

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Demonstrační systém pro magnetický manipulátor MagMan

Matyáš Vlček

Školitel: Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.
Obor: Kybernetika a Robotika
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vlk** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **499119**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Demonstrační systém pro magnetický manipulátor Magman

Název bakalářské práce anglicky:

Demonstration system for Magman magnetic manipulator

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je připravit demonstrační aplikace pro magnetický manipulátor Magman.

- 1) Navrhněte a realizujte mechanickou konstrukci hudebního nástroje pro magnetický manipulátor Magman.
- 2) Vytvořte řídicí software, který bude hrát skladby zapsané ve formátu MIDI souboru.
- 3) Pro rozšíření možností platformy proveďte experimenty s manipulací s mechanicky propojenými kuličkami.
- 4) Vytvořte webové uživatelské rozhraní pro ovládání a demonstraci magnetické manipulace při řízení pomocí počítače Jetson.
- 5) Zkontrolujte a doplňte dokumentaci k systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] A. Uchytíl, "Trajectory planning for distributed magnetic manipulation", ČVUT FEL, bakalářská práce, 2022
- [2] F. Richter, "Rozšíření platformy pro magnetickou manipulaci", ČVUT FEL, diplomová práce, 2017
- [3] M. Gurtner, J. Zemánek, and Z. Hurák, "Alternating direction method of multipliers-based distributed control for distributed manipulation by shaping physical force fields," The International Journal of Robotics Research, Feb. 2023, doi: 10.1177/02783649231153958.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Zemánek, Ph.D. katedra řídicí techniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **16.02.2025**

Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svým rodičům, jejichž podpora mi umožnila se plně věnovat studiu. Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Zemánkovi, PhD., který mi vždy pomohl a poskytl cenné rady. Chtěl bych poděkovat za pomoc také celému týmu AA4CC, hlavně Adamu Uchytílovi, který mě naučil pracovat s platformou MagMan. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat kamarádům, kteří tu pro mě vždy byli.

Prohlášení

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

Praha, 26. května 2023

Abstrakt

Tato práce se věnuje vytvoření demonstračního systému pro magnetický manipulátor MagMan. Nejprve platformou řízené kuličky zahrají na hudební nástroj skladbu uloženou ve formátu MIDI. Práce srovnává vhodné nástroje pro hraní. Nejvhodnějším nástrojem byl zvolen xylofon, pro který je sestavena konstrukce pro upevnění kolem platformy. Další součástí je manipulace s mechanicky spojenými kuličkami. Spojením kuliček vzniknou objekty, se kterými je možné provádět translační i rotační pohyb. Práce popisuje návrh konstrukce mechanické vazby a řízení objektů. Nakonec je dotvořeno webové rozhraní, původně implementované na Raspberry Pi, které umožní ovládat platformu z webového prohlížeče. K práci s webovým rozhraním byla vytvořena dokumentace.

Klíčová slova: platforma MagMan, magnetická manipulace, bezdotyková manipulace, MIDI soubor, automatická hra na hudební nástroj, webové rozhraní, demonstrační systém

Školitel: Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.
Department of Control Engineering,
Resslova 9,
12000 Praha 2

Abstract

This thesis focuses on creating a demonstration system for the magnetic manipulator MagMan. A melody extracted from a MIDI file is played on a musical instrument using the platform. A comparison of suitable musical instruments is presented and in the end the xylophone is chosen. A framework is constructed to hold the xylophone around the platform. Later, manipulation with mechanically connected balls is demonstrated. Objects created by connected balls are capable of both translation and rotation. The thesis describes the design of the mechanical connection and control algorithm of the objects. Furthermore, a web interface based on a previous version compatible with Raspberry Pi is implemented, which enables controlling the platform from a web browser. Documentation describing how to work with the web interface is created.

Keywords: MagMan platform, magnetic manipulation, contactless manipulation, MIDI file, automatic music playing, web interface, demonstration system

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Popis manipulátoru	1
2 Hra na hudební nástroj	5
2.1 Výběr nástroje	5
2.1.1 Vyrobený nástroj	6
2.1.2 Koupený nástroj	7
2.2 Design konstrukce	7
2.3 Rozbor MIDI souboru	9
2.4 Implementace hry na hudební nástroj	10
2.4.1 Čtení MIDI souboru	10
2.4.2 Řízení	10
3 Manipulace s mechanicky propojenými kuličkami	11
3.1 Konstrukce mechanické vazby ..	11
3.2 Popis silového působení na objekt	12
3.3 Implementace regulátoru pozice a natočení objektu	13
4 Webové rozhraní	15
4.1 Back-end	16
4.2 Front-end	16
4.2.1 Drop-down menu	16
5 Experimenty a výsledky	19
5.1 Hra na xylofon	19
5.2 Pohyb mechanicky spojenými kuličkami	20
6 Závěr	23
Bibliografie	25

Obrázky

Tabulky

1.1 Platforma MagMan(převzato z [1])	2
1.2 Moduly platformy MagMan(převzato z [4])	2
1.3 Schéma platformy MagMan	3
2.1 Frekvence rezonátoru v závislosti na jejich délce.	6
2.2 Konstrukce xylofonu.	8
2.3 Návrh konstrukce držáku xylofonových kamenů.	8
3.1 Návrh konstrukce mechanického spojení kuliček.	12
3.2 Kuličky spojené v rovnostranný trojúhelník.	12
4.1 Schéma komunikace mezi Simulinkem, back-endem a front-endem.	15
4.2 Webové rozhraní.	17
4.3 Interaktivní reference polohy těžiště a úhlu objektu.	17
5.1 Trajektorie kuličky při hře stupnice.	19
5.2 Závislost polohy kuliček na čase při hře na xylofon.	20
5.3 Porovnání referenční a skutečné hodnoty polohy těžiště objektu při translačním pohybu a úhlu natočení při rotačním pohybu.	21
5.4 Porovnání referenční a skutečné hodnoty polohy těžiště objektu a úhlu natočení při složeném translačním a rotačním pohybu.	21
5.5 Rotační i translační pohyb objektu.	22

Kapitola 1

Úvod

V této práci se budeme zabývat demonstrací manipulace pomocí magnetického pole. K tomu nám poslouží magnetický manipulátor (platforma MagMan) vytvořený v rámci disertační práce[1] a dále vyvíjený skupinou AA4CC z katedry řízení na ČVUT.

Platforma MagMan vznikla za účelem možnosti testování systémů řízení pro distribuovanou magnetickou manipulaci. V distribuované manipulaci vzniká optimalizační problém rozdělení příkazů pro aktuátory, abychom dosáhli požadovaného působení sil. Tento problém lze rozdělit na menší optimalizační problémy, které je poté možné řešit i přímo na výpočetních jednotkách modulů. Tímto problémem se zabývá článek [2]. Testování algoritmu na řešení problému bylo provedeno na několika platformách schopných distribuované manipulace pomocí fyzikálních polí, včetně platformy MagMan. Platformu využil ve své bakalářské práci [3] i Adam Uchytíl, který pomocí platformy testoval algoritmus plánování trajektorie pro distribuovanou manipulaci.

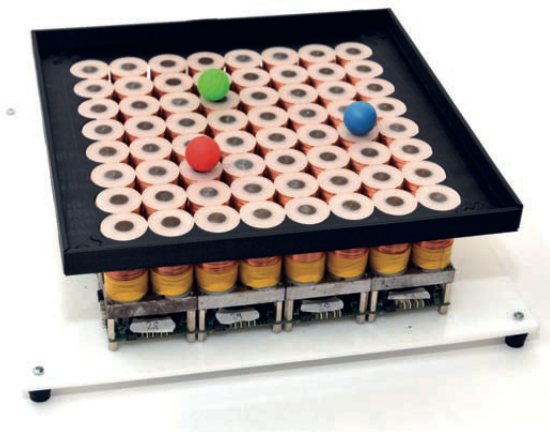
Naším úkolem je vytvořit demonstrační systém pro magnetickou manipulaci. Pohyb objektů pomocí magnetického pole můžeme demonstrovat například hrou na hudební nástroj. Platforma bude řídit kuličky, které na nástroj budou hrát. Kvůli rozměrům platformy a způsobu, jakým na nástroj budeme hrát, je potřeba vybrat vhodný nástroj a sestavit konstrukci, na které bude nástroj upevněný. Skladbu získáme ze souboru ve formátu MIDI.

Dále se budeme věnovat demonstraci manipulace se složitějšími objekty. Kuličky je možné mechanicky spojit, čímž vzniknou objekty, se kterými bude možné provádět i rotační pohyb. Navrhne a sestojíme mechanickou vazbu, spojující kuličky a pro nově vzniklé objekty vytvoříme řízení. Nakonec rozchodíme a dotvoříme webové rozhraní, které bude pracovat s počítačem Jetson. Rozhraní bude grafické a interaktivní, čímž se ovládání MagMana zjednoduší a zpřístupní více uživatelům.

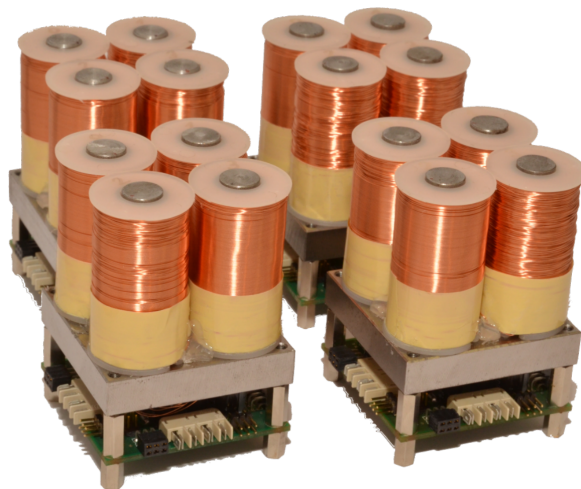
1.1 Popis manipulátoru

Hlavním stavebním prvkem platformy jsou moduly, které jsou zobrazené na obrázku 1.2. Každý modul se skládá ze čtyř cívek a má vlastní řídicí jednotku. Moduly spolu komunikují přes sběrnici RS-485. Součástí platformy je deska Injektor, která slouží jako převodník ze sběrnice do USB a k připojení

platformy k napájení. Moduly mají na všech stranách oboustranné konektory, takže je možné zapojit je do libovolné mřížky. V současnosti platforma sestává z 16 modulů sestavených do čtvercového pole (8×8 cívek) a je řízená z počítače NVIDIA Jetson. Platforma je zobrazena na obrázku 1.1, schéma platformy a připojení k řídicímu systému je na obrázku 1.3.



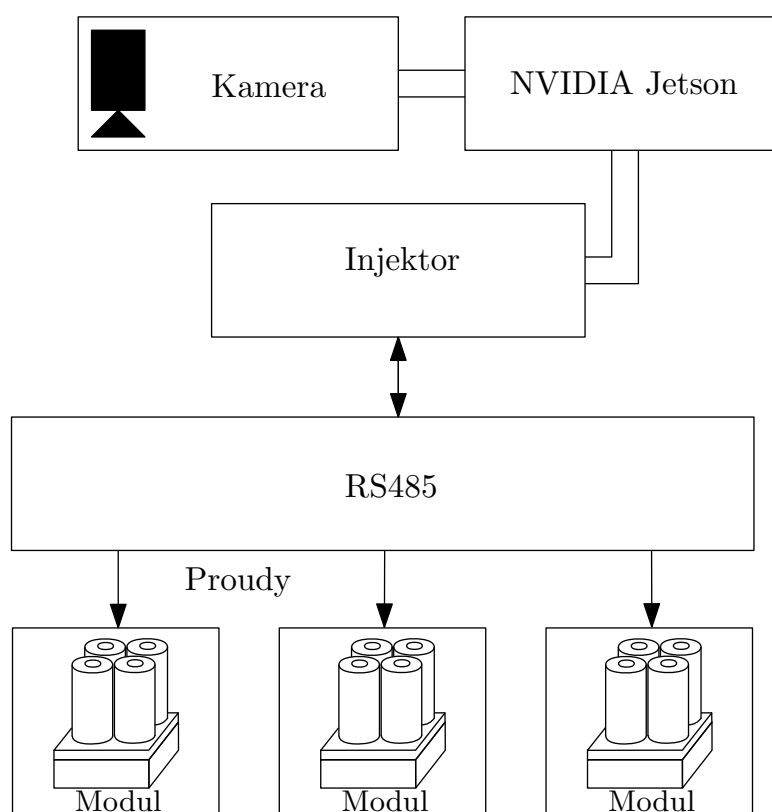
Obrázek 1.1: Platforma MagMan(převzato z [1])



Obrázek 1.2: Moduly platformy MagMan(převzato z [4])

Původní platforma prošla značnými vylepšeními. Ve své diplomové práci [4] převedl Martin Richter řídicí systém ze stolního počítače na Raspberry Pi a v Simulinku vytvořil bloky reprezentující jednotlivé hardwarové části. Vylepšil moduly a přidal proudový regulátor, čímž umožnil rychlejší odezvu při řízení proudu. Dále rozšířil původní platformu o čtyřech modulech na současných 16 modulů.

K dalšímu vylepšení platformy přispěl ve své bakalářské práci Adam Uchytíl [3]. Řízení přesunul z Raspberry Pi na počítač NVIDIA Jetson a implementoval nový systém měření polohy. Nové měření polohy má dvojnásobnou



Obrázek 1.3: Schéma platformy MagMan

vzorkovací frekvenci, tedy 100 Hz. Oproti starému měření dokáže detekovat až osm kuliček najednou, bez snížení vzorkovací frekvence.

Kapitola 2

Hra na hudební nástroj

V dnešní době proniká automatizace do každého aspektu lidského života, a ani hudba není výjimkou. Pomocí počítače můžeme tvořit celé hudební kompozice. Na tomto základě stojí například hudební žánr EDM (Electronic dance music). Hudbu hranou na hudební nástroje či zpěv můžeme upravovat různými efekty, hudbu můžeme nahrávat, případně editovat i po dohrání.

Automatizaci v hudbě můžeme využít například i pro efektní demonstraci nových technologií. Intel v roce 2011 zrealizoval počítačem vytvořenou simulaci *Pipe Dream*¹, ve které hrál na několik syntetizérů pomocí kuliček. Celý koncert² byl řízen jejich novými procesory a sloužil jako demonstrace schopnosti procesorů pracovat v reálném čase.

V této kapitole vytvoříme systém, který pomocí kuliček řízených Mag-Manem zahraje skladbu na hudební nástroj. Vzhledem ke způsobu hraní a velikosti platformy musíme vybrat vhodný nástroj, případně nástroj vyrobit. Vhodným nástrojem se zdá být například xylofon. Automatizace hry na xylofon je oblíbeným projektem. Realizace můžeme vidět například v těchto videích^{3,4}, kde na xylofon hrají pomocí paliček pohybovaných servomotory nebo zde^{5,6}, kde na xylofon hrají jádry cívek. Hra na hudební nástroj poslouží jako efektní demonstrace magnetické manipulace.

Naším úkolem bude vybrat vhodný nástroj a pro jeho upevnění sestavit konstrukci držáku kolem platformy. Z MIDI souboru získáme informace o skladbě, kterou na nástroj zahrajeme, dále implementujeme algoritmus hraní a řízení kuliček. Komunikace s platformou, měření pozice a regulátor pohybu kuliček byly vyřešeny v předchozích pracích.

2.1 Výběr nástroje

Na hudební nástroj budeme hrát pomocí kuliček, které mohou s něčím buď pohybovat nebo do něčeho vrážet. Vhodnou volbou hudebního nástroje se

¹<https://www.youtube.com/watch?v=HmoUSSVSV7I>

²<https://www.youtube.com/watch?v=JLdBOWEixjM>

³https://www.youtube.com/watch?v=OmCMhy-UIQw&ab_channel=KW

⁴<https://www.youtube.com/watch?v=gvi5ccoE5Qs>

⁵https://www.youtube.com/watch?v=dr950Dvycxs&ab_channel=StephenVaillancourt

⁶<https://www.youtube.com/watch?v=sR3xmof8rZY>

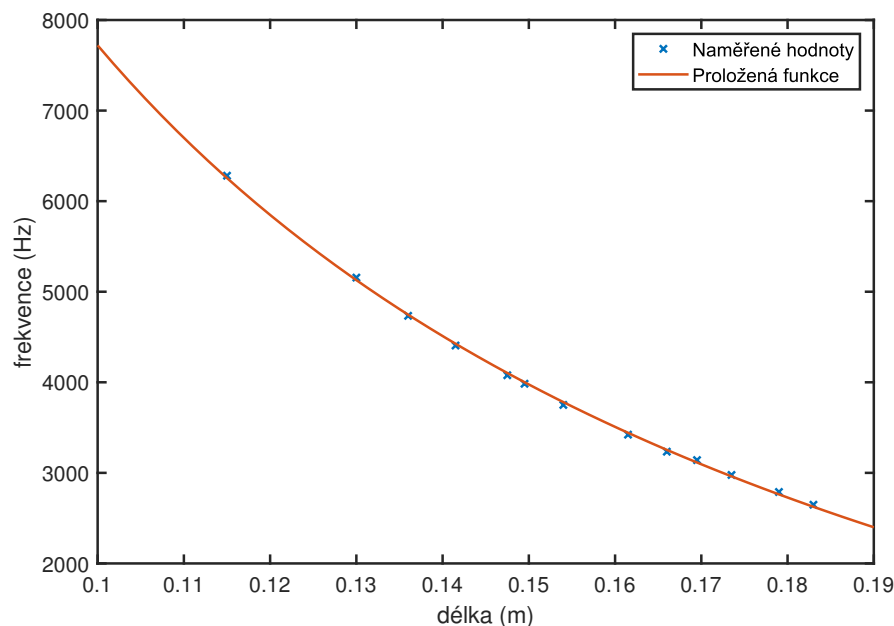
jeví bicí nástroje, případně strunné. Konstrukce na upevnění strun by musela být masivní, aby napnuté struny udržela, a zároveň z nutnosti ladění strun by byla mnohem složitější. Další nevýhodou by bylo samotné řízení, protože hraní na struny vyžaduje mnohem větší přesnost úderu. Z těchto důvodů jsme se nakonec rozhodli pro bicí nástroje.

Při rozměrech platformy 8x8 cívek (20x20 cm) jsme omezili výběr z bicích nástrojů na takové, které by se kolem platformy daly uspořádat tak, aby pokryly alespoň jednu oktávu. Také bylo zapotřebí rozhodnout, zdali koupit hotový nástroj, nebo nástroj vyrobit.

2.1.1 Vyrobený nástroj

Motivací pro výrobu vlastního nástroje je, že si nástroj můžeme přizpůsobit našim potřebám. Můžeme si zvolit velikost nástroje a materiál, ze kterého nástroj vyrobíme. Máme také větší volnost ve výrobě konstrukce pro upevnění, protože jí můžeme upravit i samotný nástroj.

Jako materiál na výrobu nástroje jsme zvolili hliníkovou trubku s vnějším poloměrem 16 mm a tloušťkou stěny 1 mm. Hliníkovou trubku jsme vybrali, protože je to levný materiál, který dobře rezonuje a má nízkou permeabilitu, takže nebude ovlivňovat magnetické pole platformy. Trubku jsme rozřezali na jednotlivé rezonátory. Změřili jsme délku rezonátorů a frekvenci zvuku, kterou rezonátor vydává po úderu. Předpis 1D vlnové rovnice pro oba volné konce je $f = \frac{c_o}{2l}$, kde f je frekvence, c_o rychlost šíření vlny a l je délka rezonátoru. Změřené hodnoty jsme proložili lineárně lomenou funkcí, její průběh a naměřené hodnoty jsou zobrazeny v grafu 2.1



Obrázek 2.1: Frekvence rezonátoru v závislosti na jejich délce.

Tvar použité lomené funkce je $f = a + \frac{b}{l}$ a její parametry jsme zjistili pomocí metody nejmenších čtverců. Parametry vyšly jako $a = 1123,3$ a $b = 3512,7$. Požadovanou frekvenci tónů dosadíme do rovnice a vypočítáme délky rezonátorů, které máme vyrobit. V praxi se osvědčilo začít s delší trubkou a poté ji zkracovat, dokud nevydá požadovaný tón, protože kratší trubku neprodloužíme. Ladění rezonátorů bylo časově velmi náročné, proto jsme nakonec hudební nástroj koupili.

■ 2.1.2 Koupený nástroj

Nástroje, které splňují výše zmíněné podmínky, tedy aby byl nástroj kompaktní a bylo možné na něj zahrát alespoň jednu oktávu, jsou například temple bloky⁷, metalofonbloky⁸ nebo xylofon⁹. Výběr jsme omezili na tyto tři nástroje, ačkoliv by bylo možné využít i jiné, například marimbu. Pro demonstrační účely se nicméně nástroje z vyšších cenových kategorií nehodí.

■ Temple bloky

Výhodou temple bloků je možnost naladit je. Další výhodou je, že jsou dřevěné a jejich přítomnost v blízkosti cívek nebude rušit magnetické pole. Nevýhodou je, že jsou podstatně větší než kameny xylofonu nebo metalofonu a obtížně bychom dosáhli více než jedné oktávy.

■ Metalofon

Velikost kamenů metalofonu seděla na velikost platformy ideálně. Kameny mají však vysokou permeabilitu a rušily magnetické pole platformy, což ztěžovalo řízení. V těsné blízkosti se kuličky ke kamenům přimagnetizovaly. Existují i metalofony například s hliníkovými kameny, ale kvůli vysoké ceně se ani hliníkové metalofony nedaly použít.

■ Xylofon

Kameny xylofonu jsou dřevěné, takže magnetické pole neovlivňují. Jak velikost kamenů, tak cena xylofonu byly pro účely této práce ideální. Jednou z nevýhod xylofonu je horší rezonance než u metalofonu. Cenově dostupné xylofony také neobsahují pultóny. I přes tyto nedostatky se ukázal být xylofon nejlepší volbou, a proto jsme ho v této práci nakonec použili.

■ 2.2 Design konstrukce

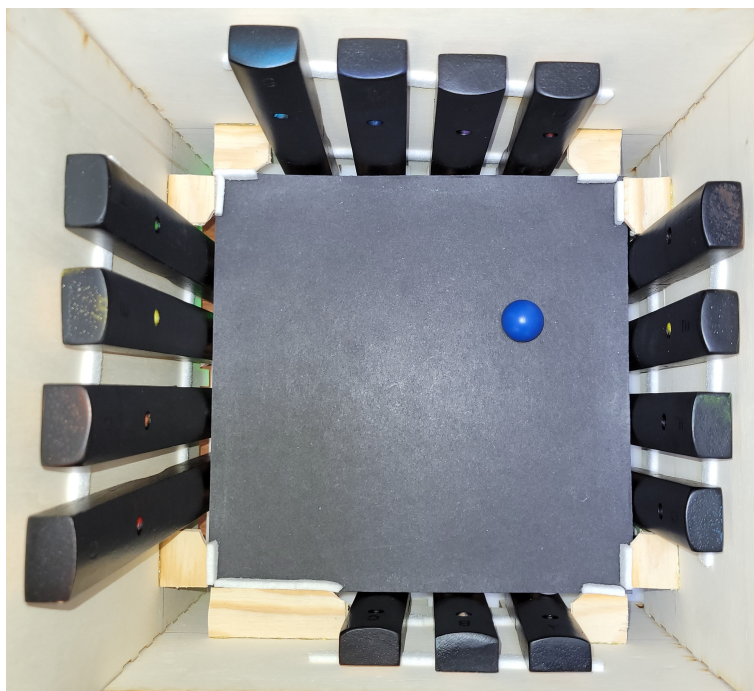
Aby xylofon při úderu vydal správný zvuk, je potřeba udeřit paličkou nebo kuličkou doprostřed kamenu. Kameny tedy budou uchyceny po stranách

⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Temple_blocks

⁸<https://en.wikipedia.org/wiki/Metallophone>

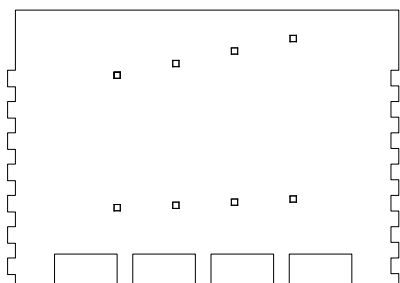
⁹<https://cs.wikipedia.org/wiki/Xylofon>

platformy tak, aby se jejich středy nacházely na úrovni platformy. Kameny jsou rozmístěny po celém obvodu platformy a mezi sebou mají rozestupy takové, aby kuličky z platformy nespadly, ale aby se kuličky hrající dva sousední tóny co nejméně ovlivňovaly. Díky větší vzdálenosti se kuličky při hraní méně ovlivňují. Na obrázku 2.2 je zachycen navržený držák kamenů.

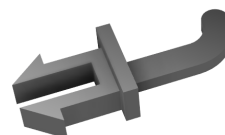


Obrázek 2.2: Konstrukce xylofonu.

Kameny jsou zavěšeny na dvou háčcích. Abychom zabránili dotykům kamenů s platformou, kameny podložíme filcem, čímž omezíme tlumení platformou. V rozích, kde kameny nejsou, jsou nalepené destičky, aby kulička nespadla z platformy. Jedna deska konstrukce je zachycena na obrázku 2.3.



(a) : Jedna deska konstrukce.



(b) : Háček.

Obrázek 2.3: Návrh konstrukce držáku xylofonových kamenů.

2.3 Rozbor MIDI souboru

Soubory formátu MIDI slouží k ukládání hudebních událostí, například tónů, tempa nebo dynamiky. Soubory neobsahují zvuková data, ale pouze instrukce jaké noty hrát, jak zvuk použít a jaké aplikovat efekty.

MIDI soubory se skládají z bloků. Soubor začíná hlavičkovým blokem, který obsahuje společné informace pro stopové bloky, které po něm následují. Struktura hlavičkového bloku je následující.

- 4 byty: Identifikátor "MThd".
- 4 byty: Délka bloku (hlavičkový blok obsahuje vždy šest bytů).
- 2 byty: Určují, zdali soubor obsahuje jeden nebo více stopových bloků.
- 2 byty: Počet stopových bloků, které následují po hlavičkovém bloku.
- 2 byty: Číslo, kterým se dělí časové údaje v MIDI souboru.

Po hlavičkovém souboru následují stopové bloky, které mají následující strukturu.

- 4 byty: Identifikátor "MTrk".
- 4 byty: Délka bloku.
- Zbytek bloku sestává z jednotlivých hudebních událostí.

Každá událost začíná údajem, kolik uplynulo od minulé události času, resp. jaký je časový rozestup mezi událostmi. Velikost údaje není přesně specifikovaná. Nejvýznamnější bit (MSB) udává, zdali následující byte ještě obsahuje informace o uplynulém čase. Dokud je nejvýznamnější bit jedna, započítáváme data ze všech bytů od začátku sekvence, až po byte, kde je MSB rovný nule. Pouze sedm posledních bitů se započítává do hodnoty časového údaje.

Události se dělí na tři různé typy: midi event, meta event, system exclusive event. Pro účely demonstrace řízení bude stačit, když se zaměříme pouze na některé midi události. Midi události obsahují informaci o prováděné hudební akci, například hraní not nebo nastavení zařízení. Pro hru na xylofon nám bude stačit událost "Note On". Struktura události "Note On" je následující.

- 1 byte: Identifikátor 144.
- 1 byte: Nota.
- 1 byte: Rychlost, jakou se nota zahraje.

2.4 Implementace hry na hudební nástroj

Naším úkolem bylo implementovat systém, který zahraje skladbu uloženou ve formátu MIDI na xylofon pomocí platformy. Tento úkol lze rozdělit na dvě části. Nejdříve je potřeba získat z MIDI souboru potřebné informace a poté vyřešit samotné načasování a řízení kuliček.

2.4.1 Čtení MIDI souboru

Abychom mohli hrát na xylofon, je potřeba z MIDI souboru vyčíst, jakou notu máme zahrát, to zjistíme z události "Note On". Druhým důležitým údajem je čas, kdy notu máme zahrát.

MIDI soubor začíná vždy hlavičkovým blokem. V hlavičkovém bloku je pro nás nejdůležitějším údajem číslo, kterým se dělí časové skoky mezi jednotlivými událostmi. Poté následuje stopový blok. Události ve stopovém bloku jsou seřazeny chronologicky a před každou událostí je časový údaj, který obsahuje čas uplynulý od poslední události. Způsob získání časového údaje je popsán v podkapitole 2.3. Celkový čas získáme sčítáním jednotlivých časových údajů, které vydělíme číslem z hlavičkového bloku. Za časovým údajem následuje událost. Pokud se jedná o událost "Note On", notu a čas si uložíme. Pokud se jedná o jinou událost, v souboru pouze přeskočíme počet bytů, které událost zaujímá.

Z MIDI souboru používáme jen první stopu. Výstupem analýzy MIDI souboru jsou dvě pole, jedno pole obsahuje noty, v druhém poli jsou časové okamžiky (měřené od začátku písničky), ve kterém mají být noty zahrány.

2.4.2 Řízení

Abychom zahráli písničku správně, musí kulička uhoďit do správného kamenu ve správný čas. Kameny jsou kolem platformy rozmístěny viz obrázek 2.2 a každému kameni přísluší souřadnice souřadnicového systému spojeného s platformou. Aby kulička zahrála na kámen ve správný čas, připravíme si ji na pozici před požadovaný kámen, a ve chvíli, kdy přijde čas na zahrání noty, kuličkou do kamene uhoďíme.

Kuličkám přiřazujeme kameny v chronologickém pořadí. Kulička se připraví před kámen a když nastane správný čas, do kamene uhoďí. Rozpohybování kuličky docílíme tak, že na kuličku budeme působit silou ve směru kamene. Sílu získáme z regulátoru, do kterého přivedeme referenci kuličky, kterou umístíme do místa kamene. Po srážce s kamenem se kulička přesune do pozice před následující kámen.

Kapitola 3

Manipulace s mechanicky propojenými kuličkami

S kuličkami je možné provádět pouze translační posun, jelikož jsou osově souměrné, tak rotace není znát. V této kapitole se pokusíme realizovat pohybování s mechanicky spojenými kuličkami, čímž vzniknou objekty, se kterými bude možné provádět i rotační pohyb.

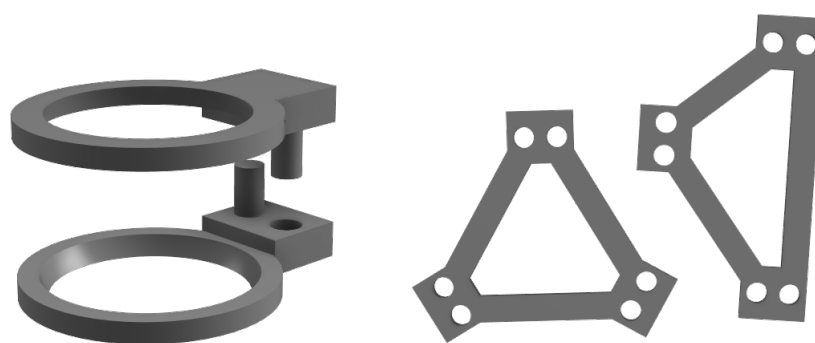
Kuličky budou spojené mechanickou vazbou, kterou je potřeba zkonstruovat. Vazba bude pevná, ale je zapotřebí, aby uchycení kuliček bylo co nejvolnější. Vazba musí kuličkám umožnit kroužení, tak aby mezi kuličkami a uchycením vznikalo co nejmenší tření.

Translačního pohybu objektu docílíme působením síly na jeho těžiště. Rotačního pohybu dosáhneme působením momentu síly. Od uživatele dostaneme zadanou referenční polohu těžiště a referenční úhel otočení objektu. Tyto údaje poté přepočítáme na sílu a moment, kterými je potřeba na objekt působit, aby se dostal do požadované polohy.

V neposlední řadě je potřeba moment síly a sílu působící na objekt přepočítat na síly, kterými budeme působit na jednotlivé kuličky. Přepočet síly na proudy procházející cívkami už máme implementovaný.

3.1 Konstrukce mechanické vazby

Nejprve jsme navrhli a zkonstruovali vazby kuliček a způsob, jak budou kuličky k vazbě uchyceny. Uchycení kuliček jsme navrhli tak, aby bylo jednoduché z kuliček tvarovat různé objekty a zároveň aby se kuličky a konstrukce uchycení co nejméně dotýkaly. Uchycení kuliček, které se následně připevní na vazbu, sestává ze dvou shodných dílů, které se do sebe zasadí. Návrh uchycení je zobrazen na obrázku 3.1a. Mezi uchycení se vloží vazba. Navrhli jsme dvě různé vazby, které můžeme vidět na obrázku 3.1b.

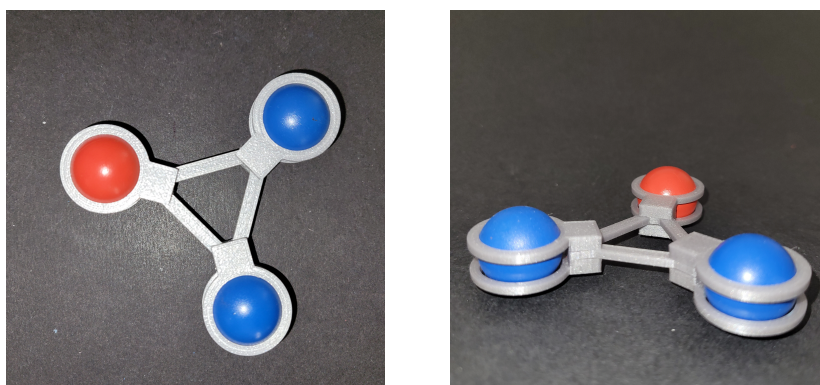


(a) : Návrh uchycení kuliček.

(b) : Návrh vazby mezi kuličkami.

Obrázek 3.1: Návrh konstrukce mechanického spojení kuliček.

Vazba může mít téměř jakýkoli tvar stačí, aby v místech, kde mají být připojeny kuličky, byly umístěny konektory, na které budeme moci připevnit uchycení. Na obrázku 3.2 můžeme vidět kuličky tvořící rovnostranný trojúhelník.



Obrázek 3.2: Kuličky spojené v rovnostranný trojúhelník.

3.2 Popis silového působení na objekt

K řízení pohybu objektem potřebujeme vypočítat síly a momenty sil působící na objekt. Tyto veličiny lze vyjádřit pomocí sil, které působí na jednotlivé kuličky. Vyjádření najdeme ve vzorci 3.1.

$$\begin{aligned}
 F_x &= \sum_{i=1}^n F_{xi}, \\
 F_y &= \sum_{i=1}^n F_{yi}, \\
 M &= \sum_{i=1}^n (r_{xi}F_{yi} - r_{yi}F_{xi}),
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

kde F_x , F_y jsou x-ová a y-ová složka síly působící na objekt, M je velikost momentu síly působící na objekt, F_{xi} a F_{yi} jsou velikosti složek síl působící na jednotlivé kuličky, n je počet kuliček v objektu a r_{xi} , r_{yi} jsou vzdálenosti středů kuliček od těžiště objektu v ose x a y. Rovnice 3.1 si vyjádříme v maticovém tvaru

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 \\ -r_{y1} & r_{x1} & -r_{y2} & r_{x2} & \cdots & -r_{yn} & r_{xn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Známe-li sílu a moment síly, které působí na objekt, z rovnice 3.2 můžeme vypočítat síly, kterými bychom měli působit na jednotlivé kuličky. Rovnice 3.2 je vyjádřena ve tvaru $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x}$. Pro dvě a více kuliček má matice \mathbf{A} lineárně závislé sloupce a platí, že $\mathbf{b} \in \text{rng}(\mathbf{A})$. Z těchto vlastností vyplývá, že soustava je nedourčená, neboli má nekonečně mnoho řešení.

Z množiny řešení vybereme to řešení, které minimalizuje součet druhých mocnin velikosti síl, což vede na úlohu

$$\min\{\|\mathbf{x}\|^2 | \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}\}. \quad (3.3)$$

Úloha 3.3 může být řešena jako soustava s nejmenší normou. Odvození vzorce pro výpočet optimálního řešení najdeme ve skriptech [5]. Optimální řešení úlohy je v rovnici 3.4

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{b}. \quad (3.4)$$

3.3 Implementace regulátoru pozice a natočení objektu

Abychom mohli objekt řídit, musíme si nejprve stanovit referenční natočení objektu, vůči němuž budeme rotaci vztahovat. Pro jednoduchost si zvolíme jako úhel referenčního natočení objektu úhel, který svírá nějaká kulička vzhledem k těžišti. Předem vybranou kuličku musíme barevně odlišit pro detekci z kamery.

Z polohy kuliček získaných z detekce kamerou si spočítáme polohu těžiště, vzdálenosti jednotlivých kuliček od těžiště a úhel natočení objektu. Od uživatele dostaneme zadanou referenční polohu těžiště a úhel, na něž je úkolem objekt řídit.

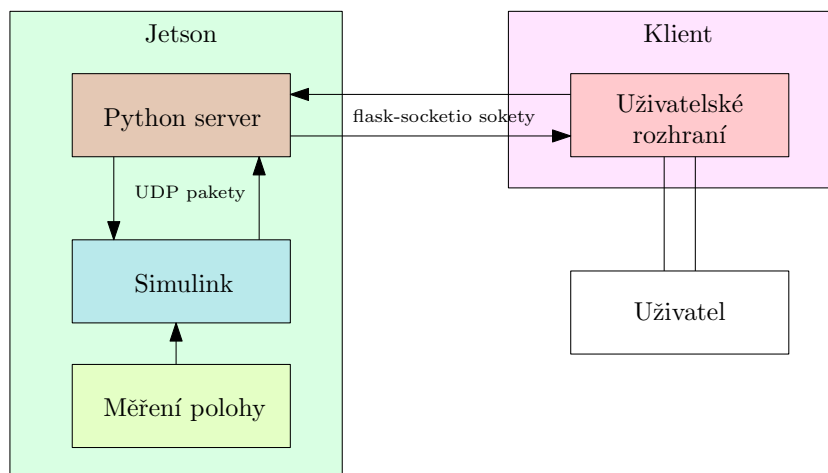
Tření kuliček neuvažujeme, proto pro řízení polohy těžiště můžeme použít PD regulátor, který z rozdílu polohy těžiště a reference vypočítá translační sílu. Řízení rotace je také realizováno přes PD regulátor. Z rozdílu referenčního

Kapitola 4

Webové rozhraní

Ovládání platformy je implementované v Simulinku. Ačkoliv je Simulink velice mocný nástroj, pro demonstrační účely není příliš vhodný, protože je pro běžného uživatele složitý a neuspořádaný. V této kapitole vytvoříme jednoduché a interaktivní webové rozhraní, které uživateli zpřístupní řízení objektů pomocí platformy z webového prohlížeče.

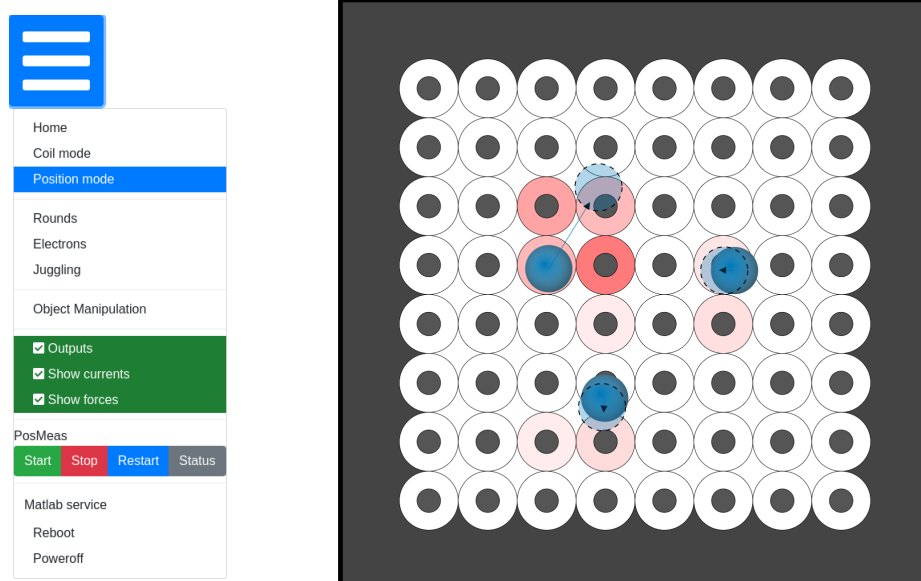
Webové rozhraní typicky sestává z front-endu a back-endu. Front-end nebo strana klienta je rozhraní, se kterým interaguje uživatel. Front-end zprostředkovává grafickou vizualizaci stránek, přijímá příkazy od uživatele a komunikuje se serverem. Back-end nebo strana serveru operuje v pozadí a uživatel s ním přímo neinteraguje. Jeho součástí je databáze, server i logika, podle které celá aplikace pracuje. Back-end zpracovává požadavky od front-endu, vyhodnotí je a odešle zpět odpověď. Součástí back-endu je také komunikace se simulinkovým modelem. Schéma komunikace je zobrazeno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Schéma komunikace mezi Simulinkem, back-endem a front-endem.

Řešení webového rozhraní pro počítač Jetson je postavené na již napsaném webovém rozhraní pro Raspberry Pi¹. Projekt jsme upravili, aby rozhraní komunikovalo se současnou verzí systému a přidali jsme manipulaci s objekty

¹<https://gitlab.fel.cvut.cz/aa4cc/magman/webinterface.git>

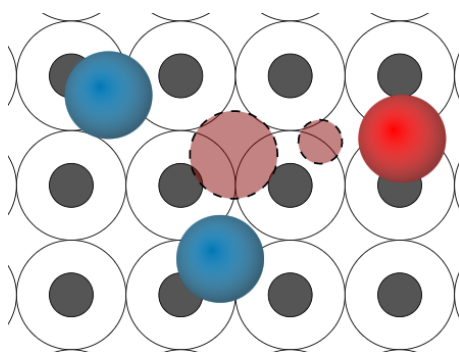


(a) : Drop-down menu

(b) : Interaktivní platforma

Obrázek 4.2: Webové rozhraní.

- **Position mode** zviditelní reference kuliček, které jsou zobrazeny na obrázku 4.2b jako poloprůhledné modré kruhy. Referencemi může uživatel pohybovat po platformě, čímž se mění i reference v Simulinku.
- **Rounds, Electrons** a **Juggling** spustí různé demonstrace pohybů kuliček.
- **Object Manipulation** umožní uživateli manipulovat s referencí těžiště objektu a měnit rotaci objektu. Na obrázku 4.3 je znázorněná interaktivní reference těžiště a úhlu natočení. Větší z červených kruhů je znázornění reference polohy těžiště objektu. Menší kruh znázorňuje úhel otočení červené kuličky oproti těžišti.



Obrázek 4.3: Interaktivní reference polohy těžiště a úhlu objektu.

- Zaškrtnutí checkboxu **Outputs** otevře komunikaci mezi Simulinkem a platformou.

- **Show currents** a **Show forces** zobrazí v rozhraní proud, který teče cívkami a síly působící na kuličky.
- V sekci **PosMeas** je možné spustit/zastavit měření polohy kuliček. Měření polohy musí být spuštěno před spuštěním Simulinku.
- Tlačítka **Reboot** a **Poweroff** restartují, případně vypnou zařízení na kterém je spuštěný server.

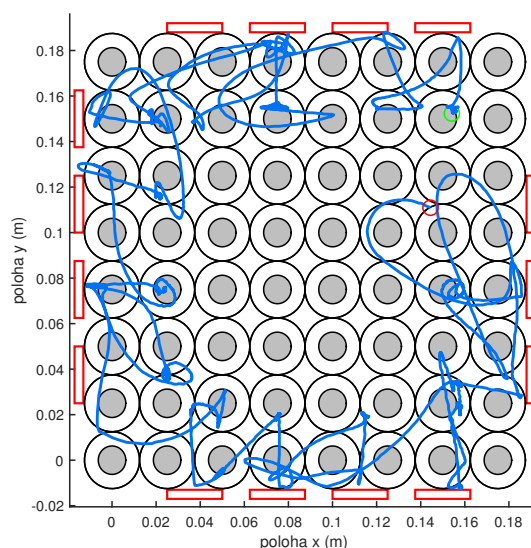
Kapitola 5

Experimenty a výsledky

5.1 Hra na xylofon

Nejprve jsme na xylofon zahráli stupnice C dur od c' (C4) do c''' (C6). Stupnice byla vybrána, protože při hraní zahraje kulička na všechny kameny. V grafu 5.1 je zobrazena trajektorie kuličky při hraní stupnice. Zelená a červená kružnice označují počátek a konec trajektorie a červené obdélníky značí kameny xylofonu.

Z grafu je patrné, kde se kulička připraví před kamenem a v jakém místě do kamene udeří. Můžeme také vidět, že systém není vždy spolehlivý. Kulička občas zahraje na jiný kámen, případně na kámen vůbec nezahraje, jak je tomu například u posledního kamene stupnice na souřadnicích [0.185, 0.11].

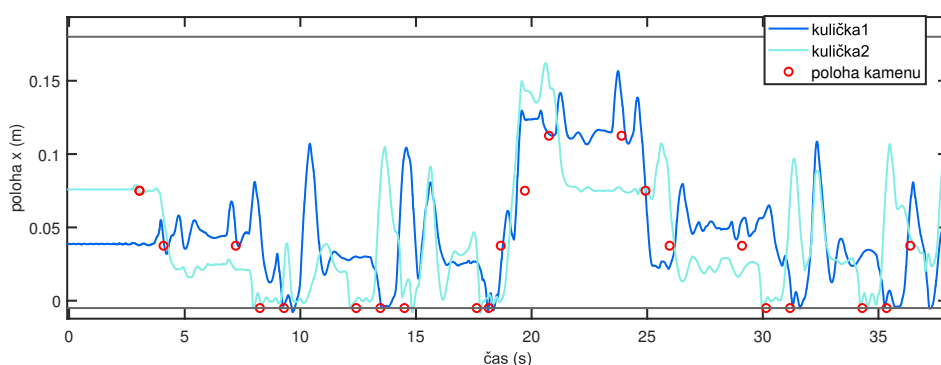


Obrázek 5.1: Trajektorie kuličky při hře stupnice.

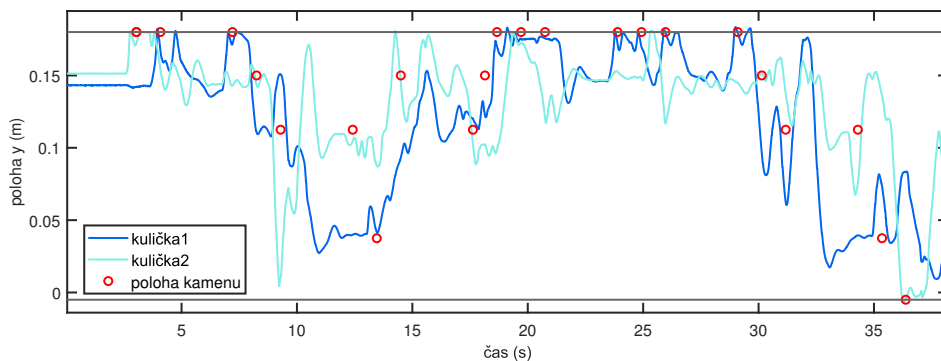
Pro správné zahrání skladby je potřeba, aby se kulička rychle přesouvala mezi tóny. Pokud pohyb něco naruší, skladba se rozpadne. Tóny musí být zahrány ve správný čas, občas platforma kuličku nerozpohybuje v požadova-

ném časovém intervalu a kulička tón nezahraje. Pro rychlejší skladby přidáme více kuliček, aby se všechny tóny stihly zahrát. V grafech na obrázku 5.2 je zobrazena poloha dvou kuliček v čase. Kuličky hrají hlavní linku znělky ze hry Skyrim.

Grafy 5.2a a 5.2b zobrazují souřadnice polohy kuliček hrajících znělku. Vodorovné černé čáry v grafu znázorňují okraj platformy a červené kružnice souřadnice jednotlivých kamenů. Aby kuličky zahrály správný tón ve správný čas, je zapotřebí, aby v obou grafech v daný čas protínala trajektorie jedné kuličky souřadnice kamene. V grafech můžeme vidět, že hraní není vždy stoprocentní. Kuličky občas vícekrát zahrají stejný tón, například v čase $t = 5$ s. Pokud hrajeme pomocí více kuliček, kuličky do sebe vzájemně naráží a ovlivňují se, čímž se řízení ještě ztěžuje.



(a) : Souřadnice x polohy kuliček.



(b) : Souřadnice y polohy kuliček.

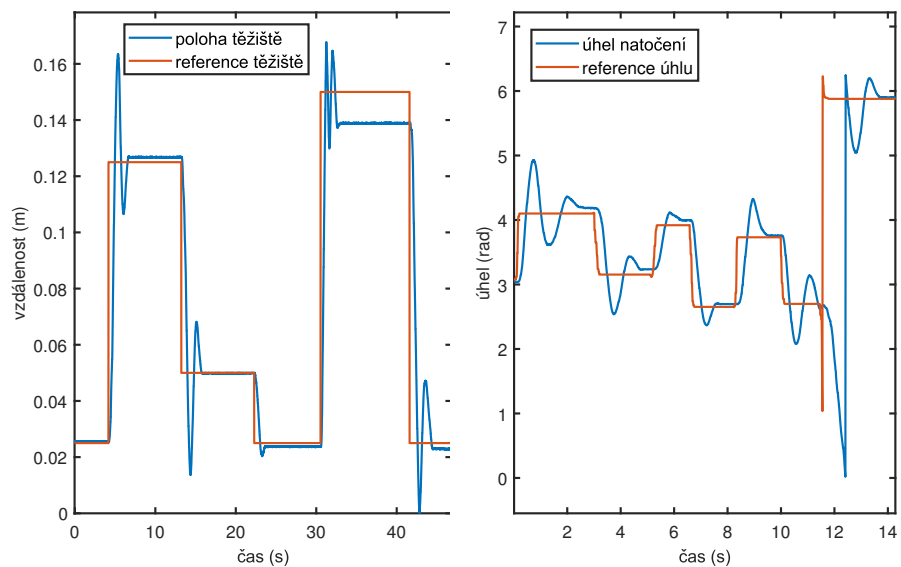
Obrázek 5.2: Závislost polohy kuliček na čase při hře na xylofon.

5.2 Pohyb mechanicky spojenými kuličkami

S objekty můžeme provádět translaci, rotaci nebo oba pohyby složit. Nejprve jsme provedli oba pohyby samostatně. Na obrázku 5.3 jsou zobrazeny dva grafy pohybu s objektem. V grafu 5.3a je při translačním pohybu zobrazena souřadnice x těžiště a její reference. Souřadnice y polohy těžiště měla velmi podobný průběh. V grafu 5.3b je při rotačním pohybu zobrazen úhel natočení

objektu a jeho referenční hodnota.

V grafech můžeme vidět, že řízení objektů funguje. Ačkoliv máme vysoký překmit, doba ustálení je v řádu vteřin. Odchylka v ustáleném stavu je způsobena tím, že jsme použili PD regulátor bez integrační složky. Ve většině případů není příliš velká.

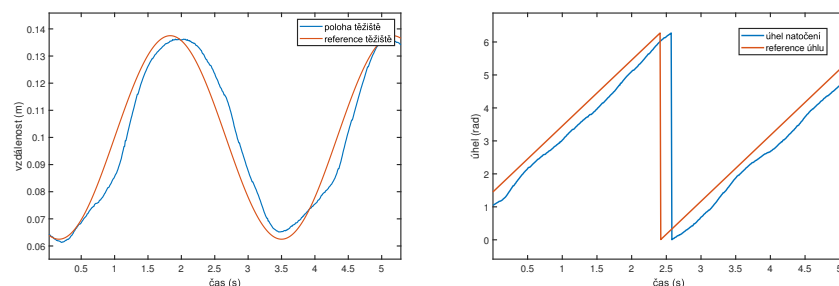


(a) : Referenční a skutečná hodnota souřadnice x polohy těžiště.

(b) : Referenční a skutečná hodnota úhlu natočení objektu.

Obrázek 5.3: Porovnání referenční a skutečné hodnoty polohy těžiště objektu při translačním pohybu a úhlu natočení při rotačním pohybu.

Pohyb vzniklý složením translace a rotace je zobrazen na obrázku 5.5. V grafech na obrázku 5.4 můžeme vidět skutečný úhel a polohu souřadnice x těžiště v porovnání s jejich referencemi. Pohyb objektu se skládá z rotace s konstantní rychlostí a translace po kruhové dráze.

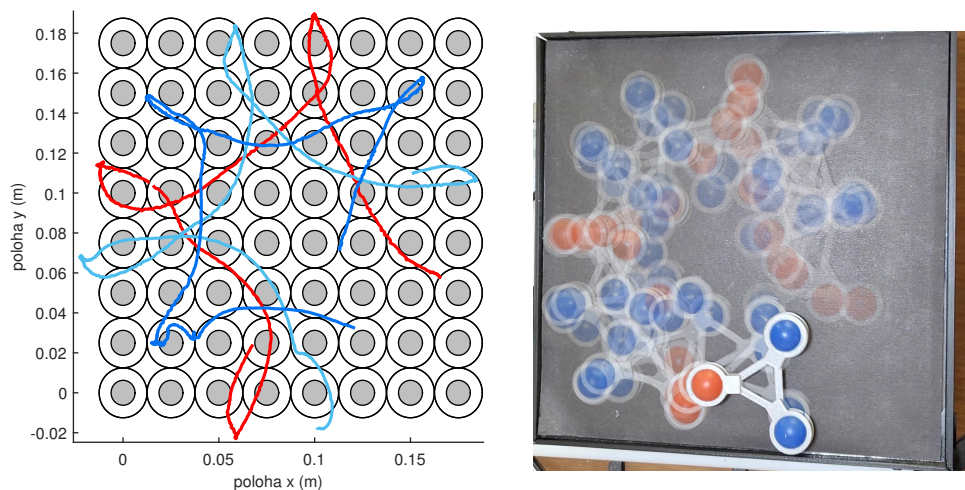


(a) : Referenční a skutečná hodnota souřadnice x polohy těžiště.

(b) : Referenční a skutečná hodnota úhlu natočení objektu.

Obrázek 5.4: Porovnání referenční a skutečné hodnoty polohy těžiště objektu a úhlu natočení při složeném translačním a rotačním pohybu.

V grafech 5.4a a 5.4b vidíme, že řízení objektu při složení rotačního a translačního pohybu funguje. Těžiště i úhel otáčení sledují své reference dostatečně přesně.



Obrázek 5.5: Rotační i translační pohyb objektu.

Kapitola 6

Závěr

V této práci jsme se zaměřili na manipulaci s objekty pomocí magnetického pole. Magnetickou manipulaci jsme demonstrovali pomocí platformy MagMan.

V kapitole 2 jsme jako ideální hudební nástroj vybrali xylofon. Dále jsme sestrojili konstrukci, na které jsou xylofonové kameny kolem platformy upevněné. Nakonec jsme navrhli algoritmus, který zahraje skladbu ze souboru MIDI na xylofon. Hraní skladby v reálném čase nebylo příliš přesvědčivé. Ačkoliv kuličky většinu tónů zahrály, některé tóny byly zahrány ve špatný čas, některé tóny byly zahrány, přestože zahrány být neměly a některé tóny byly zcela vynechány.

V kapitole 3 jsme navrhli a sestrojili vazbu kuliček, čímž vznikly objekty, se kterými bylo možné provádět rotační pohyb. Dále jsme navrhli řízení objektů pomocí změny reference polohy těžiště a referenčního úhlu natočení. Řízení objektů funguje dobře, nedostatky jsou však velký překmit a ustálená odchylka od reference.

V kapitole 4 jsme webové rozhraní navržené pro ovládání platformy z Raspberry Pi upravili, aby fungovalo s počítačem Jetson. K práci s webovým rozhraním jsme vytvořili dokumentaci. Dále jsme doplnili možnost interaktivní manipulace s objekty a přidali možnost ovládání variabilního počtu kuliček.

Magnetická manipulace skýtá všemožná využití. Hlavním využitím platformy je stále testování algoritmů pro distribuovanou manipulaci. V dalších pracích by bylo možné například využít pro hraní na hudební nástroj pokročilé plánování trajektorie.



Bibliografie

- [1] Jiří Zemánek. „Distributed manipulation by controlling force fields through arrays of actuators“. Dis. pr. Fakulta Elektrotechnická, České vysoké učení technické, 2018. URL: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/9/9f/Diz_2018_zemanej_jiri.pdf.
- [2] Martin Gurtner, Jiří Zemánek a Zdeněk Hurák. „Alternating direction method of multipliers-based distributed control for distributed manipulation by shaping physical force fields“. In: *The International Journal of Robotics Research* (2023). DOI: 10.1177/02783649231153958. URL: <https://doi.org/10.1177/02783649231153958>.
- [3] Adam Uchytíl. „Trajectory planning for distributed magnetic manipulation“. Fakulta Elektrotechnická, České vysoké učení technické, 2022. URL: https://wiki.control.fel.cvut.cz/mediawiki/images/6/66/Bp_2022_uchytil_adam.pdf.
- [4] Filip Richter. „Rozšíření platformy pro magnetickou manipulaci“. Fakulta Elektrotechnická, České vysoké učení technické, 2018. URL: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68378/F3-DP-2017-Richter-Filip-Rozsireni_platfromy_pro_magnetickou_manipulaci.pdf.
- [5] Tomáš Werner. „Elektronická skripta předmětu B0B33OPT“. Fakulta Elektrotechnická, České vysoké učení technické, 2022. URL: https://cw.fel.cvut.cz/wiki/_media/courses/b0b33opt/opt.pdf.