . . .	63
5.1.1	Využití hodinek . . . . .	63
5.1.2	Experiment . . . . .	63
5.1.3	Algoritmus detekce úderů . . . . .	64
5.2	Diskuze . . . . .	66
5.2.1	Omezení . . . . .	66
5.2.2	Možnosti zlepšení . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>70</b>

# 1 Úvod

Hraní na hudební nástroje bylo odjakživa spjato s lidskou civilizací. Společně s rozmachem technologií se objevují stále nové příležitosti, jak se hru na hudební nástroj naučit. S nástupem internetu a sdílení videí částečně odpadla nutnost hledání a docházení za učitelem hudby, neboť díky videím a internetovým kurzům má každý výukové materiály i s praktickými ukázkami na dosah ruky. Vývoj software na domácích počítačích či mobilních telefonech dokázal v omezené míře poskytnout i tolik důležitou zpětnou vazbu, tedy informaci, zda hráč provádí navrhovaná cvičení správně. Avšak i tento důležitý aspekt výuky na hudební nástroje může být neustále zdokonalován.

Hráči na hudební nástroje, kteří se učí v domácích podmínkách sami, musejí být obzvlášť pozorní ke svým chybám. Musí se tak nejenom soustředit na správné držení nástroje, hraní správných tónů a správného rytmu, současně jsou nuceni neustále hodnotit svůj výkon. To je úloha velmi těžká, zejména pro nezkušené začátečnický. Počítače, tablety a mobilní telefony dokáží nahradit, a v mnoha případech předčit, klasické papírové výukové materiály svou jednoduchostí, variabilitou a interaktivitou. Nedokáží však zatím plně nahradit onen aspekt kontroly, kterou zastává zkušený pedagog. Nositelnosti, potažmo chytré hodinky jsou dalším článkem do mozaiky nástrojů, které je možné při výuce hraní na hudební nástroj využít. Jejich výhodou je nízká hmotnost a fakt, že je má uživatel při hraní na sobě, což dává nové příležitosti ke sběru dat, jejich využití a v neposlední řadě jsou dalším kanálem pro tak důležitou zpětnou vazbu.

Kytara dnes patří k nejoblíbenějším hudebním nástrojům. Během svého života vezme kytaru do ruky nespočet lidí, aby ji vzápětí odložili, protože jim v té nejdůležitější fázi výuky – na začátku – chyběla dostatečná zpětná vazba. S příchodem nových technologií, zejména v oblasti nositelnosti, vyvstávají nové příležitosti, jak novým i stávajícím hráčům na kytaru tento zásadní prvek poskytnout.

## 2 Cíl práce a metodika

### 2.1 Cíle práce

Hlavním cílem práce je navrhnout postupy, jak analyzovat a využít data získaná pomocí senzorů chytrých hodinek při hře na kytaru.

Prvním dílčím cílem práce bylo navrhnout experiment vhodný pro sběr dat a jeho následné provedení. Dalším dílčím cílem byl samotný sběr data, jejich popis a analýza. Na základě analýzy těchto dat a byl formulován návrh jejich využití. Návrh využití dat spočíval v návržení algoritmu, který získaná a analyzovaná data využívá k poskytování zpětné vazby při hře na kytaru. Správnost a úspěšnost navrženého algoritmu byla ověřena a ukázána na jednoduché aplikaci pro chytré hodinky, ve které byl tento algoritmus implementován.

### 2.2 Metodika

Metodika řešené problematiky diplomové práce je založena na studiu a analýze odborných informačních zdrojů. Praktická část je založena na vlastním návrhu experimentů, sběru a analýzy dat získaných z chytrých hodinek při hře na kytaru. Dále byly hledány optimální metody automatické analýzy dat. Na základě syntézy teoretických poznatků a výsledků praktické části byly formulovány závěry práce.

## 3 Teoretická východiska

V následující části budou nejprve vysvětleny pojmy z hudební teorie, které budou v práci používány. Dále bude stručně vysvětlena teorie hry na kytaru a současně diskutována specifika jednotlivých druhů kytar a jejich dopad na navrhované postupy a sběr dat. Následně budou diskutována stávající využití chytrých mobilních telefonů a chytrých hodinek při hře na kytaru v komerční sféře. Dále pak výsledky v oblasti výzkumu využití chytrých hodinek při hře na kytaru. Na základě těchto poznatků budou navrženy výzkumné příležitosti v této oblasti.

### 3.1 Hudební teorie

V následující části je uveden stručný úvod do hudební teorie a hudebních termínů, které jsou nutné pro orientaci a pochopení této práce. Jedná se zejména o pojmy s oblasti teorie tónu, rytmu a velmi základní úvod do problematiky hudebního zápisu.

#### 3.1.1 Tón

Základním stavebním kamenem hudby je tón. Tón je speciálním zvukem, který „má určitou přesnou výšku, kterou můžeme napodobit zpěvem nebo na hudebním nástroji“ [1]. Tón má čtyři základní vlastnosti: délku (hlasitost), sílu, barvu a výšku [1]. Výška je dána frekvencí. Tóny jsou dle výšek uspořádány do tónové soustavy. Námi nejčastěji používaná soustava má sedm tónů, které jsou značeny písmeny - *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *a*, *h*. Například tzv. komorní *a* má frekvenci 440 Hz. V hudbě se však pojmenování tón využívá i pro popis intervalu (rozdíl) mezi výškami jednotlivých tónů. Tóny *c* a *d* jsou vzdáleny o interval „celého tónu“. Interval od výchozího tónu k jeho prvnímu opakování se nazývá oktáva. Oktáva je v evropské hudbě rozdělena na dvanáct půltónů. Zvýšením, či snížením základních tónů o interval půltónu vznikají odvozené tóny (např. *cis* – zvýšené *c*) [1].

#### 3.1.2 Akord

Akord je souzvuk alespoň tří tónů různé výšky.

### 3.1.3 Notový zápis

Tóny se zapisují pomocí not. Délka tónu je označována tvarem noty. Využívány jsou zejména tyto tvary not:

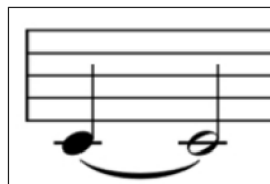
- nota celá -  $\mathbf{c}$ ,
- nota půlová -  $\mathbf{d}$ ,
- nota čtvrtěová -  $\mathbf{e}$ ,
- nota osminová -  $\mathbf{f}$ ,
- nota šestnáctinová -  $\mathbf{g}$ ,
- nota dvaatřicetinová -  $\mathbf{h}$ ,
- nota šedesátičtvrtinová -  $\mathbf{i}$ .

Jestliže následuje po sobě více not osminových nebo menších zapisují pomocí tzv. *trámce* [1].



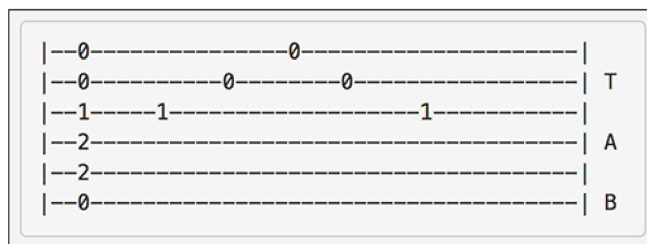
Obrázek 1: Trámec spojující dvě osminové noty [2]

Noty zapisujeme do notové osnovy sestávající se z pěti linek. Poloha noty na notové osnově značí její výšku. Má-li být délka noty prodloužena, spojují se noty stejné výšky pomocí oblouku, tzv. *ligatury* (obrázek 2).



Obrázek 2: Pomocí ligatury jsou noty spojeny do celkové délky tří čtvrtěových not [2]

Při zápisu kytarové hudby se také často využívá *tabulatury* (obrázek 3). Jedná se o alternativní notový zápis, při kterém jsou na linkách, které představují struny kytary, číslem vyznačeny pražce, na kterých má být daná struna stisknuta. Zvláštními symboly jsou pak vyznačeny jiné, než standardní hrací techniky.



Obrázek 3: Ukázka zápisu pomocí tabulatury [3]

Problematika notového zápisu je rozsáhlá. Výše byly uvedeny pouze skutečnosti, které je nutné znát k pochopení notového zápisu vyskytujícího se v tomto textu.

### 3.1.4 Takt a doby

Hudební skladby jsou členěny na krátké úseky zvané takty. Ty jsou v notové osnově značeny svislými čarami. Takty jsou pak dále členěny na doby – stejně dlouhé časové úseky [1]. Druh taktu je vždy vyznačen na začátku skladby, popřípadě na začátku úseku, kdy se druh taktů ve skladbě mění.



Obrázek 4: Zápis taktů ve skladbě [4]

Na obrázku 4 je zapsána skladba, která má první dva takty dvoučtvrté. Tyto takty tedy obsahují dvě doby. Hodnota všech not v taktu nesmí přesáhnout délku dvou čtvrtých not. Poslední dva takty jsou tříčtvrté. Tedy každý takt má tři doby o délce čtvrté noty. Obecně lze tedy říci, že takt je zapsán pomocí zlomku, kde číselník označuje počet dob a jmenovatel vyjadřuje délku těchto dob v notách.

### 3.1.5 Rytmus

Termín rytmus se v hudební teorii používá v různých kontextech. Ve skladbách lze nalézt skupiny tónů, kdy jsou některé tóny (potažmo doby), podobně jako slabiky v jazyce, přízvučné a nepřízvučné. Tyto skupiny vytváří rytmické útvary, které se ve skladbě opakují. Rytmický útvar může vyplňovat jeden takt nebo jeho délka může zasahovat i do několika taktů. Samotné střídání přízvučných a nepřízvučných dob se nazývá metrum. V hudební teorii se nejčastěji užívá termínu rytmus ve vztahu k délce tónů. Rytmus je zapsán v notovém zápise, zatímco metrum je vnímáno na pozadí skladby, jako pravidelné střídání přízvučných a nepřízvučných dob [1]. Při hře na kytaru se pojmem rytmus rozumí kombinace obou těchto termínů.

### 3.1.6 Tempo

Tempo skladby udává hodnotu délky jednotlivých not. Nejčastěji se udává v BPM (beats per minute) a vztahuje se k délce čtvrté noty. Například 60 BPM značí 60 úderů (čtvrtých not) za minutu, tedy čtvrtá nota bude mít délku jedné sekundy.

## 3.2 Kytara

### 3.2.1 Stručná historie

Kytara je strunný drnkací hudební nástroj, jehož historie sahá až do období kolem roku 2500 př. n. l. Z této doby pochází dosud nejstarší dochované vyobrazení hudebního nástroje podobného kytáře. K předchůdcům dnešní kytary jsou také řazeny nástroje jako chetitská kytara z období let 1600-1100 př. n. l., či řecká khitara. [5]

První teorie o vzniku kytary hovoří o tom, že kytara se vyvinula z jiného strunného nástroje – loutny. Dnes však již loutny nejsou řazeny do historie kytar a oba nástroje jsou považovány za dvě různé vývojové větve vycházející ze společného předchůdce [6].

### 3.2.2 Princip hry na kytaru

Tón vzniká rozechvíváním strun natažených na kytáře mezi dvěma pevnými body. Struny byly dříve vyráběny ze zvířecích střívek, zatímco dnes se používá výhradně strun nylonových



(klasická kytara) nebo kovových (tzv. country kytara). Výška tónu je dána tloušťkou jednotlivých strun a současně může být také ovlivněna změnou chvějné délky struny přitlačením struny prstem na hmatník. Jednotlivé struny jsou napnuty tak, aby při chvění vznikala základní frekvence určité hodnoty (struna je naladěna na konkrétní tón). Kombinace těchto výchozích tónů se nazývá *ladění*. Standardní ladění u kytary od nejsilnější struny k nejtenčí je: *e, a, d, g, h, e*.

Na strunné drnkací nástroje je možné hrát dvěma hlavními způsoby. Prsty, kdy se struny rozeznávají jednotlivě, a hrou plektrem (trsátkem), jímž se přejíždí po strunách. Přejetí strun plektrem se nazývá úder. Opakující se sekvence těchto úderů potom tvoří rytmus.



Obrázek 5: Držení akordu C ve standardním ladění [7]

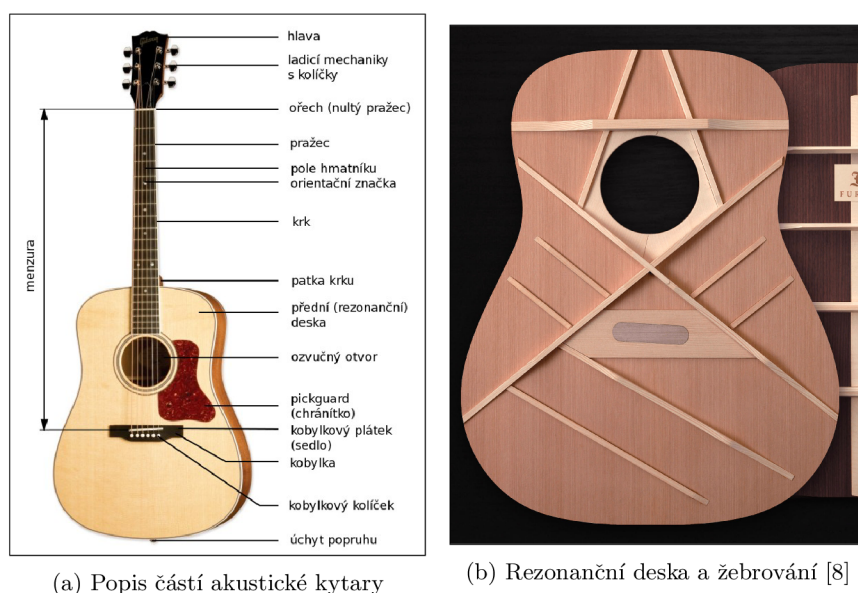
Při hraní tedy hráč pokládá prsty na hmatník, čímž ovlivňuje chvějnou délku strun. Kombinace přiložených prstů a strun tvoří akord (viz obrázek 5). Ten lze následně zahrát úderem nebo pomocí prstů zahrát jednotlivé tóny akordu.

### 3.2.3 Druhy kytar

V dnešní době existuje několik druhů kytar, které se mezi sebou liší konstrukcí, tvarem a v neposlední řadě způsobem vytváření samotného zvuku. Neboť se tato práce zabývá samotným návrhem experimentu a využití, nebyl na některé méně obvyklé druhy kytar brán

zřetel. Jedná se například o tzv. slide kytaru, či kytaru havajskou, u kterých je styl hraní a držení kytary velmi odlišný od běžných nástrojů.

Mezi tyto běžné druhy kytar se v dnešní době řadí zejména kytara akustická a kytara elektrická. U akustické kytary se vibrace strun přenášejí přes kobylku na rezonanční desku (obrázek 6a). Resonanční deska je často z vnitřní strany opatřena „žebrováním“ (obrázek 6b), stejně jako boční a zadní desky kytary. Tvar a umístění těchto vnitřních prvků se u jednotlivých kytar liší. Kvalita a způsob zpracování má velký dopad na výsledný zvuk. Tím jak vibrace procházejí tělem kytary dochází k zesílení zvuku, který pak vychází ozvučným otvorem ven.



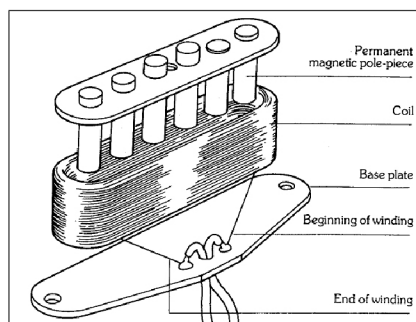
(a) Popis částí akustické kytary

(b) Resonanční deska a žebrování [8]

Obrázek 6: Akustická kytara

U elektrické kytary jsou vibrace snímány snímači, ve většině případů sestávajícími se z magnetů a cívky. Snímač je sestaven tak, aby pod každou strunou byl umístěn magnet, většinou zasunutý do plastové základny. Základna s magnety je pak obtočena drátem, jak je patrné z obrázku 7. Nejčastěji používané snímače jsou jednocívkové (single coil), dvoucívkové (humbucker) popřípadě tzv. P90, které mají jednu cívku a navíc ještě tyčový magnet. Magnety umístěné pod strunami tyto struny magnetizují, vibrující struna tedy vytváří pohyblivé magnetické pole, které ve spojení se statickou cívkou generuje malé elektrické napětí. Toto napětí je pomocí kabelů vedeno z kytary do zesilovače a dále do reprodukcí (reproduk-

tor, sluchátka, ...) [9]. Elektrické kytary ve většině případů nemají duté tělo ani ozvučný otvor. Při vypnutém snímači je tedy zvuk elektrické kytary téměř neslyšitelný.



Obrázek 7: Ukázka složení jednocívkového snímače

Elektrickým snímačem lze také osadit akustickou kytaru. Vznikne tak tzv. elektroakustická kytara. Elektroakustické kytary někdy kombinují snímání pomocí mikrofону a elektromagnetického či piezoelektrického snímače. Zvuk v tomto případě vzniká v těle kytary a současně je možné ho dále upravovat.

### 3.2.4 Specifika záznamu zvuku jednotlivých druhů kytar

Princip vzniku zvuku při hraní na kytaru se u jednotlivých druhů kytar liší, jak bylo uvedeno v kapitole výše. V případě, kdy by sběr dat a následná analýza probíhala odděleně, bylo by výhodné použití elektrické nebo elektroakustické kytary. Signál získaný pomocí snímačů lze snadno přenést do počítače, kde by mohl být podroben zevrubné analýze a bylo by tak možné zachytit veškeré nuance vzniklého zvuku. Má-li být však jedním z požadavků následná využitelnost navržených experimentů a z nich vycházejících závěrů v praxi, například v aplikaci běžících na chytrých hodinkách během hraní, je tato možnost méně výhodná. V případě elektrické kytary nedochází při vypnutém snímači k téměř žádnému vydávání zvuku. Analýza zvuku během hraní by tak byla téměř nemožná, popřípadě by musela probíhat na jiném zařízení, které by muselo být nějakým způsobem připojeno do zvukové soustavy. I při zapnutých snímačích by v případě okamžité analýzy zvuku mohly nastat potíže. Je otázkou, jak kvalitní by byla reprodukce snímaného zvuku, jakou by měla hlasitost, popřípadě v jaké vzdálenosti od chytrých hodinek by se reprodukční zařízení nacházelo. Dalšími proměnnými by pak byly použité zkreslení a různé efekty, které mohou být při hraní využívány a které

by jistě měly vliv na výsledný zvuk. V případě použití elektrické kytary by bylo potřeba dalších testů, které by určily, jaké nastavení má být pro experiment použito, jak by měla celá použitá sestava vypadat, tzn. druh zesilovače, druh reprodukcího zařízení, vzdálenost, nastavení zesilovače apod.

Akustická kytara nepotřebuje k vydávání kvalitního zvuku dalších zařízení. Při analýze zvuku by bylo potřeba navrhnout způsob, jak vydávaný zvuk snímat. K tomu by mohl stačit externí mikrofon (v případě, že by následná analýza probíhala například v počítači), zcela jistě by však mohl být zvuk snímán přímo mikrofonem hodinek. Navíc, v případě, že by měl hráč hodinky na ruce, kterou rozechvívá struny, nacházely by se hodinky přímo u ozvučného otvoru kytary, tedy nejbližší zdroji zvuku. Jistou výhodou by mohlo přinést použití elektroakustické kytary. V případě tohoto druhu kytary by šlo zvuk snímat nejen pomocí hodinek u ozvučného otvoru, ale také pomocí snímače posílat signál do dalšího zařízení k analýze.

Diskutované poznatky shrnuje tabulka 1.

Druh kytary	Výhody	Nevýhody
elektrická kytara	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchý přenos signálu ke zpracování v dalším zařízení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nutné určit další parametry experimentu</li> <li>• složitější zpracování zvuku během hraní na hodinkách</li> </ul>
akustická kytara	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduché snímání zvuku hodinkami</li> <li>• nižší variace výsledného zvuku u různých kytar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nutnost určit způsob snímání zvuku pro analýzu</li> </ul>
elektroakustická kytara	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduché snímání zvuku hodinkami</li> <li>• jednoduchý přenos signálu ke zpracování v dalším zařízení</li> </ul>	

Tabulka 1: Shrnutí výhod a nevýhod použití kytar v experimentu

Výsledný zvuk není určen pouze druhem kytary, ale také použitými materiály nebo zařízeními. U elektrické kytary to jsou snímače a další aktivní prvky soustavy (jak bylo popsáno výše).

U akustické kytary je zvuk ovlivněn zejména použitým dřevem rezonanční desky, druhem strun, popřípadě tvarem těla [10]. Použité dřevo (jeho druh a kvalita) mají největší vliv na rezonanční vlastnosti kytary a ovlivňuje tedy například jak dlouho kytara zní, popřípadě jiné vlastnosti, které jsou důležité z hudebního hlediska (hloubka basů, ...). Struny bývají nejčastěji nylonové nebo kovové. Nylonové struny mají „měkčí“ zvuk a kytara je celkově tišší. Podobně se projevuje i tvar těla kytary, kdy větší kytary hrají hlasitěji. Zatímco všechny tyto parametry jsou důležité z hlediska hudebního, z pohledu experimentu, který má být navržen by se projevil pouze tehdy, pokud by velmi záleželo na analýze zvuku. Jestliže by měly být v rámci analýzy zachyceny určité projevy zvuku (výška tónu, hlasitost, dozvuk, ...) bude třeba brát na všechny výše zmíněné parametry zřetel. Pokud by probíhala pouze analýza toho, zda je na nástroj hráno, měly by být rozdíly mezi jednotlivými druhy akustických kytar minimální, neboť princip vzniku zvuku je u všech stejný.

### 3.3 Chytré hodinky

Chytré hodinky jsou zástupcem tzv. nositelné elektroniky, tedy zejména vestavěných systémů, které může uživatel nosit přímo na sobě. Chytré hodinky se nejčastěji objevují v podobě náramkových hodinek, jejichž hlavním prvkem není ciferník (jako je tomu u klasických hodinek), ale, dnes ve většině případů dotykový, displej. Historie chytrých hodinek sahá do 70. let minulého století, kdy se na trhu objevily první digitální hodinky [11]. Z nich se postupně vyvinuly první programovatelné přístroje schopné komunikace s počítačem. Moderní historie chytrých hodinek se začala psát kolem roku 2010, kdy se na trhu nejdříve objevila zařízení, která fungovala jako externí displej mobilního telefonu. V roce 2013 pak přišly na trh první moderní chytré hodinky, na které bylo možné instalovat aplikace [12]. V dnešní době jsou chytré hodinky používány nejčastěji jako rozšíření mobilního telefonu a jsou schopny přijímat a odesílat textové zprávy, e-maily, lze přes ně vyřizovat telefonní hovory. Současně disponují širokou škálou senzorů využitelných při cvičení, sportu a jiných volnočasových aktivitách. Pojem *hodinky* a *chytré hodinky* je v práci dále zaměňován a myslí se jím právě tento druh nositelné elektroniky.

Chytré hodinky dnes vyrábí téměř všechny technologické společnosti, které mají na trhu chytrý mobilní telefon. Chytré hodinky jsou schopny měřit tep při sportovních aktivitách, tlak a jiné tělesné funkce. Současně jsou díky pohybovým senzorům schopny měřit další aspekty

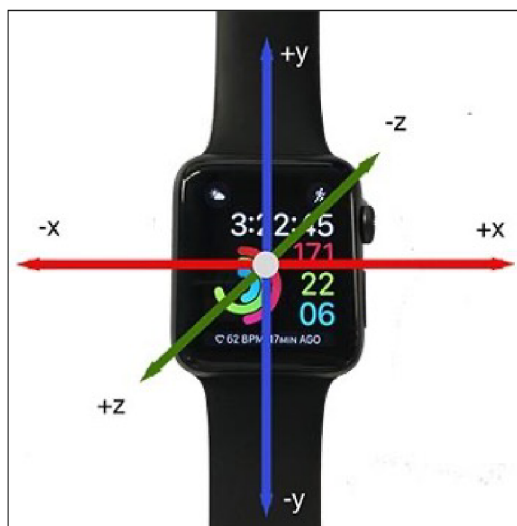
sportovních výkonů - např. kroky, běžecké tempo apod. Ve většině případů musejí být ve spojení s chytrým telefonem a slouží jako ovládací rozhraní v případech, kdy uživatel nechce, nebo nemůže interagovat přímo s mobilním telefonem. Na poli výzkumu se diskutují různé způsoby využití od sledování odpalů míčku při tenise [13], až po vyhodnocování charakteristik řeči lidí s řečovými poruchami [14].

### 3.3.1 Apple Watch

Firma Apple uvedla na trh svou první verzi chytrých hodinek v roce 2015. Hodinky pro svůj chod využívají speciální operační systém WatchOS, pro který je možné vyvíjet vlastní aplikace v jazyce Swift. Hodinky disponují mikrofonem, akcelerometrem, kompasem, gyroskopem a dalšími senzory. Frekvenci, s jakou senzory provádějí měření, nelze přesně dohledat. Společnost Apple uvádí, že je alespoň 100 Hz [15]. Tato hodnota bude muset být při měření ověřena.

## 3.4 Akcelerometr

Akcelerometr je zařízení měřící zrychlení ve směru os  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Orientace os vzhledem k hodinkám je patrná z obrázku 8.

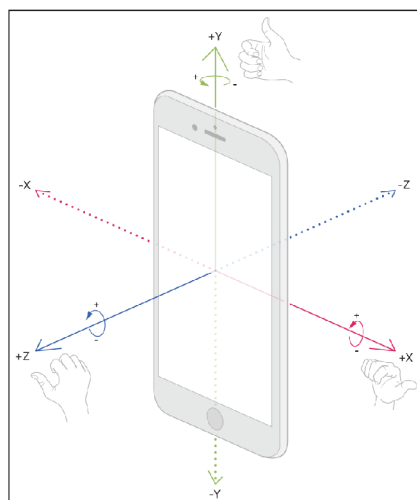


Obrázek 8: Pomyslné osy procházející hodinkami [16]

Budou-li hodinky ležet na podložce displejem směrem vzhůru a spodní hrana displeje bude natočena směrem k pozorovateli, bude pohyb hodinek vyvolávat následující změny. Pohybem vlevo či vpravo se bude měnit akcelerační vektor  $x$ . Pohybem vzhůru nebo dolů po podložce se bude měnit akcelerační vektor  $y$ . Dojde-li ke zvednutí hodinek z podložky, bude naměřena změna akceleračního vektoru  $z$ . Změna vektorů je udávána jako násobek tíhového zrychlení v daném směru. Tedy, pokud dojde k akceleraci vpravo ekvivalentní tíhovému zrychlení na Zemi, bude hodnota vektoru  $x$  rovna 1.

Pomocí akcelerometru lze také měřit orientaci hodinek, a to pomocí hodnoty gravitačního vektoru. Gravitační vektor udává sílu gravitace ve směru jednotlivých os. Pokud tedy budou hodinky položeny na podložce displejem vzhůru, bude mít gravitační vektor ve směru osy  $z$  hodnotu  $-1$ . Ostatní gravitační vektory budou nulové. Budou-li hodinky postaveny na hranu, kde se nachází ovládací korunka, bude gravitační vektor  $x$  roven 1 a ostatní gravitační vektory budou opět nulové.

### 3.5 Gyroskop

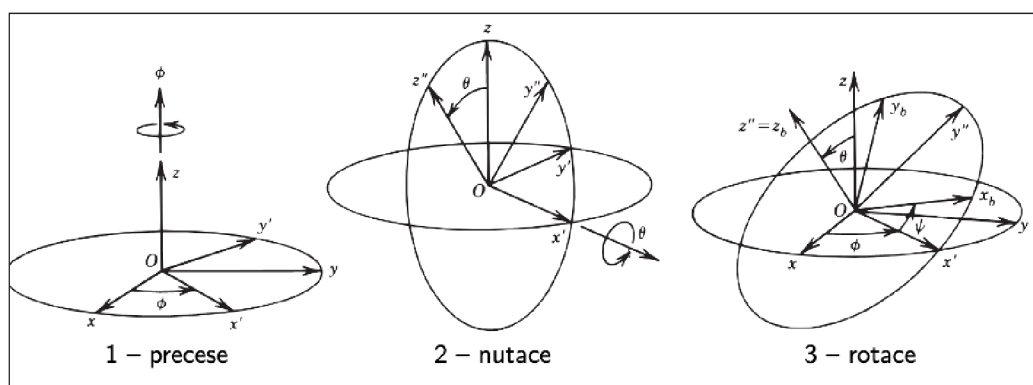


Obrázek 9: Pomyslné osy procházející zařízením [17]

Gyroskop je zařízení měřící rotaci. Ta je udávána v radiánech za sekundu. Myšlené osy procházející zařízením jsou naznačeny na obrázku telefonu 9, v případě hodinek jsou osy analogické. Jednotlivé hodnoty udávají úhlovou rychlost rotace kolem těchto os. Jestliže

budou hodinky opět položeny na podložce displejem vzhůru a dojde ke zvednutí horní hrany směrem vzhůru, bude naměřena rotace kolem osy  $x$ . Překlopením hodinek na hranu s ovládací korunkou dojde ke změně rotace kolem osy  $y$ . Otočením hodinek po směru hodinových ručiček dojde k rotaci kolem osy  $z$ .

Pomocí gyroskopu lze také určit polohu hodinek. Výchozím stavem je poloha hodinek, která odpovídá poloze, kdy jsou hodinky umístěny na podložce displeje směrem vzhůru s ovládací korunkou na pravé straně. Informaci o orientaci lze získat třemi způsoby. Pomocí rotační matice, kvaternionu nebo Eulerových úhlů [18]. První dvě zmíněné možnosti jsou přesnější, avšak pro účely této analýzy zbytečně složité. Eulerovy úhly udávají orientaci tělesa v prostoru. Slovní definice Eulerových úhlů je poměrně složitá. Nejčastěji se uvádí jejich grafické vyjádření (obrázek 10).

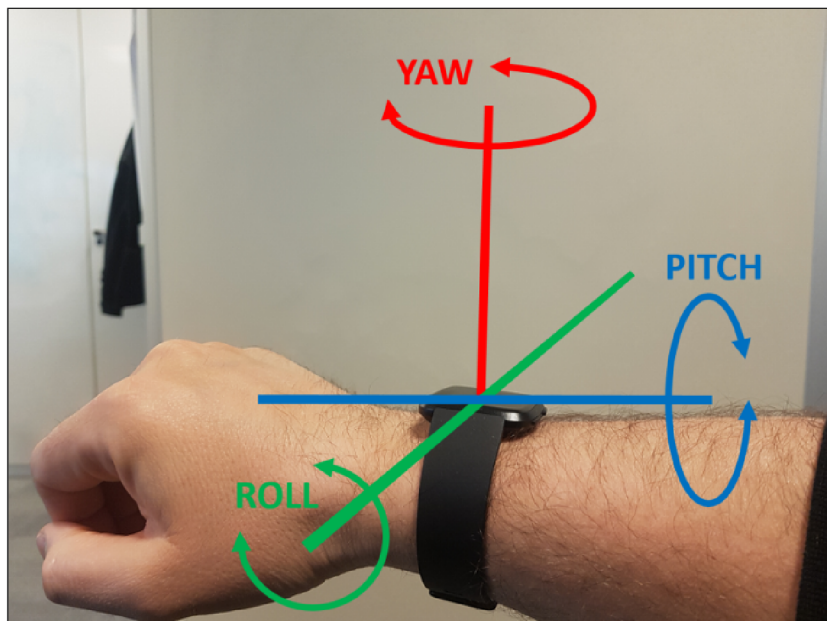


Obrázek 10: Grafické znázornění Eulerových úhlů [18]

Zjednodušeně lze definovat tři různá otočení – *yaw*, *pitch* a *roll*. Osy, kterým jednotlivá otočení odpovídají, ukazuje schéma na obrázku 11.

Orientace hodinek na obrázku 11 odpovídá výchozí poloze. Hodnoty jednotlivých úhlů budou v této poloze nulové. V případě natočení hodinek dojde k jejich změně. Jednotlivé hodnoty úhlů jsou relativní k výchozí poloze a udávané v radiánech.





Obrázek 11: Jednotlivá otočení ve vztahu k pomyslným osám hodinek [19]

### 3.6 Výzkum využití chytrých hodinek

V oblasti výzkumu využití chytrých hodinek při hře na kytaru byla nalezena jedna práce. Ta se zaměřuje na dva problémy – detekci rytmu a detekci akordů. Detekcí rytmu se v uvedené práci rozumí zjištění, zda hráč udržuje při hraní stálé tempo. Pro detekci pohybu byl využit akcelerometr hodinek a jako směrodatný byl určen akcelerační vektor  $y$ . Pomocí FFT (rychlé Fourierovy transformace) byla během hraní určena dominantní frekvence pohybu - tempo. Není zmíněno, jaký rytmus a v jakém tempu byl hrán. Při analýze a implementaci algoritmů bylo pracováno pouze s pravidelnými rytmy. Detekce akordů byla prováděna pouze na jiném zařízení (nikoliv na hodinkách) a zpětně. [20]

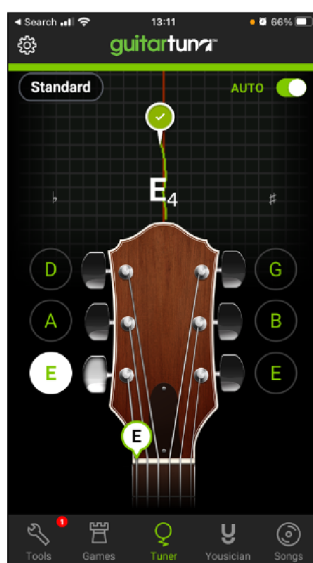
### 3.7 Současné využití chytrých zařízení

Po nástupu chytrých mobilních telefonů se začaly objevovat první aplikace pro kytarové hráče. Mezi nejčastější zástupce těchto aplikací patří aplikace pro ladění kytary. Tyto aplikace využívají mikrofonu telefonu ke snímání zvuku. Na základě zvoleného ladění po drknutí na

strunu zobrazují, zda je tato struna správně naladěna, často s indikací, zda má být utáhnuta či povolena. Tyto aplikace tak nahrazují tzv. klipové ladičky. Aplikace jsou v průběhu let zdokonalovány a umožňují krom základních ladění také upravovat cílové frekvence jednotlivých tónů a ladit i jiné strunné nástroje (obrázky 12 a 13).



Obrázek 12: Kytarová klipová ladička

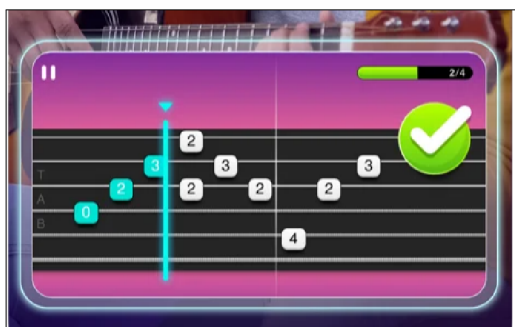


Obrázek 13: Ukázka aplikace Guitar Tuna

Dalším typem aplikací, které cílí na hráče na kytaru, jsou aplikace výukové. Jedná se o aplikace, které si kladou za cíl naučit hráče hrát zejména písně populární hudby. U těch nejjednodušších aplikací nedochází k žádnému zpracovávání vstupu, a jedná se tak pouze o digitální a mírně interaktivní zpěvníky, popřípadě tabulatury.

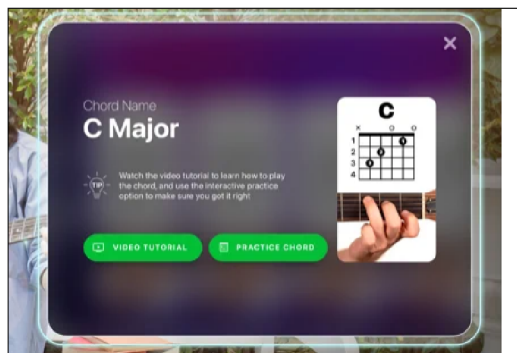
Mezi propracovanější výukové aplikace patří Simply Guitar (obrázky 14 a 15) od společnosti JoyTunes. Jedná se o aplikaci pro výuku kytarových písní pomocí tzv.gamifikace. Společnost si v roce 2010 nechala zapsat patent s názvem „System and method for analyzing a digitalized musical performance“ (Systém a metoda pro analýzu digitalizovaného hudebního přednesu). Tento patent popisuje v obecné rovině fungování aplikace. Informace ohledně použitých vstupů a způsobů jejich zpracování jsou popsány takto: „Příklady [...] parametrů zahrnují, ale nejsou omezeny na přehrávaný tón, intenzitu tónu, také označovanou jako hlasitost, dobu trvání tónu a jakékoli další charakteristiky, které by pomohly při analýze hraní. Mezi takové další charakteristiky mohou patřit například měření specifická pro nástroj, jako je objem vzduchu, který uživatel vloží do dřevěného dechového nástroje, přesnost načasování a tempa, kdy uživatel hraje na bicí nástroj, intenzita, kterou uživatel stiskne klavírní klapku nebo hraje na kytarovou strunu nebo jiné vlastnosti.“ [21]

Z výše uvedeného popisu a testování samotné aplikace bylo odvozeno, že aplikace využívá jako vstup mikrofon a je schopna rozpoznat, zda uživatel zahrál správný tón/akord ve správnou chvíli (a udržuje-li tak správné tempo). Aplikace však nemůže rozpoznat, zda uživatel vedl úder správným směrem, což se ale také projevuje na finální podobě tónu a pocitu ze skladby.



Obrázek 14: Simply Guitar - výuka písně pomocí tabulatury [22]

V době vzniku byla na chytré hodinky dostupná pouze jedna aplikace. Tou byla aplikace Wristruments (obrázek 16). Jedná se o výukovou aplikaci, která během hraní zobrazuje na displeji pomocí tabulatur akord, který má být zahrán, popřípadě doporučené tóny pro improvizované hraní. Obsahuje též mentronom implementovaný za pomoci haptické odezvy. Aplikace neprovádí žádnou analýzu vstupů.



Obrázek 15: Simply Guitar - výuka akordů [22]



Obrázek 16: Ukázka zobrazení akordů v aplikaci Wristruments [23]

### 3.8 Návrhy využití chytrých hodinek

V první řadě je důležité diskutovat možnosti využití chytrých hodinek při hře na kytaru. Důležitým kritériem pro toto využití bylo, aby se data z hodinek získaných při hře na kytaru dala využít v reálném čase při vlastním hraní nebo jiné manipulaci s kytarou.

Vzhledem k zabudovanému mikrofonu by se jistě nabízelo využít hodinky jako ladící řazení. Toto využití naráží na dva problémy. Tím prvním je přínos takového využití. Aplikací na ladění kytar existuje na mobilní zařízení nespočetné množství a přidaná hodnota v podobě toho, že má hráč ladící zařízení na ruce, není příliš velká. Druhý, zásadnější problém, je způsoben koncepcí celého zařízení. V dnešní době jsou stále všechna elektronická zařízení omezena zdrojem energie. U nositelných zařízení, a tím i chytrých hodinek, je jako zdroj

energie téměř výhradně využívána nějaká forma galvanického článku. I přes neustálý vývoj v této oblasti je tento článek v chytrých hodinkách příliš malý na to, aby vydržel dodávat elektrickou energii po delší dobu při velkém zatížení. Možnosti hodinek jsou proto maximálně omezovány, aby nedocházelo k příliš rychlému vybíjení. To se podepisuje i na možnostech zpracování zvuku. Zatímco na mobilním telefonu či tabletu je možné provádět zevrubné analýzy nahrávaného zvuku, na hodinkách je analýza často omezena jen na sledování úrovně hlasitosti nahrávaného zvuku. Při využití hodinek jako ladícího nástroje je tak nemožné se vyhnout tomu, aby byl zvuk zpracováván v jiném zařízení, kde lze provádět nutné analýzy, jako je analýza zvukového spektra a jiné [24].

Další možností využití hodinek by byla kontrola tempa. Algoritmus pro detekci tempa je známý, lze například využít FFT [25] a hlavním cílem by tedy bylo určení veličin, které by tento algoritmus zpracoval. Přínos toho využití je však diskutabilní, neboť pro kontrolu tempa většina hudebníků využívá metronom, který je znám od počátku 19. století [26]. Jestliže má využití chytrých hodinek při hře na kytaru přinést užitnou hodnotu, je třeba si uvědomit, s čím mají hráči při hře na kytaru nejčastější problémy. Při prohledávání kytarových internetových fór, blogů, internetových dotazníků, či článků v časopisech se nejčastěji objevují dva problémy související s technikou hraní (například [27]):

- hmaty a změna akordů,
- hraní rytmu a držení tempa.

Hmaty se rozumí kladení prstů na hmatník tak, aby při následném zahrání – ať už prsty nebo trsátkem – vznikl souzvuk tónů – akord. Zapamatovat si správnou polohu prstů a poté ji správně zreprodukovat na hmatníku kytary je, zejména v začátcích, velmi těžké. Proto je vhodná jakákoliv vizuální pomůcka. Chytré hodinky by se v tomto případě daly využít tak, že by na displeji hodinek bylo zobrazeno schéma akordu – znázornění hmatníku a míst, kde se má jednotlivými prsty na struny tlačit. Takovéto využití by však žádným způsobem nevyužívalo výhod chytrých hodinek a stejně dobře, ne-li lépe by pousloužilo jiné zobrazovací zařízení, například tablet, či mobilní telefon. Současně, jak již bylo uvedeno výše, se jedná oblast, kde již existují dobrá řešení. Potíže s přehmatáváním/změnou akordů lze vyřešit vhodným cvičením a ani v této oblasti by přínos chytrých hodinek nebyl velký.

Dalším často probíraným problémem při hraní je držení rytmu. Aby byl hráč schopen doprovázet píseň hraním na kytaru, je třeba, aby hrál zvolený rytmus. Rytmus musí vycházet z tempa a druhu taktu hrané skladby. Rytmus může mít jakoukoliv podobu, existuje však řada univerzálních rytmů pro jednotlivé druhy taktu, které by se začínající hráč na kytaru měl naučit. Rytmus, stejně jako všechno v hudbě, není striktně dogmatický. V průběhu skladby se může rytmus měnit, ale samotná výuka konkrétního rytmu spočívá v zapamatování si a opakování určité sekvence úderů. Chytré hodinky by šlo při výuce rytmů využít pro kontrolu hraní. Pokud by měl uživatel hodinky na ruce s trsátkem, mohlo by snímáním pohybu docházet ke kontrole hraného rytmu. Tímto způsobem by byly využity hlavní přednosti chytrých hodinek. Uživatel má hodinky na sobě, analýzu pohybu ruky by pomocí mobilního telefonu šlo dělat jen stěží. Současně je možné ihned uživateli poskytnout zpětnou vazbu pomocí haptické odezvy. Výhodou haptické odezvy je, že si jí uživatel všimne, zatímco je plně soustředěn na jinou činnost. Není těžké si představit, že vizuální odezvy si hráč na kytaru nemusí všimnout, protože se při hraní soustředí pohledem na kytaru, na kladení prstů. Díky haptické odezvě je o správnosti svého počínání informován ihned a není třeba přerušovat neustále soustředění pohledem na jiná zařízení.

Na základě výše uvedeného rozboru se jeví, že přínosem v oblasti využití chytrých hodinek při hře na kytaru by mohlo být sledování hraného rytmu, včetně kontroly směru vedení úderu. Jedná se oblast, se kterou mají zejména začínající hráči problém a současně momentálně dostupné aplikace na chytrá zařízení tuto oblast příliš neřeší.

### 3.9 Kontrola hraného rytmu

V následující kapitole bude proveden rozbor problematiky kontroly hraného rytmu. Bude definováno, co bude kontrola hraného rytmu obnášet, dále bude vysvětleno jak se samotná technika hry na kytaru projevuje při hraní zvoleného rytmu a nastíněno možné řešení zvoleného problému vzhledem k použitým zařízením a jejich možnostem, včetně výběru vhodného druhu kytary pro experiment.

Problém kontroly hraného rytmu lze rozdělit na tři hlavní dílčí problémy:

- **identifikace pohybu** - určení veličin popisujících pohyb,
- **detekce zahrání** - kontrola, zda hráč skutečně hraje,

- detekce (identifikace směru) úderu.

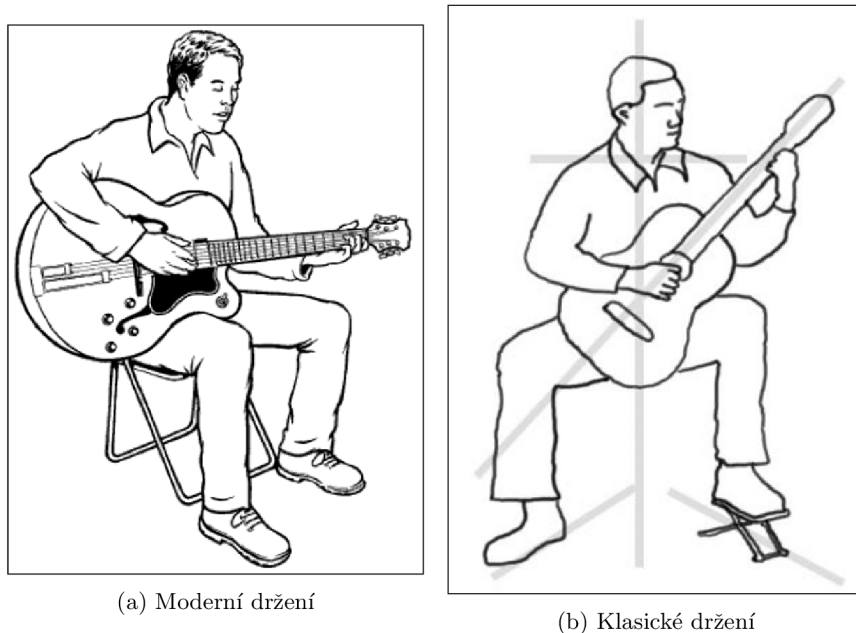
### 3.9.1 Identifikace pohybu

Prvním problémem je identifikace pohybu, který hráč při hraní rytmu provádí. Tato identifikace bude provedena na základě měření veličin z dostupných senzorů hodinek. Naměřené veličiny veličiny bude třeba matematicky analyzovat a na základě této analýzy určit ty, které pohyb ruky při hraní definují, tzn. určit veličiny, které je nutné při hraní sledovat. Na hodinkách Apple Watch jsou dostupné dva senzory pohybu – akcelerometr a gyroskop.

Data z těchto senzorů budou použita pro identifikaci pohybu. Měření bude probíhat během hraní zvolených rytmů. Získaná data poté budou analyzována. Cílem analýzy bude zjistit, v jakých směrech dochází při hraní k akceleraci a rotaci hodinek a jak jsou tyto výchylky veliké. Pro ilustraci lze využít následující příklad. Předpokládejme akceleraci hodinek ve směru osy  $y$ . Jestliže během měření nebude docházet k pohybu hodinek, jednotlivé naměřené hodnoty se budou blížit nule. Změna veličiny je v tomto případě minimální. Pokud dojde k pohybu hodinek ve směru této osy, budou se naměřené hodnoty od sebe lišit.

Při hře na kytaru plektrem hráč drží kytaru tak, aby čelní strana těla kytary mířila směrem od těla hráče. Tělo kytary má pravák položeno na pravé noze, trsátko drží v pravé ruce a prsty levé ruky přikládá na hmatník. V případě klasického držení je spodní hrana těla kytary zapřena u praváka o pravou nohu a tělo kytary je položeno na nohu levou. Hmatník kytary je pak více vzpřímen směrem vzhůru. Rozdíly jsou patrné z obrázků 17a a 17b. V obou případech však platí, že ruka s trsátkem je vytočena vnější stranou zápěstí směrem od těla. Chytré hodinky může mít hráč připnuty na vnější nebo vnitřní straně zápěstí. Během hraní bude v obou těchto případech displej hodinek natočen směrem do místnosti, nikoliv k podlaze či stropu.

Správný pohyb ruky při hře na kytaru vychází z lokte – dochází ke kmitavému pohybu ruky. Při hraní úderu směrem dolů dochází k extenzi loketního kloubu a při úderu směrem nahoru pak k flexi. Při hraní má též hráč tendenci ruku v loketním kloubu mírně otáčet. Při úderu směrem dolů dochází k supinaci a při úderu směrem vzhůru k pronaci loketního kloubu [28].



Obrázek 17: Rozdílné držení kytary

Z obrázků je patrné, že flexe a extenze loketního kloubu by se měla v datech ze senzorů hodiněk projevit jako změna úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $z$  a akceleračního vektoru  $y$ . Supinace a pronace by se měla projevit jako změna úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $x$ . Pokud je hráč zvyklý hrát spíše zápěstím, bude změna úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $z$  menší. Naopak změna úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $x$  bude větší, neboť u tohoto stylu hraní jsou flexe a extenze loketního kloubu nepatrné.

Pro hodnocení míry změny lze využít směrodatnou odchylku. Směrodatná odchylka udává míru variability souboru, tedy nakolik jsou si hodnoty uvnitř souboru podobné [29]. Čím vyšší směrodatná odchylka, tím je variabilita souboru větší. Veličiny s nejvyšší směrodatnou odchylkou budou ty, které se při pohybu ruky nejvíce mění. Budou to tedy veličiny, jejichž hodnoty je nutné při hraní sledovat. Směrodatná odchylka je definována jako odmocnina rozptylu souboru dat.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$



### 3.9.2 Detekce zahrání

Ve chvíli, kdy se hráč dotkne trsátkem strun, by mělo dojít ke zvýšení hlasitosti snímaných zvuků. Detekce těchto rozdílů by mohla být využita pro detekci zahrání. Jestliže bude na hodinkách detekován správný pohyb ruky a současně bude detekována změna hladiny snímaného zvuku, může se potenciálně jednat o úder. Z důvodu již dříve diskutovaného omezení analýzy zvuku není možné v reálném čase analyzovat snímaný zvuk podrobněji. Nelze tedy například analyzovat, zda snímaný zvuk je skutečně zvukem, který vytváří kytara. To může vést k falešným detekcím. Cílem této práce však není takovýto problém odstranit.

**3.9.2.1 Výběr druhu kytary pro experiment** S detekcí zahrání úzce souvisí výběr druhu kytary, který dále ovlivní další parametry experimentu. Pro detekci zahrání bude nutné snímat zvuk kytary. Skutečnosti, které je třeba brát v potaz při záznamu zvuku kytary, byly shrnuty v tabulce 1. Vzhledem k tomu, že jedním z cílů je, aby detekce hraného rytmu probíhala v reálném čase přímo na hodinkách, je nutné již při formulování experimentu brát v potaz složitost pořizování záznamu. Současně nemá smysl v rámci experimentu sbírat a analyzovat data, které by poté nešlo získat analyzovat přímo během hraní v již hotové implementaci zjištěných poznatků. Výše bylo uvedeno, že na hodinkách nelze provádět pokročilé analýzy zvuku. Z tohoto důvodu není nutné zaznamenávat přesný průběh zvuku kytary, pouze zjišťovat, zda kytara vydává zvuk. Při použití elektrické kytary by musely být určeno a otestováno více parametrů, zatímco u kytary akustické lze snímat zvuk jednoduše hodinkami přímo u ozvučného otvoru. Proto se použití akustické kytary jeví v první fázi výzkumu jako vhodnější.

### 3.9.3 Identifikace směru pohybu

Ve chvíli, kdy je detekováno potenciální zahrání, bude nutné také určit, jakým směrem byl úder veden. Detekce úderu by měla vycházet z předchozí analýzy pohybu.

#### **3.9.4 Shrnutí**

Výstupem praktické části bude návrh algoritmu, který bude schopen za pomoci chytrých hodinek kontrolovat hraný rytmus. Nejprve bude formulován experiment pro sběr dat ze senzorů hodinek, tato data budou poté analyzována, pomocí nastíněných metod. Na základě této analýzy dat bude navržen algoritmus, který bude schopen detekovat hráčovy údery při hraní zvoleného rytmu. Funkčnost algoritmu bude ověřena na jednoduché aplikaci. Aplikace bude zaměřena na začínající kytarové hráče a měla by jim pomáhat při výuce rytmu. Uživatel si bude moci navolit rytmus – sekvenci úderů, který se chce učit. Po zvolení rytmu zahájí samotné herní sezení. Během sezení bude algoritmus detekovat zahrané údery a hráči bude poskytnuta zpětná vazba ohledně jejich správnosti.

## 4 Praktická část

### 4.1 Experiment

Pro sběr dat a jejich analýzu byl určen následující experiment. Hráč byl sledován při hraní několika nejčastěji používaných kytarových rytmů. Cílem experimentu bylo určit veličiny, které popisují pohyb hráčovy ruky při hraní tak, aby se z nich dalo určit, kterým směrem je veden úder. Hráč si umístil hodinky na ruku, kterou rozeznívá struny - u praváka se jedná o pravou ruku. Sledována byla všechna dostupná data z gyroskopu, akcelerometru a mikrofonu hodinek. Při hraní na kytaru byl hráč snímán kamerou, aby bylo v datech možné určit úseky, ve kterých docházelo k samotnému hraní. Ostatní data pak byla z analýzy vyjmuta, neboť se nejednalo o data významná.

Na základě požadavků a omezení byla pro potřeby experimentu použita akustická kytara. Stejně dobře by však mohlo být využito i kytary elektroakustické. Oba druhy kytar splňují možnost snímat zvuk přímo, bez potřeby zapojení dalších akustických zařízení, jejich kalibrace a testování pro potřeby experimentu. Konkrétně se jednalo o akustickou kytaru Furch Vintage 2 RS-SR ve tvaru "rounded shoulder", tedy mírně upravený tvar "dreadnought", což je druhý největší běžně vyráběný tvar akustických kytar. Jedná se o kytaru celomasivní ze smrku sitka a indického palisandru. Tato kytara má hlasitější projev s delším dozvukem, což ovlivní naměřené hodnoty hlasitosti. Kytara byla osazena strunami Elixir Nanoweb Phosphor Bronze Custom Light (0,11-0,52). V experimentu byly používány chytré hodinky Apple Watch series 5 s nainstalovaným operačním systémem WatchOS ve verzi 7.3. Pro potřeby validace dat byl celý experiment snímán kamerou NiceBoy Vega X Pro s nainstalovaným firmwarem ve verzi 2020825HK. Použitá zařízení jsou přehledně shrnuta v tabulce 2.

#### 4.1.1 Sběr dat

V rámci experimentu byla sbírána data z akcelerometru, gyroskopu a mikrofonu. Protože společnost Apple neudává přesné maximální vzorkovací frekvence senzorů, bylo potřeba nejprve tuto frekvenci určit a ověřit. Jako požadovaná frekvence byla určena frekvence 120 Hz,

kteřá zajišťuje dostatek dat a současně odpovídá snímkovací frekvenci použité kamery, která byla použita pro kontrolu dat. Prakticky bylo ověřeno, že senzory hodinek jsou schopné zaznamenávat data s takovouto frekvencí. Videozáznam byl pořízen ve stejné frekvenci. Jedna vteřina záznamu pak odpovídala 120 měřením a každý jeden snímek teoreticky odpovídal jednomu měření.

Pro sběr dat byl napsána jednoduchá aplikace jazyce Swift. Aplikace byla spuštěna na hodinkách v debugovacím režimu, po stisku tlačítka na displeji hodinek došlo k aktivaci periodického čtení dat z určených senzorů. Naměřená data byla pomocí logovacího rozhraní odesílána do počítače a po skončení sezení uložena do souboru. Sezení se ukončovalo stiskem druhého tlačítka na displeji hodinek. Pro vývoj a spojení hodinek s počítačem bylo využito vývojového prostředí Xcode ve verzi 12.4. Parametry experimentu jsou shrnuty v tabulce 2.

Parametr/Zařízení	
Kytara	Furch Vintage 2 RS-SR
Struny	Elixir Nanoweb Phosphor Bronze Custom Light (0,11-0,52)
Kamera	NiceBoy Vega X Pro
Hodinky	Apple Watch series 5 (WatchOS 7.3)
Použité senzory hodinek	akcelerometr, gyroskop, mikrofon
Frekvence měření	120 Hz
Snímkovací frekvence kamery	120 fps
Tempo hry	80 BPM

Tabulka 2: Přehled zařízení a parametrů experimentu

#### 4.1.2 Kytarové rytmy

Při hraní na kytaru lze použít nesčetné množství rytmů. Ty se mezi sebou liší sekvencí úderů i jejich načasováním. Úder lze v rytmu provést vždy na začátku doby (například ve třídobém taktu budou zahrány tři údery), v tomto případě budou prodlevy mezi jednotlivými údery vždy stejné. Lze však hrát i rytmy, ve kterých se v rámci jedné doby hraje úderů několik (ve třídobém taktu je například zahráno pět úderů). Z tohoto důvodu bylo třeba vybrat takové rytmy, ve kterých se všechny tyto rozdílnosti projeví. Vzhledem k povaze určení aplikace, byly vybrány rytmy vhodné pro kytarový doprovod. Vybrané rytmy lze rozdělit dle počtu dob v taktu.

Každý z rytmů byl hrán čtyřikrát za sebou v tempu 80 BPM. Tedy v tempu, kdy se do jedné minuty vejde 80 dob. Údaje z hodinek byly ukládány s frekvencí 120 Hz. Dále byl pořízen videozáznam pomocí kamery ve snímkové frekvenci 120 Hz (viz tabulka 2).

#### 4.1.3 Zpracování dat

Naměřená data z hraní jednotlivých rytmů byla zpracovávána individuálně. Naměřené hodnoty byly přeneseny do tabulkového procesoru. Nejprve byly v datech určeny úseky, kdy byl hrán vybraný rytmus, a to pomocí videozáznamu. Nejprve byl ve videozáznamu nalezen okamžik, kdy došlo k zapnutí záznamu dat ze senzorů hodinek (stisk tlačítka na displeji hodinek). Snímek ve videozáznamu, který tento moment představoval, byl určen jako počáteční snímek 0. Dále byl nalezen okamžik, kdy začal hráč hrát první úder (počátek první doby v rytmu). Počet snímků mezi těmito dvěma okamžiky představoval počet měření, které bylo nutné odstranit z pořízených dat ze senzorů. Tímto způsobem byla odstraněna naměřená počáteční data, která nesouvisela s hraním daného rytmu. Podobně byla odstraněna data i z konce měření. Zde byl jako referenční snímek použit ten, který zachycoval okamžik relaxace (dokončení pohybu) hráčovy ruky při zahrání posledního úderu. Dále je dle videozáznamu určen okamžik, kdy se hráč trsátkem při úderu dotkl strun - tedy začátek každého úderu.

Výše popsaným způsobem nelze synchronizovat data senzorů a videozáznam přesně, avšak frekvence je natolik dostatečná, aby nedošlo k odstranění důležitých dat. Očištěná data tedy obsahovala záznamy ze senzorů, které vznikly hraním rytmu od první doby v prvním taktu po konec poslední doby ve čtvrtém taktu.

## 4.2 Identifikace pohybu

Po očištění dat ze hraní všech rytmů byly identifikovány ty veličiny, které měly vysokou míru variability ve všech těchto rytmech. Tyto veličiny jsou ty, které definují pohyb hodinek při hraní na kytaru.

Při analýze rytmů byly sledovány změny akceleračních vektorů a změny úhlové rychlosti kolem os otáčení. Pro přehlednost bylo zavedeno následující značení:

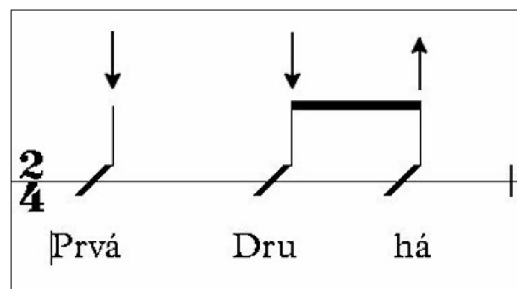
- akcelerační vektor  $x - \vec{a}_x$ ,
- akcelerační vektor  $y - \vec{a}_y$ ,
- akcelerační vektor  $z - \vec{a}_z$ ,
- úhlová rychlost otáčení kolem osy  $x - \omega_x$ ,
- úhlová rychlost otáčení kolem osy  $y - \omega_y$ ,
- úhlová rychlost otáčení kolem osy  $z - \omega_z$ .

Vybrané rytmy byly rozděleny dle počtu dob v taktu.

#### 4.2.1 Rytmy dvoudobého taktu

##### 4.2.1.1 Rytmus 1

Prvním rytmem byl rytmus dvoudobého taktu se třemi údery. Hráč během hraní rytmu provedl čtyři pohyby rukou v jednom taktu.



Obrázek 18: Rytmus 1 [30]

Výsledky analýzy dat pomocí směrodatné odchylky shrnuje tabulka 3. Vektory, u nichž se předpokládají největší změny, jsou v tabulce zvýrazněny barvou.

$\vec{a}_x$	$\vec{a}_y$	$\vec{a}_z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
0,05025	0,19144	0,08865	0,74867	0,24864	1,22837

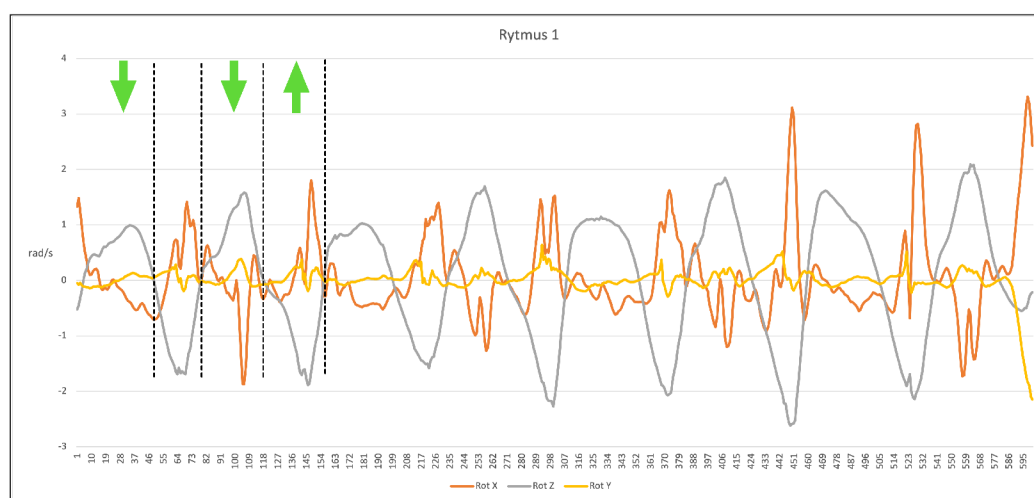
Tabulka 3: Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 1

Nejmenší změna byla zaznamenána u akcelerační vektorů  $\vec{a}_x$  a  $\vec{a}_z$ . Největší změna byla zaznamenána u úhlové rychlosti  $\omega_z$ , což potvrdilo předpoklad vycházející z teorie hry na kytaru.

Naopak se proti předpokladu u prvního rytmu neprojevila příliš změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$ .

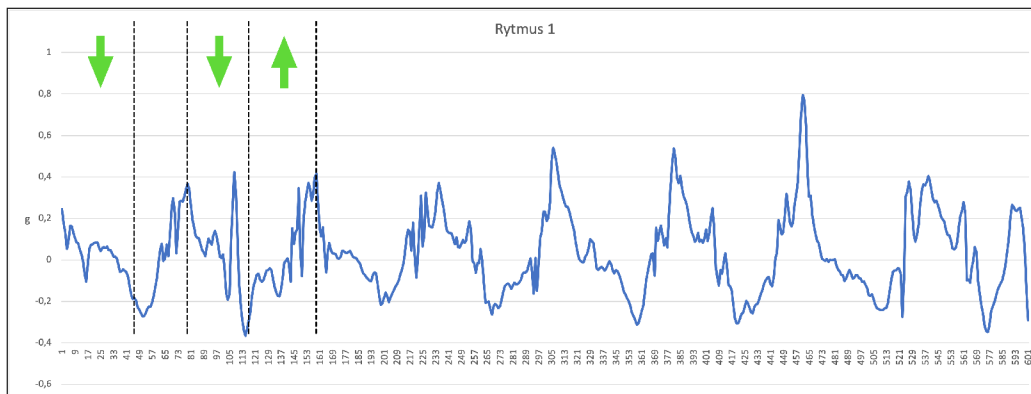
Naměřené hodnoty čtyř nejvíce variabilních vektorů byly zaneseny do grafů, kde „Akcel“ značí akcelerační vektor v dané ose a „Rot“ úhlové rychlosti otáčení kolem dané osy. Svislými přerušovanými čarami jsou v grafu naznačeny úseky pohybů ruky v prvním taktu. Každá druhá svislá čára pak tedy odděluje doby. Zelenými šipkami jsou vyznačeny úderu rytmu, směr šipky odpovídá směru daného úderu.

Graf 1 zobrazuje hodnoty úhlových rychlostí. Je patrné, že úderu nejlépe vystihují hodnoty úhlové rychlosti  $\omega_z$  (šedá barva). Dále je v grafu patrný trend úhlové rychlosti  $\omega_x$  (oranžová barva). Sledováním změn těchto dvou křivek lze z grafu jednoduše vyčíst jednotlivé pohyby. Při poloze hodinek na vnější straně pravého zápěstí nabývala úhlová rychlost  $\omega_z$  při úderu směrem dolů kladných hodnot, při úderu směrem vzhůru pak hodnot záporných. U úhlové rychlosti  $\omega_x$  byl tento trend opačný. Změna úhlové rychlosti  $\omega_y$  byla zřetelně menší a u úderů nebyl pozorován žádný výrazný opakující se trend.



Graf 1: Změna úhlových rychlostí v rytmu 1

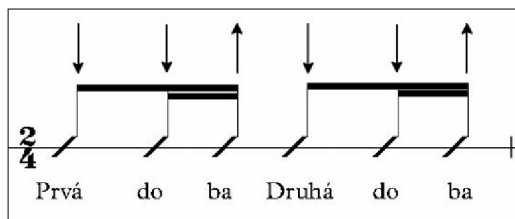
V grafu 2 akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  je vidět, že během hraní docházelo k velkým výkyvům hodnot i v rámci jednotlivých úderů.



Graf 2: Změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  v rytmu 1

#### 4.2.1.2 Rytmus 2

Druhým rytmem byl rytmus dvoudobého taktu se šesti úderů. Hráč během tohoto rytmu provedl osm pohybů rukou v jednom taktu.



Obrázek 19: Rytmus 2 [30]

Analýzou pomocí směrodatné odchylky bylo zjištěno, že při hraní tohoto rytmu byly opět nejvýraznější změny úhlových rychlostí  $\omega_x$  a  $\omega_z$ . Výsledky shrnuje tabulka 4.

$\vec{a}_x$	$\vec{a}_y$	$\vec{a}_z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
0,21236	0,3778	0,2801	2,4825	0,6148	1,5743

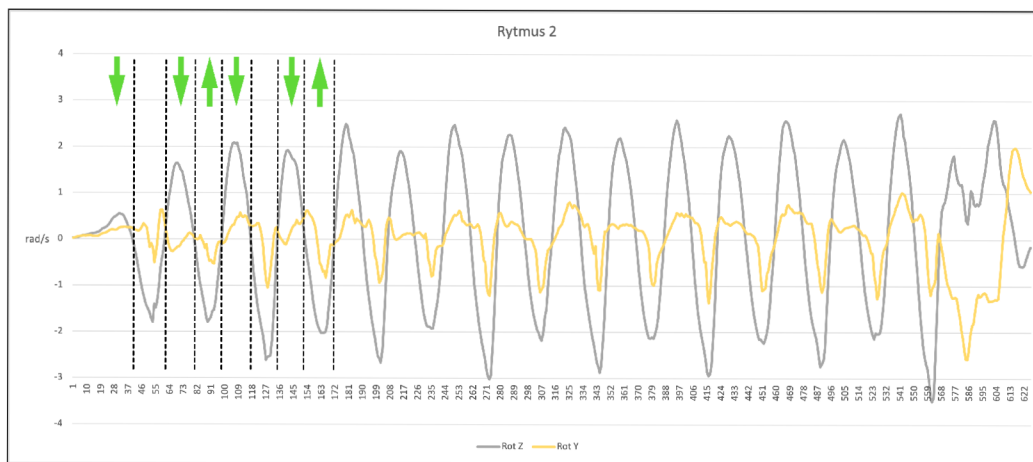
Tabulka 4: Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 2

V grafu 3 jsou zobrazeny naměřené hodnoty úhlových rychlostí  $\omega_z$  a  $\omega_y$ . Z hodnot úhlové rychlosti  $\omega_z$  jsou opět patrné jednotlivé pohyby. Svislé čáry naznačují úseky jednotlivých pohybů, zelené šipky pak naznačují časové úseky jednotlivých úderů v prvním taktu. Trend úhlové rychlosti  $\omega_y$  je více patrný než u předchozího rytmu.

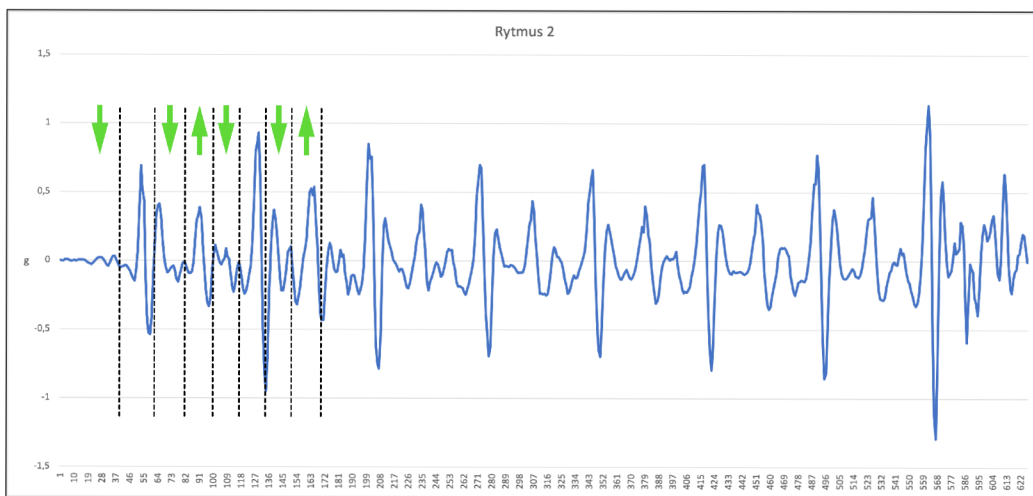
V grafu 4 jsou zobrazeny hodnoty akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$ . I v tomto grafu je trend to-



hoto vektoru více patrný, avšak v rámci jednoho úderu opět docházelo ke kolísání hodnot. Pohyb ruky ve směru této osy nebyl plynulý. Rozdíly jsou i mezi úderými vedenými stejným směrem. Například již v prvním taktu měl každý ze čtyř úderů směrem dolů velmi rozdílný průběh.



Graf 3: Změna úhlových rychlostí v rytmu 2

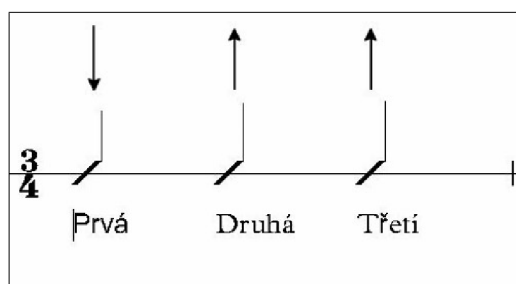


Graf 4: Změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  v rytmu 2

## 4.2.2 Rytmy třídobého taktu

### 4.2.2.1 Rytmus 3

Dalším rytmem byl rytmus třídobého taktu se třemi údery. Hráč během hraní jednoho taktu provedl čtyři pohyby rukou.



Obrázek 20: Rytmus 3 [30]

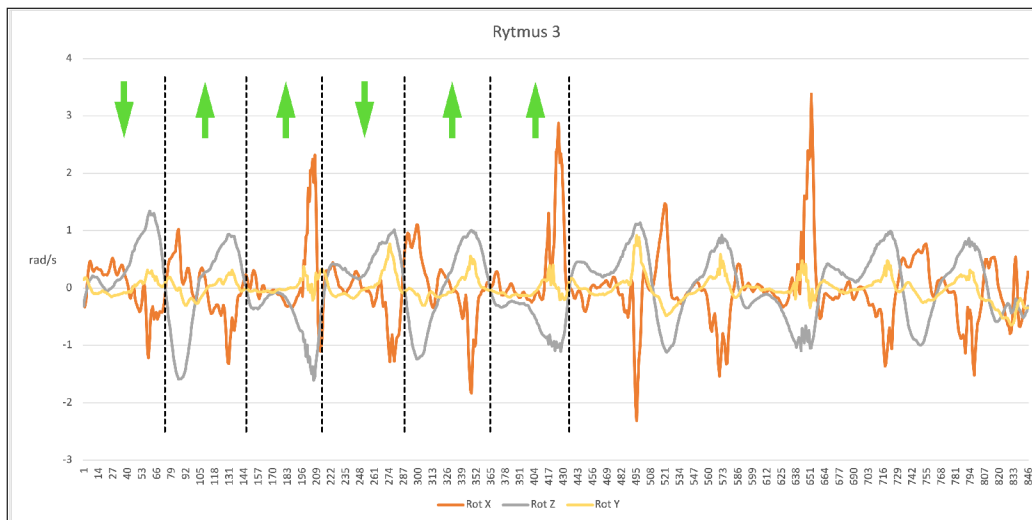
Výsledky analýzy směrodatné odchylky jednotlivých sledovaných vektorů ukázaly, že mezi nejvíce se měnící vektory patřily opět úhlové rychlosti  $\omega_x$  a  $\omega_z$ . Z akceleračních vektorů vykazoval nejvyšší změnu vektor  $\vec{a}_y$ , viz tabulka 5.

$\vec{a}_x$	$\vec{a}_y$	$\vec{a}_z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
0,03245	0,11589	0,06944	0,59841	0,19858	0,62455

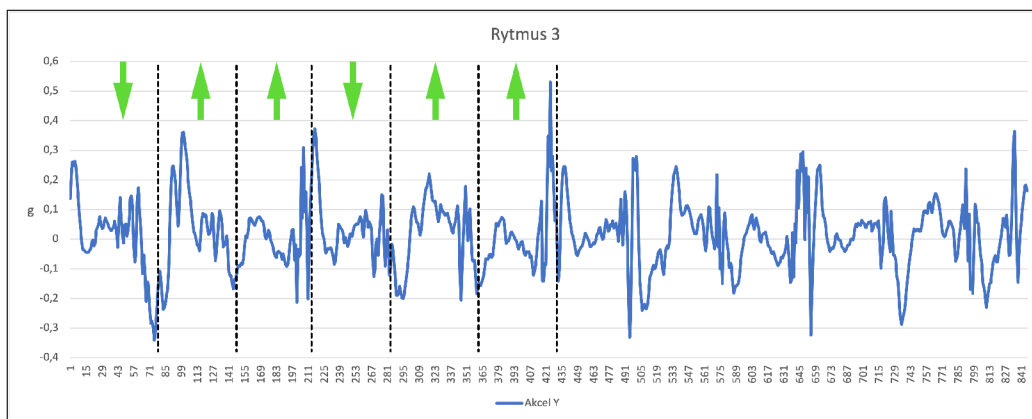
Tabulka 5: Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 3

Graf 5 zobrazuje hodnoty úhlových rychlostí. Svislými čarami jsou, na rozdíl od předchozích příkladů, odděleny jednotlivé doby prvních dvou taktů. Zelené šipky naznačují, který úder měl být během této doby zahrán. Hodnoty úhlové rychlosti  $\omega_z$  vystihují pohyb ruky. V grafu lze také pozorovat, že první doby taktů byly zahrány se zpožděním. V průběhu druhých dob taktu je na průběhu úhlové rychlosti  $\omega_z$  vidět nejprve zahrání úderu směrem vzhůru (vektor nabýval negativních hodnot) a poté návrat ruky do spodní polohy. Úhlová rychlost  $\omega_x$  vykazovala větší výkyvy než v předchozích rytmech i v průběhu úderu, trend je ale stále patrný.

Průběh akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  (graf 6) se lišil od předchozích rytmů. V rámci jednoho úderu docházelo k velkým výkyvům v naměřených hodnotách. Průběh se liší mezi údery vedenými ve stejném směru, zejména u úderu vedených směrem vzhůru.



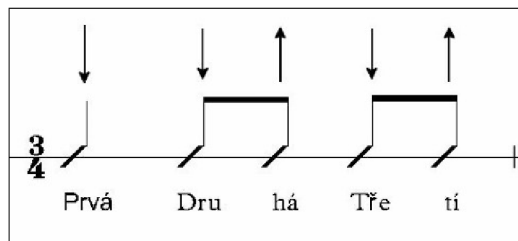
Graf 5: Změna úhlových rychlostí v rytmu 3



Graf 6: Změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  v rytmu 3

#### 4.2.2.2 Rytmus 4

Čtvrtým hraným rytmem byl rytmus třídobého taktu s pěti údery. Během hraní jednoho taktu provedl hráč šest pohybů rukou.



Obrázek 21: Rytmus 4 [30]

Analýza dat pomocí směrodatné odchylky ukázala největší změny ve stejných vektorech jako v předchozích případech. Výsledky jsou zaneseny v tabulce 6.

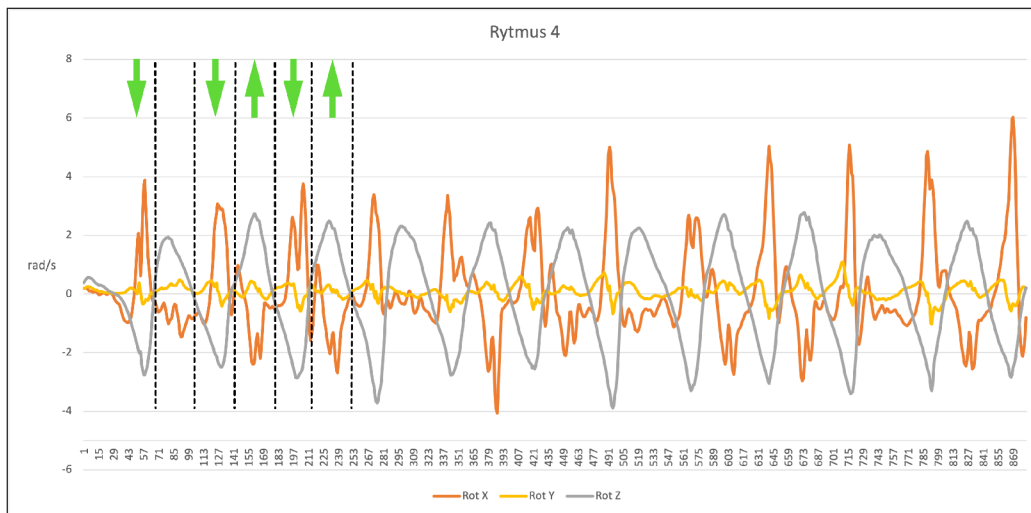
$\vec{a}_x$	$\vec{a}_y$	$\vec{a}_z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
0,0896	0,2818	0,1255	1,5313	0,2541	1,6928

Tabulka 6: Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 4

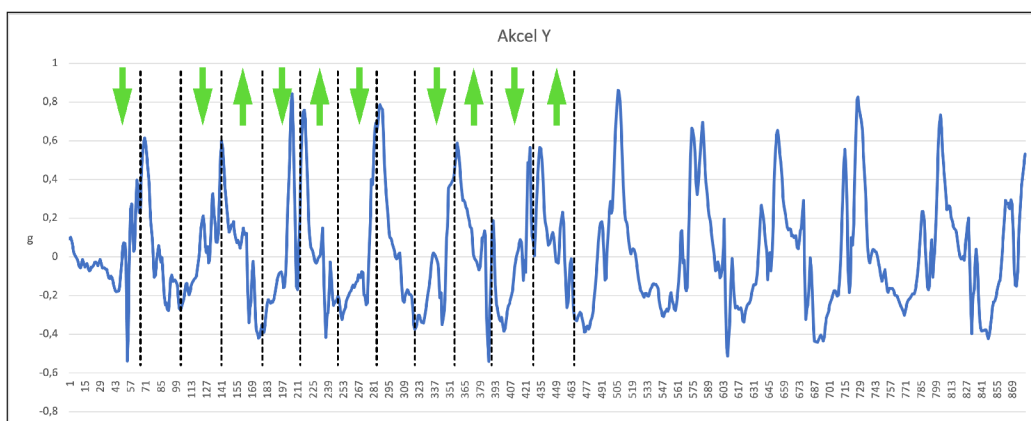
V grafech jsou svislými čarami naznačeny úseky pohybů a zelenými šipkami jednotlivé úderu prvního taktu.

Z grafu 7 hodnot úhlových rychlostí lze opět vyčíst jednotlivé pohyby ruky plynulými změnami úhlové rychlosti  $\omega_z$ . Hodnota úhlové rychlosti  $\omega_x$  vykazovala mírné výkyvy, ale trend v jednotlivých úderech je jasně patrný. Úhlová rychlost  $\omega_y$  vykazovala změnu malou a její průběh se měnil i v rámci úderu vedených ve stejném směru.

V grafu 8 hodnot akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  je patrný trend ve směrech jednotlivých úderů. Hodnoty v rámci jednoho úderu jsou však velmi rozkolísané. Opět nedocházelo k plynulému pohybu ve směru této osy. Průběh je jiný než v předchozích měřeních.



Graf 7: Změna úhlových rychlostí v rytmu 4

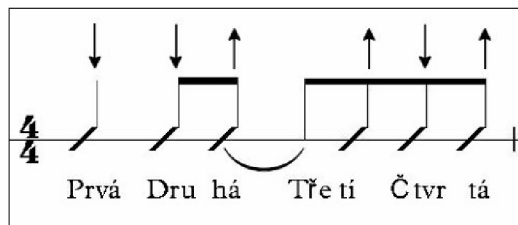


Graf 8: Změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  v rytmu 4

### 4.2.3 Rytmy čtyřdobého taktu

#### 4.2.3.1 Rytmus 5

Jako pátý rytmus byl zvolen rytmus čtyřdobého taktu se šesti údery. Hráč během hraní jednoho taktu provedl osm úderů.



Obrázek 22: Rytmus 5 [30]

Vektory s největší variabilitou byly opět určeny pomocí směrodatné odchylky. Stejně jako v předchozích případech to byly úhlové rychlosti  $\omega_x$  a  $\omega_z$  a akcelerační vektor  $\vec{a}_y$ , viz tabulka 7.

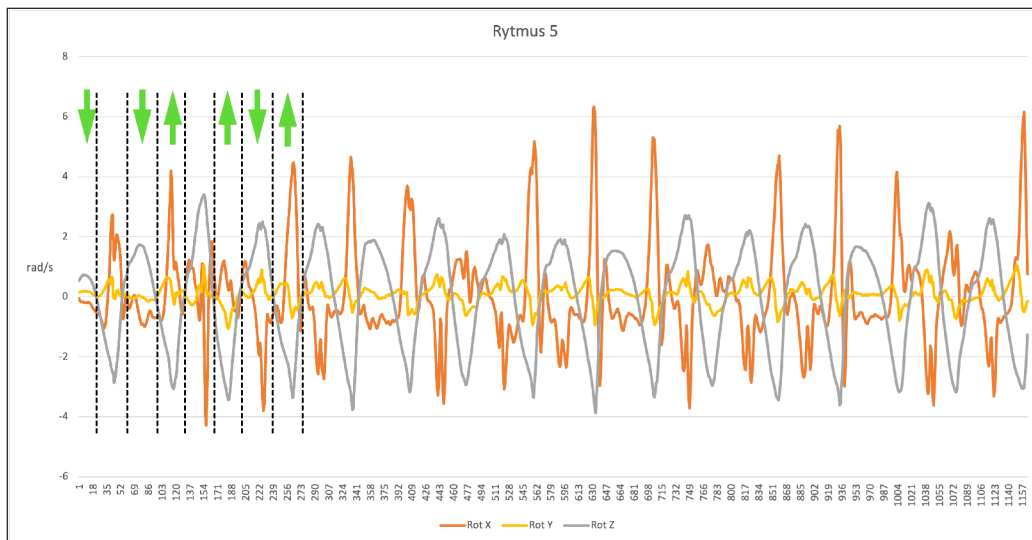
$\vec{a}_x$	$\vec{a}_y$	$\vec{a}_z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
0,10351	0,31091	0,16314	1,621323	0,31924	1,74955

Tabulka 7: Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 5

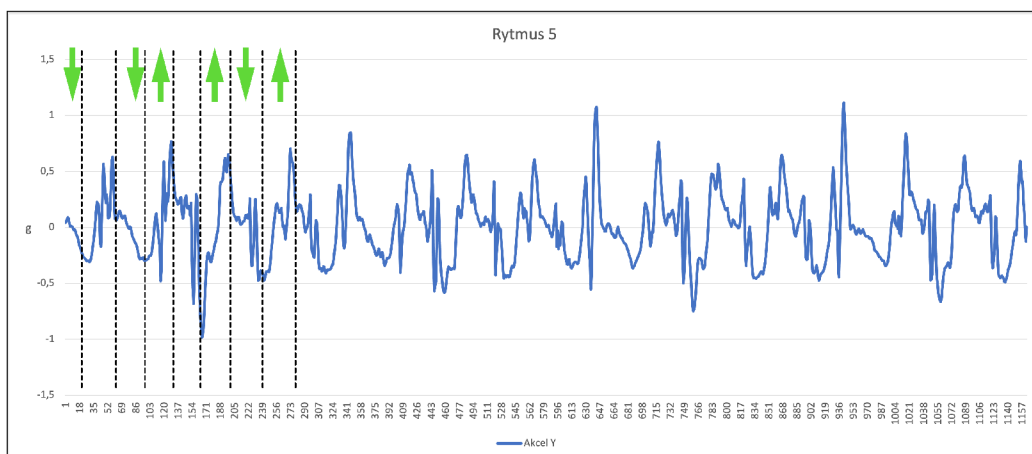
V grafech jsou pomocí svislých čar a zelených šipek vyznačeny úseky pohybů, respektive jednotlivých úderů.

V grafu 9 úhlových rychlostí lze vidět stejné trendy jako v předchozích případech. Změna úhlové rychlosti  $\omega_z$  byla plynulá a jednotlivé výkyvy korespondují s pohyby ruky. Výkyvy úhlové rychlosti  $\omega_y$  byly malé a průběh je rozdílný mezi různými údery vedenými ve stejném směru.

Průběh akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  (graf 10) se opět odlišoval od předchozích měření. V průběhu je patrný trend u jednotlivých pohybů, ale podobně jako v předchozích případech docházelo i v rámci jednotlivých úderů k velkým výkyvům.



Graf 9: Změna úhlových rychlostí v rytmu 5

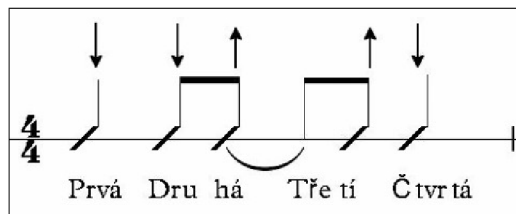


Graf 10: Změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  v rytmu 5

#### 4.2.3.2 Rytmus 6

Posledním sledovaným rytmem byl rytmus čtyřdobého taktu s pěti údery. Během hraní taktu hráč provedl sedm pohybů ruky.

Analýza směrodatné odchylky dopadla podobně jako v předchozích případech. Výsledky shrnuje tabulka 8.



Obrázek 23: Rytmus 6 [30]

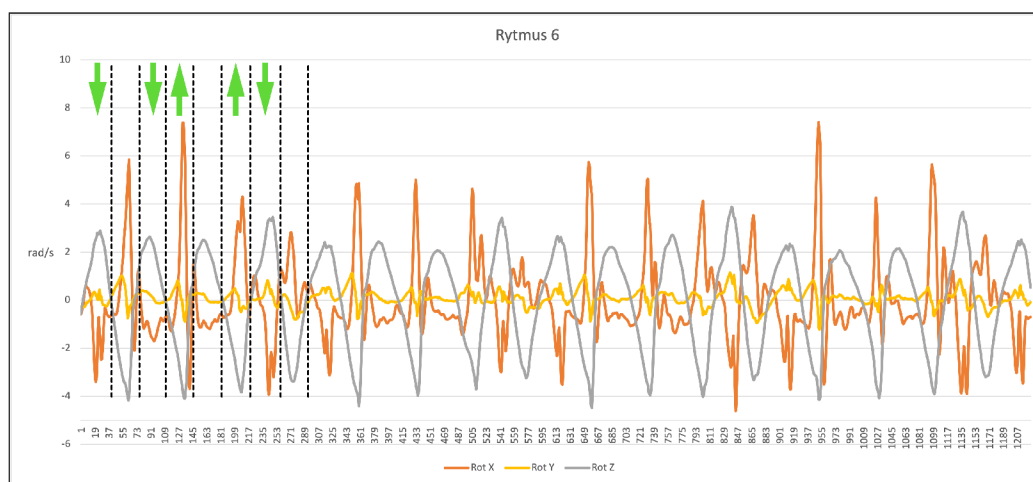
$\vec{a}_x$	$\vec{a}_y$	$\vec{a}_z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
0,12592	0,38132	0,19506	1,724734	0,33232	2,04322

Tabulka 8: Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 6

V následujících grafech průběhů vektorů jsou v prvním taktu úseky pohybů odděleny svislými čarami a úderý naznačeny zelenými šipkami.

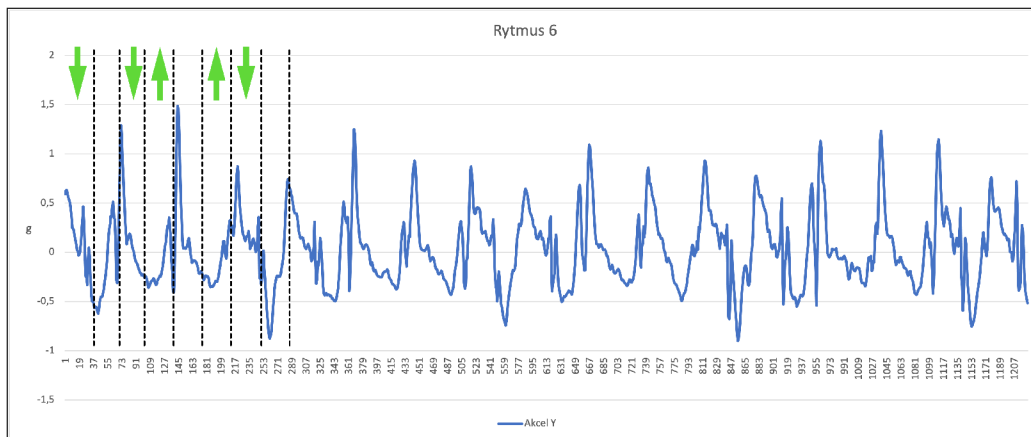
Z grafu 11 lze vyčíst, že i při hraní tohoto rytmu byly změny úhlové rychlosti  $\omega_z$  plynulé a korespondovaly s jednotlivými pohyby ruky. Totéž lze říci o úhlové rychlosti  $\omega_x$ , i když u ní docházelo k mírným výkyvům v rámci úderu. Při některých úderech také nebyla změna této úhlové rychlosti tolik výrazná. Průběh úhlové rychlosti  $\omega_y$  je podobný jako v předchozích měřeních a její průběh se lišil i u úderů vedených stejným směrem.

V grafu akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  jsou patrné silné výkyvy hodnot i v rámci jednoho úderu. Celkový průběh se opět odlišoval od předchozích měření.



Graf 11: Změna úhlových rychlostí v rytmu 6





Graf 12: Změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$  v rytmu 6

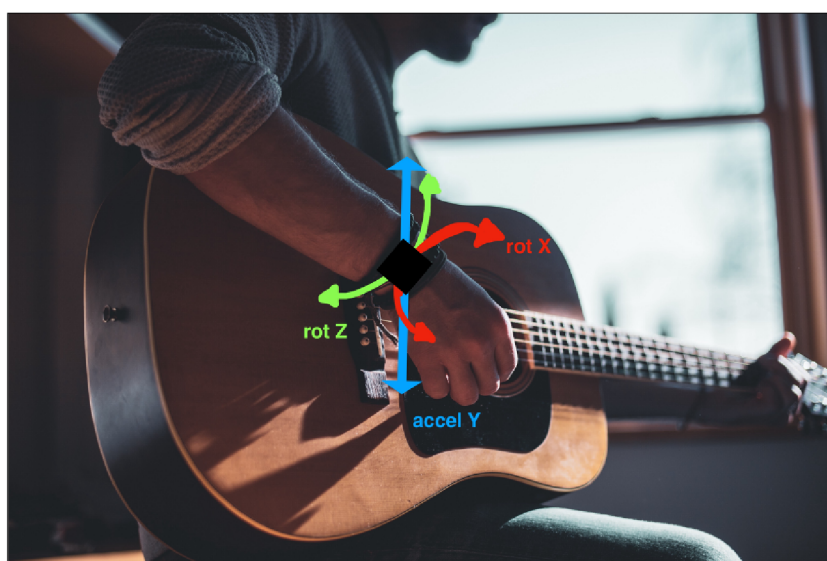
#### 4.2.4 Závěry analýzy

Analýzy měření jednotlivých rytmů ukázaly, že nejvíce se mění hodnoty úhlových rychlostí  $\omega_x$  a  $\omega_z$ . To koresponduje se závěry, které byly vyvozeny na základě analýzy vztahu pohybu ruky při hře na kytaru a pohybových senzorů hodinek.

Analýza dat pomocí směrodatné odchylky ukázala i signifikantní změny akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$ . Následná vizuální analýza provedená pomocí vynesení naměřených dat do grafu ukázala, že oproti předchozím dvěma vektorům byly změny poměrně malé. Celkový průběh tohoto vektoru byl nepravidelný a u jednotlivých směrů pohybu nebyl pozorován žádný významnější trend. Pohyb, kterým se projevuje změna tohoto vektoru, odpovídá rotaci ruky s hodinkami okolo osy spojující vrchní a spodní hranu displeje hodinek. Tento pohyb může být způsoben například „vysunutím“ lokte směrem ven. Z analýzy se zdá, že změna toho vektoru nesouvisí přímo s hraním rytmu/úderu, ale spíše s držením těla samotného hráče. Tento závěr vychází z faktu, že průběh tohoto vektoru se lišil i mezi údery vedenými stejným směrem. Souvislost mezi sledovanými vektory a pohybem při hraní znázorňuje obrázek 24.

U akceleračních vektorů se jako vektor s největší změnou projevoval vektor  $\vec{a}_y$ . U ostatních dvou vektorů byla změna zanedbatelná. To opět potvrzuje závěry, které vycházely z analýzy pohybu ruky při hraní. Aby se měnil vektor  $\vec{a}_x$ , bylo by nutné, aby hráč změnil polohu tak, že by ji posouval směrem k/od sedla kytary. Takovýto pohyb není při hraní častý. Změna vektoru  $\vec{a}_z$ , by byla způsobena odtážením ruky od těla kytary. K takovému pohybu při

hraní také nedochází. Předpoklad, že pohyb jednotlivých úderů bude popisovat i změna akceleračního vektoru  $\vec{a}_y$ , se nepotvrdil. Celková změna tohoto vektoru nebyla příliš velká. Naopak během jednoho pohybu ruky docházelo k velkým výkyvům v naměřených hodnotách tohoto vektoru. Celkový průběh vektoru se také silně lišil mezi jednotlivými rytmy. Větší kolísání hodnot bylo zaznamenáno zejména v rytmech s více údery v jednom taktu. Z toho lze usuzovat, že hodnoty tohoto vektoru souvisí s celkovou dynamikou hraní. Nalezení trendu v tomto vektoru by si žádalo další analýzu.



Obrázek 24: Sledované vektory ve vztahu k pohybu při hraní

Z výše popsaného bylo vyvozeno, že pohyb ruky při hraní se nejvíce a nejpravidelněji projevuje ve změnách úhlových rychlostí  $\omega_x$  a  $\omega_z$ . U ostatních měřených vektorů se nepodařilo zvolenými metodami nalézt trend, který by se opakoval ve většině úderů ve sledovaných rytmech.

Změna úhlové rychlosti  $\omega_x$  je způsobena supinací a pronací loketního kloubu. Flexí a extenzí loketního kloubu dochází ke změně úhlové rychlosti  $\omega_z$ . Při poloze hodinek na vnější straně zápěstí pravé ruky nabývá úhlová rychlost  $\omega_z$  při úderu směrem dolů záporných hodnot, při pohybu směrem vzhůru nabývá kladných hodnot. U úhlové rychlosti  $\omega_x$  je tomu naopak.

#### 4.2.5 Analýza orientace

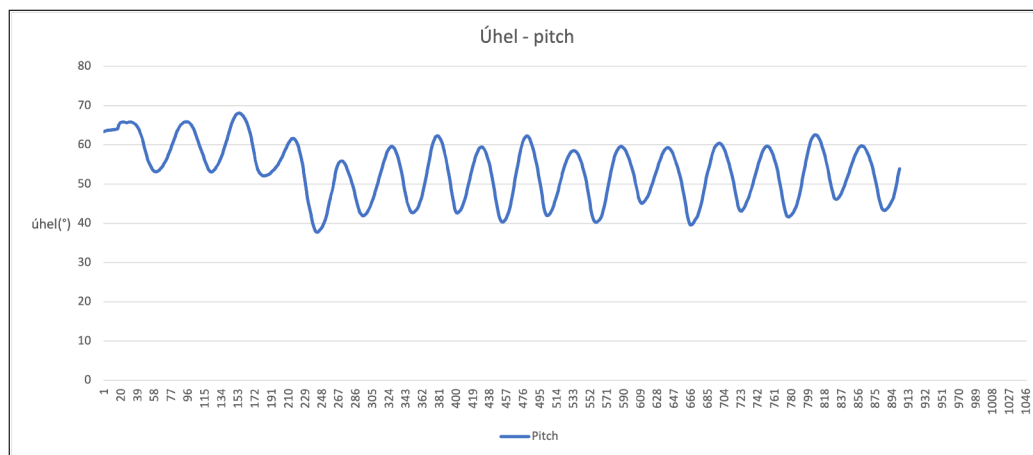
Kromě analýzy pohybu hodinek byla při hraní provedena také analýza orientace. Pohyb hodinek totiž může probíhat s hodinkami natočenými různým směrem. Stejný profil pohybu tak může být naměřen například v poloze, kdy displej hodinek míří směrem vzhůru, nebo v poloze, kdy jsou hodinky natočeny displejem směrem k zemi. Ani v jednom z uvedených příkladů však zřejmě nebude docházet ke hře na kytaru, neboť by v takovém případě musela být kytara držena velmi nestandardním způsobem. Z teorie hry na kytaru vyplývá, že ruka je během hraní v takové poloze, že hodinky jsou natočeny displejem směrem k tělu kytary nebo od těla kytary a myšlená přímka rovnoběžná s plochou displeje je téměř kolmá k zemi.

Při analýze orientace byl sledován úhel *pitch* (viz obrázek 11). Senzor hodinek vrací hodnotu úhlů v radiánech. Tuto hodnotu lze pro lepší čitelnost převést na stupně následujícím vztahem:

$$1 \text{ rad} = 180^\circ/\pi$$

V ideálním případě by se při hraní rytmu měla hodnota tohoto úhlu pohybovat v absolutní hodnotě okolo  $90^\circ$  (znaménko závisí na poloze hodinek – vnitřní/vnější strana zápěstí).

Měření úhlu probíhalo opět s frekvencí 120 Hz. Z naměřených dat byly podobně jako v případě analýzy pohybu odstraněny hodnoty naměřené před začátkem a po konci hraní určeného rytmu. Začátek a konec hry vybraného rytmu byl opět určen pomocí videozáznamu z kamery. Snímková frekvence záznamu byla také 120 Hz. Graf 13 ukazuje naměřené hodnoty z hraní náhodně určeného rytmu.



Graf 13: Změna úhlu *pitch* při hraní

#### 4.2.6 Závěry analýzy orientace

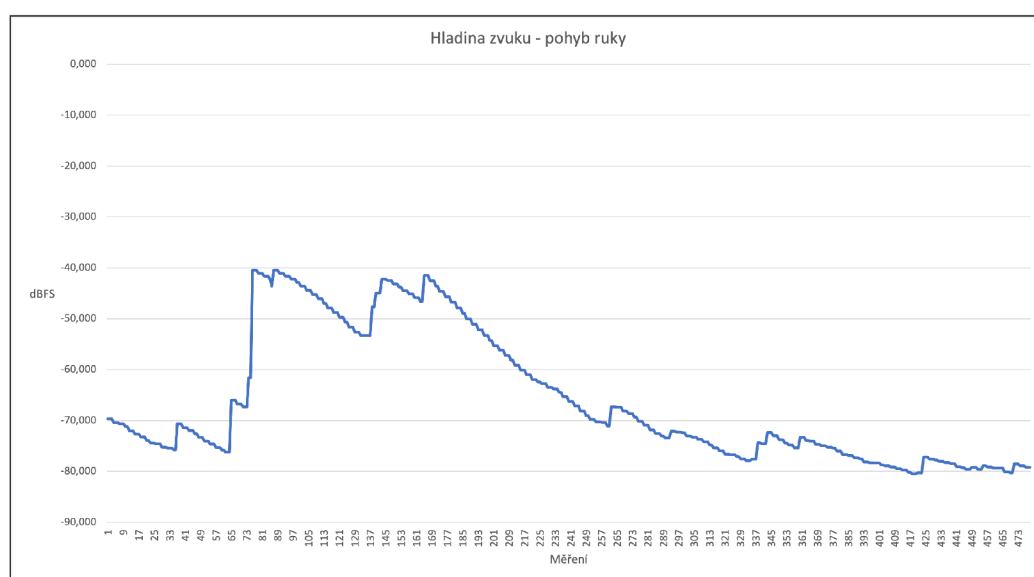
Oproti předpokladu hodnota úhlu nedosahovala  $90^\circ$ . To bylo způsobeno držením kytary, hráč nedržel kytaru přesně kolmo, nástroj (a tím i poloha ruky) byly mírně natočeny směrem k obličej. Nejmenší naměřený úhel při tomto měření byl  $38^\circ$ . Podobné hodnoty byly naměřeny i při dalších experimentech. Celkem byla provedena čtyři měření, při nichž byly hrány různé rytmy v různém tempu. Nejmenší naměřená hodnota byla  $34^\circ$ , nejvyšší pak  $82^\circ$ . Průměrná hodnota všech měření byla  $51^\circ$ .

#### 4.3 Detekce zahrání

Po identifikování veličin definujících pohyb při hraní na kytaru bylo dále nutné ověřit, zda uživatel na kytaru skutečně zahrál. K tomu samotná detekce pohybu nestačila. Hráč může provádět správný pohyb, ale nemusí rozeznívat struny. K detekci zahrání bylo využito integrovaného mikrofону. Během záznamu zvuku bylo možné v periodických intervalech odečítat úroveň hladiny zaznamenávaného zvuku. Tato hladina je udávána v jednotkách dBFS (decibels relative to full scale). 0 dBFS je maximální zaznamenatelná úroveň hlasitosti. Hladina je udávána relativně k této maximální hodnotě. Například hodnota  $-10$  dBFS značí hladinu hlasitosti o 10 dB nižší, než je maximální hodnota.

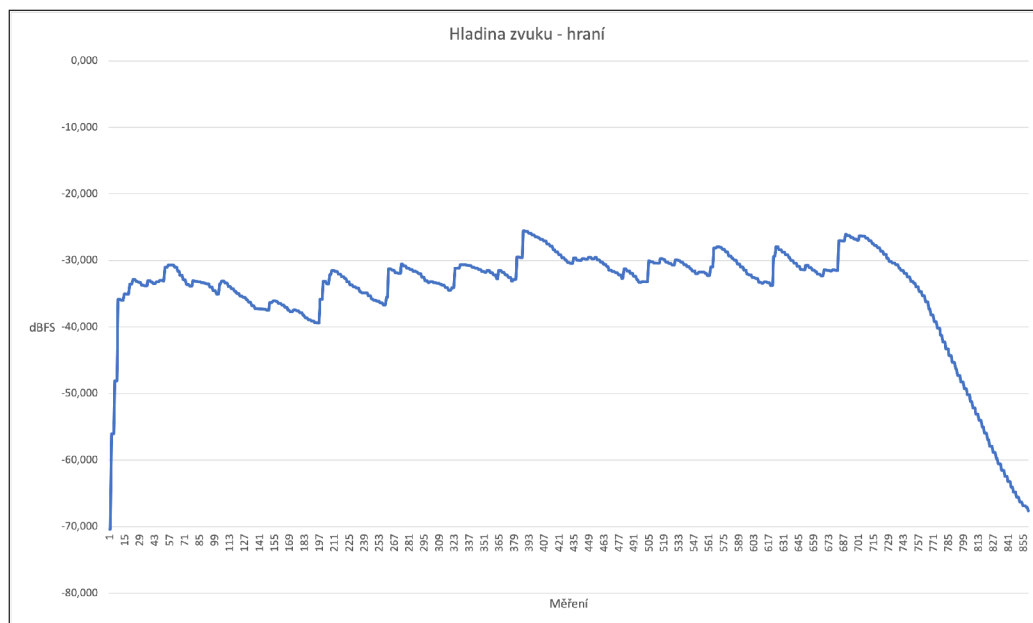
Nejprve byl proveden experiment, při němž hráč na kytaru simuloval hraní rytmu, avšak

nedocházelo k rozeznívání strun. Tím byla zjištěna hladina zvuku, která vzniká pouhým pohybem ruky v jinak tichém prostředí. Úroveň takto naměřené hladiny byla silně proměnlivá (graf 14), ale při simulaci hraní vybraných rytmů v daném tempu nepřesahovala hodnotu  $-40$  dBFS. Tato hodnota tedy byla určena jako práh pro detekci zahrání. Pokud by byl detekován pohyb hodinek, který odpovídá pohybu při hraní rytmu, ale úroveň naměřené hlasitosti by během tohoto pohybu nepřesáhla hodnotu  $-40$  dBFS, nelze rozhodnout, zda došlo k zahrání na kytaru či nikoliv.



Graf 14: Naměřená hladina zvuku při pohybu ruky

V další fázi experimentu byla měřena úroveň hlasitosti při skutečném hraní zvolených rytmů (graf 15). I při hlasitém hraní nedosahovaly naměřené hodnoty maximální úrovně  $0$  dBFS. V naměřených hodnotách lze také pozorovat skoky, které vznikají při zahrání prvního tónu úderu. Při prvním úderu dojde ke skokovému zvýšení naměřené úrovně hlasitosti ve chvíli, kdy hráč svým pohybem rozezní struny. Po přejetí všech strun dochází ke změně pohybu – ruka se zastaví a následně rozpohybuje druhým směrem. Mezitím však dojde k poklesu úrovně zvuku, který kytara vydává, tím, jak dochází k poklesu amplitudy vlnění. Při následném úderu pak dojde opět ke skokovému zvýšení hlasitosti. Pomocí detekce těchto skoků lze identifikovat během měření okamžiky, kdy mohlo dojít k zahrání na kytaru.



Graf 15: Naměřená hladina zvuku při hraní rytmu

Další analýza naměřených hodnot ukázala, že nejmenší změna v úrovni hlasitosti mezi dvěma údery byla 2,4 dBFS. Nejvyšší změna byla naměřena při prvním úderu a její velikost závisí na počáteční úrovni hlasitosti – hladině zvuku v místnosti. Ta se v různých situacích pohybovala od  $-90$  dBFS do  $-70$  dBFS.

#### 4.4 Identifikace směru úderu

Směr úderu lze určit ze znaménka u úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $z$ . Má-li hráč hodinky na vnější straně pravého zápěstí, pak při hraní úderu směrem dolů bude znaménko této rotace kladné (rotace je ve směru hodinových ručiček). V případě úderu vedeného směrem vzhůru bude toto znaménko záporné. V případě, že má hráč hodinky na levé ruce, budou znaménka přehozena.

Všechny poznatky zjištěné v rámci experimentu a datové analýzy shrnuje tabulka 9.

Oblast	Poznátky
Identifikace pohybu	Signifikantní veličiny: <ul style="list-style-type: none"> <li>• úhlová rychlost <math>\omega_x</math></li> <li>• úhlová rychlost <math>\omega_z</math></li> </ul> Průměrná hodnota úhlu otočení <i>pitch</i> $51^\circ$
Detekce zahrání	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Práh detekce zahrání <math>-40</math> dBFS</li> <li>• Nejmenší změna při souvislém hraní <math>2,4</math> dBFS</li> </ul>
Detekce směru úderu	Směr uručuje znaménko úhlové rychlosti úhlová rychlost $\omega_z$

Tabulka 9: Shrnutí poznatků z experimentu

## 4.5 Návrh algoritmu

Na základě předchozích měření a analýz byl proveden návrh algoritmu. Algoritmus má tři hlavní fáze, které vycházejí z předešlých problémů. V první fázi jsou detekována potenciální zahrání na kytaru, ve druhé je porovnáván pohyb ruky, zda odpovídá profilu pohybu při hraní na kytaru, a ve třetí fázi je určen směr úderu.

### 4.5.1 Detekce zahrání

V pravidelných intervalech je měřena úroveň hladiny hluku, kterou snímá mikrofon hodinek. Tato hladina je porovnávána s předchozí naměřenou hodnotou. Algoritmus vyhodnotí výsledek měření jako potenciální zahrání pokud

- (a) naměřená úroveň hladiny je vyšší než  $-40$  dBFS,
- (b) došlo ke zvýšení této úrovně v porovnání s předchozím měřením o určitou hodnotu

Obě podmínky vycházejí z výsledků předchozího pozorování a analýzy. Frekvence měření byla stanovena na stejnou hodnotu jako při původním sběru dat, tedy  $120$  Hz. V předchozí analýze zvuku bylo naměřeno, že nejmenší změna hladiny zvuku byla  $2,4$  dBFS. Jako mezní hodnota pro splnění podmínky (b) byla tedy zvolena hodnota  $2,3$  dBFS.

#### 4.5.2 Porovnání profilu pohybu

Jestliže algoritmus vyhodnotí výsledek měření jako potenciální zahrání, přejde do druhé fáze – porovnání profilu pohybu. V této fázi je zjišťováno, zda následný pohyb ruky po rozeznění strun odpovídá pohybu, který hráč provádí při hraní na kytaru. K tomu je třeba zaznamenat data určitého časového úseku ze senzorů pohybu do bufferu a následně vyhodnotit – porovnat s již naměřenými hodnotami. Protože ukládat a porovnávat hodnoty ze všech provedených měření by bylo nákladné, je potřeba naměřená data nejprve upravit. V analýze pohybu bylo na základě výsledků rozhodnuto, že pohyb ruky se nejvíce projevuje na hodnotách úhlových rychlostí otáčení kolem os  $x$  a  $z$ . Aby byl naměřený pohyb podobný s pohybem, který byl pozorován při hraní rytmy, je nutné, aby oba sledované vektory vykazovaly během měření nenulové hodnoty. Pokud bude tato podmínka splněna, bude i součet naměřených hodnot daných vektorů nenulový. Hodnota pozorovaných vektorů nebyla při experimentech stejná, to je dáno tím, že každý rytmus byl hrán s jinou dynamikou.

Oba sledované vektory se při hraní rytmu měnily plynule a jejich hodnoty byly buď vždy kladné, nebo vždy záporné - v závislosti na orientaci úderu. Budou-li tedy naměřené hodnoty od začátku úderu po určitý časový úsek, který je kratší, než byla doba sledovaného úderu, sčítány, bude se hodnota tohoto součtu v absolutní hodnotě vždy zvyšovat. Po určení délky časového úseku lze pro každý identifikovaný úder tento součet hodnot provést. Nejmenší součty budou odpovídat nejméně výrazným úderům. V algoritmu tak jsou porovnány pouze součty naměřených hodnot v určitém časovém úseku.

Dále je třeba sledovat, zda se během měření mění oba sledované vektory. Tedy, že nedochází pouze k minimální pohybu v některém směru způsobeného faktem, že hráč nikdy nedokáže ruku udržet v klidu natolik, aby senzory hodinek nezaznamenaly alespoň minimální pohyb. Z tohoto důvodu budou mezi sebou hodnoty vektorů vynásobeny. Jestliže by v některém ze sledovaných směrů nedocházelo k pohybu, byla by naměřená hodnota vektoru rovna nule nebo by se k nule blížila. Po vynásobení hodnot sledovaných vektorů tedy dojde ke dvěma možnostem:

- (a) Výsledná hodnota je nulová nebo se blíží nule, protože některý ze sledovaných vektorů nevykazoval signifikantní změny.
- (b) Výsledná hodnota je nenulová.



Protože znaménka hodnot vektorů jsou závislá na směru pohybu, je počítáno s absolutními hodnotami vektorů, s výjimkou úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $z$ , podle kterého je následně určen směr úderu. Během jednoho měřicího cyklu budou tedy hodnoty sledovaných vektorů mezi sebou vynásobeny a výsledná hodnota je uložena do bufferu. Manipulaci s hodnotami vektorů lze vyjádřit jako následující funkci:

$$f(\omega_z, \omega_x) = \omega_z \cdot |\omega_x|,$$

kde  $\omega_z$  je úhlová rychlost otáčení kolem osy  $z$  a  $\omega_x$  je hodnota úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $x$ . Po naplnění bufferu budou hodnoty sečteny. Hodnota součtu je porovnána s předem určenou mezní hodnotou, jestliže bude hodnota součtu vyšší než tato hodnota, je naměřený pohyb považován za dostatečně podobný pohybu, který byl pozorován při měřených experimentech. Počáteční hodnota meze byla určena aplikací výše zmíněné funkce na již naměřená data z předchozích experimentů. Frekvence měření byla stanovena na 120 Hz, počáteční velikost bufferu byla stanovena na hodnotu 20. Teoreticky tak lze během jedné vteřiny zaznamenat až šest úderů (120/20). Nejmenší součet, který byl získán aplikací předchozí funkce na prvních 20 naměřených hodnot všech úderů identifikovaných při předchozích experimentech, měl hodnotu 1,2. Mez byla stanovena na hodnotu 1,1.

Z předchozích analýz bylo také pozorováno, že při hraní na kytaru mají hodinky specifickou orientaci. Analýzou bylo zjištěno, že průměrná hodnota úhlu otočení kolem osy  $x$  – *pitch* byla 50°. Při analýze pohybu tak nebyla porovnávána pouze hodnota součtu hodnot v bufferu, ale i průměrná hodnota tohoto úhlu během měření. Počáteční mezní hodnota, které musí průměrná hodnota úhlu dosahovat, byla stanovena na 50°.

### 4.5.3 Určení směru úderu

Poslední fází algoritmu je určení směru úderu. Ten je možné určit na základě znaménka úhlové rychlosti otáčení kolem osy  $z$ , jak bylo diskutováno dříve. Protože hodnota tohoto vektoru nebyla jako jediná ve funkci z předchozí fáze brána v absolutní hodnotě, projeví se znaménko tohoto vektoru na výsledném součtu. Směr úderu je tedy určen na základě znaménka výsledného součtu. Při vyhodnocení je třeba brát v potaz, zda má hráč hodinky

na pravé nebo levé ruce, a dále na jaké straně zápěstí jsou hodinky umístěny. Závislost směru úderu na poloze hodinek a znaménka součtu hodnot ukazuje tabulka 10.

Znaménko	Strana zápěstí	Ruka	Směr úderu
+	vnější	levá	↑
-	vnější	levá	↓
+	vnitřní	levá	↓
-	vnitřní	levá	↑
+	vnější	pravá	↓
-	vnější	pravá	↑
+	vnitřní	pravá	↑
-	vnitřní	pravá	↓

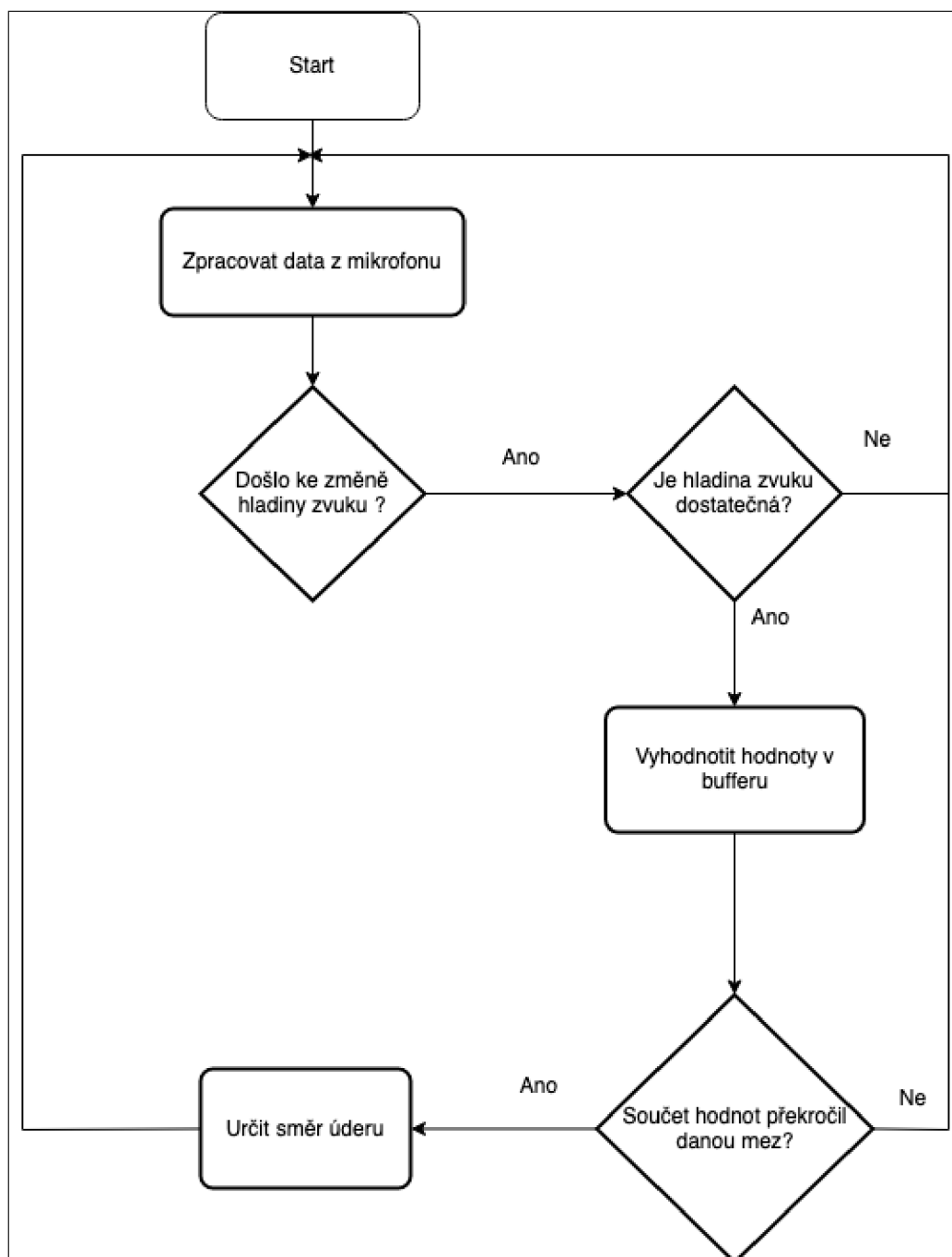
Tabulka 10: Směr úderu zvhledem k umístění hodinek a znaménku úhlové rychlosti otočení kolem osy  $z$

Po vyhodnocení směru úderu, nebo pokud algoritmus v druhé fázi úder vůbec nedetekuje, cyklus algoritmu skončí. Pokud je detekováno potenciální zahrání – změnou úrovně hladiny zvuku – během vyhodnocování druhé nebo třetí fáze, je tato detekce ignorována.

Celkový průběh algoritmu je patrný na obrázku 25, počáteční parametry algoritmu jsou pak shrnuty v tabulce 11.

Detekce zahrání	
Podmínky	<ul style="list-style-type: none"> <li>• úroveň hlasitosti <math>\geq -40</math> dBFS</li> <li>• změna úrovně <math>\geq 2,3</math> dBFS</li> </ul>
Pohyb	
Sledované veličiny	<ul style="list-style-type: none"> <li>• úhlová rychlost <math>\omega_x</math></li> <li>• úhlová rychlost <math>\omega_z</math></li> <li>• otočení kolem osy <math>x</math> – <i>pitch</i></li> </ul>
Průměrná hodnota úhlu <i>pitch</i>	$\geq 50^\circ$
Tranformační funkce kroku	$f(\omega_z, \omega_x) = \omega_z \cdot  \omega_x $
Velikost bufferu (počet měřených kroků jednoho úderu)	20
Hranice detekce úderu (součet bufferu)	1,1
Směr úderu	znaménko $\omega_z$
Frekvence měření	120 Hz

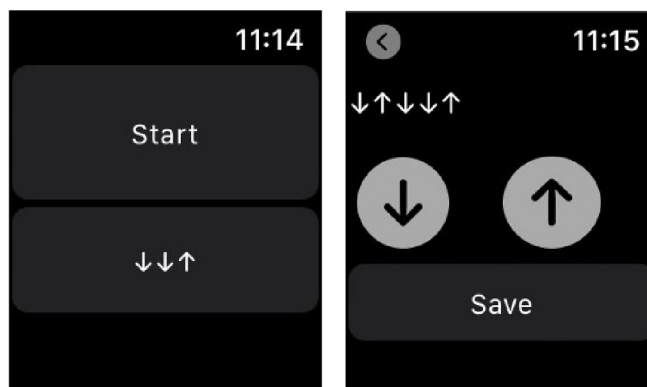
Tabulka 11: Počáteční parametry algoritmu



Obrázek 25: Průběh algoritmu detekce úderu

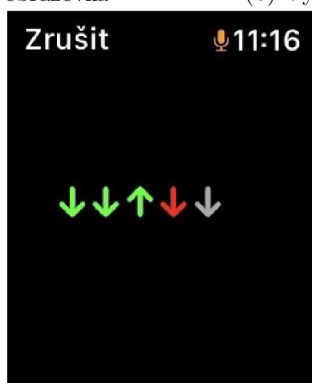
## 4.6 Implementace algoritmu

Navržený algoritmus byl implementován v aplikaci určené pro hodinky Apple Watch Series 5. Aplikace byla napsána v programovacím jazyce Swift. Aplikace demonstruje využití algoritmu při výuce rytmů začínajících hráčů. Hráč má nejprve možnost zvolit si rytmus, který se chce učit. Rytmus je na displeji hodinek zobrazen jako sekvence šipek, jejich orientace odpovídá směřům jednotlivých úderů. Po zahájení sezení sleduje aplikace hráčovy údery. V případě zaznamenání úderu dostane hráč zpětnou vazbu. Zahrál-li správný úder v rytmu, je šipka odpovídající rytmu vybarvena zeleně. Pokud zahrál špatný úder, je uživatel informován o této skutečnosti vibrací a vybarvením šipky červeně.



(a) Úvodní obrazovka

(b) Výběr rytmu



(c) Kontrola úderů

Obrázek 26: Ukázky aplikace v níž byl algoritmus implementován

Funkčnost algoritmu byla měřena pomocí sledování správně detekovaných úderů při hře různých rytmů v tempu 60BPM. V první fázi bylo zahráno 200 úderů a správně bylo

detekováno 80 z nich. Ze 120 nesprávně detekovaných úderů bylo 80 vyhodnoceno špatně na základě velikosti průměrné hodnoty úhlu – orientace hodinek – otočení kolem osy  $x$ . Z aplikačních logů bylo zjištěno, že průměrná hodnota toho úhlu se při úderech pohybovala v rozmezí 37°-60°. Mezní hodnota 50° tak byla příliš vysoká. Nová mezní hodnota byla určena na 35°. Z následujících 300 úderů bylo správně identifikováno 288. Výsledky shrnuje tabulka 12

	S původními parametry	Po úpravě úhlu <i>pitch</i>
Úderů	200	300
Správně detekováno	80	288
Špatně detekováno	120	12
Úspěšnost	40 %	96 %

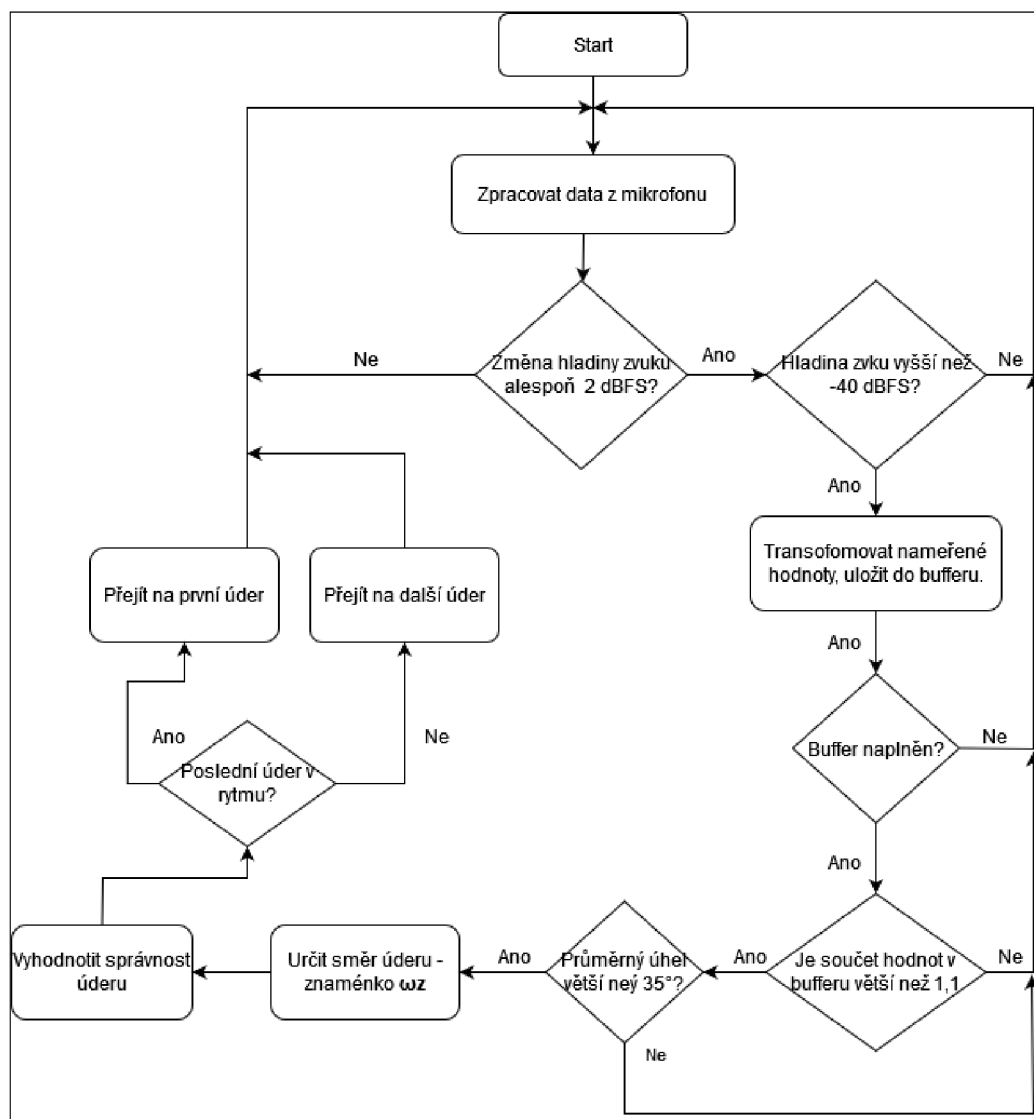
Tabulka 12: Výsledky algoritmu při použití aplikace v tempu 60 BPM

Všech 12 chybných vyhodnocení bylo špatně vyhodnoceno již v první fázi algoritmu – úderý nebyl vůbec identifikován jako potenciální zahrání, protože hladina úrovně se při nich zvýšila jen o 2,2 dBFS-2,3 dBFS. Mezní úroveň pro změny této hladiny byla snížena z 2,3 dBFS na 2 dBFS.

Po úpravě bylo správně identifikováno dalších 200 při tempu 60 BPM. Po zvýšení tempa na 80 BPM bylo správně identifikováno 92 ze 100 provedených úderů. Při zvýšení tempa na 100 BPM již aplikace nedokázala správně detekovat více než polovinu úderů (viz tabulka 13). Výsledné parametry algoritmus hrnuje tabulka 14, konečný průběh algoritmu je na obrázku 27.

	60 BPM	80 BPM	100 BPM
Úderů	200	100	100
Správně detekováno	200	92	31
Špatně detekováno	0	8	69
Úspěšnost	100 %	92 %	31 %

Tabulka 13: Konečné výsledky algoritmu



Obrázek 27: Konečná podoba algoritmu v aplikaci

Detekce zahrání	
Podmínky	<ul style="list-style-type: none"> <li>• úroveň hlasitosti <math>\geq -40</math> dBFS</li> <li>• změna úrovně <math>\geq 2</math> dBFS</li> </ul>
Pohyb	
Sledované veličiny	<ul style="list-style-type: none"> <li>• úhlová rychlost <math>\omega_x</math></li> <li>• úhlová rychlost <math>\omega_z</math></li> <li>• otočení kolem osy <math>x</math> – <i>pitch</i></li> </ul>
Průměrná hodnota úhlu <i>pitch</i>	$\geq 35^\circ$
Tranformační funkce kroku	$f(\omega_z, \omega_x) = \omega_z \cdot  \omega_x $
Velikost bufferu (počet měřených kroků jednoho úderu)	20
Hranice detekce úderu (součet bufferu)	1,1
Směr úderu	znaménko $\omega_z$
Frekvence měření	120 Hz

Tabulka 14: Konečné parametry algoritmu

## 5 Výsledky a diskuze

### 5.1 Výsledky

#### 5.1.1 Využití hodinek

Návrh využití chytrých hodinek byl formulován jednak na základě současného stavu využití chytrých zařízení v komerčních aplikacích určených pro hráče na kytaru, jednak byly brány v potaz momentální výsledky výzkumu v oblasti využití chytrých hodinek při hře na kytaru. V neposlední řadě návrh vycházel z hardwarových a softwarových omezení chytrých hodinek. Výsledkem výše uvedených poznatků byl návrh využití chytrých hodinek pro kontrolu hraného rytmu.

#### 5.1.2 Experiment

Na základě předchozího rozhodnutí byl navržen experiment, jehož provedením byla sesbívána data ze senzorů chytrých hodinek, které při hraní byly na ruce, kterou hráč rozeznívá struny (u většiny kytaristů se jedná o ruku pravou). Jednalo se o data z akcelerometru, gyroskopu a mikrofonu hodinek. Cílem experimentu bylo určit, které měřitelné veličiny pohyb ruky při hraní definují. Současně bylo cílem zjistit v jaké poloze se hodinky při hraní nachází, či jaký profil má zvuk zaznamenaný při hraní. Důraz byl kladen na to, aby již v rámci experimentu bylo užíváno pouze senzorů a analýz, které pak mohou být prováděny v reálném čase na chytrých hodinkách. Díky tomu mohly být všechny poznatky z experimentu využity při implementaci navrženého způsobu užití.

K experimentu byla použita akustická kytara, zejména díky jednoduchosti snímání zvuku. Hodinky se nachází při hraní přímo u ozvučeného otvoru, kde u akustické kytary zvuk vzniká a proto nebylo třeba určovat další parametry experimentu - například typ zesilovače apod., což by bylo nutné při použití elektrické kytary. Experiment probíhal s hodinkami Apple Watch Series 5 a celý průběh experimentu byl natáčen na kameru. Videozáznam poté posloužil k určení naměřených dat, která souvisela s hraním na kytaru a k validaci závěrů analýzy.



V rámci experimentu hrál hráč jeden z několika vybraných základních rytmů v tempu 80 BPM. Pomocí analýzy směrodatnou odchylkou byly v sesbíraných datech z akcelerometru a gyroskopu nalezeny veličiny s nejvyšší variabilitou. Tyto veličiny byly určeny jako ty, které nejlépe definují pohyb ruky při hraní. Jednalo se o úhlovou rychlost otáčení kolem osy  $x$  a úhlovou rychlost otáčení kolem osy  $z$ . Pohyb ruky byl v rámci měření patrný i v hodnotách a průběhu změny akceleračního vektoru  $y$ , ale tento vektor nakonec nebyl určený jako směrodatný, neboť jeho hodnoty vykazují velké výkyvy mezi jednotlivými úderými v rámci hraného rytmu. Největší výkyvy byly pozorovány ve chvíli, kdy se hráč odchýlil od hraného tempa a toto korigoval rychlejším zahráním následujícího úderu. Hodnoty tohoto vektoru také rostou úměrně s tím, jak hlasitě hráč hraje, neboť má v dané situaci tendenci dráhu svých úderů prodlužovat, v důsledku čeho se ruka pohybuje rychleji. Při úsporném a klidném hraní byla změna toho vektoru malá.

Protože ke změnám výše uvedených vektorů může docházet i při jiném pohybu, než je hra kytaru, bylo třeba určit další parametry, které jsou pro hru na kytaru specifické. Ze způsobu držení kytary vyplývá, že hodinky jsou při hraní natočeny určitým směrem. Průměrný úhel natočení hodinek kolem osy  $x$  byl při měření  $50^\circ$ . Dále bylo analýzou zjištěno, že při hře na kytaru je naměřená úroveň hladiny zvuku větší než  $-40$  dBFS a mezi jednotlivými úderými dochází ke změně této hladiny nejméně o  $2,4$  dBFS. Směr úderu lze určit na základě znaménka úhlové rychlosti otáčení hodinek kolem osy  $z$ .

Důležité poznatky z experimentu jsou tedy následující:

- Pohyb hodinek se projevuje jako změna úhlových rychlostí  $\omega_x$ ,  $\omega_z$ .
- Hodinky jsou při hraní průměrně natočeny kolem osy  $x$  v úhlu  $50^\circ$ .
- Při hraní přesahuje naměřená hladina zvuku  $-40$  dBFS.
- Mezi jednotlivými úderými byla změna úrovně hladiny zvuku alespoň  $2,4$  dBFS.
- Směr úderu lze určit pomocí znaménka  $\omega_z$ .

### 5.1.3 Algoritmus detekce úderů

Na základě zjištěných skutečností byl navržen algoritmus, který během hraní dokáže detekovat jednotlivé úderý. Tento algoritmus původně detekoval úder, pokud byla naměřená

hladina zvuku větší než  $-40$  dBFS a došlo ke změně této hladiny alespoň o  $2,3$  dBFS. Dále byla sledována orientace hodiněk ve směru osy  $x$ . Jako mezní hodnota úhlu byla zvolena hodnota  $50^\circ$ . V určitých časových úsecích jsou zpětně vyhodnocována naměřená data sledovaných veličin, zda se shodují se zjištěnými profily pohybu. Naměřené hodnoty úhlových rychlostí  $\omega_x$ ,  $\omega_z$  byly nejprve v každém kroku měření transformovány pomocí jednoduché transformační funkce (4.5.2) a uloženy do bufferu. Po naplnění bufferu byly hodnoty sečteny a porovnány s průměrnou hodnotou zjištěnou během experimentu 1,1. Jestliže součet hodnot v bufferu byl vyšší, než tato hodnota, byl detekován úder. Velikost bufferu byla určena na 20 měření. Měření probíhalo s frekvencí  $120$  Hz.

Tento algoritmus byl poté použit v jednoduché aplikaci určené pro výuku hraní kytarových rytmů. Uživatel má možnost zvolit si rytmus, který chce hrát, a aplikace poté sleduje, zda uživatel vede údery správným směrem. Uživatel je v případě chyby upozorněn pomocí haptické odezvy. Pomocí této aplikace byla změřena přesnost algoritmu. Během ověřování funkčnosti algoritmu byly upraveny některé jeho parametry. Mezní hodnota změny hladiny naměřeného zvuku byla snížena na  $2$  dBFS a mezní hodnota sledovaného úhlu na  $35^\circ$ . Po této úpravě byla přesnost algoritmu v tempu  $60$  BPM po  $200$  úderech  $100\%$ . Po zvýšení tempa na  $80$  BPM byla přesnost algoritmu při  $100$  úderech  $92\%$  (viz tabulka 15).

Po úpravách tedy detekuje algoritmus úder pokud:

- Naměřená hladina zvuku  $\geq -40$  dBFS.
- Změna hladiny úrovně zvuku je  $\geq 2$  dBFS.
- Hodinky jsou v průměru natočeny kolem osy  $x$  v úhlu  $\geq 35^\circ$ .
- Součet 20 uložení výstupů transformační funkce (4.5.2)  $\geq 1,1$ .

Dále:

- Směr úderu lze určit pomocí znaménka  $\omega_z$  (viz tabulka 10).
- Měření probíhalo s frekvencí  $120$  Hz.

Tempo	Počet úderů	Správně detekováno	Úspěšnost
60 BPM	200	200	100 %
80 BPM	100	92	92 %

Tabulka 15: Úspěšnost algoritmu

## 5.2 Diskuze

### 5.2.1 Omezení

Navržený algoritmus má několik omezení. Hlavním omezením je nízký vzorek sesbíraných dat. V rámci práce byla data pomocí chytrých hodinek sbírána ze hry jednoho konkrétního hráče. Jak bylo vysvětleno při analýze dat, naměřené hodnoty jsou silně závislé na poloze hodinek, jejich natočení a podobně. Vzhledem k tomu, že každý hráč na kytaru drží kytaru rozdílně, byla by data naměřená jiným hráčem zřejmě mírně odlišná. Stejně tak každý hráč hraje na kytaru rozdílně. U některých hráčů vychází pohyb ruky výhradně z lokte, zatímco u jiných může docházet k velmi výraznému pohybu v zápěstí. Všechny tyto skutečnosti mají za následek, že výsledný profil hraní projevený v datech se bude u každého hráče na kytaru lišit. Proto bylo během analýzy sledováno více veličin, aby byly tyto odlišnosti v hraní zachyceny. Přesto nelze vyloučit, že bude v případě hráčů s velmi specifickým způsobem hry algoritmus sledování rytmu méně přesný.

Experiment, navržený algoritmus i následně vyvinuta aplikace pracují s předpokladem, že hráč hraje na akustickou kytaru. Akustická kytara byla vybrána proto, že zvuk lze snímat přímo u ozvučného otvoru pomocí hodinek, neb toto je místo, kde u akustické kytary zvuk vniká. Nebylo tak potřeba kalibrovat a testovat další zařízení, jako je například zesilovač, které by dále ovlivnily naměřená data, zejména v oblasti zvuku. Aplikace tak není využitelná při hře na elektrickou kytaru.

Dalším omezením algoritmu je tempo. Sběr dat probíhal v tempu 80 BPM a výsledný algoritmus funguje nejlépe v tomto tempu, popřípadě v tempech pomalejších. Při rychlejších tempech dochází k zahlcení algoritmu, kdy algoritmus nestíhá detekovat všechny údery. Vzhledem k navržené povaze využití, tedy pro výuku začátečníků, není toto omezení fatální, ale pro využití v rychlejších tempech by bylo nutné algoritmus dále upravit.

### 5.2.2 Možnosti zlepšení

Navržený algoritmus by šlo vylepšit analýzou většího množství dat. Zejména s využitím dat o více hráčích, neboť by se tak projevily odlišnosti ve způsobu hraní, které by šlo do algoritmu zanést. Bylo by také vhodné zahrnout do experimentu i jiné druhy kytar, nikoliv pouze akustickou. Rozšířilo by se tak spektrum hráčů, kteří mohou aplikaci využít.

Další možností by bylo využití neuronové sítě. Pomocí navrženého experimentu by byla sesbírána data ze všech senzorů, která by sloužila k trénování této sítě. Výsledkem by pak byl model, který na základě vstupních parametrů (data ze senzorů) detekuje úder.

## 6 Závěr

Hlavním cílem práce bylo navrhnout postupy, jak analyzovat a využít data získaná pomocí chytrých hodinek při hře na kytaru.

V teoretické části práce práci byly nejdříve vysvětleny některé pojmy z hudební teorie. Dále byla z teoretického hlediska rozebrána technika hry na kytaru a důsledky použití těchto technik vzhledem k zaměření práce. Rozebrána byla také specifika jednotlivých druhů kytar a jejich dopad na možné použité techniky měření a sběru dat.

Nejprve byly diskutovány způsoby využití chytrých zařízení (telefonu a hodinek) při hře na kytaru a současný stav výzkumu této problematiky. Závěrem bylo, že v dnešní době nejsou chytré hodinky využívány při hře na kytaru v komerčních aplikacích. Současně bylo zjištěno, že výzkum v této oblasti zatím příliš neprobíhá. Chytré mobilní telefony, popřípadě tablety jsou dnes využívány zejména pro účely ladění, popřípadě jsou na ně vyvíjeny interaktivní výukové aplikace, které se zaměřují zejména na držení akordů a výuku písní. Jedním z cílů práce bylo navrhnout možné využití chytrých hodinek při hře na kytaru, které využije specifických vlastností tohoto zařízení, s důrazem na originalitu takového využití. Důraz byl kladen na to, aby sesbíraná data bylo možné využít v reálném čase při hře na kytaru a aby navrhované využití přinášelo nový pohled na využití chytrých zařízení při hře na kytaru. Bylo navrženo, že chytré hodinky by bylo vhodné využít pro kontrolu hraného rytmu (sekvence úderů). Takovéto využití by mohlo pomoci začátečnickům při výuce kytarových rytmů, což je jeden z nejčastěji se objevujících problémů.

Byl navržen experiment, jehož pomocí byla sesbírána data z různých senzorů hodinek. Konkrétně se jednalo o data z akcelerometru, gyroskopu a mikrofonu. V experimentu byla sbírána data při hraní několika základních kytarových rytmů na akustické kytáře, aby byla získána data co nejrozmantější. Jejich následnou analýzou byly určeny veličiny, které jsou důležité pro detekci hraného rytmu a byly nalezeny další parametry, které je třeba při hraní sledovat, aby nedocházelo k falešně pozitivním detekcím. Tyto parametry souvisejí například s polohou ruky, natočením hodinek a podobně.

Na základě provedených měření, analýzy a určení důležitých veličin byl navržen algoritmus, který dokáže rozpoznat/sledovat hraný rytmus. Funkčnost tohoto algoritmu byla matema-

ticky ověřena a dále demonstrována na jednoduché aplikaci určené pro chytré hodinky, ve které má uživatel možnost zvolit si rytmus, který chce na kytaru hrát, a v průběhu hraní dostává zpětnou vazbu o správnosti své hry.

V poslední části byla diskutována hlavní omezení navrženého algoritmu, popsána byla také jeho možná vylepšení.

## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1] ZENKL, Luděk. *ABC hudební nauky*. 8. vydání. Praha: Bärenreiter Praha, 2018. ISBN 978-80-86385-21-1.
- [2] MUSÍLEK, Jakub. Notové písmo. *Pianovka* [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <http://www.pianovka.cz/data/hn/not/psani-not.html>
- [3] SANDERCOE, Justin. How to read guitar TAB. Justin Guitar [online]. © 2021 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.justinguitar.com/guitar-lessons/how-to-read-guitar-tab-mt-202>
- [4] MUSÍLEK, Jakub. Takty základní a složené. *Pianovka* [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <http://www.pianovka.cz/data/hn/not/takty.html>
- [5] HEGLAS Lukáš. *Dějiny kytary* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2021-03-20]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta pedagogická. Plzeň, 2014 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/14972/1/Bakalarska%20prace%20-%20Dejiny%20kytary%20-%20Heglas.pdf>
- [6] BLÁHA, Vladislav. *Dějiny kytary: s přihlédnutím k literatuře nástroje*. Brno: Janáčkova akademie múzických umění v Brně, 2012. ISBN 978-80-7460-020-3.
- [7] SANDERCOE, Justin. The C chord. Justin Guitar [online]. © 2021 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.justinguitar.com/guitar-lessons/the-c-chord-bc-132>
- [8] Furch guitars [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupný na WWW: <https://furchguitars.com/cs/vlastnosti/rezonancni-desky-a-zebrovani/>
- [9] FEINBERG, Jack a Bingen YANG. Natural-frequency splitting of a guitar string caused by a non-uniform magnetic field. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2018, 144(5), EL460-EL464 [cit. 2022-03-08]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.5080465
- [10] FRENCH, Richard M. *Acoustic Guitar Design*. Cham: Springer, 2022. ISBN 978-3-030-89381-1.

- [11] DOENSEN, Pieter. *WATCH. History of the modern wrist watch*. Gent: Snoeck Ducaju & Zoon, 1994. ISBN 9789053491355.
- [12] Pebble smartwatch now shipping, but expect to wait a while for yours. *VentureBeat — Transformative tech coverage that matters* [online]. VentureBeat, 2013 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://venturebeat.com/2013/01/23/pebble-smartwatch-shipping/>
- [13] TAGHAVI, Sara, Fardjad DAVARI, Hadi Tabatabaee MALAZI a Ahmad ALI ABIN. Tennis stroke detection using inertial data of a smartwatch. In: *2019 9th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE)* [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 466-474 [cit. 2022-03-07]. ISBN 978-1-7281-5075-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICCKE48569.2019.8964775
- [14] DUBEY, Harishchandra, J. Cody GOLDBERG, Kunal MANKODIYA a Leslie MAHLER. A multi-smartwatch system for assessing speech characteristics of people with dysarthria in group settings. In: *2015 17th International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom)* [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 528-533 [cit. 2022-03-08]. ISBN 978-1-4673-8325-7. Dostupné z: doi:10.1109/HealthCom.2015.7454559
- [15] Getting Raw Accelerometer Events. *Apple Developer Documentation* [online]. Apple, 2021 [cit. 2021-11-1]. Dostupné z: [https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting\\_raw\\_accelerometer\\_events](https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting_raw_accelerometer_events)
- [16] MOSTAFA, Abeer, Toka BARGHASH, Asmaa ASSAF a Walid GOMAA. Multi-sensor Gait Analysis for Gender Recognition. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* [online]. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2020, 2020, s. 629-636 [cit. 2022-03-08]. ISBN 978-989-758-442-8. Dostupné z: doi:10.5220/0009792006290636
- [17] Getting Raw Gyroscope Events. *Apple Developer Documentation* [online]. © 2021 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: [https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting\\_raw\\_gyroscope\\_events](https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting_raw_gyroscope_events)
- [18] SMUTNÝ, Vladimír. *Robotika: Popis polohy tělesa* [online]. České vysoké učení technické v Praze [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/geometry-notecz.pdf>



- [19] Mimicking arm movement with a pan-and-tilt unit and Fit-bit. *Automate Everything* [online]. 2013 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://automateeverythingsite.wordpress.com/2019/03/13/mimicking-arm-movement-with-a-pan-and-tilt-unit-and-fitbit/>
- [20] WIRZ, Roland. *Get Rhythm* [online]. ETH Zürich, 2014 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://pub.tik.ee.ethz.ch/students/2014-FS/SA-2014-26.pdf>. ETH Zürich.
- [21] IZKOVSKY, R., Y. KAMINKA a Y. KAMINKA. *System and method for analyzing a digitalized musical performance*. USA. 9492756. Uděleno 14. 9. 2010.
- [22] Simply Guitar. *JoyTunes* [online]. © 2021 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.joytunes.com/>
- [23] Wristruments. *Indiegogo* [online]. © 2021 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.indiegogo.com/projects/wristruments/#/>
- [24] MEREDITH, David. *Computational music analysis*. Cham: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-25929-1.
- [25] LAROCHE, Jean. Efficient Tempo and Beat Tracking in Audio Recordings. *Journal of The Audio Engineering Society* [online]. 2003, (51), 226-233 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.ee.columbia.edu/~dpwe/papers/Laro03-beattrack.pdf>
- [26] MAELZEL, Johann N. *Instrument/Machine for the Improvement of all Musical Performance, called Metronome*. 3966. Uděleno 5. 12. 1815.
- [27] SANDERCOE, Justin. 5 hurdles every beginner guitar player faces - and how to avoid them. *Guita Techniques* [online]. Bath: Future Publishing Limited, 2020 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.guitarworld.com/features/5-hurdles-every-beginner-guitar-player-faces-and-how-to-avoid-them>
- [28] GRADY, Troy. Guitar Anatomy: Four Fundamental Movements Every Guitarist Should Know. *Guitar World* [online]. Bath: Future Publishing Limited, 2019 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.guitarworld.com/lessons/guitar-anatomy-four-fundamental-movements-every-guitarist-should-know>
- [29] O'NEIL, Cathy a Rachel SCHUTT. *Doing data science*. Sebastopol: O'Reilly, 2013. ISBN 978-1449358655.

- [30] Kytarový doprovod: Základní rytmy. *Klasická kytara* [online]. 2013 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://klasicka-kytara.cz/2013/12/kytarovy-doprovod-zaklani-rytmy/>

## Seznam obrázků

1	Trámec spojující dvě osminové noty [2] . . . . .	13
2	Pomocí ligatury jsou noty spojeny do celkové délky tří čtvrtových not [2] . . .	13
3	Ukázka zápisu pomocí tabulatury [3] . . . . .	14
4	Zápis taktů ve skladbě [4] . . . . .	14
5	Držení akordu C ve standardním ladění [7] . . . . .	16
6	Akustická kytara . . . . .	17
7	Ukázka složení jednocívkového snímače . . . . .	18
8	Pomyslné osy procházející hodinkami [16] . . . . .	21
9	Pomyslné osy procházející zařízením [17] . . . . .	22
10	Grafické znázornění Eulerových úhlů [18] . . . . .	23
11	Jednotlivá otočení ve vztahu k pomyslným osám hodinek [19] . . . . .	24
12	Kytarová klipová ladička . . . . .	25
13	Ukázka aplikace Guitar Tuna . . . . .	25
14	Simply Guitar - výuka písně pomocí tabulatury [22] . . . . .	26
15	Simply Guitar - výuka akordů [22] . . . . .	27
16	Ukázka zobrazení akordů v aplikaci Wristruments [23] . . . . .	27
17	Rozdílné držení kytary . . . . .	31
18	Rytmus 1 [30] . . . . .	37
19	Rytmus 2 [30] . . . . .	39
20	Rytmus 3 [30] . . . . .	41
21	Rytmus 4 [30] . . . . .	43
22	Rytmus 5 [30] . . . . .	45
23	Rytmus 6 [30] . . . . .	47
24	Sledované vektory ve vztahu k pohybu při hraní . . . . .	49
25	Průběh algoritmu detekce úderu . . . . .	58
26	Ukázky aplikace v níž byl algoritmus implementován . . . . .	59
27	Konečná podoba algoritmu v aplikaci . . . . .	61

## Seznam grafů

1	Změna úhlových rychlostí v rytmu 1 . . . . .	38
2	Změna akceleračního vektoru $\vec{a}_y$ v rytmu 1 . . . . .	39
3	Změna úhlových rychlostí v rytmu 2 . . . . .	40
4	Změna akceleračního vektoru $\vec{a}_y$ v rytmu 2 . . . . .	40
5	Změna úhlových rychlostí v rytmu 3 . . . . .	42
6	Změna akceleračního vektoru $\vec{a}_y$ v rytmu 3 . . . . .	42
7	Změna úhlových rychlostí v rytmu 4 . . . . .	44
8	Změna akceleračního vektoru $\vec{a}_y$ v rytmu 4 . . . . .	44
9	Změna úhlových rychlostí v rytmu 5 . . . . .	46
10	Změna akceleračního vektoru $\vec{a}_y$ v rytmu 5 . . . . .	46
11	Změna úhlových rychlostí v rytmu 6 . . . . .	47
12	Změna akceleračního vektoru $\vec{a}_y$ v rytmu 6 . . . . .	48
13	Změna úhlu <i>pitch</i> při hraní . . . . .	51
14	Naměřená hladina zvuku při pohybu ruky . . . . .	52
15	Naměřená hladina zvuku při hraní rytmu . . . . .	53

## Seznam tabulek

1	Shrnutí výhod a nevýhod použití kytar v experimentu . . . . .	19
2	Přehled zařízení a parametrů experimentu . . . . .	35
3	Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 1 . . . . .	37
4	Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 2 . . . . .	39
5	Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 3 . . . . .	41
6	Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 4 . . . . .	43
7	Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 5 . . . . .	45
8	Výsledky analýzy směrodatnou odchylkou pro rytmus 6 . . . . .	47
9	Shrnutí poznatků z experimentu . . . . .	54
10	Směr úderu zvhledem k umístění hodiněk a znaménku úhlové rychlosti otočení kolem osy $z$ . . . . .	57
11	Počáteční parametry algoritmu . . . . .	57
12	Výsledky algoritmu při použití aplikace v tempu 60 BPM . . . . .	60
13	Konečné výsledky algoritmu . . . . .	60
14	Konečné parametry algoritmu . . . . .	62
15	Úspěšnost algoritmu . . . . .	66