UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

VPLYV HAPTICKÉHO VEDENIA NA UČENIE RYTMICKÝCH SEKVENCIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Bratislava 2015 Bc. Matej Klobušník

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

VPLYV HAPTICKÉHO VEDENIA NA UČENIE RYTMICKÝCH SEKVENCIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program: Kognitívna veda (jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: 2503 Kognitívna veda
Školiace pracovisko: Katedra Aplikovanej Informatiky
Školiteľ: RNDr. Kristína Rebrová PhD.
Konzultant: RNDr. Kristína Rebrová PhD.

Bratislava 2015 **Bc. Matej Klobušník**

Čestné vyhlásenie

Čestne prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne s použitím uvedených zdrojov.

V Bratislave .....

Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Matej Klobušník
Študijný program: kognitívna veda (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: 9.2.11. kognitívna veda
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Vplyv haptického vedenia na učenie rytmických sekvencií
Effect of Haptic Guidance on Motor Learning of Rhythmic Sequences

Cieľ: 1. Prehľad problematiky motorického učenia rytmických sekvencií a haptického vedenia.
2. Vytvorenie klávesového zariadenia použiteľného na trénovanie rytmických sekvencií pomocou haptického vedenia.
3. Experimentálne overenie vplyvu haptického vedenia na učenie rytmických sekvencií.

Anotácia: Haptické vedenie je jednou z možností ako poskytnúť spätnú väzbu pri motorickom učení. Pri tejto paradigme je subjekt fyzicky vedený cez všetky štádia žiadaného pohybu pomocou hmatového rozhrania. Efektivitu tohto prístupu podporuje existencia takzvaných haptických rehabilitačných zariadení a taktiež doterajší výskum vplyvu haptického vedenia na učenie nových trajektórií a rytmických sekvencií. Cieľom diplomovej práce je naštudovanie problematiky motorického učenia rytmických sekvencií a haptického vedenia, navrhnutie a vytvorenie klávesového zariadenia použiteľného na trénovanie rytmických sekvencií pomocou haptického vedenia, a následné experimentálne overenie vplyvu haptického vedenia na učenie rytmických sekvencií.

Kľúčové slová: motorické učenie, haptické vedenie, rytmické sekvencie

Vedúci: RNDr. Kristína Rebrová, PhD.
Katedra: FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky
Vedúci katedry: prof. Ing. Igor Farkaš, PhD.

Dátum zadania: 26.10.2012

Dátum schválenia: 10.04.2014

prof. RNDr. Pavol Zlatoš, PhD.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

Poďakovanie

Táto práca by nevznikla bez neustálej podpory mojej priateľky Soničky, ktorá mi bola oporou počas celej doby tvorby. Taktiež ďakujem Milanovi Lajtošovi za pripomienky pri technickej realizácii, rodine za ich podporu a aj svojej školiteľke Kristíne Rebrovej za jej cenné rady, pomoc a trpezlivosť.

Abstrakt

Cieľom tejto práce je preskúmať vplyv haptického vedenia ako formy proprioreceptívnej spätnej väzby pri získavaní nových motorických zručností. Pri paradigme haptického vedenia je subjekt za pomoci haptického rozhrania fyzický vedený cez ideálnu trajektóriu učeného pohybu, čím dostáva proprioreceptívnú informáciu o želanej polohe kĺbov. Haptickým rozhraním používaným v tejto práci budú nami zostrojené haptické klávesy, kde sú prsty subjektu napevno spojené s klávesami, ktoré sa automaticky pohybujú podľa zadanej sekvencie spolu s pripevnenými prstami. Navrhli a vykonali sme tri experimenty, v ktorých sa hudobní začiatočníci učili rôzne hudobné sekvencie s variabilnou temporálnou, ordinálnou alebo oboma zložkami. V tréningovej fáze bola subjektu predstavená učená sekvencia pod jednou z týchto troch podmienok: audio, haptická alebo audio-haptická. Pri haptickej podmienke sú prsty pomocou haptických kláves vedené cez učenú sekvenciu, pri audio podmienke subjekt počúva audio nahrávku učenej sekvencie a pri audio-haptickej podmienke sú prítomné obidva spomenuté stimuly. Po tréningovej fáze nasledovala testovacia fáze, kde sú subjekty vyzvané k reprodukovaniu učenej sekvencie. Prvý experiment je zameraný na validáciu zostrojených haptických klávesov a na testovanie vplyvu haptického vedenia na ordinálnu zložku hudobnej sekvencie. Druhý experiment skúma pod vplyvom haptickej paradigmy učenie temporálnej zložky sekvencií, ktoré obsahujú zložitejšie rytmy. Sekvencie použité v treťom experimentu obsahujú rozdielne temporálne aj ordinálne zložky. Výsledok prvého experimentu ukazuje signifikantné zlepšenie v učení ordinálnych sekvencií pod audio-haptickou podmienkou. Tento výsledok je konzistentný so závermi predchádzajúcich štúdií, čím sa zároveň validuje naše zariadenie. Analýza dát druhého pokusu ukazuje pozitívny vplyv audio-haptickej podmienky pri sekvenciách s variabilnou temporálnou zložkou. Aj tretí experiment pri kombinovaných sekvenciách potvrdil efektivitu haptického vedenie tak na ordinálnu ako aj temporálnu zložku. Záver našej práce sa dá zhrnúť do tvrdenia, že použitie haptického vedenia pri učení sekvencií u hudobných začiatočníkov je efektívnejšie v porovnaní s použitím samostatnej audio podmienky.

Kľúčové slová: motorické učenie, haptické vedenie, rytmické sekvencie

Abstract

In this thesis we are investigating the effect of proprioceptive feedback on motor learning with haptic guidance. Subjects are physically guided through a haptic interface producing the ideal motion providing them with proprioceptive information about the required position of their joints. We have constructed an electronic haptic keyboard. Fingers of the user are firmly attached to the keys, which can be moved programmatically together with the fingers. We have conducted three experiments, where musically naive subjects learned rhythmic sequences with varying temporal, ordinal or both properties. In the training phase, three conditions were used to present the subjects with the target sequences, namely haptic, audio, and audio-haptic. In haptic condition subject fingers were physically moved through required sequence, during audio they listened to the recording of the sequence and in audio-haptic both stimuli were combined. During testing phase subjects were required to reproduce the target sequences. The first experiment was testing the effect of haptic guidance on the ordinal property and also used as a validation for our device. The second experiment was targeting temporal property of rhythmic sequences where timing performance on more difficult sequences was measured. The third experiment was focused on rhythmic sequences with varying temporal and ordinal property. Results of the first experiment have shown that the ordinal property was learned significantly better during the audio-haptic condition. This is consistent with previous studies and this validates our device. Results from the second experiment confirm that the haptic audio condition was better for learning the temporal aspects. In the third experiment, better performance has been reached in both sequence properties. Our results support that this form of haptic guidance is more effective for teaching musically naive subjects to perform new rhythmic sequences, when compared with audio-only learning.

Keywords: haptic guidance, rhytmic sequences, motor learning

Obsah

1 Úvod **7**

2 Prehľad **9**

2.1 Spätná väzba . . . 9
2.2 Motorické učenie . . . 10
2.3 Fyzické vedenie . . . 14
2.3.1 Haptická vedenie . . . 15
2.4 Zariadenia používané v procese rehabilitácie . . . 17
2.5 Hudba a kognitívna veda . . . 18
2.5.1 Kognitívna neuroveda hudby . . . 18
2.5.2 Hudobná pedagogika . . . 20
2.5.3 Hudba a haptické vedenie . . . 21

3 Haptické klávesy a software **26**

3.1 Požiadavky . . . 26
3.2 Design systému . . . 27
3.3 Prvé verzie hardvéru . . . 28
3.4 Opis hardvéru . . . 28
3.5 Opis softvéru . . . 32
3.6 Záznam a vyhodnocovanie dát . . . 37
3.6.1 Porovnávanie ordinálnej zložky . . . 37
3.6.2 Porovnávanie temporálnej zložky . . . 38
3.7 Limitácie . . . 39

4 Experimenty **40**

4.1 Experiment 1 . . . 40
4.1.1 Hypotéza . . . 41
4.1.2 Dizajn a štruktúra experimentu . . . 41
4.1.3 Trénovacie sekvencie . . . 42
4.1.4 Subjekty . . . 43
4.1.5 Trénovacie podmienky . . . 43

4.1.6 Priebeh experimentu 44
4.1.7 Výsledky a analýza 45
4.1.8 Zhrnutie a diskusia 47
4.2 Experiment 2 48
4.2.1 Hypotéza 49
4.2.2 Dizajn a štruktúra experimentu 49
4.2.3 Trénovacie sekvencie 50
4.2.4 Subjekty 51
4.2.5 Priebeh experimentu 51
4.2.6 Výsledky a analýza 52
4.2.7 Zhrnutie a diskusia 53
4.3 Experiment 3 54
4.3.1 Hypotézy 55
4.3.2 Štruktúra experimentu 55
4.3.3 Trénovacie sekvencie 56
4.3.4 Subjekty 57
4.3.5 Priebeh experimentu 57
4.3.6 Výsledky a analýza 58
4.3.7 Zhrnutie a diskusia 60

Záver **63**

Literatúra **64**

Príloha A **68**

Zoznam obrázkov

1 Príklad komerčného haptického zariadenia „Phantom premium“. V tomto prípade robotické rameno pohybuje prstom užívatela. 15
2 Haptické zariadenia, ktoré vytvoril Grindlay. (A) HAGUS. (B) FielDrum 22
3 Prototyp haptického zariadenia MaGKeyS Prototype, ktoré vytvoril Lewiston. (A) Pohľad na typickú konfiguráciu užívateľovej ruky počas testovania. (B) Fotografia zariadenia počas experimentu. 24
4 Ilustrácia používania haptické systému. Haptické klávesy s haptickým a zvukovým výstupom(1). Kryt (2), ktorý ma používateľovi zabrániť v získaní vizuálnej nápovedy. Monitor (3) zobrazuje informácie o prebiehajúcom experimente. 26
5 Blokový diagram hapticého systému 27
6 Schéma zapojenia hardvéru, ktorým kontrolujeme a zaznamenávame päť klávesov. Legenda: M- servomotor, D- LED dioda, Q- Foto-tranzistor, R- rezistor. 30
7 Ilustrácia pohybovania klávesu servomotorom a detekcie stlačenia. . . . 31
8 Pohľad zdola na haptické klávesy s detailom na Arduino. Legenda: Fotorezistor (1), Kláves (2), LED dióda (3), Servomotor(4). 31
9 Pohľad na haptický systém z pohľadu používateľa. Písmená označujú klávesy s haptickou funkcionalitou. 32
10 Obrazovka nastavení. Umožňuje nastavenie sekvencií, podmienok pre blok experimentu a poradie blokov v experimente 33
11 Načasovanie stlačenia. 1-Servomotor dostane signál na stlačenie klávesu. 2-Začiatok znenia 1. tónu. 3-Servomotor dostane signál pre uvoľnenie klávesu. Koniec znenia 1. tónu. 4- Servomotor je v základnej pozícií, dostane signál na ďalšie stlačenie. 5- Začiatok znenia 2. tónu. 34
12 Vývojová obrazovka na kalibráciu a testovanie presnosti servomotorov. 35
13 Obrazovka na zadanie nového subjektu a spustenie experimentu. 36

14 Výrezy z ozbrazoviek, ktoré vidí užívateľ počas priebehu experimentu. Najkôr je obrazovka neaktívna aby sa užívatel oboznámil s prostredím (A). Inštrukcie počas trénovacej fázý z haptickou (B), audio-haptickou (C), audio (D) podmienkou a počas testovacej fázy (E). 36
15 Obrazovaka na vyhodnocovanie a zobrazovanie výsledkov. 37
16 Schematické znázornenie prvého experimentu 42
17 Použité sekvencie v experimente 1 s konštantou temporálnou zložkou a variabilnou ordinálnou zložkou. 43
18 Priebeh priemernej chyby počas 25 pokusov pre testovacie podmienky A, H, AH. 46
19 Priemerná chyba pre testovacie podmienky A, H, AH pre prvých 15 pokusov a posledných 10 pokusov. 46
20 Schematické znázornenie druhého experimentu. 50
21 Použité sekvencie v experimente 2 s konštantou ordinálnou zložkou a variabilnou temporálnou zložkou. 51
22 Priebeh priemernej chyby počas 30 pokusov pre testovacie podmienky A,H,AH. 53
23 Priemerná chyba pre testovacie podmienky A,H,AH pre prvých 15 pokusov a posledných 15 pokusov. 53
24 Schematické znázornenie experimentu 3. 56
25 Použité sekvencie v experimente 3 s variabilnou ordinálnou a temporálnou zložkou. Sekvencie sa skladajú z poradia troch tónov a to D4 označeného D, ktorý je stláčaný ukazovákom, E4 (E)tónu pre prostredník a F4 (F) stláčaný prstenníkom. Z pohľadu rytmiky sa v sekvencii vyskytujú tri dĺžky tónov o trvaní 250 ms, 500 ms a 750 ms, označené sú na obrázku daným číslom bez jednotky. 57
26 Priebeh priemernej temporálnej chyby počas 30 pokusov pre testovacie podmienky A,H,AH. 58
27 Priebeh priemernej temporálnej chyby počas 30 pokusov pre testovacie podmienky A,H,AH. 59

28 Priemerná ordinálne chyba pre testovacie podmienky A,H,AH pre prvých 15 pokusov a posledných 15 pokusov. 59

29 Priemerná temporálnej chyba pre testovacie podmienky A,H,AH pre prvých 15 pokusov a posledných 15 pokusov. 60

Zoznam algoritmov

3.1 Pseudokód pre algoritmus na výpočet Levenshteinovej vzdialenosti . . . 38

3.2 Pseudokód pre algoritmus na výpočet rytmickej vzdialenosti 39

1 Úvod

Hra na hudobný nástroj je komplexný proces zahŕňajúci koordináciu viacerých oblastí mozgu. Človek okrem analýzy sekvencie z hľadiska rytmiky a poradia tónov musí vykonávať aj komplexné pohyby závislé od druhu hudobného nástroja, pri ktorých je dôležitá nielen trajektória, ale aj správane načasovanie vykonávaného pohybu. Výučba hry na hudobný nástroj je dlhodobý proces, ktorého úspešnosť závisí od mnohých faktorov, pričom jedným z nich je efektivita a periodicita tréningov. Dôležitú úlohu v tréningovom procese hrá učiteľ, ktorý vedie žiaka správnym poradím výučbových fáz a poskytuje žiakovi spätnú väzbu. Najčastejšou formou spätnej väzby je verbálna, pri ktorej učiteľ slovne zhodnotí úspešnosť prevedenia, avšak stretávame sa aj inou, napr. fyzickou prezentáciou požadovaného pohybu. Z praktických dôvodov je však učiteľ prítomný iba počas malej časti procesu učenia a preto je dôležité aby tréningy, kde žiak cvičí samostatne prebiehali často a metodologicky správne.

V súčasnej dobe kedy dochádza k automatizácií v mnohých oblastiach ľudskej činnosti sa vynára otázka, či technológie nemôžu priniesť nové formy učenia a rozšíriť tak portfólio učiacich nástrojov, ktoré by zefektívnili tento proces. Haptické vedenie je forma motorického učenia, kde pomocou hmatového rozhrania je subjekt fyzicky vedený cez trajektóriu žiadaného pohybu. V reálnej aplikácií by bolo pre učiteľa veľmi obtiažne opakovane viesť žiaka cez požadované pohyby, avšak existujúce haptické zariadenia ukazujú efektívnosť tejto metódy, či už pri rehabilitácií [3], učení nových motorických sekvencií [20, 13] alebo 3D trajektórií[8]. Myslíme si, že zariadenia poskytujúce haptické vedenie sú ideálnym príkladom, kde kombinácia technológie a automatizácie prináša nové možnosti v oblastiach výučby motorických zručností.

Hudobné nástroje implementujúce haptické vedenie, ktoré boli použité v prácach [20, 13], sú našou hlavnou inšpiráciou pri konštrukcii klávesového zariadenia s haptickou spätnou väzbou, tzv. *haptické klávesy*. Toto zaradenie má byť schopné pohybovať prstami používateľa podľa požadovanej hudobnej sekvencie a otestovať na ňom vplyv haptického vedenia na učenie nových motorických sekvencií. Lewiston [20] s podobným zariadením vykonal viaceré experimenty na overenie efektivity haptického vedenia, pričom pri niektorých experimentoch zaznamenal konfliktné výsledky. Jeden z vykonaných experimentov bude navrhnutý na validáciu zostrojených haptických klávesov. V ďalších

experimentoch chceme implementovať zmeny v návrhu Lewistonových experimentov, od ktorých očakávanie riešenie ním popísaných problémov.

Práca je členená na tri kapitoly. V prvej kapitole sa venujeme teoretickému prehľadu motorického učenia, pričom budú spomenuté najdôležitejšie teórie venujúce sa učeniu a nadobúdaniu nových motorických zručností. Prvá kapitola sa potom zameriava na priblíženie oblastí haptického vedenia, učenia rytmických sekvencií a použitie haptického vedenia pri rehabilitácií a výučbe nových pohybov. Záver prvej kapitoly je venovaný implementácií dvoch takýchto haptických zariadení pri výučbe hry na hudobný nástroj. Druhá kapitola sa venuje popisu nášho vytvoreného haptického zariadenia. Okrem popísania procesu konštrukcie takýchto haptických klávesov, sa v tejto kapitole nachádzajú detailné fotografie zariadenia aj s popisom použitých komponentov. Neskôr v kapitole nachádzame popis aplikácie, ktorá plní niekoľko funkcií a medzi najdôležitejšie patrí nastavenie experimentov, získanie dát z experimentov a ich následná analýza. Posledná tretia kapitola sa venuje trom experimentov, ktorých cieľom je overenie efektivity haptického vedenia. Každý experiment začína krátkym úvodom, kde sa snažíme zdôvodniť opodstatnenosť návrhu daného experimentu. Okrem detailného popisu použitej metodológie a priebehu, obsahuje každý experiment analýzu nameraných dát a diskusiu k dosiahnutým záverom.

2 Prehľad

Táto kapitola je venovaná zhrnutiu poznatkov z oblasti výskumu nadobúdania nových motorických schopností, vplyvu spätnej väzby a začlenenie rôznych haptických rozhraní do procesu učenia a rehabilitácie.

Schmidt definoval oblasť „motor control“ ako štúdium neurálnych, fyzických a behaviorálnych aspektov vykonávania pohybu, pričom v oblasti tzv. „motor learning“ sa štúdium zameriava na získanie a ukotvenie konkrétneho pohybu ako výsledok tréningového procesu [31].

2.1 Spätná väzba

V širokom význame slova sa pod *spätnou väzbou* rozumie akákoľvek zmyslová informácia súvisiaca s vykonávaným pohybom. Spätná väzba má počas učiaceho sa procesu nezastupiteľnú úlohu, pretože subjekt na základe nej vyhodnocuje kvalitu výkonu daného pohybu a je teda hnacím prostriedkom v zdokonaľovaní sa počas tréningu. Spätná väzba je rozdelená do dvoch hlavných kategórií [31]: vnútorná (intrinsic) a vonkajšia (extrinsic). Pod vnútornou spätnou väzbou rozumieme vyhodnocovanie na základe signálov z receptorov. Zdrojom tejto spätnej väzby sú vizuálne, zvukové a proprioreceptné signály. Táto forma spätnej väzby nám neprináša informáciu o kvalite vykonávaných pohybov. Do kategórie rozšírenej,vonkajšej spätnej väzby zaraďujeme informácie o kvalite výkonu poskytnuté iným, externým objektom, napríklad učiteľom rôznej časovej následnosti vzhľadom k vykonávanej úlohe. Najvýznamnejším typom vonkajšej spätnej väzby je verbálna spätná väzba, ktorá sa delí na dve podkategórie: informácia o výsledku (knowledge of result - KR) alebo informácia o kvalite výkonu (knowledge of performance - KP). KR sa sústreďuje na vyhodnocovanie zadaných cieľov identifikovaných v učiacom procese a KP ohodnocuje kvalitu konkrétne vykonávaných pohybov. Pri jednoduchej simulácii žiaka, učiteľa a hry na klavíri, ak učiteľ povie žiakovi: „Ani jednu notu si nezahral dobre“, tak túto spätnú väzbu zaradíme do KR kategórie, avšak ak ho napomenie: „Každý tón C si zahral ako tón D“ tak táto informácia spadá do kategórie KP. Ďalšie faktory úzko súvisiace so spätnou väzbou sú frekvencia spätnej väzby a zložitosť trénovaného pohybu. Hagman [14] ukázal, že učenie sa s nízkou frekvenciou

KR spätnej väzby prináša horšie výsledky vo výkone a prevedení, ale je efektívnejšia v zachovaní, zapamätaní si daného pohybu. Naopak príliš častá KR spätná väzba vykazuje úspešnejšie prevedenie počas tréningu, ale horšie zapamätanie daného pohyb po skončení tréningu. Autori [30] predložili hypotézu, ktorá tvrdila, že vonkajšia spätná väzba KR síce pomáha znižovať chybovosť v tréningovom procese a zlepšovať prevedenie úlohy v po sebe nasledujúcich pokusoch, avšak v z hľadiska dlhodobého pamätania si je kontraproduktívna, pretože kladie prekážky kódovaniu, zapamätaniu si daného pohybu, ktoré nastáva v čase medzi tréningami. Jedným z riešením tohto paradoxného javu je stratégia „slabnúcej“ spätnej väzby, kedy sa frekvencia KR znižuje počas trvania tréningového procesu. Ďalším významným faktorom ovplyvňujúcim efektivitu poskytovanej vonkajšej spätnej väzby je zložitosť pohybu. Optimálna KR spätná väzba pre relatívne jednoduché pohyby resp. úlohy je efektívna keď je prezentovaná po väčšom počte pokusov (niektoré štúdie uvádzajú až 15) a pri náročných, komplexných úlohách má KR zmysel už po jednom pokuse. Čo sa týka KP formy spätnej väzby, tak štúdie skúmajú fyzické vedenie (guidance) ako formy konkurentnej KP. Úlohy jednoduchého charakteru nepreukázali prospešnosť fyzického vedenia [38], avšak významné zlepšenie sa dokázali v štúdiach zameraných na výskum učenia sa komplexnejších pohybov a úloh [37].

2.2 Motorické učenie

V 20 storočí nastal významný progres v štúdiu učenia sa nových motorických schopností, tak ako na fyziologickej, tak aj na konceptuálnej úrovni. Prominentný posun nastal obzvlášť po pokroku v zobrazovacích metódach ako funkčná magnetická rezonancia (fMRI), čo umožnilo praktické testovanie mnohých abstraktných teórií z oblasti motorického učenia.

Jednu z prvých teórií získavania motorických zručností je Fittsova teória [10], ktorá identifikuje tri hlavné fázy v procese učenia sa: kognitívnu, asociatívnu a autonómnu fázu.

V kognitívnej fáze sa učiaci subjekt oboznamuje s povahou vyžadovaného pohybu a taktiež vyhodnocuje ako daný pohyb motoricky vykonať. Táto fáza je v literatúre označovaná ako prieskumná fáza, kedy subjekt získava novú motorickú schopnosť, pop-

rípade minimálne informáciou o tom ako ju vykonať. Navyše, toto je fáza, kedy kvalita a kvantita tréningu významne prispievajú k tomu, ako rýchlo si subjekt osvojí daný pohyb.

V asociatívnej fáze, ktorá trvá podstatne dlhšie ako kognitívna fáza, si subjekt zdokonaľuje daný pohyb. Vykonanie daného pohyby sa stáva plynulejším a taktiež si subjekt pre neho vytvára efektívnu stratégiu vykonávania.

V autonómnej fáze už subjekt časom vykonáva dané pohyby samostatne a nevyžadujú sa také zdroje pozornosti a sústredenia sa ako v predchádzajúcich fázach. Táto fáza trvá dlhšie časové obdobie, od niekoľkých mesiacov až po roky.

Ďalšou z ranných teórii motorického učenia je Adamsova teória: Closed-loop theory of motor learning (teória motorického učenia s uzavretou slučkou) [2]. Táto teória predpokladá, že učenie konkrétneho pohybu pozostáva z dvoch pamäťových stavov: pamäťová stopa (memory trace) a percepčná stopa (perceptual trace). Dochádza k neustálemu porovnávaniu aferentných informácií o vykonávanom pohybe s uloženým „korektným obrazom“ daného pohybu. Prvý stav pohybu, pamäťová stopa inicializuje daný pohyb, vyberá začiatočný smer a je zodpovedná za prvotné časti daného pohybu. Táto pamäťová stopa sa posilňuje tréningom a relevantnou spätnou väzbou. Druhý stav pohybu, percepčná stopa (podobné rozpoznávacej pamäti vo verbálnom učení) je zodpovedná za riadenie končatiny cez správnu trajektóriu daného pohybu. Táto stopa sa formuje na základe minulých pohybov, kedy subjekt dostával spätnú väzbu o správnom alebo neprávnom umiestnení končatiny v danom čase a teda si postupne vytváral interný obraz korektného pohybu. Pri ďalšom vykonávaní daného pohybu sa aktuálne prichádzajúca spätná väzba porovnáva s touto stopu, vyhodnocuje sa miera korektnosti daného pohybu a na základe toho sa poloha končatiny upravuje do želanej polohy.

Okrem tejto „closed-loop“ teórie, kde je tvarovanie, dolaďovanie pohybu zabezpečené pomocou spätnej väzby existujú aj „open-loop“ teórie, pre ktoré neexistuje spätná väzba a kde pohyb je vykonávaný na základe motorického programu, ktorý sa vyskladá zo sady motorických príkazov pre daný pohyb, ktoré sú uložené v centrálnom nervovom systéme (CNS). Príkladom je Keeleho teória[16].

Negatívom týchto teórií je mapovanie konkrétneho pohybu na jemu prislúchajúce

pamäťové a percepčné stopy, často uvádzané ako one to one mapping pri Adamsovej teórií, alebo uloženie sady motorických príkazov pre každý pohyb pri Keeleho teórií. Z toho následne plynú veľké pamäťové požiadavky na CNS. Navyše tieto teórie dostatočne nevysvetľujú ako sa objekt učí nové pohyby a ako je prvotná percepčná stopa formovaná alebo ako sú získané motorické príkazy.

Najdôležitejší teórií motorického učenia je Schmidtova schematická teória. [32]. Vychádza z predpokladu, že v CNS sú uložené pravidlá pre danú skupinu pohybov, ktoré určujú aké konkrétne pohybové príkazy, pri ktorých zmyslových vstupov a za akého konkrétneho stavu prostredia sa vykonajú na dosiahnutie želaného motorického výsledku.

Schéma je v tejto teórií ako súbor pravidiel, ktoré skôr reprezentujú vzťahy medzi veličinami čo je rozdiel v porovnaní s absolútnymi hodnotami týchto veličín v Adamsovej teórií. V jeho návrhu schémy sa nachádzali 2 stavy pamäte, podobné tým v Adamsovej teórií a to rozpamätávajúca pamäť (recall memory) a rozpoznávacia pamäť (recognition memory).

Rozpamätávajúca pamäť je zodpovedná za vykonávanie pohybu a rozpoznávacia pamäť je zodpovedná za vyhodnocovanie pohybu. Schmidt predstavil ideu všeobecného motorického programu (general motor program), ktorý zodpovedá schematickému plánu pre vykonanie pohybu.

Vykonávaný všeobecný motorický program závisí od 4 druhov informácií uložených v krátkodobej pamäti a to:

1. informácie o počiatočných odmienkach pred vykonávaním pohybu (poloha končatín, veľkosť, váha objektu)

2. parametre ktoré sú pripísané všeobecnému motorickému programu (sila, čas)

3. vonkajšia spätná väzba počas vykonávania pohybu

4. spätná väzba zo senzorov

Učenie nového pohybu teda zodpovedá vývoju rozpamätávajúcej and rozpoznávacej pamäti. Po každom vykonaní pohybu sa nastavujú, prispôsobujú parametre danej schémy a informácie z rôznych zdrojov uložené v krátkodobej pamäti sú zmazané a

jediné čo zostáva a uchováva sa je schéma pre daný pohyb. Keďže sa ukladajú iba všeobecné pravidlá rieši sa problém kapacity pamäťového miesta a navyše sa poskytuje priestor na učenie sa nových pohybov v tých kategóriach pohybov, pre ktoré schémy existujú. Schmidt navyše predpokladal, že schémy budú silnejšie ak je počas učenie vykonávaných širšie spektrum pohybov, pretože uchovávaná schéma potom poskytuje väčšiu variabilitu pre učenie sa nových pohybov.

Predchádzajúce teórie majú spoločné charakteristiky v centralistickej reprezentácií daného pohybu uloženého buď ako presný postup jeho vykonávania, poprípade jeho zovšeobecnenú schéma v CNS. Na opačnej strane tejto skupiny teoretických modelov stojí ekologický prístup (ecological approach), ktorý je nazývaný aj „teória akcií“ (action theory) alebo dynamických systémov (dynamical systems) [22]. Tento prístup má základ v predpoklade, že kinematika pohybov nie je ukladaná centrálne ale vzniká ako emergentná vlasnosť dynamiky motorického systému.

Prvá práca siaha do roku 1967, kedy Bernstein [5] charakterizoval učenie sa ako opakované hľadanie riešenia problému, pod ktorým máme na mysli vykonanie pohybu, ako vykonávanie nejakého programu krokov uloženého v CNC. Druhá významná publikácia, ktorá prispela k formovaniu ekologického prístupu, pochádza od psychológa Gibsona [11], ktorý opísal dynamický systém v oblasti vizuálnej percepcie a pomohol definovať informačné pravidlá získavané z prostredia. Pri ekologickom prístupe vystupuje do popredia samoorganizácia jednolivých systémov (svaly, pohybový aparát, CNS) a ich funkčné kooperovanie, aby splnili požiadavky okolia. Pohybov potom vzniká ako funkcia, kde vstupnou hodnotou sú neustále meniace sa obmedzenia ktoré sú na objekt vykonávajúci pohyb kladené. Obmedzenia limitujú schopnosti jednotlivca a Nowell [22] ich rozdelil do troch kategórií.

1. štrukturálne a funkčné: tvar tela, hmotnosť, výška, emocionálna stabilita
2. environmentálne: gravitácia, teplota, vietor
3. obmedzenia týkajúce sa daného pohybu

Upustenie z reprezentacionalizmu a rozvoj ekologického prístupu a nenastal len v motorickej oblasti, ale táto zmena je pozorovateľná v celom spektre kognitívnych vied. Jedna z otázok, ktorými sa ekologický zaoberá je výmena informácií. Kým v predchá-

dzajúcich reprezentacionistických teóriách je interná reprezentácia informácie prenášaná od odosielateľa k prijímateľovi, tak v ekologickom prístupe informácia ako niečo uchopiteľné neexistuje. Informácia je chápaná ako štrukturálna, vnútorná väzba v rámci jedného organizmu a výmena tejto väzby je uskutočnená cez vzájomné prepojenie odosielateľa a prijímateľa nejakým médiom (vzájomná blízkosť, elektronická komunikácia) a výsledkom je vytvorenie si jemu vlastnej vnútornej, štrukturálnej väzby. Informácia neexistuje ako samostatná entita, ale je vždy spätá s daným subjektom.

Nowell [22] navyše špecifickejšie definuje význam informácie (komunikačný prostriedok) pri učení nového pohybu, ako prostriedok mapovania dynamiky a informácie daného pohybu do perceptuálno-motorického pracovného priestoru. Nowell ponúka teóriu, že jednak zdroje o invariantných vlastnostiach prostredia a taktiež doplňujúce (augmented) informácie sú dostupné v perceptuálno-motorickom priestore a využívané na hľadanie optimálneho riešenia pri konkrétne vykonávajúcom sa úkole. Na tomto mieste vstupuje použitie externého zariadenia, v našom prípade haptického, ako možnosť poskytovania rozšírených informácií.

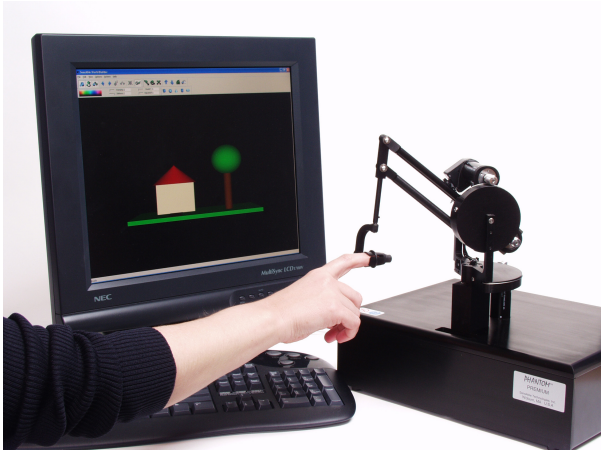
2.3 Fyzické vedenie

Pojem *fyzické vedenie* (physical guidance) je používaný v literatúre na pomenovanie niekoľkých foriem vonkajšej spätnej väzby a to hlavne *vedenie s obmedzením pohybu* (constrain-based guidance - CBG) a *haptické vedenie* (haptic guidance). Pod definíciou CBG si môžme predstaviť formu spätnej väzby bežiacu súbežne s vykonávaním daného pohybu, kedy má objekt kontrolu nad pohybom, avšak je priestorovo, poprípade časovo obmedzený. Jedna z najvýznamnejších štúdií [15] skúmala akým spôsobom sa vysporiada skupina účastníkov so zaviazanými očami s úlohou premiestniť gombík po tyči v dĺžke presne o 15cm. Účastníci boli rozdelení do skupín a každá skupina sa testovala s inou formou spätnej väzby, pričom jedna skupina bola kontrolná a nedostala žiadnu dodatočnú radu, informáciu. Najdôležitejšie formy spätnej väzby boli KR, CBG a haptické vedenie. Pri KR dostávala prvá skupina KR informáciu typu „správne-nesprávne“ a ďalšia skupina dostávala detailnejšiu formu KR ktorá obsahovala aj údaje o veľkosti a smere chyby. Pri CBG bola v dĺžke 15 cm namontovaná prekážka, teda účastníci vedeli kedy by mal pohyb končiť. Pri haptickom vedení boli účastníci v danej skupine

po celú dobu vedení po ideálnej trajektórii presunu gombíka pomocou struny, ktorá kopírovala ideálny pohyb končatiny. Všetky formy spätnej väzby preukázali zlepšenie oproti kontrolnej skupine, navyše najvýraznejší prínos sa vyskytol pri CBG. Táto, aj nasledujúce štúdie však potvrdzujú zaujímavý fakt o vedení s obmedzením pohybu, kedy častý tréning s prílišnými obmedzeniami pôsobil degradačne z pohľadu dlhodobého zapamätania pohybu.

2.3.1 Haptická vedenie

Pojem haptické vedenie (haptic guidance) s je vo vedeckej literatúre používaný vo viacerých významoch a preto, aby sa zabránilo pomýleniu je potrebné ho jasne definovať. My používame rovnakú definíciu ako Feygin [8]. Haptické vedenie označuje ako paradigmu, kde je subjekt fyzicky vedený pomocou haptického rozhrania cez všetky štádia učeného pohybu. Subjekt takto dostáva informáciu o trajektórií pohybu a jeho dynamike v propriocepčnej modalite.



Obr. 1: Príklad komerčného haptického zariadenia „Phantom premium“. V tomto prípade robotické rameno pohybuje prstom užívatela.

Túto definíciu haptického vedenia používajú aj ďalšie štúdie zamerané na štúdium haptické vedenia a učenia rytmických sekvencií. [20, 13]. Kedže v kontexte našej práce je haptické vedenie použité ako vonkajšia spätná väzba v procese učenia, budeme haptickému vedeniu hovoriť haptická spätná väzba.

Väčšina skorších výskumov sa zaoberala vplyvom haptického vedenia na jednoduchý lineárny pohyb. Prvá štúdia ktorá rozoberala vplyv nielen haptického vedenia, ale aj KP

spätnú väzbu na komplexný pohyb ramena bola práca Armstronga a kol. [4]. Výsledkom práce bolo zlepšenie pri haptickom vedení a súbežnej KP spätnej väzbe, avšak pri retenčných testoch mala najlepšie skóre KP spätná väzba, ktorá bola dodaná na konci tréningu.

Ďalšou z ranných štúdií skúmajúca vplyv haptického vedenia na výsledok tréningu bola práca Gillespieho a kol. [12], ktorý zostavil systém nazývajúci *Virtual teacher*. Toto zariadenie demonštrovalo subjektom ideálnu stratégiu čo najrýchlejšieho zastavenia pohybujúceho sa kyvadla. Kontrolnú skupinu tvorili subjekty, ktoré sa dynamiku ideálnej stratégie snažili naučiť, bez demonštrácie. Autori v tejto štúdii nepozorovali žiadne výrazné zlepšenie pri skupine, ktorá používala nástroj Virtual teacher, čo pripisujú príliš náročnej optimálnej stratégii a predpokladajú, že efektívnejšie by bolo, keby Virtual teacher demonštroval nie optimálnu stratégiu ako celok, ale po častiach iba jej komponenty.

Nasledujúce štúdie porovnávali vplyv haptického vedenia s vizuálnou spätnou väzbou. Feygin a kol. [8] skúmal efektivitu učenia komplexných 3D priestorových trajektórií pod rôznymi typmi spätnej väzby (haptická, vizuálna, hapticko-vizuálna). V tréningovej fáze boli subjektom prezentované trajektórie v rôznych experimentálnych podmienkach. V testovacej fáze mali dané pohyby reprodukovať buď zo zaviazanými očami, to znamená bez vizuálneho stimulu alebo s vizuálnym stimulom. Jeden pokus pozostával z 2 prezentácií trajektórie a následnej reprodukcie, pričom dokopy subjekt absolvoval 15 pokusov. Korektnosť vykonania daného pohybu sa merala pomocou viacerých nezávislých ukazovateľov, a to presnosť kopírovania učenej trajektórie, presnosť začiatočnej a konečnej polohy a temporálna presnosť (načasovanie kreslenia učenej trajektórie). Výsledkom bolo, že vizuálna spätná väzba bola výrazne efektívnejšia v zmysle učenia priestorového tvaru danej trajektórie, avšak haptické vedenie pomohlo subjektom s temporálnym aspektom vykonávanéj 3D trajektórie. Na tomto mieste by sme radi dodali, že aj záver tejto prvej komplexnejšej štúdie skúmajúcej vplyv haptického vedenia na učenie nových pohybov nás motivoval k nášmu experimentu v oblasti učenia sa hry na klávesový nástroj. Práve hra na hudobný nástroj je vhodná oblasť na skúmanie temporálnej, časovej zložky učeneného pohybu, keďže sekvencia nie je daná len poradím tónov ale aj rytmikou.

Na túto štúdiu neskôr nadviazal podobným experimentom Liu a kol. [21] ktorého pohyby však boli menej komplexné a boli blízke pohybom, ktoré vidíme z rehabilitačných cvičení. Prvou zmenou oproti Feyginovmu nastaveniu experimentov bolo, že jeho pokus obsahoval až 7 trénovacích fáz nasledovaných siedmimi testovacími kolami. To mu umožnilo sledovať vplyv dlhšej opakovanej trénovacej fázy. Druhou zmenou bolo, že autor nesledoval vplyv samostatného haptického vedenia a teda mal iba vizuálne a vizuálno-haptické trénovacie podmienky a taktiež v testovacom prostredí testoval subjekty iba za vizuálnej podmienky. Všetky trénovacie prostredia a podmienky preukázali zlepšenie medzi prvým a posledným pokusom, avšak nepreukázalo sa zlepšenie pri použití haptického vedenia s vizuálnou spätnou väzbou (dokonca iba samostatné vizuálne vedenie dávalo o niečo lepšie výsledky).

Výsledky predchádzajúcich dvoch štúdií môžme zhrnúť do záveru, že haptická spätná väzba sa nepreukázala ako efektívny nástroj z pohľadu učenia sa trajektórií daného pohybu, nakoľko vizuálna spätná väzba dominuje nad haptickým vnemom, ktorý oproti vizuálnemu systému neposkytuje dodatočnú informáciu o tvare trajektórie. Problémom môžu byť príliš zložité 3D trajektórie, ktoré štúdie zvolili na testovanie prínosu haptického vedenia. Na druhej strane však preukázali výhody pri zameraní sa na temporálne zložku vykonávaného pohybu.

2.4 Zariadenia používané v procese rehabilitácie

V tejto časti sa budeme venovať rehabilitáciám končatín, kde bolo významne integrované použitie haptických robotických zariadení do celkového procesu.Počas posledného desaťročia môžeme vidieť rozvoj v oblasti rehabilitačnej techniky uľahčujúcej znovuzískanie stratených motorických zručností hlavne pri pacientoch po mozgovej porážke. Základným fyzickým zariadením vo vývoji rehabilitačných pomôcok sú robotické ruky z dvoma stupňami voľnosti (2-DOF).

Prvým význačným robotickým rehabilitačným zariadením bol MIT-MANUS, 2-DOF robotická ruka, vyvinutá Hganomet a kol. na MIT [3]. Prístroj bol overený v niekoľkých štúdiách na hemiparetických pacientoch, t.j. na pacientoch, ktorým buď ochabla alebo ochrnula jedna časť tela po mozgovej porážke [18, 35, 34, 7]. Pacienti boli rozdelení do dvoch skupín, pričom jedna podstupovala rehabilitáciu lakťa a ra-

mena za účasti MIT-MANUSU a druhá kontrolná skupina dostávala falošnú robotickú rehabilitáciu. Výsledkom je signifikantné zlepšenie pri MIT-MANUSE, dokonca tieto zlepšenie boli viditeľné aj po dlhšej dobe, čo dokazuje štúdia sledujúca rozdiely medzi týmito dvoma skupina po 3 rokoch [36]. Závery týchto komplexných štúdií rozpútali vlnu návrhu nových haptických robotov na rehabilitáciu lakťa a ramena.

Ďalším prirodzeným krokom bol vývoj rehabilitačných zariadení pre ruku a zápästie, MIT-MANUS skupina používala zariadenie s troma stupňami voľnosti (3-DOF), ktoré simulovala všetky tri úrovne pohybu zápästia [27, 6]. Klinické štúdie znova preukázali signifikantné zlepšenie a urýchlenie rehabilitačného procesu. The Haptic Knob [19] je rehabilitačné 2-DOF robotické zariadenie ruky, ktoré je schopné adaptácie na rôznu veľkosť ruky a je schopná sa preškoliť na rehabilitáciu rôznych funkcií ruky, od otvárania a zatvárania dlane, zvieranie a uchopenie predmetov, až po rotáciu zápästia. Posledným zariadením je HWARD [33], ktoré je 3-DOF robotické zariadenia dovoľujúce rehabilitáciu prstov na ruke. Štúdia vykonaná Takahashim [33] skúmala nielen vplyv zariadenia na zlepšenie motoriky prstov, ale taktiež aj vzťah medzi množstvom vykonanej rehabilitácie za pomoci HWARD. Výsledkom je znova výrazné zlepšenie a najvyššie pokroky sú viditeľné pri skupine s najvyššou dávkou rehabilitácie.

2.5 Hudba a kognitívna veda

Hudba predstavuje bohatý zdroj na skúmanie rôznych procesov odohrávajúcich sa v mozgu cez vnímanie, pamäť, emócie a je vhodným nástrojom na štúdium komplexných motorických funkcií akým je aj schopnosť vnímať a reprodukovať hudobnú rytmickú sekvencii. Rytmickú sekvenciu môžeme rozdeliť na temporálnu a ordinálnu zložku. Temporálna zložka rytmickej sekvencie je dĺžka intervalu medzi nasledujúcimi tónmi. Učenie dĺžky intervalov budeme nazývať ako *temporálne učenie*. Ordinálna zložka je poradie tónov v rytmickej sekvencii. Učenie poradia tónov budeme nazývať *ordinálne učenie*.

2.5.1 Kognitívna neuroveda hudby

Hra na hudobný nástroj zahŕňa spojenie troch elementárnych motorických funkcií a to vnímanie poradia tónov (ordinálnej zložky), rytmiky sekvencie(temporálnej zložky)

a priestorovej organizácie pohybov tela. Mnoho odborných prác je venovaných oddelenému štúdiu týmto funkcií a ich neurálnym mechanizmom, ako aj ich kombinovanej interakcii pri tvorbe komplexného hudobného prevedenia.

Sakai, Ramnani a Passigham [29] sa snažili identifikovať oblasti mozgu, ktoré sú zodpovedné za ordinálne a temporálne učenie. Randomizáciou ordinálnej a temporálnej zložky vytvorili množiny sekvencií, ktoré boli nezávisle zamerané na tieto dve zložky. Pomocou pozitrónovej emisnej tomografie (PET) identifikovali aktiváciu v rôznych oblastiach mozgu pri ordinálnom a temporálnom učení. Konkrétne učenie poradia prstov bolo asociované so zvýšenou aktivitou v pravej intraparietálnej brázde (intraparietal sulcus) a v mediálnom parietálnom kortexe (medial parietal cortex), učenie temporálnych vlasností bolo asociované so zvýšenou aktivitou v laterálnom mozočku (lateral cerebellum). Pri učení sekvencií, ktoré obsahovali obidve zložky bola zvýšená aktivácia v prednom laloku (frontal lobe), presnejšie v prefrontálnom dorsolaterálnom kortexe (prefrontal dorsolateral cortex) a v premotorických (premotor) oblastiach. Zároveň naznačujú, že frontálny lalok je zodpovedný za integráciu temporálnej a ordinálnej zložky sekvencie.

Čo sa týka štúdia mechanizmov zodpovedných sa spracovanie rytmiky sekvencie, tak práce zaoberajúce sa správnym načasovaním pohybov naznačujú, že táto funkcionalita nie je kontrolovaná jednou časťou mozgu, ale rôzne regióny spracovávajú špecifické parametre daného pohybi v závislosti od časových vlastností danej sekvencie [39]. Sakai a kol. [28] tiež skúmal vnímanie rytmiky v zdravých jedincoch pomocou sekvencie skladajúcej sa zo 7 nôt, pričom časové intervaly boli buď metrické (1:2:3,1:2:4)[1] alebo nemetrické (1:2:5:3:5). Výsledkom bolo zistenie, že pri metrických sekvenciách sú aktivované regióny v premotorických a parietálnych oblastiach, zatiaľ čo nemetrické sekvencie sa podieľali na obojstrannej aktivácii mozočku a prefrontálnej.

Na základe týchto štúdií môžeme pozorovania zhrnúť do záveru, že narastajúca komplexita sekvencie spôsobuje nárast aktivity v frontálnom laloku a mozočku. Pri jednoduchších rytmických vzoroch vidíme zvýšenú aktivitu v premotorickej, motorickej a parietálnej oblasti.Temporálne a ordinálne učenie teda vedie k aktiváciam v odlišných oblastiach mozgu.

[1] Číslo označuje relatívnu dĺžku intervalu

2.5.2 Hudobná pedagogika

Napriek prekvapujúco dlhej histórií pedagogiky učenia sa hry na hudobnom nástroji a pomerne veľkému množstvu materiálov venujúcich sa správnej technike hry, existuje strašne málo teórií o tom, ako tieto techniky odprezentovať učiacemu sa subjektu. Navyše, veľká časť teórií o technikách sa venuje vysoko-úrovňovým problémom, ako je frázovanie, zatiaľ čo počiatočné problémy pri budovaní základným motorických návykov sú ignorované.

Prvým priekopníkom, ktorý z vedeckého pohľadu zdokumentoval, ktoré svaly na prstoch a rukách sú zapájané pri hre na klavíri, bol v roku 1929 Otto Ortmannn. Cez vysoko-rýchlostnú fotografiu zdokumentoval niekoľko profesionálnych klaviristov a výsledky jeho empirických pozorovaní vo forme pravidiel publikoval v [25]. Pravidlá sa sústreďujú na správne držanie a rozloženie rúk a prstov tak, aby výsledkom hrania boli rôzne typy rytmu. Ďalšou osobnosťou, ktorá významne prispela k tvore teórie pedagogiky hry na hudobný nástroj bola Dorothy Taubman. Hoci svoje pozorovania neopierala o žiadne vedecké experimenty, ale o dlhoročné skúsenosti ktoré získala ako inštruktorka hry na klavíri, tak môžme jej techniku charakterizovať ako tú, ktorá kladie dôraz na efektivitu a ergonomicitu hrania [1].

Ďalšou charakteristikou jej techniky je prízvuk na individualitu žiaka a teda na nutnosť prispôsobovať tréning a technickú korekciu jeho schopnostiam. Finkova teória zase apeluje na to, aby žiak mal presné, precízne porozumenie fyziológie tela umožňujúcej hru na klavíri [9]. Znovu na rozdiel od Ortmanna, Finkove závery nie sú podložené žiadnymi vedeckými skúmaniami, ale sú skôr založené na jeho dlhoročných učiteľských pozorovaniach. Výsledkom je metodológia typu zdola-nahor, kedy sa začína s takzvanými „primárnymi“ pohybmi, ktoré sa neskôr rozvíjajú do viacej komplexnejších „integračných pohybov“. Napriek tomu, že tieto práce významne prispeli k pokusu rozbiť zložité pohyby vyžadujúce sa pri hre na hudobný nástroj na jednoduchšie, čiastočné pohyby, zostáva nám problém ako efektívne verbálne odkomunikovať vykonávanie žiadaných pohybov. Pri Traubmnaovej a Finkovej metóde existujú videá a obrázky,stále ale existuje veľké množstvo informácií, ktoré je ťažké až nemožné verbálne žiakovi odprezentovať. Navyše verbálny a vizuálny popis pohybov stále vyžaduje preklad do proprioreceptného systému. Použitie haptického zariadenia pri výučbe hry na

klavíri umožňuje informáciu o žiadanom pohybe doručiť učiacemu sa subjektu priamo cez haptické rozhranie a žiak by nemusí robiť prekladanie z vizuálnej alebo verbálnej prezentácie.

2.5.3 Hudba a haptické vedenie

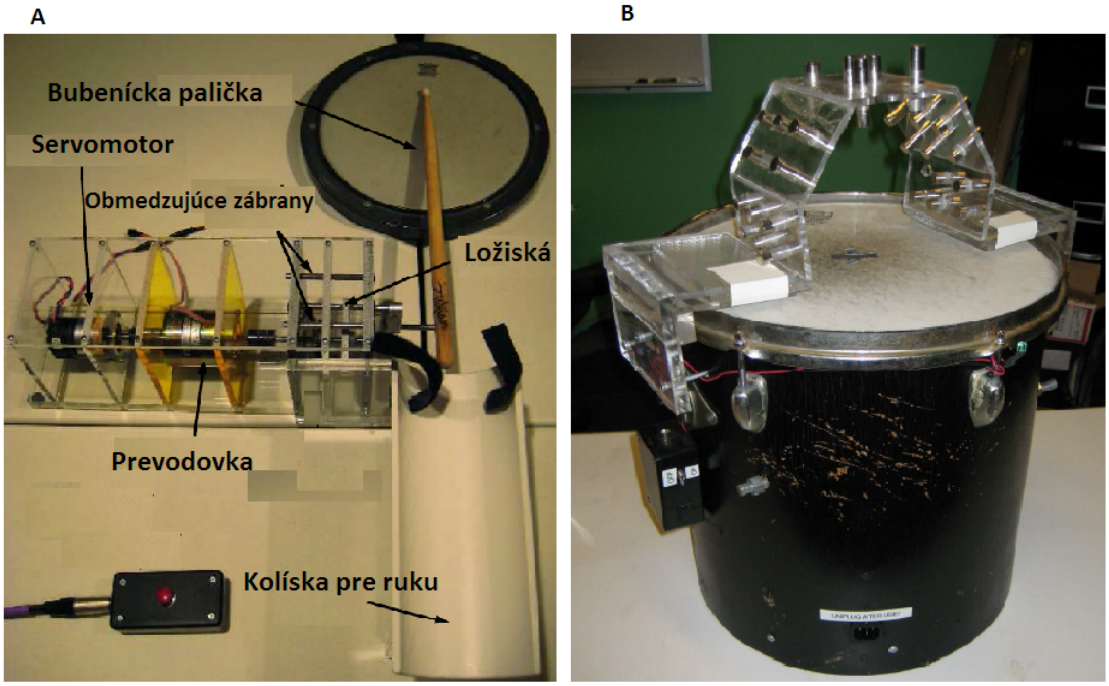
V tejto časti zhrnieme využitie haptických robotických zariadení ako súčasť učiaceho procesu hry na hudobnom nástroji. Hoci štúdium vplyvu haptickej spätnej väzby v hudobnej teórií nepatrí medzi rozšírené vedecké smery, existujú dôkazy o dôležitej úlohe hmatu v procesu porozumenia hudby a interakcie s hudobným nástrojom [24]. Štúdium haptickej spätnej väzby v hudbe môže priniesť lepšie pochopenie toho, ako hudobníci využívajú hmatové informácie a lepší návrh hudobných nástrojov v zmysle efektívnejšieho využívania týchto hmatových informácií.

Prvou prácou z tejto oblasti je O'Modhrainovej štúdia [23], v ktorej sa autorka pozrela na rolu haptickej spätnej väzby v kontexte rôznych hudobných predstavení. Skúmala jej vplyv na presnosť hrania na theremin, čo je elektronický hudobný nástroj s dvoma anténami produkujúcimi elektronické kmity. Hráč tvorí hudbu pomocou pohybu paže, dlane a prstov. Haptická spätná väzba bola generovaná pomocou 2-D haptického displeja „Moose", ktorý poskytuje prístup k grafickému počítačovému rozhraniu pre slepých ľudí. Výsledkom pridania haptickej spätnej väzby bolo iba malé zlepšenie. O'Modhrain skúmala aj vplyv haptickej spätnej väzby v zložitejšom nastavení experimentu, a to konkrétne vplyv trenia, chvenia ako nástroj na zlepšenie výkonu pri hre na husle, pričom husle boli simulované virtuálnym modelom struny a sláčika. Výsledky nepreukázali výrazne zlepšenie u začiatočníkov, u pokročilých hráčov sa dokonca objavili negatívne efekty použitia haptickej spätnej väzby cez chvenie. Autorka to odôvodňuje, že haptické zariadenie simulujúce chvenie pri hre na husle neposkytovalo 100 % realistický pocit vibrácie zažívaných pri skutočnej hre na husle.

V nedávnej dobe vznikli dve pomerne rozsiahle práce, ktoré sa venujú nielen skúmaniu efektu haptického vedenia na efektivitu učenia hry na hudobnom nástroji, ale pomerne rozsiahle opisujú aj hardwarové rozhranie týchto zariadení s ich prípadným využitím v reálnom učiacom procese. Prvou je práca Grahama Grindlaya z MIT, ktorý vyvinul 2 haptické zariadenia uľahčujúce výučbu rytmiky pri hre na perkusiách a to

FielDrum a HAGUS. [13]. FielDrum používal elektromagnet nachádzajúci sa vo vnútri bubnu, ktorý kontroloval pohyb permanentného magnetu nachádzajúceho sa na konci bubnovacej paličky. Nad bubnom sa nachádzal magnetický štít, ktorý vplýval na to, aby úder paličkou bol blízko stredu bubna, kde sa nachádzal permanentný magnet. Takto navrhnuté zariadenie však nebolo vhodné na experimentálne merania. Jedným z dôvodom bola nepresnosť tohto trénovacie systému, t.j. negarantovalo, že bubnovacia palička sa bude pri bubnovaní pohybovať v ideálnej trajektórií. Ďalšia nevýhoda vyplývala z použitia magnetu ako ovládacieho a poháňacieho zariadenia. Jednak elektromagnet spotrebovával veľa energie na generovanie nie príliš silného poľa a navyše vzťah medzi veľkosťou magnetickej sily a vzdialenosťou je nelineárny, čiže sila pôsobiaca na paličku s magnetom sa nelineárne zvyšovala čím bližšie bola palička k hlave bubna.

Vyšie vymenované nevýhody ho viedli k vývoju druhého zariadenia HAGUS, ktoré bolo založené na servomotoroch a optickom kódovači upevnenom na konci bubnovacej paličky. Tento dizajn zaručoval precízne vedenie paličky cez optimálnu trajektóriu pohybu a presné meranie rytmiky hry na bubne.



Obr. 2: Haptické zariadenia, ktoré vytvoril Grindlay. (A) HAGUS. (B) FielDrum

Vo svojej experimentálnej časti sa zameral na skúmanie efektívnosti učenia sa ryt-

miky pri súbežnom haptickom vedení pomocou zariadenia HAGUS. Jeho cieľom bolo porovnanie rozdielov medzi haptickou spätnou väzbou a učením založenom na audio posluchu. Jeho hypotéza bola postavená na tom, že haptické vedenie spolu so sluchovou spätnou väzbou zaručí, že učiace subjekty reprodukujú učenú rytmickú sekvenciu lepšie, ako keby boli trénované samostatne len s audio alebo haptickou spätnou väzbou. Subjekty sa učili 4 rôzne rytmy v 4 rôznych učiacich podmienkach. Učenie vybraného rytmu v konkrétnej podmienke pozostávalo z 15 pokusov, pričom každý pokus obsahoval 2 tréningové fázy a jednu testovaciu fázu. Autor testoval subjekty v týchto trénovacích podmienkach:

1. *A*: audio - subjekty nepohybovali rukami, len 2 krát počuli daný rytmus zahraný na HAGUS zariadení, ktorý sa následne samostatne pokúsili zahrať.

2. *H*: haptická - subjekty boli fyzicky vedené pomocou HAGUS zariadenia cez želanú trajektóriu úderu daného rytmu, pričom mali na ušiach slúchadla so šumom aby neprijímali žiadne audio informácie.

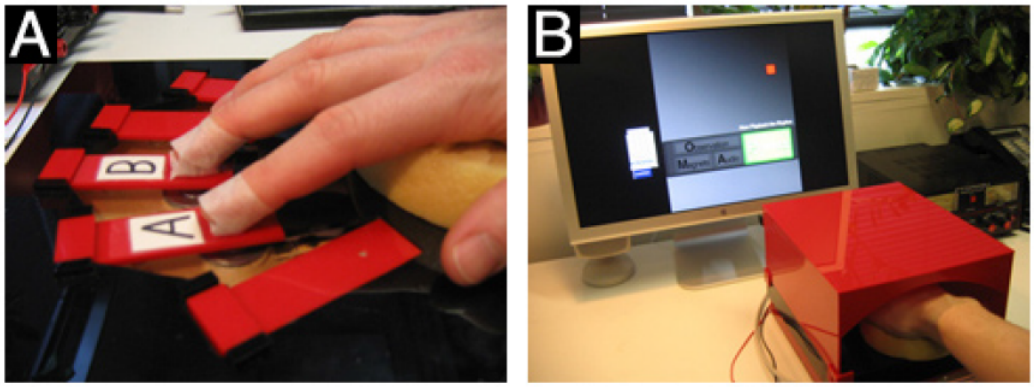
3. *A+H*: audio-haptická - kombinácia prvých 2 podmienok, kedy subjekt bol nielen prevedený želaným pohybom, ale navyše počul aj zvukovú nahrávku.

4. *A+H(oslabená)*: audio-haptické (oslabené) - zhodný a A+H, ale subjekt mal v ušiach slúchadla aj počas učenia aj počas testovania, avšak počas učenia mu nebol púšťaný šum. Táto posledná podmienka bola zvolená z dôvodu, že za učiacej podmienky H bolo dovolené aby si subjekt ponechal slúchadla na ušiach počas testovacej fázy z praktického dôvodu (aby ich nemusel neustále vyberať a dávať naspäť) a teda potreboval otestovať, že táto možnosť nebude mať na výsledky samostatnej H podmienky žiadny vplyv.

Závery z Grindlayovej práce je možné zhrnúť do 2 bodov. Tréning v počiatočných pokusoch učenia za podmienky A+H znížil priemernú chybu o 17 % oproti podmienkam A a H. V posledných pokusoch však učenie za podmien A prinieslo menej chýb ako počas A+H a H.

Ďalšou prácou z oblasti použitia haptických zariadení v trénovacom procese hry na hudobnom nástroji je práca C.E. Lewistona [20] z MIT. Hlavným zámerov je overenie

efektivity použitia haptického vedenia na učenie hudobných sekvencií. Cieľom bolo vyrobiť funkčný prototyp a taktiež demonštrovať jeho možnosti v oblasti učenia a rehabilitácie. Autor zostrojil *MaGKeyS Protype* (The Magnetic Guidance Keyboard System Prototype), ktorý pomocou magnetov pripojených na piano vedie subjekt cez správne poradie a rytmiku trénovanej sekvencie (obr. 3) .



Obr. 3: Prototyp haptického zariadenia MaGKeyS Prototype, ktoré vytvoril Lewiston. (A) Pohľad na typickú konfiguráciu užívateľovej ruky počas testovania. (B) Fotografia zariadenia počas experimentu.

Lewiston navrhol tri na seba nadväzujúce experimenty. V prvom experimente sa zameral na hrubé overenie správnosti zvoleného prístupu haptickej spätnej väzby. Subjekt sa učil novú rytmickú sekvenciu v troch podmienkach a to:

1. *A*: audio - subjektu je sekvencia prezentovaná iba v audio nahrávke
2. *H*: haptická - sekvencia je učená cez haptické vedenie, pričom subjekt nedostáva žiadnu audio informáciu o danej sekvencii
3. *A+H* audio-haptická (AH) - sekvencia je prezentovaná cez audio a haptické vedenie

Trénovacie sekvencie mali priemernú obtiažnosť čo sa týka rytmiky a boli adaptované z práce [26]. Úlohou subjektu bolo zopakovať učiacu sa sekvenciu po každom pokuse a výsledky z nameraných dát boli konfrontované s hypotézou, že haptická spätná väzba v spojení s audio vedením uľahčuje učenie rytmických sekvencií oproti učiacemu procesu, kde je zahrnutá iba audio spätná väzba. Učiaci blok pre každú podmienku pozostával

z 30 pokusov a jeden pokus sa skladal z učiacej sa časti a testu. Učiaca sekvencia bola však príliš dlhá z pohľadu poradia tónov, subjekty robili chyby aj v posledných pokusoch a preto nebolo možné zhodnotiť a analyzovať ordinálnu aj temporálnu zložku sekvencie. Analýza sa preto zúžila na ordinálnu časť. Výsledok prvého Lewistonovho experimentu bol v súlade s hypotézou a H+A učiace prostredie prinieslo zlepšenie oproti A podmienke.

V 2. Lewistonovom experimente bolo cieľom zistiť ako haptické vedenie pôsobí nezávisle na učenie sa poradia tónov a rytmiky. Experiment pozostával z 2 samostatných častí, kde zaujímavejšia z nášho pohľadu je druhá časť, ktorá analyzovala haptickú spätnú väzbu a temporálnu zložku sekvencie. Účastníci experimentu sa učili sekvenciu jedeného tónu avšak s rôznou rytmikou. Obidve časti experimentu boli znovu absolvované za troch podmienok (A,H,A+H). Výsledky druhého experimentu však nepotvrdili prínos haptickej spätnej väzby pri učení rytmickej sekvencie. Testy pri audio vedení dosiahli najmenšiu chybu a samostatné haptické vedenie malo najväčšiu chybovosť. Autor si tento záver vysvetľuje skutočnosťou, že zvolil príliš jednoduchú rytmickú sekvenciou.

V poslednom treťom experimente Lewiston skúma ako sa zlepšenie prinesené vo výučbe poradia tónov pri zapojení haptického vedenia prenesie do procesu učenia sa nových sekvencií a taktiež ako sa nadobudnuté zručnosti za pomoci haptickej spätnej väzby uchovávajú dlhodobejšie, čiže t.z. „retention effect“. Výsledky tretieho experimentu naznačujú, že haptické vedenie uľahčuje dlhodobejšie uchovávanie motorických zručností (1 deň).

3 Haptické klávesy a software

V tejto kapitole sa budeme venovať opisu navrhnutého a vytvoreného haptického systému, ktorý bol cielený ako experimentálny nástroj na preskúmanie vplyvu haptického vedenia na motorické učenie. Pozostáva z upravených digitálnych klávesov Bontempi PM 662 spojených s počítačom a riadiaceho softvéru. Systém je schopný pohybovať vybranými piatimi klávesami tak, aby zahral požadovanú sekvenciu. Taktiež je schopný zaznamenávať stlačenie vybraných piatich klávesov a vyhodnocovať zaznamenané dáta. Ilustráciu sytému môžeme vidieť na obrázku č. 4.

Obr. 4: Ilustrácia používania haptické systému. Haptické klávesy s haptickým a zvukovým výstupom(1). Kryt (2), ktorý ma používateľovi zabrániť v získaní vizuálnej nápovedy. Monitor (3) zobrazuje informácie o prebiehajúcom experimente.

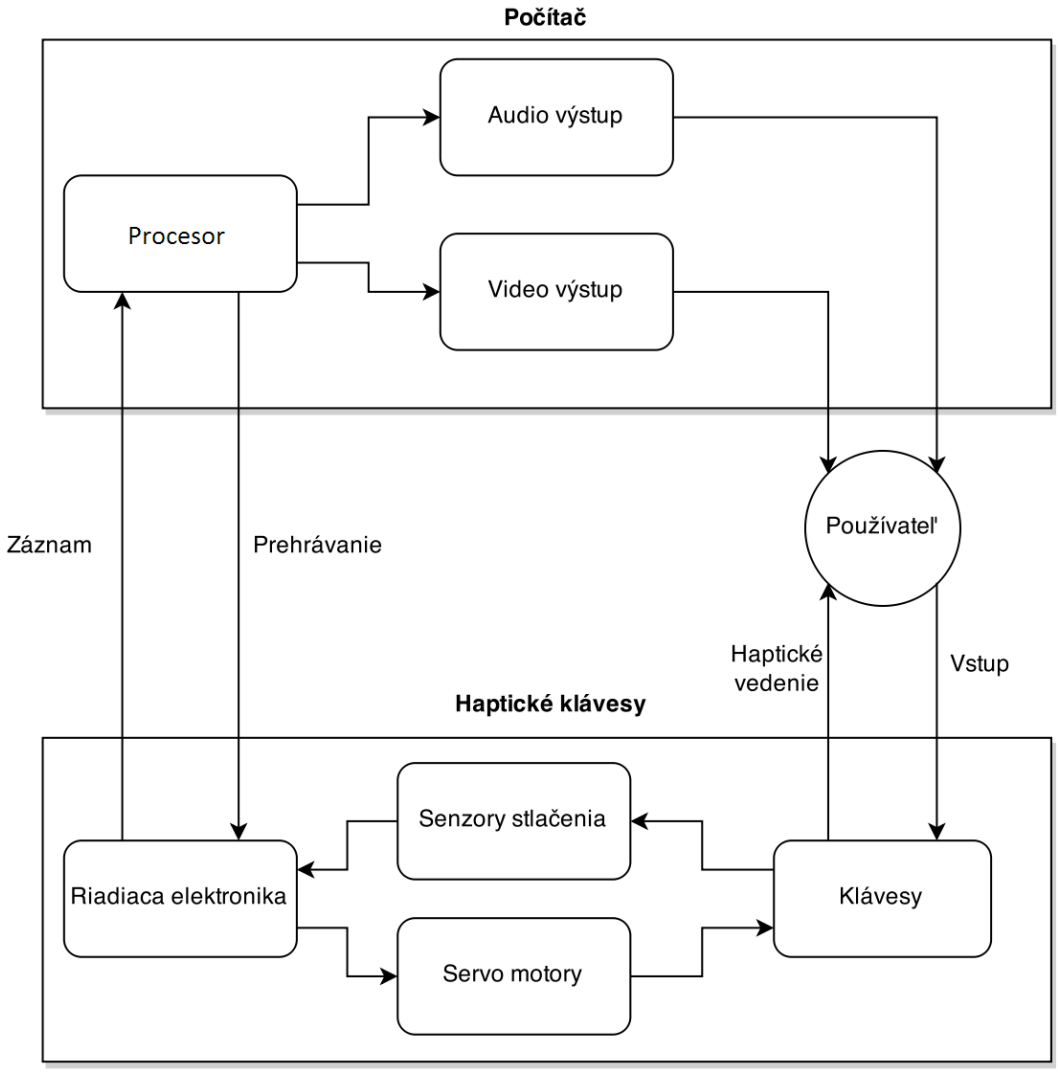
3.1 Požiadavky

Pre vykonanie naplánovaných experimentov musel haptický systém spĺňať nasledovné požiadavky:

1. Pohybovanie klávesmi s dostatočnou silou, aby pohol uvoľnenými prstami
2. Záznam dĺžky stlačenia klávesu a poradia klávesov
3. Vkladanie a nahrávanie rytmických sekvencií
4. Prehrávanie rytmických sekvencií v troch podmienkach a to v audio forme, haptickej a v kombinovanej audio-haptickej
5. Presnosť stláčania klávesov a merania dĺžky s odchýlkou max 10 ms

3.2 Design systému

Obrázok č. 5 zobrazuje blokovú schému hlavných komponentov systému, ktoré sú počítač a haptické klávesy. Komunikácia prebieha cez USB rozhranie. Program na počítači posiela príkazy riadiacej elektronike a tá ich interpretuje na kontrolu servo motorov. Riadiaca elektronika tiež zaznamenáva signál zo senzorov stlačenia a posiela ho počítaču. Kontrolu, zaznamenávanie a spracovanie dát teda vykonáva počítač. Riadiaca elektronika plní v tomto prípade funkciu rozhrania so senzormi a servomotormi.



Obr. 5: Blokový diagram hapticého systému

3.3 Prvé verzie hardvéru

Pri procese konštruovania hardvéru sme prešli viacerými iteráciami kým sme zhotovili zariadenie, ktoré spĺňalo naše požiadavky. Predtým ako opíšeme funkčnú verziu hardvéru, chceme spomenúť prvotné pokusy o realizáciu jednotlivých funkcionalít, ktoré sa ukázali ako nevhodné. Pri prvých pokusoch o pohybovanie klávesami sme použili jednosmerný motor, čo ale viedlo k časovým nepresnostiam pri opakovanom stláčaní klávesu. Príčinou bola nemožnosť zaistiť presné východzie nastavenie otočného ramena pred stlačením klávesu. Preto sme sa rozhodli použiť servomotor, ktorý má možnosť presného nastavenia otočného ramena. Ďalšie riešenie, ktoré sa ukázalo ako nevhodné, bolo upevňovanie prstov ku klávesom. Najskôr sme používali rukavicu, ktorej prsty boli prilepené o klávesy. Pri pilotnom testovaní sme však zistili, že nie každému subjektu vyhovovalo rozloženie prstov dané rukavicou, preto sme nakoniec zvolili použitie obojstrannej lepiacej pásky nalepenej priamo na klávesoch. Takéto riešenie poskytlo dostatočnú priľnavosť na potiahnutie uvoľneného prstu a umožnilo flexibilnú polohu ruky na klaviatúre. Detekcia stlačenia klávesov bola taktiež netriviálna úloha. Prvotne sme sa pokúšali spracovať audio signál z digitálnych klávesov, čo by bolo najpresnejšie riešenie, avšak kvôli použitej softvérovej architektúre sa tento prístup ukázal ako implementačne náročný. Druhým pokusom bolo použitie kontaktných spínačov. Tieto sa po niekoľkých desiatkach stlačení začali deformovať a to mohlo ohroziť presnosť merania stlačenia klávesov. Preto sme sa rozhodli použiť fototranzistory v kombinácií s LED diódami, pri ktorých nedochádza k dotyku so spínačom pri stlačení klávesu.

3.4 Opis hardvéru

V tejto časti opíšeme jednotlivé hardvérové komponenty.

Optický spínač

Skladá sa z LED diódy a foto-tranzistora. Tieto sú umiestnené oproti sebe tak, že pri stlačení klávesu je prerušený tok svetla z diódy do foto-tranzistora, čo vedie k zmene toku prúdu a detekcii stlačenia. Ilustráciu môžeme vidieť na obrázku č. 7 a implementáciu na obrázku č. 8.

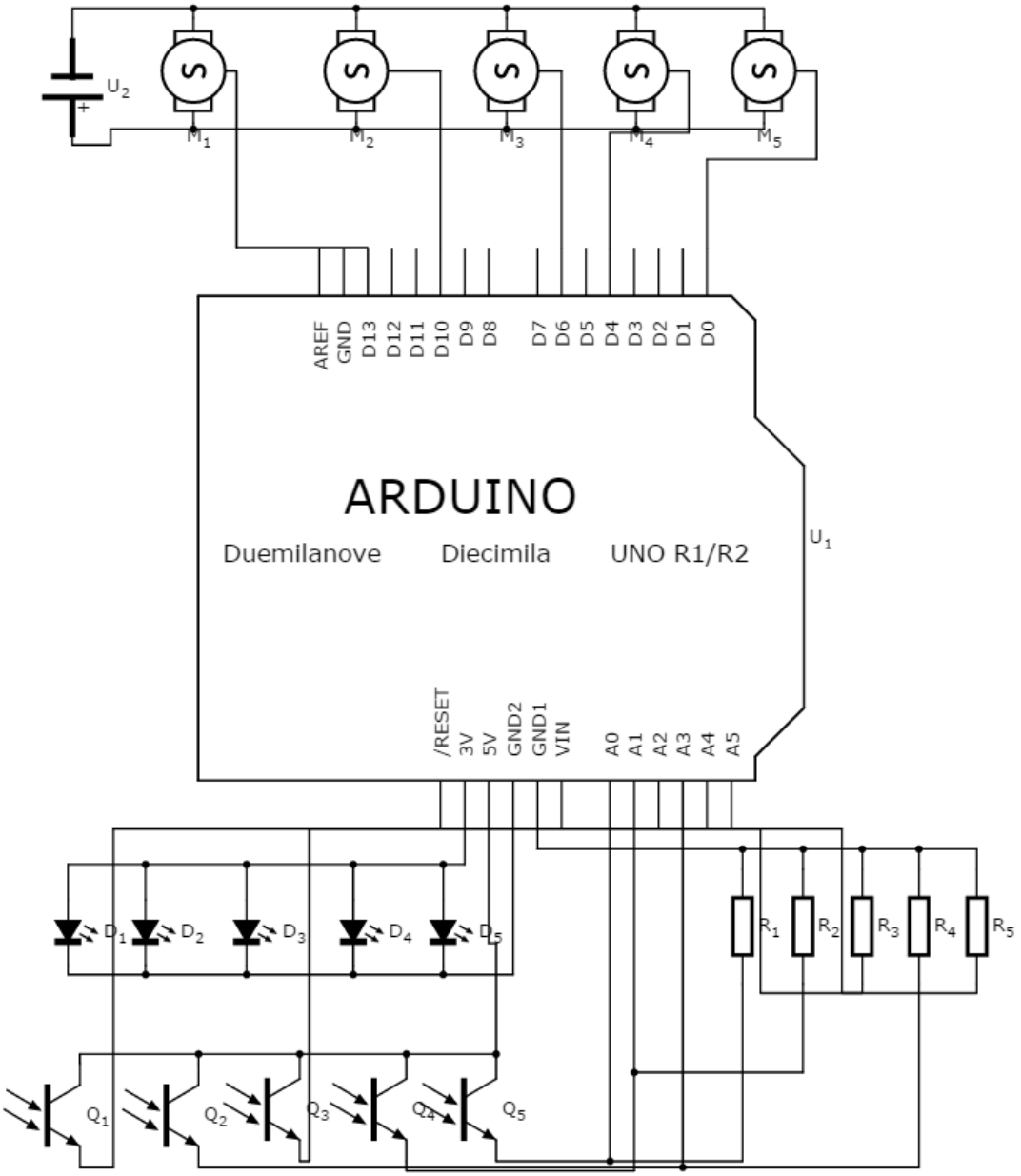
Servomotor

Je rotačný pohon, ktorý umožňuje presnú kontrolu otočenia ramena a rýchlosti otáča-

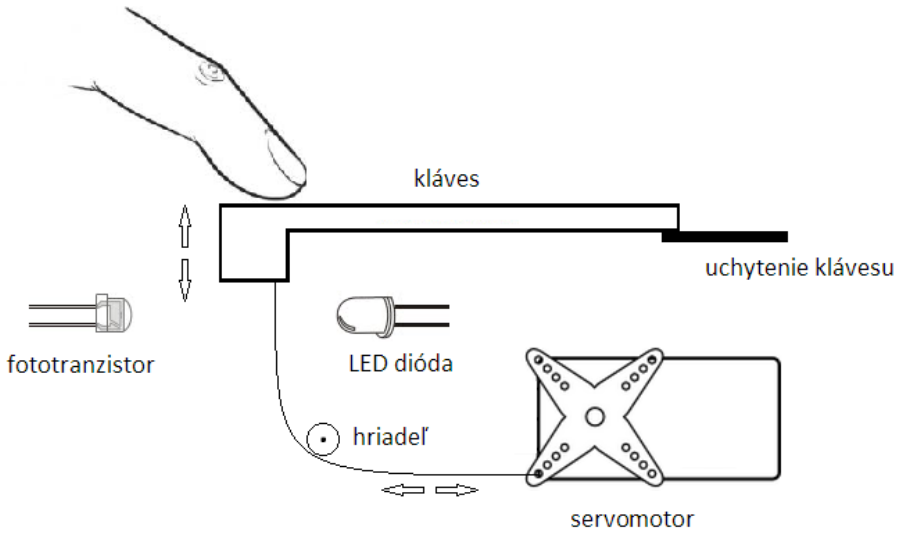
nia. Použili sme micro servomotor Hitec HS-55, ktorý má maximálnu rýchlosť otočenia $70ms/30$ stupňov a ťah $0,13N/m$. Ilustráciu môžeme vidieť na obrázku č. 7 a implementáciu na obrázku č. 8.

Riadiaca elektronika

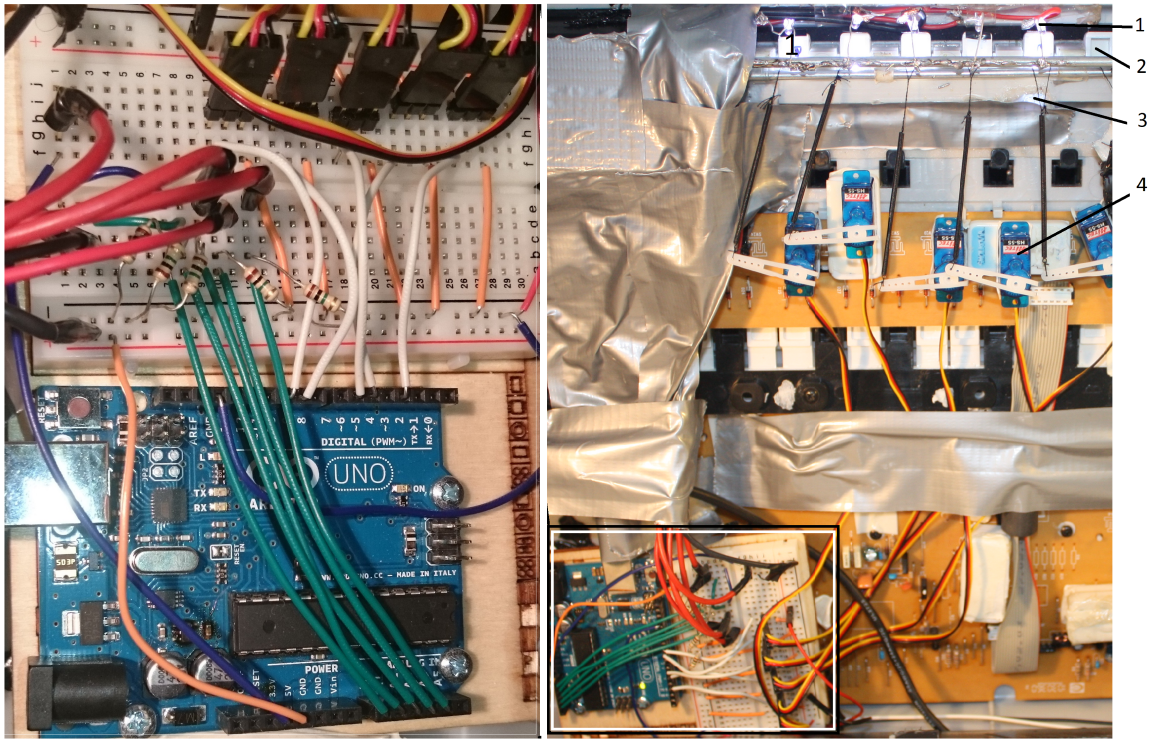
Pozostáva z Arduino Uno. Je to mikroelektronická doska založená na čipe ATmega328. Obsahuje 14 digitálnych vstupov/výstupov a 6 analógových. Digitálne výstupy používame na kontrolu servomotorov a analógové na čítanie stavu optických spínačov. Doska má USB konektor na komunikáciu s počítačom a napájanie. Na napájanie servomotorov používame externý zdroj. Schému zapojenia môžeme vidieť na obrázku č. 6 a implementáciu na obrázku č. 8.



Obr. 6: Schéma zapojenia hardvéru, ktorým kontrolujeme a zaznamenávame päť klávesov. Legenda: *M*- servomotor, *D*- LED dioda, *Q*- Foto-tranzistor, *R*- rezistor.



Obr. 7: Ilustrácia pohybovania klávesu servomotorom a detekcie stlačenia.



Obr. 8: Pohľad zdola na haptické klávesy s detailom na Arduino. Legenda: Foto-rezistor (1), Kláves (2), LED dióda (3), Servomotor(4).

Obr. 9: Pohľad na haptický systém z pohľadu používateľa. Písmená označujú klávesy s haptickou funkcionalitou.

3.5 Opis softvéru

Softvér je jednostránková webová aplikácia, ktorá je spustiteľná lokálne. Je napísaná v jazyku *Javascript* s použitím *AngularJS* a *BreakoutJS*. *AngularJS* je framework určeny na tvorbu jednostránkových aplikácií. *BreakouJS* je javascriptová knižnica, ktorá sprostredkúva priamy prístup k vstupom a výstupom Arduina z *Javascriptu*. Tým umožňuje riadenie fyzických komponentov priamo z webovej stránky. Obsahuje taktiež abstrakcie hardvérových komponentov, ako sú napríklad tlačidlá, potenciometre a servomotory, čo značne uľahčuje vývoj takejto aplikácie. Všetky názvy v popise aplikácie sú anglickom jazyku pre jeho ľahšiu šíriteľnosť. Softvér poskytuje nasledovnú funkcionalitu.

Záznam stlačenia klávesu

Ten je ukladaný v milisekundách v unixovom čase. Uložený je začiatok a koniec stlačenia.

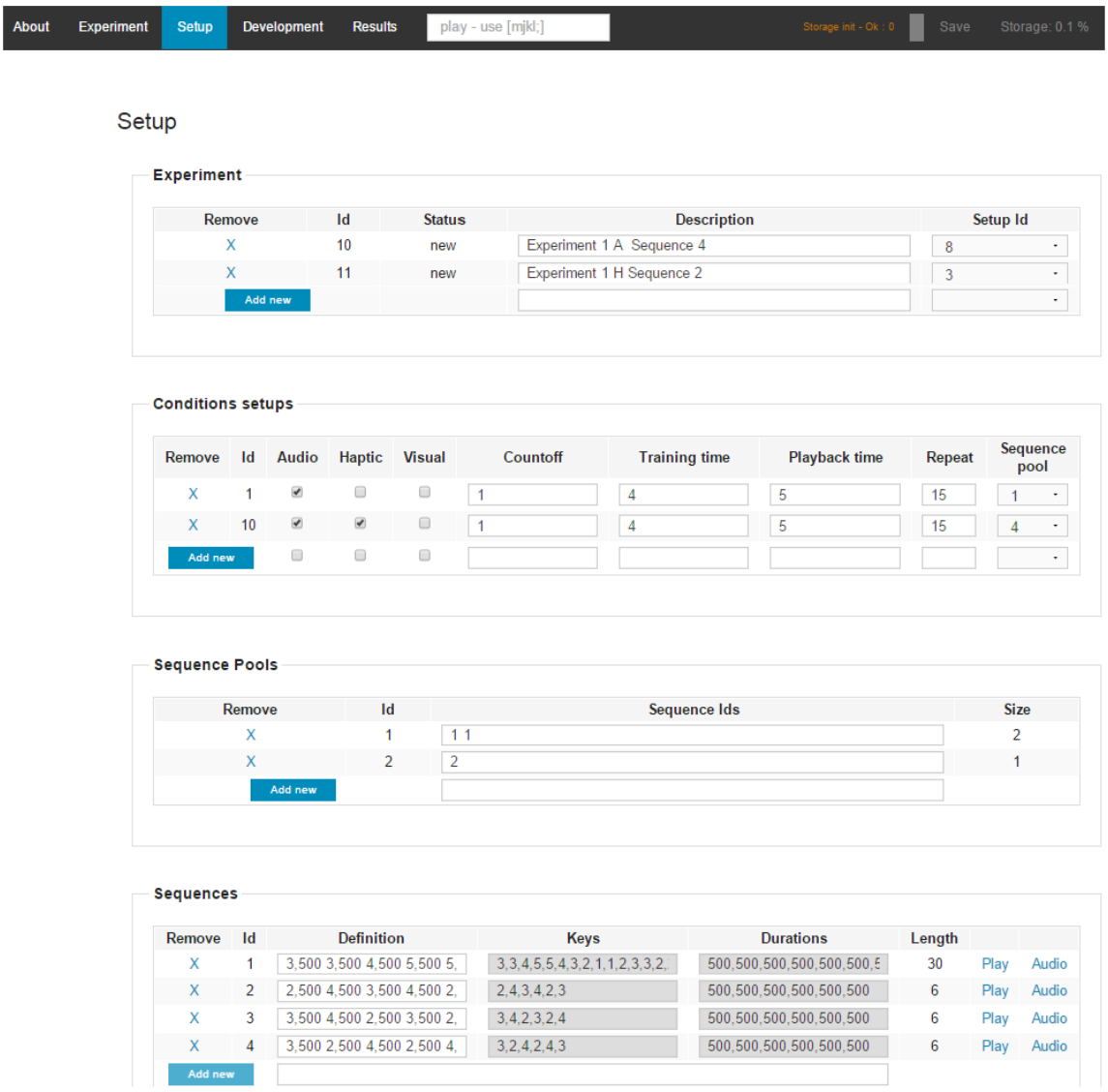
Nastavenie parametrov experimentov

Systém umožňuje vytváranie a ukladanie nastavení pre experimenty a tým čiastočne automatizovať neskorší proces testovania. Pre jeden experiment je možné nastaviť typ

stimulu (audio, haptický, audio-haptický), dĺžku trénovacieho a testovacieho okna, prestávku medzi pokusmi, počet opakovaní vzoru a trénovanú sekvenciu. Neskôr pri vykonávaní testovania tak iba zadáme základné údaje o testovanom subjekte a priradíme ho k preddefinovanému experimentu. Táto funkcionalita je zobrazená na obrázku č. 10

Konfigurácia sekvencií

Slúži na zadávanie nových sekvencií v textovom formáte, kde definujeme číslo stlačeného klávesu a dĺžku stlačenia (napr. "1, 500"). Číslo $1, 2, 3, 4, 5$ zodpovedajú klávesom $C3, D3, E3, F3, G3$.



Obr. 10: Obrazovka nastavení. Umožňuje nastavenie sekvencií, podmienok pre blok experimentu a poradie blokov v experimente

Prehrávanie sekvencií hapticky

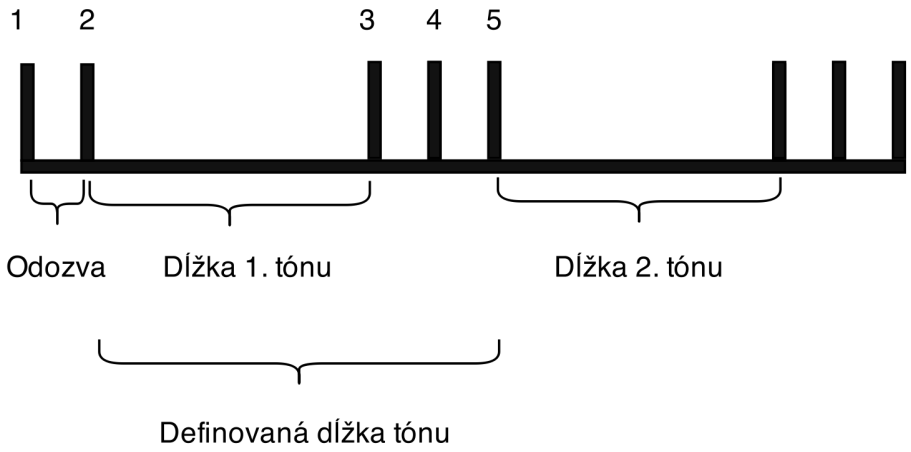
Zahranie vybranej sekvencie fyzickým stláčaním klávesou pomocou servomotorov.

Nahrávanie a prehrávanie audio sekvencií

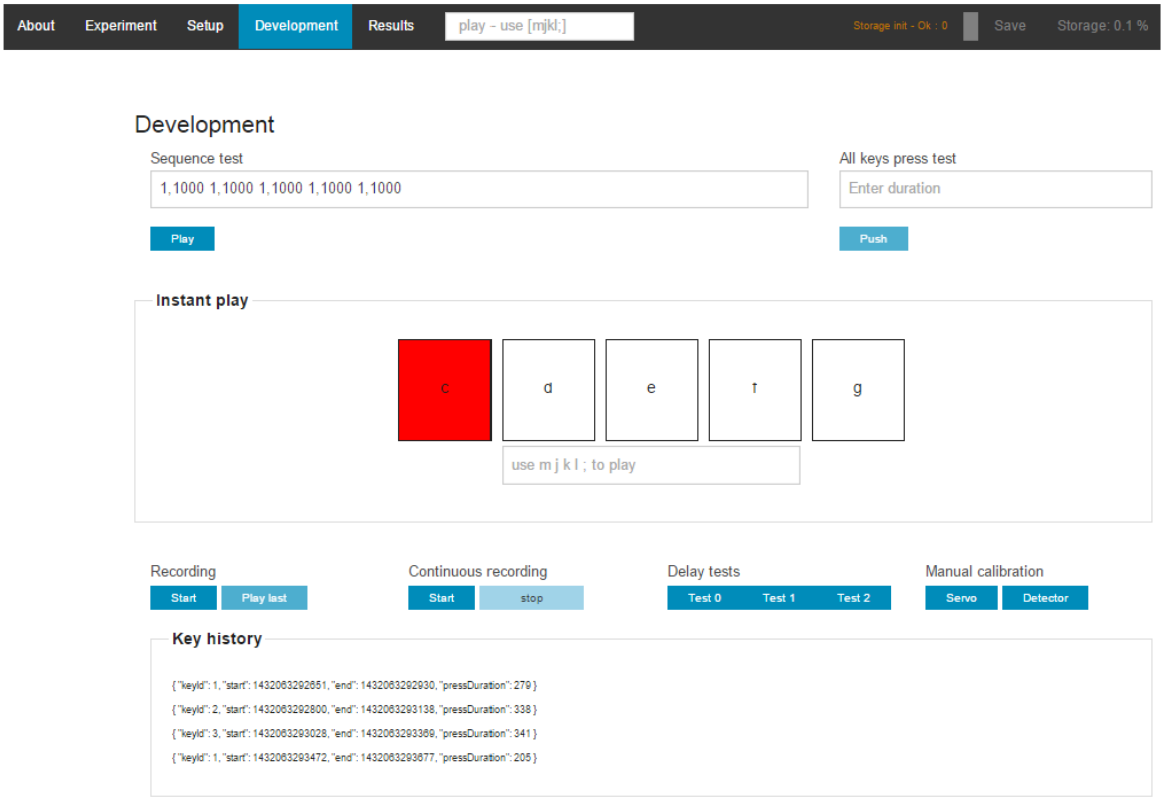
Po zadaní novej sekvencie je možné nahrať jej audio verziu. Tá je prehraná hapticky a uložená ako audio záznam v mp3 formáte. Použitie haptického prehrávania zaručí identickosť haptickej verzie a audio verzie.

Kalibrácia servomotorov

Pri konštrukcii haptických klávesov sme zistili, že servomotory ktoré používame sa líšia v čase, ktorí potrebujú na stlačenie klávesu ($\pm 10ms$), preto sme pridali možnosť kalibrácie jednotlivých servomotorov. Meriame pri nej čas od kedy pošleme signál na stlačenie klávesu po zaznenie tónu. Tento čas si uložíme pre každý kláves a počítame s ním ako s odozvou pri načasovaní stlačenia. V priemere je dĺžka odozvy $45ms$. Príklad načasovania stlačenia toho istého klávesu dvakrát po sebe je na obrázku č. 11



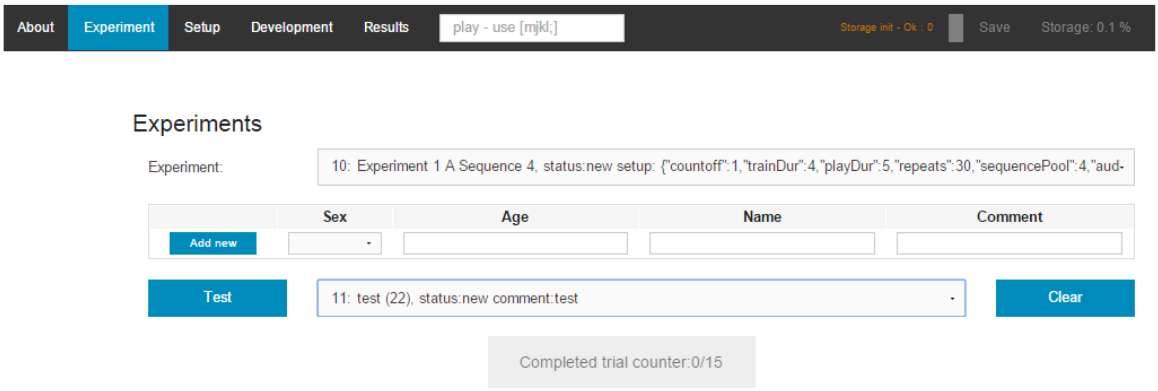
Obr. 11: Načasovanie stlačenia. 1-Servomotor dostane signál na stlačenie klávesu. 2-Začiatok znenia 1. tónu. 3-Servomotor dostane signál pre uvoľnenie klávesu. Koniec znenia 1. tónu. 4-Servomotor je v základnej pozícií, dostane signál na ďalšie stlačenie. 5- Začiatok znenia 2. tónu.



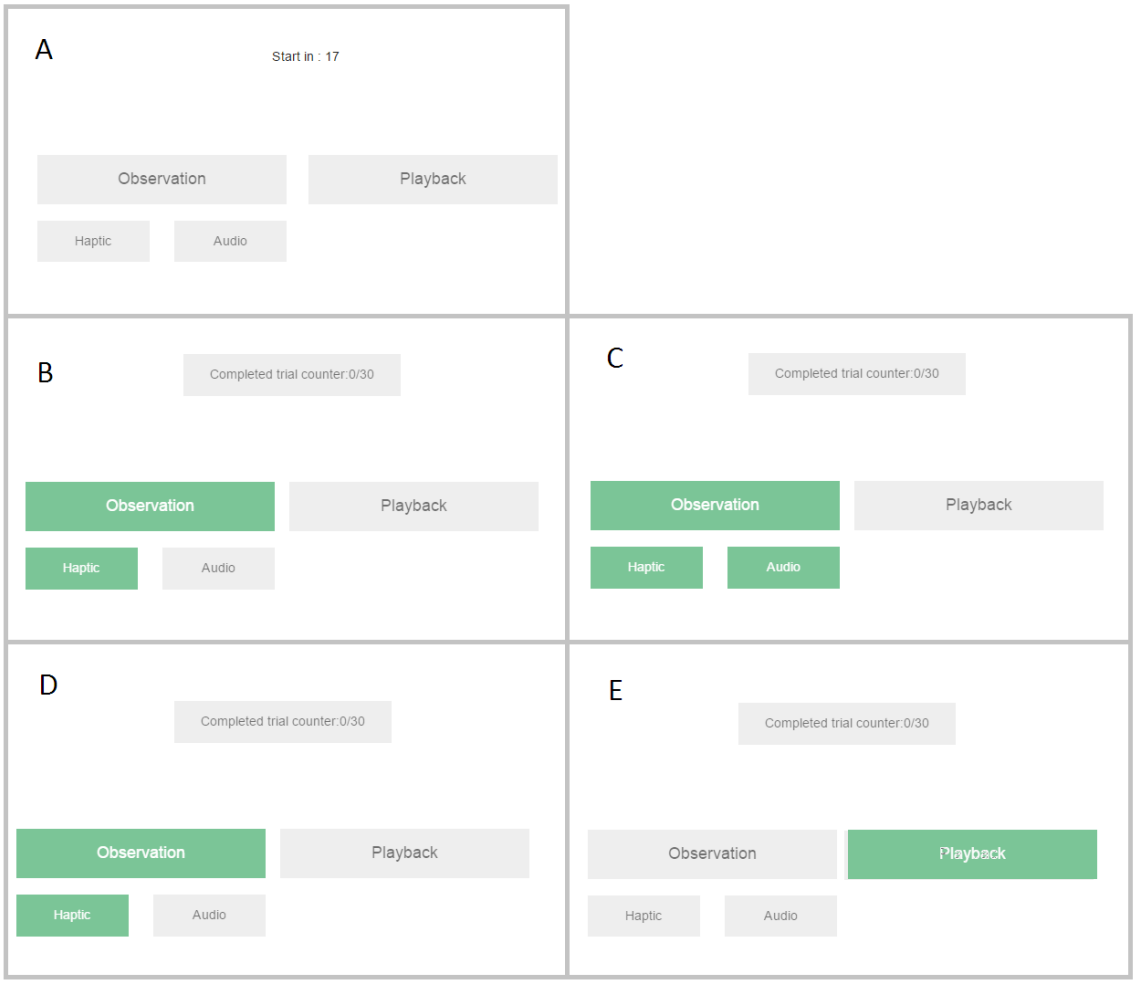
Obr. 12: Vývojová obrazovka na kalibráciu a testovanie presnosti servomotorov.

Otestovanie subjektu

Ak máme nastavené podmienky experimentu, môžeme otestovať subjekt pod zvolenými experimentálnymi podmienkami. Obrazovku môžeme vidieť na obrázku č. 13 . Testovanie pozostáva z opakovanej prezentácie trénovacej sekvencie a nahrávania pokusu o jej reprodukciu. Dáta sú uložené v pamäti pre ich následné vyhodnotenie. Počas testovania je zobrazovaná vizuálna nápoveda o fáze testovania a type trénovacieho stimulu. Obsah obrazovky počas testovania je na obrázku č. 14



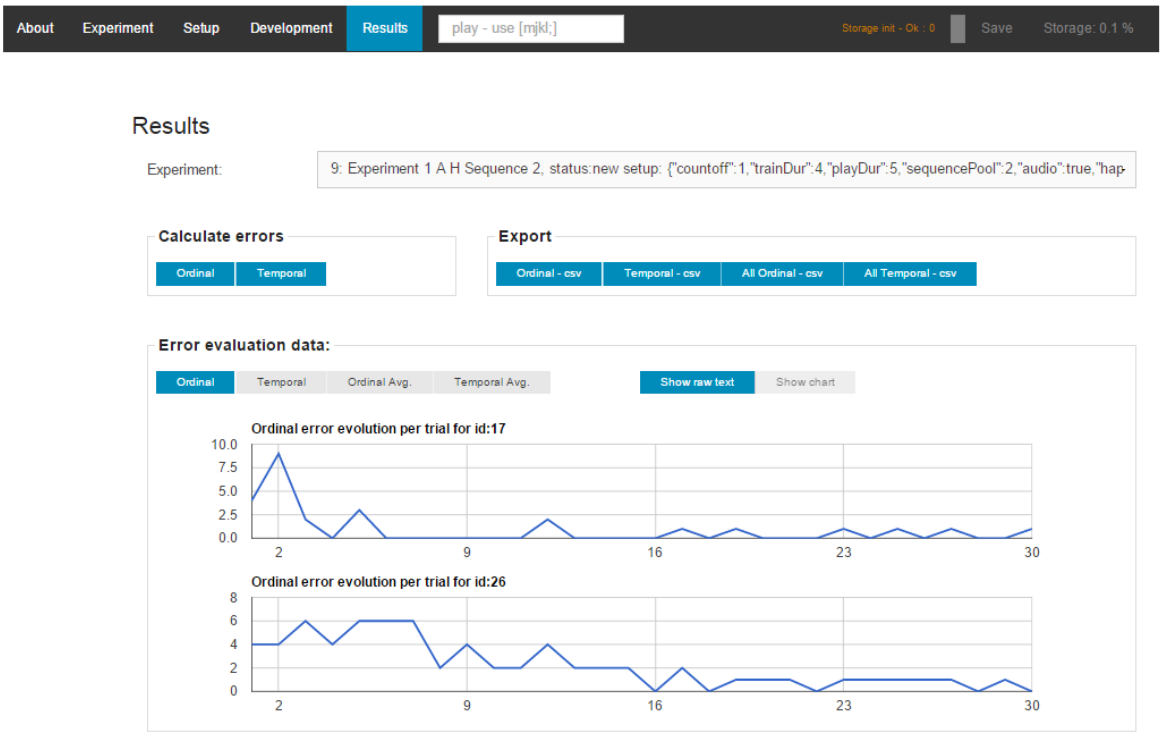
Obr. 13: Obrazovka na zadanie nového subjektu a spustenie experimentu.



Obr. 14: Výrezy z ozbrazoviek, ktoré vidí užívateľ počas priebehu experimentu. Najkôr je obrazovka neaktívna aby sa užívatel oboznámil s prostredím (A). Inštrukcie počas trénovacej fázy z haptickou (B), audio-haptickou (C), audio (D) podmienkou a počas testovacej fázy (E).

Vyhodnocovanie a zobrazovanie výsledkov

Softvér implementuje aj vyhodnocovanie odchýlky zreprodukovanej sekvencie od učenej sekvencie. Takto vyhodnotené výsledky zobrazuje v textovej a grafickej forme (obrázok č. 15).



Obr. 15: Obrazovaka na vyhodnocovanie a zobrazovanie výsledkov.

3.6 Záznam a vyhodnocovanie dát

Počas priebehu experimentov zaznamenávame údaje o stlačených klávesoch a ich vzorových sekvenciách. Ukladáme číslo klávesu a začiatky a konce stlačenia. Ordinálnu a temporálnu zložku rytmickej sekvencie posudzujeme samostatne.

3.6.1 Porovnávanie ordinálnej zložky

Pre porovnanie rozdielu medzi vzorovým a zreprodukovaným poradím tónov používame Levenshteinovú vzdialenosť, čo je metrika na meranie rozdielu medzi dvoma sekvenciami. Neformálne je to definované ako minimálny počet editácií, ktoré treba na jednej zo sekvencií vykonať, aby výsledkom boli sekvencie s rovnakým poradím tónov (algoritmus 3.1). Minimálny počet týchto editácií označuje chybu pri reprodukovaní ordinálnej

zložky rytmickej sekvencie a k tejto metrike budeme hovoriť ako o *ordinálnej chybe*.

Algoritmus 3.1 Pseudokód pre algoritmus na výpočet Levenshteinovej vzdialenosti

function LEVENSHTEIN($str1, str2$)
  $s1len \leftarrow$length($str1$)
  $s2len \leftarrow$length($str2$)
  $column \leftarrow [0_1, 0_2, \ldots, 0_{s1len}]$
  for $x \leftarrow 1, s2len$ **do**
    $col[x] \leftarrow x$
  end for
  for $p \leftarrow 1, s1len$ **do**
    $column[0] \leftarrow p$
    $r \leftarrow p - 1$
    for $q \leftarrow 1, s2len$ **do**
      $oldnum \leftarrow column[q]$
      $column[q] \leftarrow min(col[q] + 1, col[q-1] + 1, r + str1[p-1] \neq str2[q-1])$
    end for
  end for
  return $col[s1len]$
end function

3.6.2 Porovnávanie temporálnej zložky

Na porovnávanie odchýlky časového priebehu reprodukovanej sekvencie od vzorovej sekvencie používame variant *Dynamic Time Warping algoritmu* (algoritmus 3.2). Výsledkom je číslo, ktoré označuje chybu pri reprodukovaní temporálnej zložky rytmickej sekvencie a k tejto metrike budeme hovoriť ako o *temporálnej chybe*.

Algoritmus 3.2 Pseudokód pre algoritmus na výpočet rytmickej vzdialenosti

Require: $t[1 \dots N], p[1 \dots M]$

$DTW[1 \dots N, 1 \dots M] \leftarrow 0$

$DTW[1, 2 \dots M] \leftarrow \infty$

$DTW[2 \dots N, 1] \leftarrow \infty$

$cost_{ins} \leftarrow \frac{1}{2} max(t[N], p[M])$

$cost_{del} \leftarrow \frac{1}{2} max(t[N], p[M])$

for $i \leftarrow 2, N$ **do**

  for $i \leftarrow 2, M$ **do**

    $cost_{dist} = |t[i] - p[j]|$

    $DTW[i, j] \leftarrow min(DTW[i-1, j] + cost_{dist} + cost_{ins},$

    $DTW[i, j-1] + cost_{dist} + cost_{del},$

    $DTW[i-1, j-1] + cost_{dist})$

  end for

end for

return $DTW[N, M]$

3.7 Limitácie

Hlavnou limitáciou systému je používanie iba piatich klávesov, avšak na prevedenie plánovaných experimentov je táto funkcionalita postačujúca. Od reálneho hrania na klavír sa systém líši tiež fixáciou prstov na klávesoch. Pri hre na klávesový nástroj ľudia nikdy nedržia všetky prsty presne na klávesoch a aj pri fixovanej ruke mierne pohybujú prstami. Ďalšou limitáciu je rýchlosť servomotorov a tým spôsobená odozva. Pri použitom modele servomotora je maximálna frekvencia opakovaných stlačení jedného klávesu 6-krát za sekundu. Tento problém by sa dal vyriešiť použitím kvalitnejších digitálnych servomotorov, ktoré sú rýchlejšie, ale niekoľko násobne drahšie. Ďalšia možnosťou riešenia je použitie iného systému pohybovania klávesov, napríklad magnetického alebo pneumatického. Posledným problémom je mierne bzučanie servomotorov, ktoré vylučuje inú ako experimentálnu aplikáciu. Pri našich testoch tento problém riešime použitím slúchadiel.

4 Experimenty

V nasledujúcej kapitole opisujeme tri experimenty na učenie hudobných sekvencií. Na testovanie používame prototyp haptických klávesov zobrazených na obrázku č. 9. Cieľom týchto experimentov je porovnať funkčnosť nášho zariadenia a nadviazať na existujúce experimenty s podobnými zariadeniami [20, 13]. V prvom experimente validujeme vytvorený prototyp haptických klávesov a sledujeme vplyv haptickej spätnej väzby na ordinálnu zložku sekvencie. V druhom experimente sa zameriavame na nepreskúmaný vplyv haptického vedenia na zložitejšie rytmické sekvencie. V treťom poslednom experimente otestujeme vplyv haptického vedenia pri učení kombinovaných sekvencií, ktoré obsahujú nemonotónne temporálne aj ordinálne zložky. Metodiku staviame na štúdiách spomenutých v kapitole 2.5.3 učenia rytmických sekvencií a na našom pilotnom testovaní. Aplikáciu pozorovaní z pilotného testovania rozvádzame v jednotlivých experimentoch. Ako píšeme v kapitole 2.5.1, spracovanie ordinálnej a temporálnej zložky rytmickej sekvencie vedie k aktiváciám v odlišných častiach mozgu, preto v experimentoch testujeme tieto dve zložky samostatne.

4.1 Experiment 1

Náš prvý experiment má dva ciele. Prvým je validácia efektívnosti zostrojených haptických klávesov a ich úspešné použitie pri testovaní. Druhým je otestovanie vplyvu použitia haptického vedenia na učenie ordinálnej zložky hudobnej sekvencie, teda poradia tónov v sekvencii. V tomto prípade sa nekladie dôraz na temporálnu zložku,čiže na rytmiku danej sekvencie.

Design experimentu č. 1 vychádza z prvej časti experimentu 2. Lewistona [20]. Cieľom experimentu č. 1 je teda zopakovať tento postup na zostrojených haptických klávesoch a porovnaním výsledkov validovať naše zariadenie.

Výsledkom v prvej časti experimentu č. 2 u Lewistona bolo zlepšenie pri spojení haptickej a audio spätnej väzby. Podobný efekt očakávame aj pri analýze našich dát. Pozitívnym záverom experimentu sa validuje Lewistonov výsledok o výhodách haptického vedenia, ale hlavne funkčnosť a použiteľnosť nášho zariadenia, čo nám umožní jeho ďalšie použitie v nasledujúcich experimentoch.

4.1.1 Hypotéza

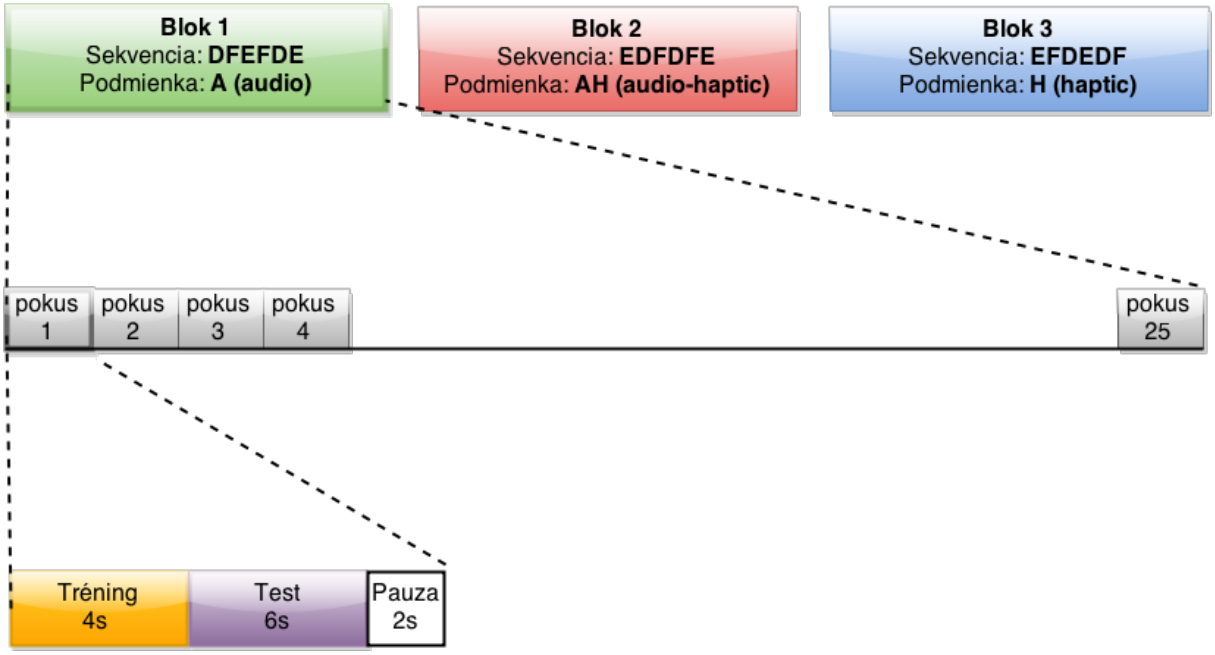
Hyp: 1 *Haptické vedenie spolu s audio spätnou väzbou uľahčujú učenie ordinálnej zložky hudobnej sekvencie oproti samostatnému použitiu audio, alebo haptickej spätnej väzby. Efektivita učiaceho procesu je meraná ordinálnou chybou*

4.1.2 Dizajn a štruktúra experimentu

Experiment pozostáva z 3 blokov, pričom každý blok je špecifikovaný svojou podmienkou. Podmienkou experimentu je typ spätnej väzby (audio, haptická a audio-haptická), ktorú subjekt dostáva počas trénovacej fázy v danom bloku. Hudobná sekvencia je rôzna pre každý blok, aby sme vedeli otestovať efektivitu každej trénovacej podmienky samostatne. Lewiston použil 30 opakovaní pokusu. Na základe pilotného testovania sme to skrátili na 25 pokusov, lebo po 25-tom pokuse sa subjekty sťažovali na jednoduchosť sekvencie, následný nezáujem a pozorovali sme zhoršenie chyby. Jeden pokus má 2 fázy, trénovaciu a testovaciu. V trénovacej fáze je subjektu prezentovaná vybraná sekvencia v špecifickom prevedení závislom od podmienky zvolenej pre daný blok. V testovacej fáze subjekt opakuje trénovanú sekvenciu, avšak bez podpory spätnej väzby z trénovacej fázy. Aby nebol pozorovaný žiadny učiaci efekt, je poradie blokov v experimente, ako aj výber sekvencie pre daný blok náhodné (obrázok č. 16).

Medzi trénovacou a testovacou fázou sa nenachádza žiadna prestávka. Medzi jednotlivými pokusmi je pauza 2 sekundy. Lewistonové experimenty [20] obsahovali pauzu aj medzi trénovacou a testovacou fázou. Na základne nášho pilotného testovania túto pauzu vynechávame, pretože subjekty intuitívne začínali testovaciu fázu hneď po skončení trénovacej. V dôsledku toho dochádzalo k vyššej chybovosti, ktorá kvantitatívne neodráža efektívnosť testovanej spätnej väzby pri trénovaní. Testovacia fáza je o dve sekundy dlhšia ako trénovacia, aby mali subjekty dostatok času na zopakovanie sekvencie. Pred začiatkom každého experimentu je subjekt poučený o jeho priebehu a na konci experimentu je urobené slovné interview ohľadom priebehu experimentu a

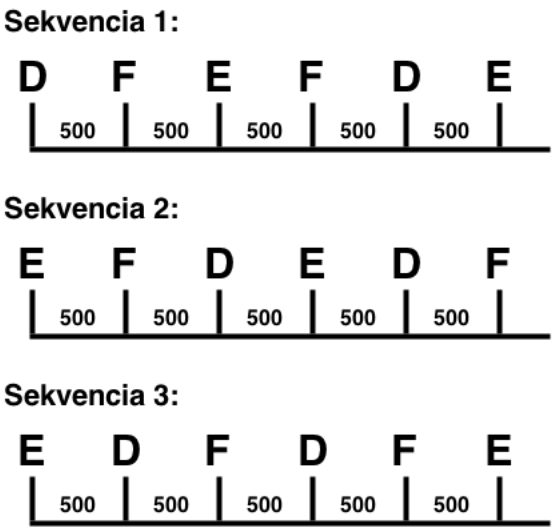
pocitov počas jednotlivých trénovacích podmienok.



Obr. 16: Schematické znázornenie prvého experimentu

4.1.3 Trénovacie sekvencie

Na testovanie boli zvolené tri sekvencie (obrázok č. 17) prevzaté z [20]. Každá sekvencia pozostáva zo 6 tónov, ktoré môžu nadobúdať 3 hodnoty a teda subjekt pri cvičení a testovaní zapája 3 prsty. Tón D zodpovedá stlačeniu klávesu D4 (293.7 Hz) pomocou ukazováka, označenie E je stlačenie klávesu E4 (329.6 Hz) prostredníkom a tón F je F4 kláves s frekvenciou 349.2 Hz stláčaný prstenníkom. Rytmika sekvencie je konštantná a časové intervaly medzi jednotlivými tónmi sú rovné 500 ms.



Obr. 17: Použité sekvencie v experimente 1 s konštantou temporálnou zložkou a variabilnou ordinálnou zložkou.

4.1.4 Subjekty

Experimentu sa zúčastnilo 15 subjektov od 21 do 37 rokov, pričom priemerný vek bol 28 rokov. Všetci boli praváci, pričom požiadavkou boli žiadne alebo minimálne skúsenosti s hrou na hudobný nástroj.

4.1.5 Trénovacie podmienky

Na overenie efektivity použitia haptických klávesov v procese výučby hudobnej sekvencie boli implementované nasledovné trénovacie podmienky: haptické - H, audio - A, audio-haptické AH. Tieto trénovacie podmienky zodpovedajú podmienkam v prácach [20, 13] a každá je charakteristická typom použitej spätnej väzby. V našom prípade pri podmienke A subjekt počuje nahrávku rytmickej sekvencie, pri podmienke H haptické klávesy pohybujú prstami subjektu a zároveň subjekt počuje tóny odpovedajúce stlačeným klávesom. Aby sme odfiltrovali vplyv vizuálneho systému na učenie, tak je na

haptických klávesoch pripevnený kryt, ktorý zabraňuje tomu, aby subjekt videl pohybujúce sa klávesy a prsty, či už počas trénovacej alebo testovacej fázy. Okrem zmeny testovacích podmienok je subjekt stále v rovnakej situácií, má na hlave slúchadlá a prsty pravej ruky má pripevnené o haptické klávesy počas trénovacej aj testovacej fázy.

Opíšeme trénovacie podmienky po bodoch:

1. audio - subjekt počas trénovacej fázy nehýbe rukami, iba počúva audio nahrávku danej sekvencie, ktorá bola vopred nahratá na našom haptickom piane a následne v testovacej fáze je vyzvaný k jej zopakovaniu.

2. haptická - vybraná sekvencia je trénovaná iba pomocou haptického vedenia. Klávesy sa automaticky stláčajú v poradí danom sekvenciou a keďže subjekt má prsty prilepené k týmto klávesom, tak sa počas testovacej fázy kontinuálne pohybujú spolu s klávesami. Kedže haptické klávesy vydávajú počas stláčania mierne bzučanie, je subjektu počas trénovacej aj testovacej fázy púšťaný do slúchadiel šum na zakrytie okolitých zvukov.

3. audio-haptická - ide o spojenie audio a haptickej spätnej väzby. Subjekt dostáva informáciu cez automatické pohyby klávesov a ich tónu. V následnej testovacej fáze danú sekvenciu opakuje, pričom tiež počuje zvuk stláčaných klávesov.

4.1.6 Priebeh experimentu

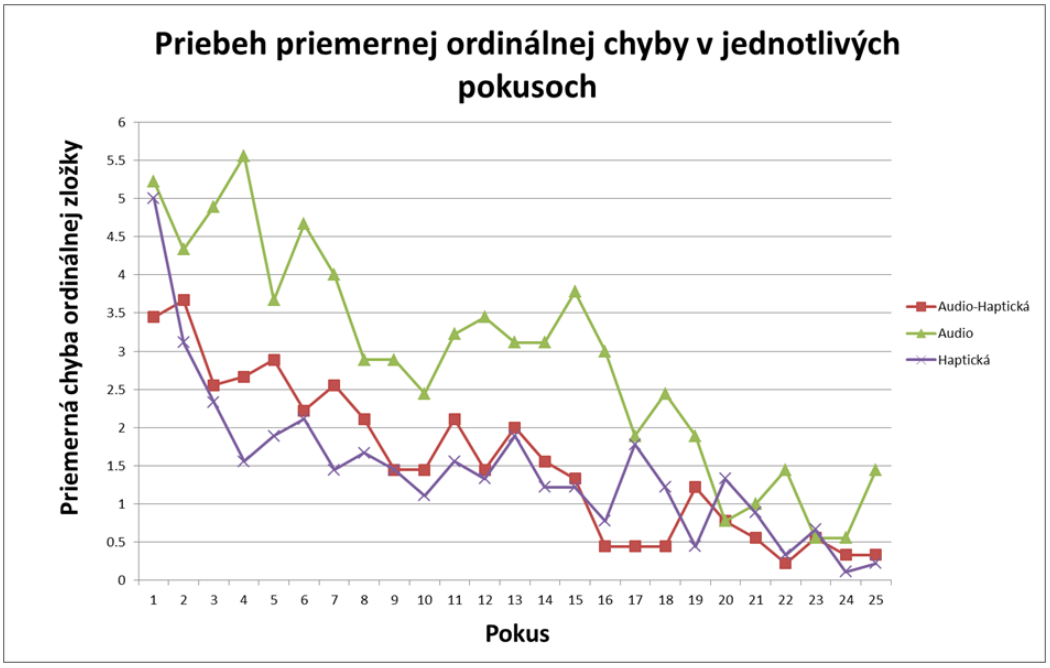
Na začiatku bol každý proband oboznámený so štruktúrou experimentu, teda z koľkých blokov pozostáva testovanie, koľko pokusov obsahuje blok a priebeh jedného pokusu. Usadil sa na stoličku za haptické klávesy s monitorom. Bol inštruovaný aby si položil pravú ruku na klávesy, pričom každý prst mal presne určenú pozíciu na klávesoch. Kvôli pohodliu počas testovania sedel subjekt na stoličke s bočnými operadlami a hrajúcu ruku mal položenú na operadle. Po tom ako sa účastník cítil pohodlne s pozíciou prstov na klávesoch bol požiadaný o pritlačenie prstov na klávesy, čo spôsobilo zafixovanie prstov k danému klávesu pomocou lepiacej pásky. Následne si subjekt mohol vyskúšať stlačenie klávesov a prispôsobiť pohodlnosť celkového nastavenia. Boli mu poskytnuté

maximálne dve minúty na oboznámenie sa so zvukom klávesov. Subjektu bolo navyše prezentovaných zopár náhodných sekvencií haptickým vedením, aby si zvykol na daný typ spätnej väzby.

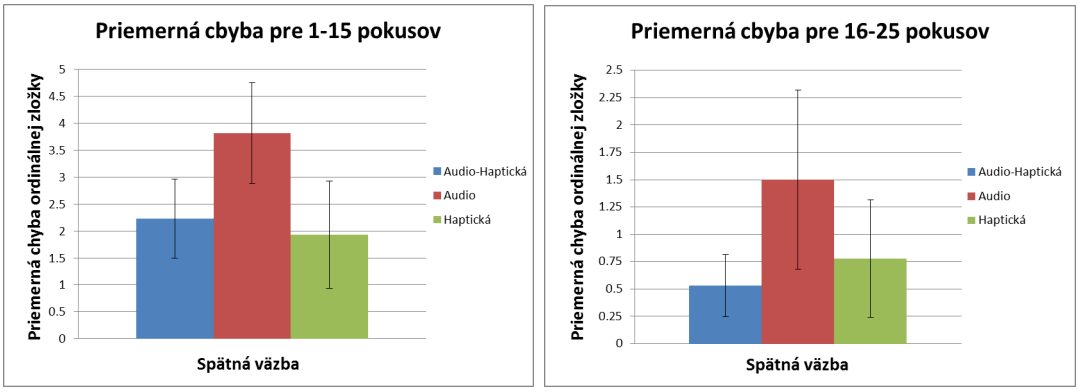
Pred každým testovacím blokom bol subjekt informovaný o forme spätnej väzby za ktorej prebehne trénovacia a testovacia fáza pokusu. Ak subjekt nemal dodatočné otázky, tak mu boli nasadené slúchadla a spustená aplikácia, ktorá ho sprevádzala počas daného bloku. Aplikácia začínala s 15 sekundovou úvodom počas ktorého sa mal subjekt oboznámiť s prostredím aplikácie a zamerať svoju pozornosť na experiment. Po úvodnom oboznámení nasledovala postupnosť 25 pokusov, pričom na obrazovke bolo viditeľné počítadlo pokusov. Po každej trénovacej fáze nasledovala testovacia, počas ktorej subjekt zahral sekvenciu, ktorú trénoval v predchádzajúcej fáze. Ak bola podmienka v danom bloku audio (A), tak v trénovacej fáze počul danú nahrávku. Pri haptickej (H) podmienke počul subjekt v slúchadlách silný šum, aby nebola prítomná žiadna zvuková stopa danej sekvencie. Pri haptickom vedení aplikácia zaručovala stláčanie klávesov v súlade s učenou sekvenciou a teda subjekt nepriamo stláčal dané klávesy. Pri audio-haptickej (AH) podmienke bola prítomná aj audio aj haptická spätná väzba. Po dokončení experimentu prebehlo s každým subjektov krátke interview o experimente.

4.1.7 Výsledky a analýza

Mierou chyby pri každom pokuse je Levensteinová vzdialenosť medzi prezentovanou zahratou sekvenciou. Bol použitý algoritmus 3.1. Na prvom grafe (obrázok č. 18) vidíme priebeh priemernej chyby pre všetky tri testovacie podmienky vypočítanej pre každý z 25 pokusov. Počas prvých 15 pokusov je chyba dosiahnutá pri haptickej spätnej väzbe o trochu menšia ako pri audio-haptickej a výrazne menšia ako pri iba audio spätnej väzbe. Rozdiely medzi jednotlivými podmienkami sa zmenšujú v druhej polovici pokusov, pričom audio-haptická podmienka predbehla haptickú podmienku, v oboch podmienkach probandi dosahujú výrazne menšiu chybu ako počas samostatnej audio spätnej väzby (obrázok č. 19).



Obr. 18: Priebeh priemernej chyby počas 25 pokusov pre testovacie podmienky A, H, AH.



Obr. 19: Priemerná chyba pre testovacie podmienky A, H, AH pre prvých 15 pokusov a posledných 10 pokusov.

Štatistickú významnosť zistených rozdielov overujeme pomocou analýzy rozptylu ANOVA. Dvojfaktorová ANOVA analýza pre dve premenné: typ podmienky a číslo pokusu 1-25 potvrdila štatistickú významnosť v obidvoch premenných: pre podmienky $F(15.91) = 44.01$ s hladinou významnosti $p << 0.0001$ a pre číslo pokusu $F(3.46) = 9.57$ s $p << 0.0001$. Tie isté závery boli potvrdené aj pri 2-ANOVE pri prvých 15 pokusoch a štatistická významnosť sa preukázala aj pri spätnej väzbe $F(15.43) = 55.1$ s $p << 0.0001$ a čísle pokusu $F(1.85) = 6.6$ s $p = 0.0001$. Je to prirodzené, keďže medzi prvými pokusmi dochádza k učeniu novej sekvencie a môžme očakávať aj vplyv čísla

pokusu.

Pri posledných 10 pokusoch sa však štatistická významnosť dát ukázala iba pre podmienky a to $F(2.52) = 8.38$ s $p = 0.0027$. Štatistická významnosť poradia pokusov sa nepreukázala pri posledných 10-tich pretože $F(0.43) = 1.44$ a hladina významnosti $p = 0.24$ má príliš vysokou hodnotou. Subjekty tiež deklarovali, že na naučenie poradia stačilo približne prvých 15 pokusov a na neskorší výsledok dát už číslo pokusu nemalo taký významný vplyv ako typ spätnej väzby. S tak veľkou hladinou významnosti môžeme tvrdiť, že vzťah dát od čísla pokusu je už iba výsledkom náhody. Keďže posledných 10 pokusov ukazuje dáta odfiltrované od čísla pokusu a závislé iba od typu podmienky trénovacej fázy, majú výsledky z druhej polovice experimentu väčšiu výpovednú hodnotu o efektivite použitej spätnej väzby. Ďalšou časťou analýzy boli štatistické jednofaktorové analýzy rozptylu 1-ANOVA posledných 10-tich pokusov pre jednotlivé kombinácie spätnej väzby. Silná závislosť od podmienky bola nameraná pre kombináciu A s AH a to $F(4.67) = 12.47$ s hladinou významnosti $p = 0.002$. To potvrdzuje náš záver, že pridanie haptickej väzby k audio podmienke prinieslo efektívnejšie učenie ordinálnej zložky danej sekvencie. Naopak slabá závislosť nám vyšla pri podmienke AH, H a to $F(0.3) = 1.62$ s $p = 0.22$ čo naznačuje, že prínos audio haptickej väzby v porovnaní s haptickou nie je až tak výrazný.

4.1.8 Zhrnutie a diskusia

Experiment č.1 bol navrhnutý na validáciu efektívnosti haptických klávesov a otestovanie vplyvu haptického vedenia na učenie ordinálnej zložky (Hypotéza č.1). Subjekty sa učili 3 rytmické sekvencie, ktoré boli zamerané na ordinálnu zložku a odlišovali sa iba v poradí tónov. Učenie týchto sekvencií bolo vykonané v troch blokoch pod tromi experimentálnymi podmienkami: A,H,AH. Výsledky podporujú prezentovanú hypotézu, že haptická spätná väzba spolu s audio spätou väzbou vedie k lepšiemu učeniu ordinálnej zložky rytmickej sekvencie oproti samostatnej audio spätnej väzbe. Výsledky sú konzistentné s prvou časťou experimentu 2 u Lewistona, z ktorého experimentálnych podmienok vychádzame. Podporuje to tiež efektívnosť nášho zariadenia, čo nám dovoľuje pokračovať v ďalších experimentoch.

Neočakávané výsledky sme dostali pri pohľade na priemernú chybu pre prvých 15

pokusov, ktorú môžeme vidieť na obrázku 19. V tomto prípade je priemerná chyba pri haptickej podmienke nižšia ako pri audio-haptickej. Pri zvyšných pokusoch je nižšia chyba pri audio-haptickej podmienke. Možné vysvetlenie tohoto javu sa nám núka z ústneho interview so subjektami po experimente, kde tretina subjektov rozpráva o audio spätnej väzbe v audio-haptickej podmienke ako o „vyrušujúcom elemente“. Ponúka sa nám preto interpretácia, že naivné subjekty majú na začiatku trénovania problém pracovať s haptickou a audio spätnou väzbou naraz.

4.2 Experiment 2

V druhom experimente sa zameriavame na meranie vplyvu haptického vedenia na učenie temporálnej zložky rytmickej sekvencie. Učené sekvencie budú jednotónové s rôznymi časovými intervalmi. Už Feyginova štúdia [8], kde skúmali haptickú spätnú väzbu na učenie sa komplexných 3D trajektórií ukázala, že haptické vedenie prinieslo výrazne zlepšenie kreslenia danej krivky z temporálneho aspektu. Hoci vizuálna spätná väzba výrazne prevýšila haptickú v presnosti tvaru trajektórie, správne načasovanie vykonávania celkového pohybu bolo presnejšie pri použití haptického vedenia.

Taktiež Grindlay [13] uvádza pri učení rytmických sekvencií zníženie chybovosti temporálnej zložky pri použití haptického vedenia spolu audio spätnou väzbou oproti audio spätnej väzbe. Preto nás zaujal výsledok druhej časti druhého experimentu u Lewistona [20], kde použitie haptického vedenia pri hre na klávesový nástroj neprinieslo výrazné zlepšenie učenia temporálnej zložky. V tomto prípade audio spätná väzba priniesla nižšiu chybovosť ako haptické vedenie. Lewiston v diskusii nepotvrdenie hypotézy odôvodňuje použitím rytmických sekvencií s príliš jednoduchou temporálnou zložkou a navrhuje otestovanie zložitejších rytmických sekvencií v rovnakých experimentálnych podmienkach. Toto jeho zdôvodnenie nás doviedlo k otázke, že či sa neúspech haptického vedenia pri použití klávesového haptického zariadenia potvrdí aj pri použití zložitejších rytmických sekvencií.

V štúdií [26] definovali autori 9 skupín sekvencií s rôznou komplexitou, ktoré odvodili ako permutácie zo základnej bázovej sekvencie. Delenie sekvencií do rôznych skupín obtiažnosti prebiehalo na základe toho ako daný rytmus pomáhal k indukovaniu „vnútorných hodín“, ktoré umožňujú špecifikovanie rytmického vzoru v počúvanej

sekvencii. Sila týchto hodín závisí od distribúcie akcentov, dôrazov vnímaných v danej sekvencii. Rytmické vzory, kde sú pozorované silné regularity, vedú k silnejším „vnútorným hodinám“ a zmysel subjektu zachytiť túto regularitu sa často označuje ako „cítenie rytmu“. V neskorších publikáciách sa zavádza pojem „metrický framework“ ako pomenovanie pre kognitívnu schému obsahujúcu hierarchicky usporiadané rôzne úrovne pulzácie. Tieto pulzácie sú vnímané ako séria vnútorných udalostí, kde každá n-tá udalosť (4,3 alebo 2) je zvýraznená.

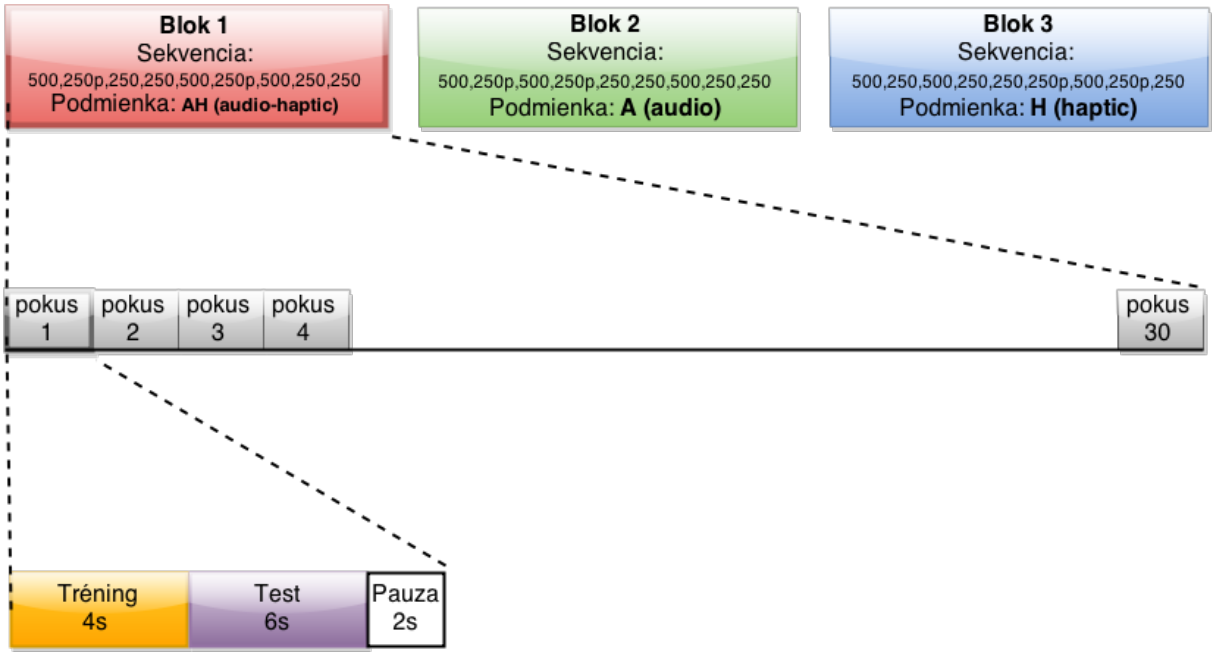
V našom experimente sme sa rozhodli použiť ako komplexnejšie rytmické sekvencie tzv. synkopové rytmy. Synkopa je z hudobného pohľadu prízvuk na neprízvučnej dobe, alebo posunutie doby kedy sa bežne očakáva prízvučná doba. Synkopa vzniká presunutím prízvuku z ťažkej doby na ľahkú dobu. Tento presun prízvuku narúša poslucháčové rytmické očakávania a preto sa sekvencie so synkopami zaraďujú medzi komplexné kategórie rytmických sekvencií [17].

4.2.1 Hypotéza

Hyp: 2 *Haptické vedenie spolu s audio spätnou väzbou uľahčujú učenie temporálnej zložky hudobnej sekvencie oproti samostatnému použitiu audio spätnej väzby. Efektivita učiaceho procesu je meraná temporálnou chybou.*

4.2.2 Dizajn a štruktúra experimentu

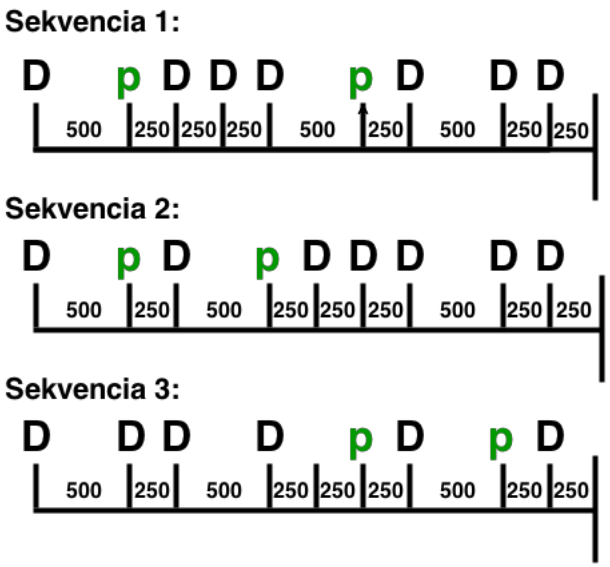
Štruktúra experimentu je zhodná so štruktúrou prvého experimentu (obrázok č. 20) s použitím tých istých testovacích podmienok. Experiment obsahuje tri testovacie bloky, pričom v každom bloku je iná testovacia podmienka a to buď A,H alebo AH. Vzhľadom na použitie zložitejšej sekvencie má subjekt v každom bloku 30 pokusov a každý pokus sa skladá z trénovacej a testovacej fázy. Medzi pokusmi je 4 sekundová pauza a testovacia fáza je dlhšia o 2 sekundy.



Obr. 20: Schematické znázornenie druhého experimentu.

4.2.3 Trénovacie sekvencie

Ako už bolo spomenuté v úvode tohto experimentu, hudobné sekvencie sa budú skladať zo synkopových rytmov a sú hrané pomocou jedného tónu a to $D4$, ktorý budú subjekty hrať pomocou ukazováka. Sekvencie budú obsahovať 2 druhy rytmov v trvaní $250ms$ označované číslom 250, alebo v trvaní $500ms$ označovaných 500. Tri sekvencie boli prevzaté z publikácie [17] a sú znázornené na obrázku č. 21. Na dosiahnutie synkopového rytmu boli okrem nôt použité aj pauzy pri ktorých subjekt nestláča žiadny kláves. Pauzy boli v rovnakých trvaniach ako tóny, $250ms$ alebo $500ms$ a na obrázku sú označené písmenom p.



Obr. 21: Použité sekvencie v experimente 2 s konštantou ordinálnou zložkou a variabilnou temporálnou zložkou.

4.2.4 Subjekty

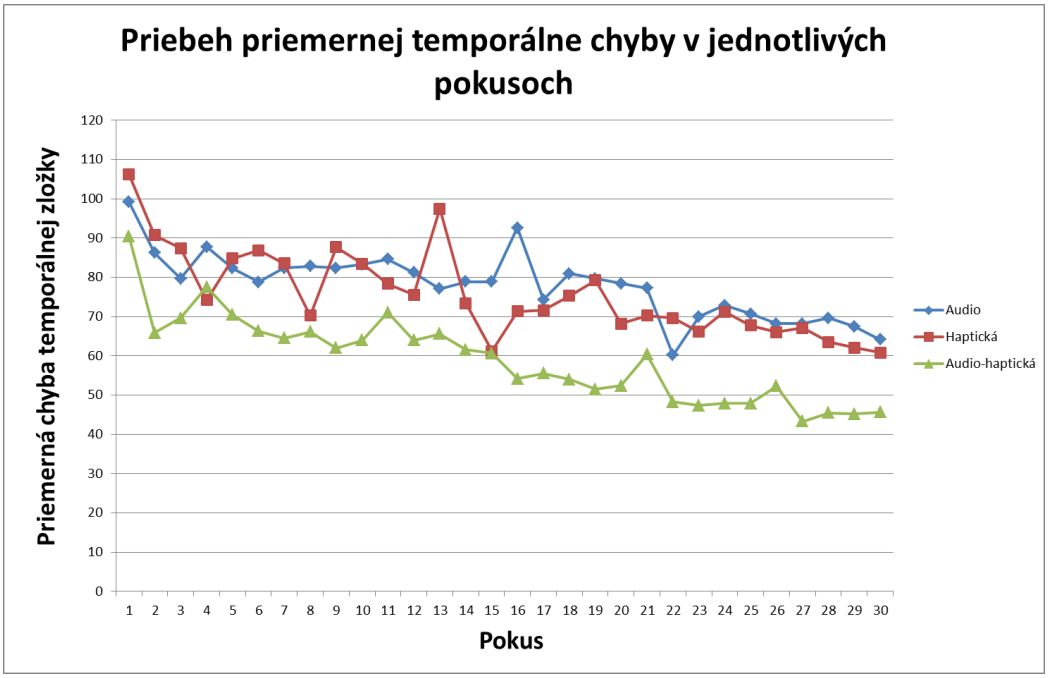
Testovacie subjekty boli tí istí uchádzači, ktorí sa zúčastnili prvého experimentu. Keďže experiment č. 2 nijako nenadväzuje na experiment č. 1 a trénovacie sekvencie sú odlišné v temporálnej aj ordinálnej zložke od sekvencií použitých v predchádzajúcom experimente, u subjektov by nemal byť pozorovaný žiadny učiaci efekt a experimenty môžeme analyzovať ako dve nezávislé udalosti. Uchádzači dostali nové inštrukcie k priebehu experimentu a na koncu bolo s nimi spravené ďalšie ústne interview.

4.2.5 Priebeh experimentu

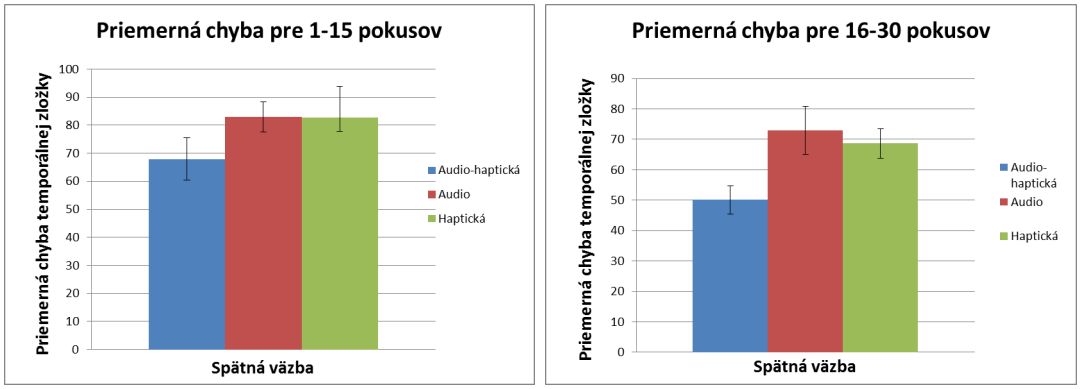
Keďže účastníci už boli oboznámení s prvým experimentom, pri druhom experimente už neabsolvovali úvodné predstavenie zariadenia a priebehu experimentu. Na rozdiel od predchádzajúceho experimentu boli oboznámení, že budú stláčať ukazovákom iba tón $D4$ a dôležitosť bude kladená na dĺžku stlačenia. Rozdelenie do blokov, štruktúra bloku a trénovacie podmienky sú nezmenené, takže účastníkom už nie sú tieto informácie znovu opakované.

4.2.6 Výsledky a analýza

Pri výpočte chyby temporálnej zložky testovanej sekvencie sme používali rytmickú vzdialenosť ako je opísaná v časti 3.6.2. Rytmická vzdialenosť bola určovaná medzi sekvenciou vykonanou haptickými klávesami a zreprodukovanou sekvenciou. Na obrázku č. 22 môžme vidieť priebeh priemernej chyby temporálnej zložky v každom pokuse pre všetky tri testovacie podmienky. Z grafu vyplýva, že najefektívnejšia je kombinovaná audio-haptická spätná väzba u ktorej aj vidíme najvýraznejšie zlepšenie v smere stúpajúceho počtu pokusov. Podmienky H, A kde pôsobí iba audio alebo haptická spätná väzba sú v prebehu chybovosti približne na rovnakej úrovni, avšak o kúsok lepšie je na tom haptická podmienka a ich zlepšenie v priebehu nárastu počtu podstúpených pokusov nie je až také výrazné. Oproti experimentu 1 s ordinálnou chybou, nevidíme tak výrazné rozdiely medzi audio spätnou väzbou a spätnými väzbami obsahujúcimi haptickú zložku (obr. fig:exp2-graph2). Štatisticky významný rozdiel medzi skupinami H, A v posledných 15 pokusoch nepotvrdil ani jednofaktorová ANOVA test, pre ktorý nám vyšla hodnota $F(210.3) = 4.85$ s hladinou významnosti $p = 0.36$. Naopak signifikantné rozdiely objavila analýza rozptylu pre skupiny AH,A ($F(3925.9) = 92, p << 0.0001$) a AH,H ($F(2592.8) = 113.7, p << 0.0001$). Pri dvojfaktorovej ANOVE sa podobne ako v prvom experimente ukázala silná štatistická významnosť aj pre typ podmienky $F(3215.45) = 111.2$ s hladinou významnosti $p << 0.0001$ aj pre poradové číslo pokusu $F(256.36) = 8.87$, $p << 0.0001$. Narozdiel od prvého experimentu sa v tomto experimente potvrdila štatistická významosť pre posledných 15 pokusov aj v čísle pokusu ako závislej premennej ($F(75.59) = 4.55$,$p = 0.0003$). Tieto čísla nám poskytuje informáciu o tom, že zvolený počet pokusov nebol pri testovaní temporálnej zložky dostatočne veľký na to, aby dokázal na dátach odfiltrovať vplyv poradia pokusu a zanechal len vplyv testovacej skupiny. Čo sa týka typu podmienky pri posledných 15 pokusoch, tento faktor zostáva značne významný čo naznačujú aj štatistické dáta $F(2218.8) = 133.45$ s hladinou významnosti $p << 0.0001$.



Obr. 22: Priebeh priemernej chyby počas 30 pokusov pre testovacie podmienky A,H,AH.



Obr. 23: Priemerná chyba pre testovacie podmienky A,H,AH pre prvých 15 pokusov a posledných 15 pokusov.

4.2.7 Zhrnutie a diskusia

Experiment č.2 bol zameraný na meranie vplyvu haptického vedenia na učenie temporálnej zložky rytmickej sekvencie. Subjekty sa učili 3 rytmické sekvencie, ktoré boli zamerané na temporálnu zložku. Používali iba jeden tón a to D4, pričom sa menila iba dĺžka tónu v sekvencii. Boli použité zložitejšie synkopové rytmy. Učenie týchto sekvencií bolo vykonané v troch blokoch pod tromi experimentálnymi podmienkami: A, H, AH. Pri analýze štatistickej významnosti sa ukázalo, že pri posledných 15-tich

pokusoch zostal vplyv poradia pokusu. To naznačuje, že ešte aj v posledných 15-tich pokusoch prebiehalo učenie a aby sme odfiltrovali vplyv poradia pokusu bolo by pri takýchto zložitejších sekvenciách vhodnejšie použiť viacej pokusov. Výsledky podporujú prezentovanú hypotézu, že haptická spätná väzba spolu s audio spätou väzbou vedie k lepšiemu učeniu temporálnej zložky rytmickej sekvencie oproti samostatnej audio spätnej väzbe. Použitie zložitejších sekvencií sa teda ukázalo ako vhodný spôsob pre testovanie vplyvu haptického vedenia na temporálnu zložku rytmickej sekvencie.

4.3 Experiment 3

V treťom experimente testujeme vplyv haptického vedenia pri učení sekvencií, ktoré obsahujú variabilnú temporálnu aj ordinálnu zložku. K takýmto sekvenciám budeme referovať ako ku kombinovaným sekvenciám. Prvý experiment bol zameraný na testovanie ordinálnej zložky a používal sekvencie tónov s nemennou temporálnou zložkou. Druhý experiment testoval vplyv haptického vedenia na temporálnu zložku a použité sekvencie obsahovali jeden tón s rôznou dĺžkou. Obidva experimenty síce prinášajú závery v podobe oddelenia vplyvu haptickej spätnej väzby na temporálnu a ordinálnu časť sekvencie, avšak návrhom sú vzdialené reálnej hre na klávesový hudobný nástroj. Väčšina trénovacích sa sekvencií obsahuje obidve zložky, teda je rôznorodá nielen v poradí ale aj v rytmike tónov. Preto aj cieľom tohto experimentu je viacej sa priblížiť reálnym podmienkam učenia sa hudobnej sekvencie a pozrieť na prínos haptického vedenia ak sú prítomné obidve zložky rytmickej sekvencie. Už Lewistom [20] mal pokus uskutočniť daný experiment, avšak narazil na komplikácie, ktoré súviseli s tým, že zvolil príliš zložitú a dlhú sekvenciu. Výsledkom bolo, že subjektom nestačil počet pokusov (30) na to, aby sa naučili správne poradie tónov a komplikácie s porovnaním rytmickej zložky danej sekvencie. Chybu experimentu nakoniec vyhodnocoval iba ako chybu v poradí tónov. Naším cieľom je upraviť podmienky tohto experimentu, aby sme vedeli vyhodnotiť dáta tak, že budú dávať odpoveď na to, či haptické vedenie je efektívne pri učení sa kombinovaných sekvencií. Obmenou jeho experimentálnych nastavení bude skrátenie sekvencií z 10 tónov na 6.

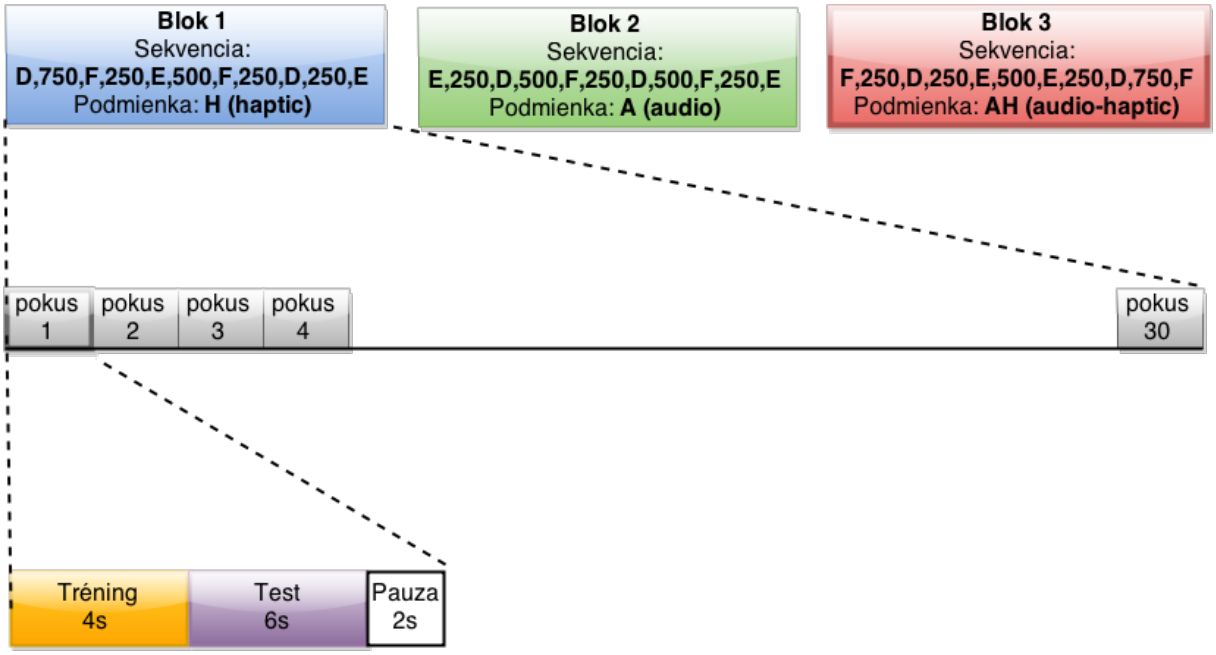
4.3.1 Hypotézy

Hyp: 3 *Haptické vedenie spolu s audio spätnou väzbou uľahčujú učenie ordinálnej zložky kombinovanej sekvencie oproti samostatnému použitiu audio spätnej väzby. Efektivita učiaceho procesu je meraná ordinálnou chybou.*

Hyp: 4 *Haptické vedenie spolu s audio spätnou väzbou uľahčujú učenie temporálnej zložky kombinovanej sekvencie oproti samostatnému použitiu audio spätnej väzby. Efektivita učiaceho procesu je meraná temporálnou chybou.*

4.3.2 Štruktúra experimentu

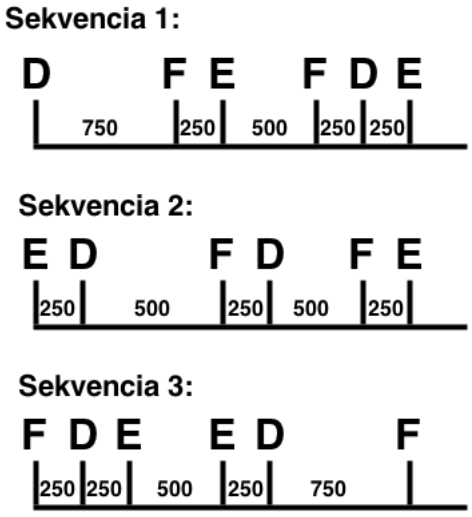
Štruktúra experimentu je zhodná so štruktúrou prvého experimentu (obrázok č. 20) s použitím tých istých testovacích podmienok. Experiment obsahuje tri testovacie bloky, pričom v každom bloku je iná testovacia podmienka a to buď A,H alebo AH. Subjekt má v každom bloku 30 pokusov kvôli prítomnosti variabilnej temporálnej zložky a každý pokus sa skladá z trénovacej a testovacej fázy. Medzi pokusmi je 4 sekundová pauza a testovacia fáza je dlhšia o 2 sekundy (obrázok č. 24).



Obr. 24: Schematické znázornenie experimentu 3.

4.3.3 Trénovacie sekvencie

Sekvencie boli prevzaté z Lewistonovho prvého experimentu [20]. Narozdiel však od 10 tónov, sme už kvôli dôvodom spomenutým v úvode experimentu, skrátili sekvencie na šesť tónov.



Obr. 25: Použité sekvencie v experimente 3 s variabilnou ordinálnou a temporálnou zložkou. Sekvencie sa skladajú z poradia troch tónov a to D4 označeného D, ktorý je stláčaný ukazovákom, E4 (E)tónu pre prostredník a F4 (F) stláčaný prstenníkom. Z pohľadu rytmiky sa v sekvencii vyskytujú tri dĺžky tónov o trvaní 250 ms, 500 ms a 750 ms, označené sú na obrázku daným číslom bez jednotky.

4.3.4 Subjekty

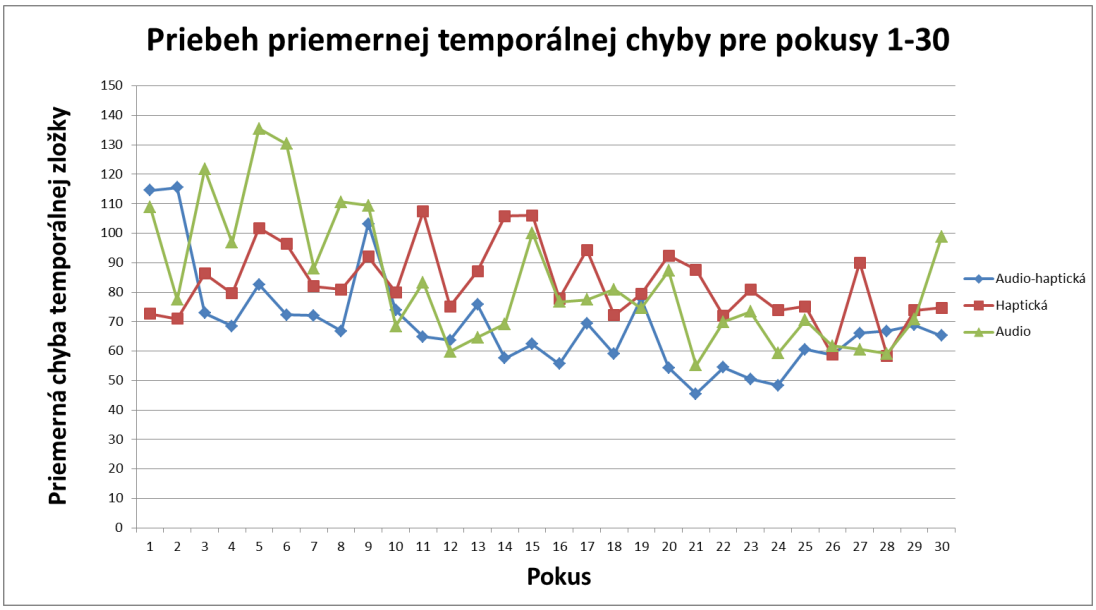
V experimente sa použijú sekvencie z prvého experimentu len s inou temporálnou zložkou, preto nebolo možné použiť účastníkov z predchádzajúcich experimentov, nakoľko by sme nevedeli pri chybovosti oddeliť vplyv naučenia sa ordinálnej časti danej sekvencie z prvého pokusu. Tohto experimentu sa zúčastnilo nových 15 subjektov vo veku od 22 do 33 rokov, pričom priemerný vek bol 27 rokov. Subjekty nemali predchádzajúce skúsenosti s hrou na klavíri a všetci účastníci boli praváci.

4.3.5 Priebeh experimentu

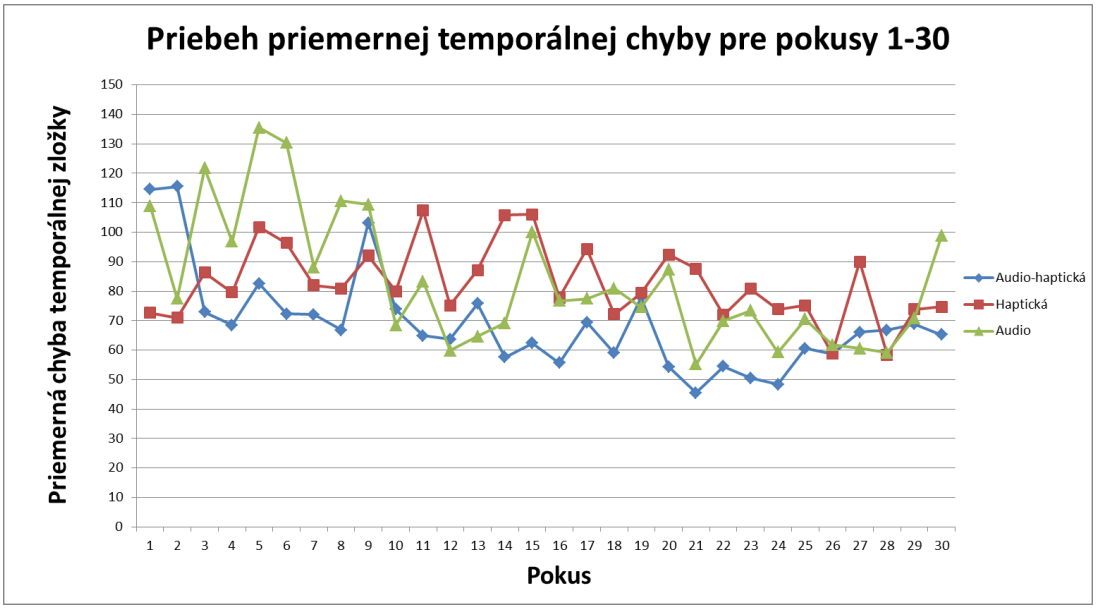
Nový účastníci experimentu absolvovali úvodné oboznámenie so zariadením a miestom. Po nastavení zariadenia tak, aby sa za elektronickým pianom cítili pohodlne im bol opísaný priebeh experimentu. Pred začiatkom prvého bloku sa ich prsty pomocou obojstrannej lepiacej pásky prilepili na prislúchajúce klávesy.

4.3.6 Výsledky a analýza

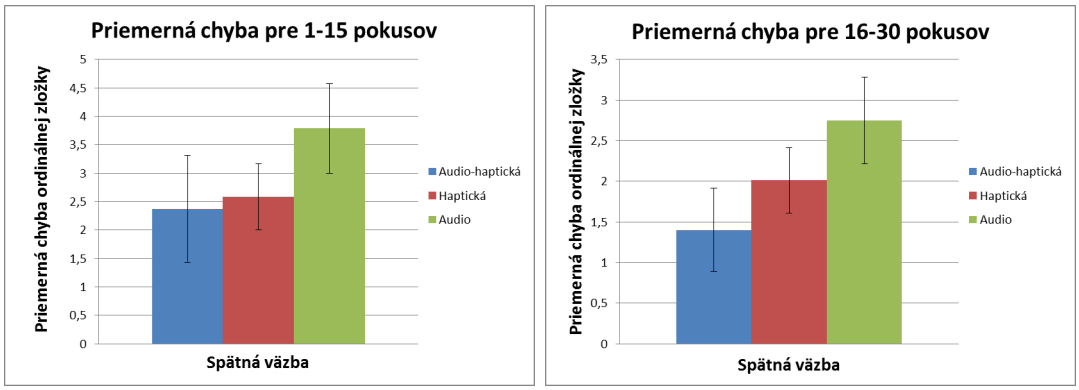
Keďže používame sekvencie s rôznou temporálnou a ordinálnou zložkou a naše hypotézy sa zameriavajú na obidve tieto zložku, preto rozdeľujeme aj analýzu na analýzu temporálnej a analýzu ordinálnej chyby. Na prvom grafe (obrázok č. 26) vidíme priebeh priemernej ordinálnej chyby počas 30 pokusov. Priebeh kriviek pre jednotlivé podmienky kopírujú výsledky z prvého experimentu. Najefektívnejšou podmienkou je *AH*, po nej nasleduje *H* a najmenej úspešnou je *A*. Na grafe tiež vidíme, že minimá všetkých kriviek sa dosahujú okolo 20 až 25-teho pokusu a posledných 5-10 pokusov môžme vidieť mierne zhoršenie. Daný jav si po na základ interview s uchádzačmi vysvetľujem ako stratenie sústredenosti, keďže väčšine sa zdal počet 30 pokusov príliš nadbytočný a po naučení sa danej sekvencie im prišlo „nudné“ znova opakovať danú sekvenciu. To potvrdzuje závery z iných štúdií spomenutých v prehľade problematiky, kde príliš často podávaná spätná väzba stráca svoju efektivitu. Keď sa pozrieme na priebeh temporálnej chyby učenej sekvencie (obrázok č. 27), tak znovu sa výsledky dajú porovnať so závermi druhého experimentu. Ako najefektívnejšia sa ukázala audio-haptická podmienka, nasledovaná audio a haptickou spätnou väzbou. Samostatné audio a haptické vedenie sa počas experimentu striedajú v úspešnosti.



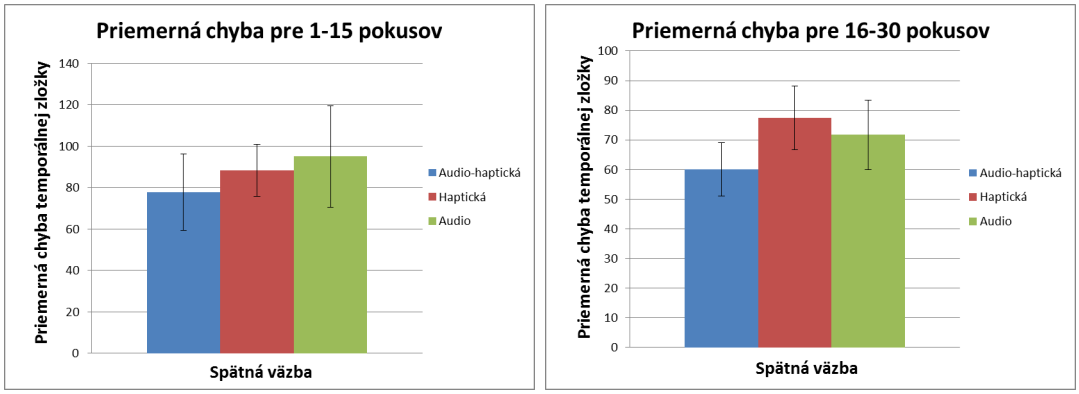
Obr. 26: Priebeh priemernej temporálnej chyby počas 30 pokusov pre testovacie podmienky A,H,AH.



Obr. 27: Priebeh priemernej temporálnej chyby počas 30 pokusov pre testovacie podmienky A,H,AH.



Obr. 28: Priemerná ordinálne chyba pre testovacie podmienky A,H,AH pre prvých 15 pokusov a posledných 15 pokusov.



Obr. 29: Priemerná temporálnej chyba pre testovacie podmienky A,H,AH pre prvých 15 pokusov a posledných 15 pokusov.

Pri dvojfaktorovej analýze kovariance ANOVA pre 1-30 pokus sa ukázala štatistická významnosť tak od podmienky ako aj od poradia pokusu.

zložka	**ANOVA pre podmienku**	**ANOVA pre poradie**
ordinálna	$F(15.05) = 56.12, p << 0.0001$	$F(1.31) = 4.87, p << 0.0001$
teporálna	$F(2009.267) = 8.95, p = 0.0004$	$F(489.75) = 2.18, p = 0.0058$

Ekvivalentne s experimentom č.1 nám v ordinálnej zložke pri 16-30 pokuse odpadá závislosť od čísla pokusu a dáta majú štatistickú významnosť iba pre podmienku ($F(6.72) = 32.02, p << 0.0001$). Štatistická významnosť podmienky sa potvrdila aj v temporálnej časti ($F(1171.07) = 12.37, p = 0.001$) a dokonca nepotvrdila pre číslo pokusu ($F(143.6) = 1.51, p = 0.17$). Narozdiel od experiment č.2 sa nám teda podarilo dosiahnuť odfiltrovanie vplyvu poradia pokusu na namerané dáta pre temporálnu zložku a zostáva iba závislosť od typu použitej podmienky. Tento rozdiel môže byť spôsobený jednoduchšou temporálnou sekvenciou oproti sekvencii použitej v experimente č.2.

4.3.7 Zhrnutie a diskusia

Experiment č.3 bol zameraný na priblíženie sa reálnym podmienkam učenia rytmických sekvencií. Meria vplyv haptického vedenia na učenie kombinovaných rytmických sekvencií, ktoré obsahujú variabilné temporálne aj ordinálne zložky. Subjekty sa učili 3

takéto rytmické sekvencie a učenie bolo vykonané v troch blokoch pod tromi experimentálnymi podmienkami: A,H,AH. Skrátenie dĺžky sekvencie oproti prvému experimentu Lewistona nám teda umožnilo získať dáta pre obidve zložky. Výsledky potvrdzujú prvú hypotézu experimentu, že haptické vedenie spolu s audio spätou väzbou vedú k lepšiemu učeniu ordinálnej zložky kombinovanej rytmickej sekvencie oproti samostatnej audio spätnej väzbe a tiež potvrdzujú druhu hypotézu experimentu, že haptické vedenie spolu s audio spätou väzbou vedú k lepšiemu učeniu temporálnej zložky kombinovanej rytmickej sekvencie oproti samostatnej audio spätnej väzbe. To je konzistentné zo závermi experimentov 1 a 2 v ktorých sa vplyv haptického vedenia skúmal samostatne pre každú zložku sekvencie. Zaujímavosťou je mierny nárast ordinálnej chyby pri posledných 5-tich pokusoch. Na základe ústneho interview zo subjektami usudzujeme, že dôvodom je strata záujmu kvôli veľkému počtu pokusov. Na základe pilotného testovania sme tento efekt predpokladali a v prvom experimente sme mu predišli použitím menšieho počtu pokusov. Počet pokusov 30 bol v tomto prípade zvolený kvôli pridaniu temporálnej zložky a narozdiel od experimentu 2 sa ukázal ako dostatočný.

Záver

Hlavnou témou tejto diplomovej práce bola diskusia a výskum efektívnosti použitia haptického vedenia v procese učenia sa nových hudobných sekvencií v porovnaní s použitím audio spätnej väzby. V prvej kapitole sme celkom obsiahle pokryli oblasť výskumu učenia a nadobúdania nových motorických zručností, pričom dôraz bol kladený na súčasný stav použitia haptického vedenia ako formy externej spätnej väzby v procese rehabilitácie a v hudobnej pedagogike. Predchádzajúce štúdie potvrdili efektivitu haptického vedenia hlavne v časových aspektoch učeného pohybu a preto výučba nových rytmických sekvencií bola cieľovou oblasťou, kde sme skúmali efektívnosť vplyv haptického vedenia ako inovatívnej formy výučby hry na hudobný nástroj. Druhá kapitola bola venovaná nami zostrojeným haptických klávesom, kde dôležitou úlohou bolo presné zadefinovanie požiadaviek, ktoré musia tieto klávesy spĺňať, aby sme ich mohli v navrhnutých experimentoch použiť ako zariadenie poskytujúce haptické vedenie. Kapitola podrobne popisuje konštrukciu tohto zariadenia aj s popisom komponentov, čím sa vytvára priestor na prípadný budúci vývoj. Výsledkom softvérovej časti implementácie je aplikácia, ktorá užívateľsky príjemným rozhraním umožňuje ovládať zostrojené haptické klávesy a vyhodnocovať zaznamenané dáta z experimentov. Tretia kapitola sa už priamo venuje overeniu vplyvu haptického vedenia na výučbu rytmických sekvencií. Tri experimenty boli navrhnuté tak, aby vyhodnotili efektívnosť haptickej spätnej väzby v porovnaní s audio spätnou väzbu. Hudobné sekvencie sú zložené z ordinálnej a temporálnej časti, pričom vykonané experimenty skúmali vplyv haptického vedenia na kombinované sekvencie s rôznou ordinálnou a temporálnou zložkou a na sekvencie, kde jedna z týchto zložiek je konštantná. Boli zadefinované tri experimentálne podmienky: audio, haptická, audio-haptická, ktoré sa odlišovali v spôsobne prezentovania učenej sekvencie. Subjekt sa v každom experimente učil inú vybranú sekvencie pod každou s týchto podmienok, čím sme docieli nameranie dát zachytávajúci vplyv danej spätnej väzby. Prvý experiment potvrdil celkom signifikantný pozitívny vplyv haptického vedenia na učenie ordinálnych sekvencií. Tieto výsledky sú konzistentné s predchádzajúcimi štúdiami [20]. Druhý experiment potvrdil výsledky z [13] o pôsobení haptickej spätnej väzby na temporálnu zložku hudobnej sekvencie. Zvolením zložitejších synkopových rytmov sme zároveň vyvrátili Lewistonovo pozorovanie, že haptické vedenie

nemá žiadny vplyv na učenie temporálnych sekvencií a že je horšie ako samostatne použitá audio spätná väzba. Posledný experiment navyše potvrdil závery z prvého a druhého experimentu na kombinovaných sekvenciách.

Problematika vplyvu haptického vedenia na učenie rytmických sekvencií skúmaná v tejto diplomovej práci ponúka niekoľko možností pre ďalší výskum. Prvou oblasťou je preskúmanie vplyvu na obojručnú koordináciu, keďže prechod na obojručnú hru je jedným z významných štádií pri hre na klávesový hudobný nástroj. Ďalšou zaujímavou oblasťou je vplyv haptického vedenia na hudobne už skúsené subjekty, čím by sa mohlo podariť nájsť závislosť medzi zložitosťou rytmickej sekvencie a efektu haptického vedenia. Významným krokom by mohlo byť vytvorenie uceleného systému na poskytovanie spätnej väzby pri učení rytmických sekvencií, ktorého súčasťou by bolo okrem iných foriem spätnej väzby (napr. audio) aj haptické vedenie.

Literatúra

[1] Golandsky institute. `http://www.golandskyinstitute.org`, 2015.

[2] J.A. Adams. A closed/loop theory of motor leraning. 1971.

[3] M.L. Aisen, H.I. Krebs, N. Hogan, F. McDowell, and B.T. Volpe. The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. *Arch. Neurol.*, 54(4):443–446, April 1997.

[4] T. Armstrong. Feedback and perceptual-motor skill learning: A review of information feedback and manual guidance. Technical Report 25, University of Michigan, Depart- ment of Psychology, 1970.

[5] N.A. Bernstein. *The Coordination and Regulation of Movement.* Pergamon Press, London, 1967.

[6] S.K. Charles. *It's All in the Wrist: A Quantitative Characterization of Human Wrist Control.* PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[7] S.E. Fasoli, H.I. Krebs, J. Stein, W.R. Frontera, and N. Hogan. Effects of robotic ther- apy on motor impairment and recovery in chronic stroke. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 84(4):477–482, 2003.

[8] D. Feygin, M. Keehner, and R. Tendick. Haptic guidance: experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002*, 2002.

[9] S. Fink. *Mastering Piano Technique: A Guide for Students, Teachers, and Performers.* Amadeus Press, 1992.

[10] P. Fitts and M. Posner. *Human Performance.* Greenwood Press, 1967.

[11] J.J. Gibson. *The ecological approach to visual perception.* Houghton-Mifflin, Boston, 1979.

[12] R.B. Gillespie, M.S. Modhrain, P. Tang, C. Pham, and D. Zaretsky. The virtual teacher. In *In ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*, Anaheim, CA, November 1998.

[13] G. Grindlay. Haptic guidance benefits musical motor learning. In *Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2008. haptics 2008. symposium on*, pages 397–404, March 2008.

[14] J.D. Hagman. Presentation and test-trial effects on acquisition and retention of distance and location. 1983.

[15] D. Holding and A. Macrae. Guidance, restriction, and knowledge of results. 1964.

[16] S.W. Keele and J.J. Summers. Changes in the human brain during rhythm learning. *Motor control: Issues and trends.*, pages 109–142, 1976.

[17] P.E. Keller and E. Schubert. Cognitive and affective judgements of syncopated musical themes. *Advances in Cognitive Psychology*, 7:142–156, 2011.

[18] H.I. Krebs, N. Hogan, M.L. Aisen, and B.T. Volpe. Robot-aided neurorehabilitation. *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, 6(1):75–87, 1988.

[19] O. Lambercy, L. Dovat, R. Gassertd, E. Burdet, C.L. Teo, and T. Milner. A haptic knob for rehabilitation of hand function. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 15(3):356–366, 2007.

[20] C. E. Lewiston. Magkeys: A haptic guidance keyboard system for facilitating sensorimotor training and rehabilitation. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2009.

[21] J. Liu, S. C. Cramer, and D. J. Reinkensmeyer. Learning to perform a new movement with robotic assistance: comparison of haptic guidance and visual demonstration. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 3:20, 2006.

[22] K.M. Newell. Motor skill acquisition. 1991.

[23] M.S. O'Modhrain. *Playing by Feel: Incorporating Haptic Feedback Into Computer-Based Musical Instruments*. PhD thesis, Stanford University, 2000.

[24] M.S. O'Modhrain and C. Chaffe. Musical muscle memory and the haptic display of musical nuance. 1996.

[25] O. Ortmann. *The Physiological Mechanics of Piano Technique*. E.P. Dutton, Inc., 1962.

[26] D.J. Povel and P. Essens. Perception of temporal patterns. *Music Perception*, 2:411–440, 1985.

[27] D. Reinkensmeyer, D. Aoyagi, J. Emken, J. Galvez, W. Ichinose, G. Kerdanyan, J. Nessler, S. Maneekobkunwong, B. Timoszyk, K. Vallance, R. Weber, R. de Leon, J. Bobrow, S. Harkema, J. Wynne, and V. Edgerton. Robotic gait training: toward more natural movements and optimal training algorithms. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 7:4818–4821, 2004.

[28] K. Sakai, O. Hikosaka, S. Miyauchi, R. Takino, T. Tamada, N.K. Iwata, and M. Nielsen. Neural representation of a rhythm depends on its interval ratio. *J. Neurosci.*, 19(22):10074–0081, 1999.

[29] K. Sakai, N. Ramnani, and R.E. Passingham. Learning of sequences of finger move- ments and timing: frontal lobe and action-oriented representation. *J. Neurophysiol.*, 88(4):2035–2046, 2002.

[30] A. Salmoni, R. Schmidt., and C. Walter. Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. 1984.

[31] R.A. Schmidt and T. Lee. *Motor Control And Learning*.

[32] D.C. Shapiro and R.A. Schmidt. The schema theory: Recent evidence and developmen- tal implications. 1982.

[33] C.D. Takahashi, L. Der-Yeghiaian, V. Le, R.R. Motiwala, and S.C. Cramer. Robot-based hand motor therapy after stroke. *Brain*, 131:425–437, 2008.

[34] B.T. Volpe, H.I. Krebs, and N. Hogan. Is robot-aided sensorimotor training in stroke rehabilitation a realistic option? *Curr. Opin. Neurol.*, 14(6):745–752, 2001.

[35] B.T. Volpe, H.I. Krebs, N. Hogan, L. Edelstein, C. Diels, and M.L. Aisen. A novel approach to stroke rehabilitation: robot-aided sensorimotor stimulation. *Neurology*, 54(10):1938–1944, 2000.

[36] B.T. Volpe, H.I. Krebs, N. Hogan, L. Edelsteinn, C.M. Diels, and M.L. Aisen. Robot training enhanced motor outcome in patients with stroke maintained over 3 years. *Neurology*, 53(8):1874–1876, 1999.

[37] G. Wulf, C. Shea, and C. Whitacre. Physical-guidance benefits in learning a complex motor skill. 1998.

[38] Y. Yokokohji, R.L. Hollis, T. Kanade, K. Henmi, and T. Yoshikawa. Toward machine mediated training of motor skills - skill transfer from human to human via virtual environment. pages 32–37, 1996.

[39] R. J. Zatorre and A. R. Halpern. Mental concerts: musical imagery and auditory cortex. *Neuron*, 47:9–12, 2005.

Príloha A

Súčasťou práca je príloha, ktorá je prístupná k stiahnutiu na adrese:

`https://bitbucket.org/matej_klobusnik/haptic_guidance_evaluator/wiki/Home`

.

Obsahuje :

- zdrojové kódy k použitému softvéru
- videá demonštrujúce funkcionalitu vytvorených haptických klávesov
- audio nahrávaky použitých rytmických sekvencií