

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická

## Ultrazvuková manipulace s kapalinou a sytkými materiály

**Pavel Svoboda**

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



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Svoboda** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **499094**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Ultrazvuková manipulace s kapalinou a sypkými materiály**

Název bakalářské práce anglicky:

**Ultrasonic manipulation of liquid and powder materials**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je otestovat možnosti platformy pro ultrazvukovou manipulaci k pohybu s kapalinou a sypkými materiály. Konkrétní úkoly jsou:

- 1) Ověřte funkci laboratorní platformy pomocí experimentů s existujícími regulátory pro řízení více pevných objektů.
- 2) Upravte a otestujte systém pro další aplikace jako například manipulace s kapalinou (míchání kapaliny, pohyb kapiček) a sypkými materiály.
- 3) Vytvořte webové uživatelské rozhraní pro ovládání a demonstraci systému
- 4) Doplňte dokumentaci k systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. Matouš, A. Kollarčík, M. Gurtner, T. Michálek, and Z. Hurák, "Optimization-based Feedback Manipulation Through an Array of Ultrasonic Transducers," IFAC-PapersOnLine, vol. 52, no. 15, pp. 483–488, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.722.
- [2] A. Marzo, S. A. Seah, B. W. Drinkwater, D. R. Sahoo, B. Long, and S. Subramanian, "Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects," Nat Commun, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, Oct. 2015, doi: 10.1038/ncomms9661.
- [3] J. Matouš, "AcouMan — Acoustophoretic Manipulation Platform", Master thesis, 2020
- [4] J. Matouš, "Manipulation with objects on a surface of a liquid using an array of ultrasonic transducers", Bachelor thesis, 2018
- [5] A. Kollarčík, "Planární akustická manipulace s kulovými objekty na pevném povrchu", Bakalářská práce 2018

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:

**do konce letního semestru 2023/2024**

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 své rodině a přátelům za jejich neutuchající podporu v psaní této práce a hlavně za veškerou poskytnutou pomoc v čase mé zdravotní indispozice. Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce *Ing. Jiřímu Zemánkovi, Ph.D.* za mnoho rad a nápadů, které mi poskytl. Také bych chtěl poděkovat celé skupině *AA4CC* za jejich ochotu a pomoc.

## 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 průzkumu dalších možností experimentální platformy pro akustickou manipulaci Acouman. Pomocí řízení fázového posuvu jednotlivých akustických měničů je možné vytvořit akustické tlakové pole daného tvaru, které následně interaguje s prostředím. Je možné vytvořit bod tlakového maxima, který silou působí na různé objekty a uvádí je tak do pohybu. V této práci je pozornost věnována hlavně zkoumání interakce jednoho nebo více tlakových bodů se sypkými materiály a s kapalinou. Je zde navržen a otestován regulátor pozice kapiček vody, který funguje na základě zavedení optické zpětné vazby. Dále je ověřeno, že je platforma schopna bezdotykově míchat kapalinu.

**Klíčová slova:** bezkontaktní manipulace, kapaliny, kapičky, ultrazvuk, sypký materiál, ultrazvuková manipulace, Acouman

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

## Abstract

In this work, I explore other possibilities of the experimental platform for acoustic manipulation called Acouman. By controlling the phase shift of individual acoustic transducers, it is possible to create an acoustic pressure field of a given shape, which then interact with the environment. It is possible to create a high-pressure point, which exerts a force on various objects and thus sets them in motion. This work mainly focuses on investigating the interaction of one or more pressure points with powder materials and liquids. A controller of water droplets is designed and tested; it uses an optical feedback loop. Furthermore, it is verified that the platform is able to contactless mix liquids.

**Keywords:** contactless manipulation, liquid, droplets manipulation, ultrasound, powder material, ultrasound manipulation, Acouman

**Title translation:** Ultrasonic manipulation of liquid and powder materials

## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Úvod</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Předešlé práce a kontext . . . . .                   | 1         |
| <b>2 Popis platformy</b>                                 | <b>5</b>  |
| 2.1 Hardware . . . . .                                   | 5         |
| 2.2 Software . . . . .                                   | 6         |
| 2.2.1 Raspberry Pi . . . . .                             | 6         |
| 2.2.2 FPGA DEO-Nano . . . . .                            | 6         |
| <b>3 Ověření funkčnosti platformy</b>                    | <b>9</b>  |
| 3.1 Generátory . . . . .                                 | 9         |
| 3.2 Detektor . . . . .                                   | 10        |
| 3.3 Simulinkový model . . . . .                          | 10        |
| <b>4 Manipulace se sytkými materiály</b>                 | <b>11</b> |
| 4.1 Experimenty . . . . .                                | 11        |
| 4.2 Diskuse k experimentům . . . . .                     | 13        |
| <b>5 Manipulace s kapalinou</b>                          | <b>15</b> |
| 5.1 Manipulace s kapičkami . . . . .                     | 15        |
| 5.1.1 Zvolení podložky . . . . .                         | 16        |
| 5.1.2 Detekce kapičky kamerou . . . . .                  | 16        |
| 5.1.3 Působení tlakového pole na<br>kapičku . . . . .    | 17        |
| 5.1.4 Návrh regulátoru . . . . .                         | 20        |
| 5.1.5 Ověření funkčnosti regulátoru . . . . .            | 22        |
| 5.1.6 Řízení více kapiček . . . . .                      | 22        |
| 5.1.7 Neneutronovská kapalina . . . . .                  | 22        |
| 5.2 Míchání kapalin . . . . .                            | 24        |
| 5.3 Diskuse výsledků manipulace s<br>kapalinou . . . . . | 24        |
| <b>6 Webové rozhraní</b>                                 | <b>27</b> |
| 6.1 Demo programy . . . . .                              | 27        |
| <b>7 Závěr</b>   | <b>29</b> |
| <b>Bibliografie</b>                                      | <b>31</b> |

## Obrázky

## Tabulky

|  |    |
|--|----|
| 1.1 Porovnání dvou iterací platformy<br>Acouman, převzato z [4]. . . . .                         | 2  |
| 1.2 Ukázky z Ghost Touch[6] . . . . .  | 3  |
| 2.1 Komunikační schéma platformy<br>Acouman . . . . .  | 7  |
| 3.1 Tlakový bod na vodní hladině . .   | 10 |
| 4.1 Nakreslená kružnice v hrubé<br>mouce . . . . .   | 12 |
| 4.2 Kružnice v pilinách, levitující<br>hromádka pilin . . . . .                                  | 13 |
| 4.3 Rozložení tlaku v okolí tlakového<br>bodu, převzato z [4]. . . . .                           | 14 |
| 5.1 Porovnání povrchů: a) sklo, b)<br>plexisklo, c) impregnovaný plast, d)<br>parafilm . . . . . | 17 |
| 5.2 Parafilmová folie na středním<br>panelu Acoumana . . . . .                                   | 18 |
| 5.3 Rozdíl mezi nabarvenou a<br>nenabarvenou kapičkou . . . . .                                  | 18 |
| 5.4 Detekce kapiček . . . . .  | 19 |
| 5.5 Deformace kapičky pod tlakovým<br>bodem . . . . .  | 20 |
| 5.6 Náklon kapičky k tlakovému bodu  | 20 |
| 5.7 Vzdálenost tlakového bodu od<br>středu kapičky. . . . .                                      | 21 |
| 5.8 Časové průběhy složek pozice<br>kapičky a reference, odchylka od<br>reference. . . . .       | 23 |
| 5.9 Průběh pozice kapičky a reference<br>v rovině XY. . . . .                                    | 24 |
| 5.10 Tuš na hladině mléka . . . . .  | 25 |
| 5.11 Proudění tuše na hladině mléka  | 26 |
| 5.12 Bubliny tuše na hladině mléka .   | 26 |
| 6.1 Ukázka z webového uživatelského<br>rozhraní . . . . .  | 28 |

# Kapitola 1

## Úvod

V této bakalářské práci se věnuji průzkumu dalších možností dříve vytvořené platformy Acouman, která umožňuje bezdotykovou manipulaci s objekty za využití akustického pole. Navazuji na práci Josefa Matouše a Adama Kollarčíka (viz níže), kteří platformu vytvořili a navrhli systém pro řízení kulových a trojúhelníkových objektů na vodní hladině. Mým úkolem je prozkoumat možnosti platformy pro pohyb s kapalinou a sypkými materiály. Konkrétně se budu snažit o řízení kapiček, míchání kapalin a kreslení do sypkého materiálu. Abych mohl tyto úkoly plnit, musím nejdřív ověřit, že platforma funguje správně, jelikož byla několik let rozložena na díly a já ji v rámci svého projektu měl za úkol sestavit. Posledním úkolem je pro pohodlí uživatele a snadnou demonstraci systému vytvořit uživatelské webové rozhraní, skrze které bude možné platformu ovládat. Každému z těchto hlavních úkolů věnuji ve své práci jednu kapitolu.

Acouman je experimentální platforma s polem akustických měničů, kde nastavením jejich fázového posuvu lze vytvořit akustické pole s tlakovými body, neboli body lokálního tlakového maxima. Tyto tlakové body umožňují působit silou na objekty, které se nacházejí v akustickém poli, a tak lze s objekty manipulovat. Pozice objektů je sledována kamerou, a při zavedení zpětnovazební smyčky můžeme regulovat jejich polohu, popřípadě i orientaci.

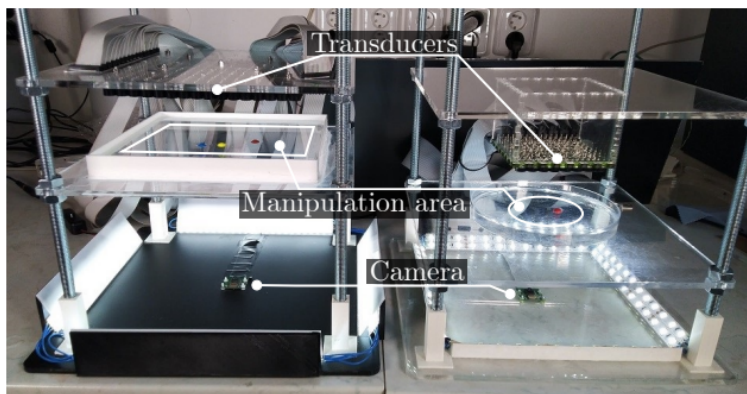
### 1.1 Předěšlé práce a kontext

Jak jsem výše zmínil, tato práce navazuje na několik předchozích prací skupiny *AA4CC* z katedry řízení na ČVUT, v této sekci se pokusím nabídnout čtenáři jejich stručný přehled, aby bylo možné pochopit kontext mé práce, s čím jsem začínal a jaké jsou přínosy.

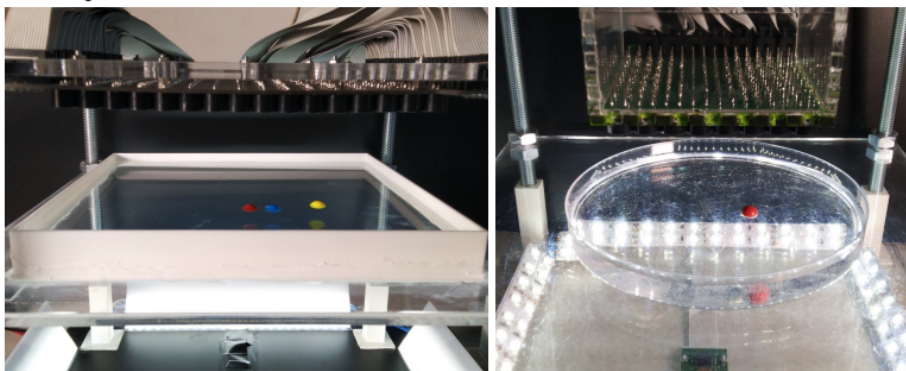
První iteraci platformy sestrojil Josef Matouš spolu s Adamem Kollarčíkem v rámci svých bakalářských projektů a bakalářských prací. Platforma měla 64 akustických měničů uspořádaných do čtverce  $8 \times 8$ . V [1] Josef Matouš navrhl řídicí systém, který dokázal řídit plovoucí kuličku na hladině vody a v [2] navrhl Adam Kollarčík řídicí systém pro kuličku na pevném povrchu. Řízení bylo v obou případech možné ve vzdálenosti do 2 cm od středu manipulačního prostoru. Společně potom ve spolupráci s dalšími členy skupiny *AA4CC* sepsali o platformě článek [3].

Nejposlednější prací na Acoumanovi je diplomová práce Josefa Matouše[4], v níž Josef Matouš vytvořil druhou iteraci platformy, ta má čtyřikrát více akustických měničů než iterace první a její manipulační prostor je úměrně tomu rozšířen. Zároveň dokáže oproti první iteraci řídit nejen kuličky, ale i planární objekty. Porovnání dvou iterací platformy je vidět na obrázku 1.1.

Zmínit je také třeba projekt Petra Brože[5], ve kterém pro platformu vytvořil 4 FPGA generátory fázově posunutých signálů, které jsou synchronizované metodou Master-Slave. Tyto generátory jsou dále více popsány.



(a) A side-by-side comparison between the old (right) and new (left) platform

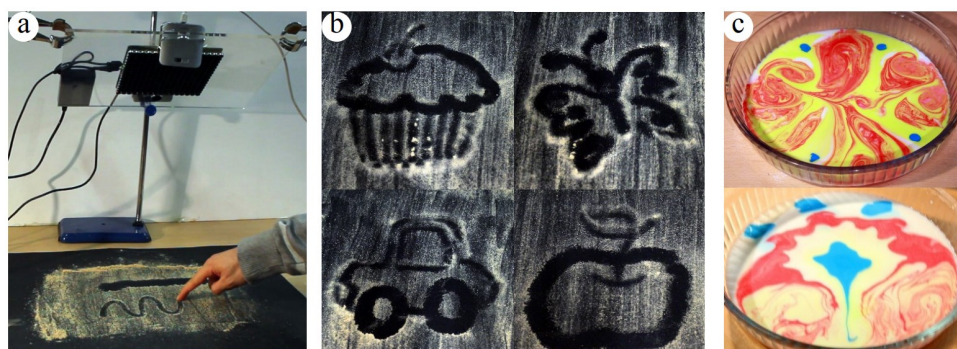


(b) Manipulation area of the new platform (c) Manipulation area of the old platform

**Obrázek 1.1:** Porovnání dvou iterací platformy Acouman, převzato z [4].

## ■ Ghost Touch

Známým projektem, kterým se inspirovali již mí předchůdci, je Ghost Touch[6], kde se autor Asier Marzo a spol. zabývají kreslením do sypkých materiálů pomocí akustických tlakových bodů. Využívají k tomu 256 akustických měničů, které jsou uspořádány do čtverce  $16 \times 16$ , stejně jako v druhé iteraci Acoumana. Mimo kreslení do sypkých materiálů se věnují i dalším aplikacím, jako je například míchání kapalin, což je demonstrováno mícháním mléka a inkoustu. Na obrázku 1.2 jsou vidět ukázky z jejich práce.



Obrázek 1.2: Ukázky z Ghost Touch[6]

### ■ Ultrazvuková levitace

Asi nejrozšířenější aplikací akustického tlakového pole je levitace malých objektů, kterou je možné použít pro přemísťování buněk, kapalin nebo různých sloučenin bezdotykově, bez kontaminace vzorku, vývojem v tomto odvětví se zabývá například článek [7], kde jsou porovnány různé přístupy k levitaci. V [8] se Asier Marzo a spol. zabývají i různými tvary akustického pole, které jsou pro akustickou levitaci vhodné, jako optimální tvary vyhodnotí tvary podobné pinzetě nebo kleštím, popřípadě lahvi. Akustickou levitací se zabývali na ČVUT i Josef Matouš s Adamem Kollarčíkem v roce 2017 v rámci letního projektu skupiny AA4CC.

### ■ Manipulace s objekty na pevném povrchu

Manipulací mikročástic na pevném povrchu se zabývá např. [9], kde je částicemi pohybováno za užití Besselových funkcí. Šestnáct aktuátorů je zde rozmístěno po kružnici a částice jsou nuceny zaujímat různé formace.





## Kapitola 2

### Popis platformy

V této kapitole nabídnou zevrubný popis celé platformy Acouman a zejména toho, jak spolu jednotlivé části interagují. Platforma, se kterou jsem pracoval, je druhou iterací projektu Acouman, kterou v rámci své diplomové práce vytvořil Josef Matouš. Liší se od předchozí verze zejména rozšířeným počtem akustických měničů na čtyřnásobek jejich původního počtu a tedy i větším manipulačním prostorem.

#### 2.1 Hardware

Hlavní část platformy je tvořena třemi rovnoběžnými panely, jak je vidět na obrázku 1.1. Vrchní plocha nese 256 akustických měničů Murrata MA40S4S, které jsou uspořádány do čtverce  $64 \times 64$ . Měníče jsou napájeny obdélníkovými signály o stejné frekvenci a řízené fázi. Signály generují FPGA generátory, jež jsou popsány níže. Pod akustickými měniči je umístěn panel z průhledného plexiskla, na kterém je vodotěsná čtvercová nádržka o délce strany 19 cm a výšce stěn 1,5 cm. Do té je možné napustit vodu a manipulovat s plovoucími objekty. V této práci do nádržky umísťuji různé sypké materiály a kapičky, se kterými následně manipuluji. Ve středu spodního panelu je umístěna *Raspberry Pi kamera*, pomocí níž je možné skrze plexisklo střední plochy pozorovat objekty. Vzorkovací frekvence je nastavena na 50 Hz a rozlišení kamery je  $480 \times 480$  px. Po obvodu spodní plochy jsou rozmístěny LED pásy, které scénu kamery osvětlují a zlepšují tak detekci.

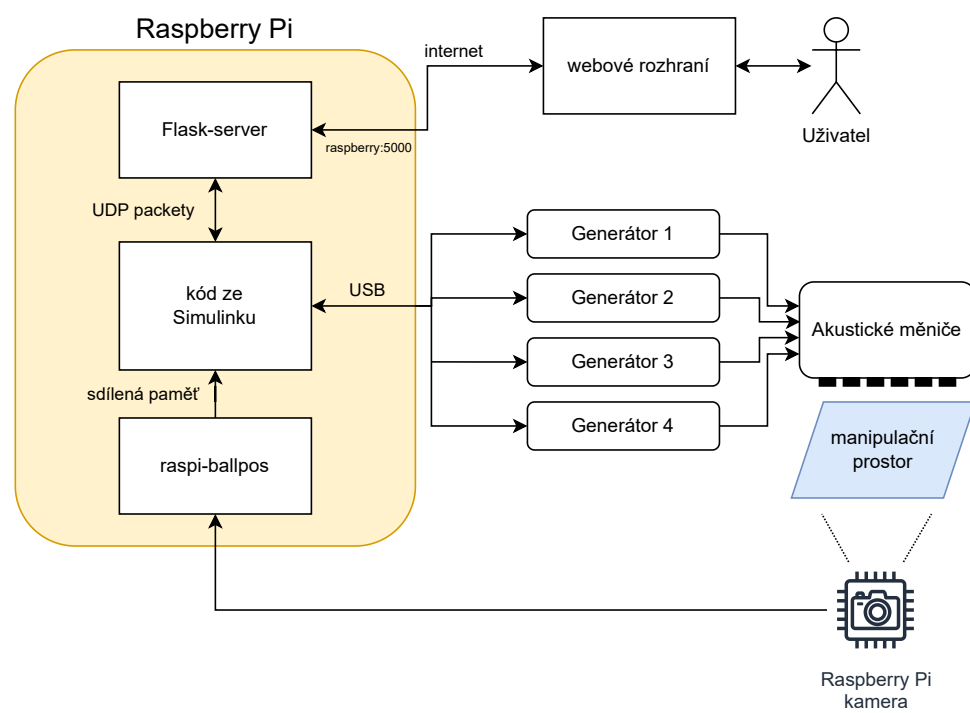
Mozkem celého systému je *Raspberry Pi 3 B+*<sup>1</sup>. V něm běží řídicí program a zároveň také Flask server, na který je možné se z jiného počítače připojit a pomocí webového rozhraní s programem interagovat (např. nastavovat referenční pozice nebo trajektorie). K *Raspberry Pi* je připojena *Raspberry Pi kamera* a čtyři generátory, se kterými komunikuje pomocí USB.

Každý ze čtyř generátorů sestává ze tří částí: FPGA desky, zesilovacího shieldu a synchronizačního shieldu. FPGA deska *Terasic DEO-Nano* generuje 64 obdélníkových signálů o stejné frekvenci (40 kHz) a fáze každého z nich je nastavována z *Raspberry Pi*. Výstup desek *DEO-Nano* má amplitudu 3.3 V a je pomocí zesilovacích shieldů zesilován na  $16 V_{pp}$ . Následně je signál veden

---

<sup>1</sup>Dále pouze *Raspberry Pi*.





**Obrázek 2.1:** Komunikační schéma platformy Acouman



## Kapitola 3

### Ověření funkčnosti platformy

Jedním z hlavních úkolů této práce bylo ověřit funkčnost platformy pomocí existujících regulátorů pro řízení více pevných objektů. Proto této části věnuji jednu z kapitol, přestože bude o poznání kratší.

Acouman byl před mým příchodem na projekt rozebrán a jeho části několik let ležely různě uskladněny. Z toho důvodu bylo potřeba zprovoznit všechny části, které byly v minulosti funkční, a ověřit, že fungují správně. Sestavení platformy a její zprovoznění nebylo vůbec jednoduché, z části kvůli chybějícím součástem a z velké části kvůli neúplné dokumentaci. Proto jsem si vedl detailní záznamy svého postupu, které mohou pomoci někomu, kdo bude v budoucnu opět Acoumana sestavovat.<sup>1</sup>

Platforma byla v minulosti schopna manipulovat s barevnými kuličkami a trojúhelníky plovoucími na hladině, a to pomocí detekce příslušných objektů kamerou. Mým cílem bylo dosáhnout opět tohoto stavu, abych mohl dále možnostní platformy rozšiřovat. V této kapitole popíši zprovoznění a ověření funkčnosti hlavních tří celků platformy, jimiž jsou generátory, detektor a Simulinkový model obsahující regulátory.

#### 3.1 Generátory

Po zprovoznění generátorů a webového rozhraní jsem zkusil vytvořit tlakový bod na hladině a pohybovat jím, čímž jsem ověřil, že výpočet posunu fází i komunikace s generátory funguje správně. Tlakový bod byl na hladině dobře patrný, foto můžeme vidět na obrázku 3.1. Posouvání bodu nicméně nebylo plynulé a při zvětšování tlaku se pohyb tlakového bodu stával trhanějším. Z toho je patrné, že je prostor všech možných pozic tlakového bodu diskrétní a ne spojitý. To je velmi důležité pozorování, jelikož není možné umístit tlakový bod o dané velikosti na libovolné místo s nekonečnou přesností, záleží na tom, jak moc bude pro kterou aplikaci toto omezení kritické nebo vůbec patrné.

---

<sup>1</sup>Plná dokumentace mého postupu zprovoznění Acoumana je na mém gitlabu: [https://gitlab.fel.cvut.cz/svobop60/acouman/-/tree/main/dokumentace\\_poznamky](https://gitlab.fel.cvut.cz/svobop60/acouman/-/tree/main/dokumentace_poznamky).



Obrázek 3.1: Tlakový bod na vodní hladině

## 3.2 Detektor

V předchozích pracích na platformě Acouman byl k detekci pozice barevných kuliček použit program *raspi-ballpos* s nastaveným detektorem *MultiColor-Detector*. Tento detektor se mi nicméně nepodařilo zprovoznit tak, aby se pozice kuliček detekovala spolehlivě. Detekovaná pozice velmi rychle kmitala okolo skutečné pozice i za klidné hladiny, ale po zapnutí generátorů a zvlnění hladiny detektor nefungoval téměř vůbec. Z toho důvodu jsem se rozhodl použít jiný dostupný detektor v balíčku *raspi-ballpos*, a to *RansacDetector*. Tento detektor fungoval spolehlivě i při zvlnění hladiny.

K detekci plovoucích trojúhelníků byl taktéž použit *MultiColorDetector* s aktivovanou volbou pro detekci orientace objektů. Bohužel stejně jako u kuliček detekovaná pozice trojúhelníků a hlavně jejich orientace hodně kmitala, takže nebylo možné trojúhelníky řídit. Možnost detekce orientace bohužel *RansacDetector* neobsahuje, a tak jsem po delším snažení implementovat detekci orientace do tohoto detektoru řízení trojúhelníků opustil. Pro zkoumání manipulace se sypkými a kapalnými médii navíc nemá detekce orientace trojúhelníků žádný význam.

## 3.3 Simulinkový model

Zbývalo spojit jednotlivé části dohromady a vyzkoušet řízení kuliček na hladině pomocí nástroje Simulink. K testování jsem použil regulátor *RGBBalls*, který je spolu s dalšími dostupný na gitlabu platformy Acouman<sup>2</sup>. Tento regulátor je určen pro řízení tří barevných kuliček na hladině a ve spolupráci s webovým rozhraním nabízí řízení barevných kuliček do referenčních pozic i pohybování s kuličkami po zvolených trajektoriích. Tato část fungovala výborně, jen při nastavení trajektorie *infinity* se občas stávalo, že kuličky v prudkých zatáčkách trajektorii opustily a odpluly mimo zorné pole kamery.

<sup>2</sup><https://gitlab.fel.cvut.cz/aa4cc/acouman/simulink-controller>

## Kapitola 4

### Manipulace se sypkými materiály

Jedním z hlavních cílů této práce je ověřit možnosti platformy Acouman pro manipulaci se sypkými materiály. Již existuje software pro vytváření tlakových bodů a já se jej pokusím použít na různé sypké materiály a budu pozorovat, jak se budou chovat.

Rád bych replikoval úspěšný projekt *Ghost Touch*[6], kde bylo využito sypkého materiálu jako interaktivního kreslicího plátna. Stejně jako v platformě Acouman bylo 256 akustických měničů řízeno signálem  $16V_{pp}$  a pomocí vytvořených tlakových bodů bylo možné kreslit různé tvary. Jako nejlepší interaktivní materiál byly zvoleny jemné piliny, jelikož jsou velmi lehké. Bylo možné nejen kreslit obrazce myší, ale i přímo prstem na plátno. Skrze zpracování obrazu potom program vyhodnotil, jakou trajektorii tlakového bodu zvolit, aby byl obrazec zkopírován.

Mým cílem bylo replikovat kreslení obrazců a pokud by se povedlo tvarovat tlakové pole dostatečně přesně, bylo by dále možné úlohu rozšířit na stavění 3D objektů. Začal jsem tedy s experimenty s jedním tlakovým bodem.

#### 4.1 Experimenty

Provedl jsem experimenty s několika různými běžně dostupnými materiály: hrubá mouka, hladká mouka, krupička, sůl a jemné piliny.

##### Hrubá mouka a krupička

**Hrubá mouka a krupička** se chovaly velmi podobně - jejich zrna jsou přibližně stejné velikosti a váhy. Krupičku jsem zkoušel použít, jelikož se o trochu lépe sype, ale rozdíl bohužel nebyl téměř znát. Tlakový bod zdvihl tenkou vrstvu mouky, ta levitovala nad tlakovým bodem a o trochu se posunula ve směru pohybu tlakového bodu. Následně zpod vrstvy tlakový bod vyklouzl a vrstva se opět položila. Když jsem nechal kroužit tlakový bod po kružnici, postupně byla kružnice do mouky nakreslena, ale po jejím obvodu se kupily hromádky mouky. Výsledek takového kroužení můžeme pozorovat na obrázku 4.1.

### ■ Hladká mouka

**Hladká mouka** se chovala výrazně jinak než ostatní materiály, zůstávala k pohybu tlakového bodu netečná. Toto chování připisují velikosti jednotlivých zrn mouky, která byla moc malá na to, aby pocítila rozdíl tlaku na svých stranách a pohybovala se. Dalším faktorem může být přirozená "lepivost" mouky, která na této malé úrovni převážila sílu tlakového pole.

### ■ Sůl

**Sůl** se chovala podobně jako hrubá mouka, ale její zrna byla větší a těžší. Tlakový bod ji tedy nedokázal udržet ve vzduchu a sůl se s ním pohybovala po povrchu. Při pohybu tlakového bodu se na povrchu sůl stále trochu kupila, přesto po delším kroužení vytvořila kružnici. Manipulace se solí byla nicméně velmi pomalá.

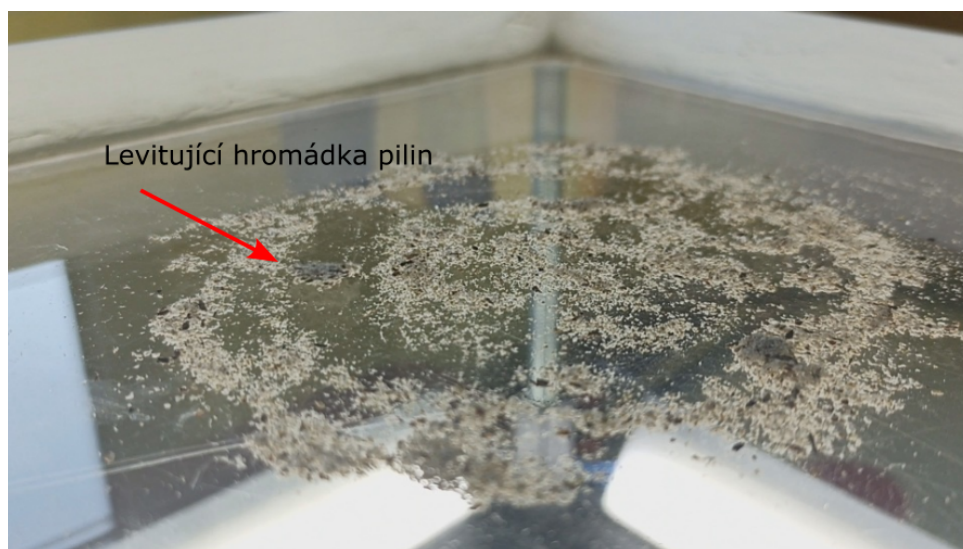
### ■ Piliny

**Piliny** měly ze všech použitých sypkých materiálů největší úspěch. Jelikož byly částičky velmi lehké, nechaly se tlakovým bodem snadno posunout. Bohužel se u pilin projevil stejný jev jako u hrubé mouky, to jest levitace hromádek pilin, zde ale ve větším měřítku. Tlakový bod zdvihl vrstvu pilin a nesl ji s sebou, přičemž cestou se na vrstvu nabalovaly další piliny a nesená hromádka rostla. Stejně jako u hrubé mouky byla kružnice do pilin po čase vykreslena, ale pro detailnější nebo přesnější kresbu do pilin je stávající tlakový bod nepoužitelný. Foto z kroužení v pilinách je na obrázku 4.2. V levé části je vidět levitující hromádka pilin, bohužel je lehce rozmazaná, jelikož rotovala velkou rychlostí.



**Obrázek 4.1:** Nakreslená kružnice v hrubé mouce



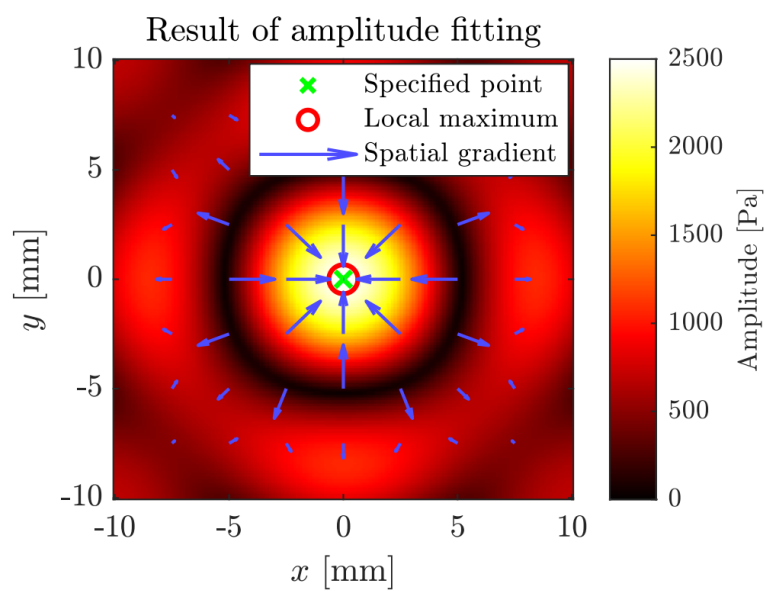


**Obrázek 4.2:** Kružnice v pilinách, levitující hromádka pilin

## 4.2 Diskuse k experimentům

Stávající tlakový bod je pro manipulaci se sypkými materiály téměř nepoužitelný, tlakové maximum je obklopeno tlakovým minimem, které nepříjemně ovlivňuje materiál a komplikuje tak manipulaci. V grafu rozložení tlaku na obrázku 4.3, který jsem převzal z [4], je vidět, že je tlak okolo tlakového bodu zvlněn a vytváří oblasti lokálního tlakového minima. Na obrázku je maximum velikosti 2500 Pa, nicméně já byl nucen použít vyšších tlaků, aby bylo možné se sypkými materiály pohybovat (od 3000 Pa do 5000 Pa). U těchto vyšších tlaků se dá očekávat ještě výraznější zvlnění, které již pravděpodobně nebude vytvářet pravidelné soustředné kružnice kvůli rozložení akustických měničů do pravoúhlé mřížky.

Komplikace spočívají ve zdvihování materiálu do vzduchu a ve vytváření kupiček v okolí tlakového bodu. Tento problém by bylo možné vyřešit pomocí jiného tvarování tlakového bodu, pokud by se povedlo vytvořit vír, bylo by možné materiál odvrhávat pryč od tlakového bodu a pohodlněji kreslit do vrstvy sypké hmoty. Další možností by bylo použít tlakový bod s menší hodnotou maximálního tlaku, aby se netvořilo takové zvlnění. V tom případě by bylo potřeba nalézt opravdu velmi lehký sypký materiál, aby jím bylo možné pohybovat pomocí nižšího tlaku.



**Obrázek 4.3:** Rozložení tlaku v okolí tlakového bodu, převzato z [4].

## Kapitola 5

### Manipulace s kapalinou

Dalším zajímavým uplatněním fázově řízeného akustického pole je manipulace s kapalinou, která přináší možnost míchat bezkontaktně různé kapaliny, oddělovat ze zásoby kapičky nebo bubliny a pohybovat s nimi a mnoho dalších. Tomuto problému se věnovala celá řada autorů a společností.

Praktickým příkladem je výzkumné středisko NASA Lewis, kde pole akustických měničů napájeli signálem s amplitudou přes 100 V a vytvářeli tak akustické pole s vysokým výkonem, pomocí něhož byli schopni míchat toxické chemikálie nebo dokonce tlumit cákání paliva v palivových nádržích [10].

#### 5.1 Manipulace s kapičkami

Dalším problémem, kterým jsem se zabýval, je ultrazvuková manipulace s kapičkami. Takovou manipulací je zajímavé se zabývat pro teoretické zkoumání, ale mohla by nalézt i řadu uplatnění, například v laboratořích, kde je potřeba pracovat s malými objemy kapalin obsahujícími biologické vzorky a není žádoucí jimi kontaminovat pracovní nástroje nebo naopak kontaminovat vzorky nečistými nástroji. Dalším příkladem může být manipulace s malými vzorky vysoce toxických nebo žíravých látek, které je potřeba ideálně automaticky přesouvat, míchat nebo oddělovat.

Při zkoumání možností manipulace s kapičkami pomocí platformy Acouman jsem narazil na několik dílčích problémů, které dále detailněji popíši a představím řešení.

Prvním a největším omezením je **stykový úhel** mezi kapičkou a povrchem a **povrchové napětí kapaliny**. Když nejsou stykový úhel a povrchové napětí dost velké, kapička se k povrchu připlácne a není možné s ní pohybovat. Ideální kapička je taková, kterou povrch hodně odpuzuje (je hydrofobní), kapička má velké povrchové napětí a drží při sobě, taková kapička na hydrofobním povrchu se podobá kuličce. Voda má povrchové napětí  $0.07275 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$  [11], což je z běžně dostupných kapalin jedno z největších povrchových napětí, proto budu v dalších experimentech používat vodní kapičky.

Druhým problémem byla **detekce kapičky kamerou**. Jelikož jsem zjistil, že obarvené kapičky mají příliš malé povrchové napětí, pracoval jsem s průhlednými kapičkami vody. Tyto kapičky však nebylo možné detekovat pomocí již existujícího programu *raspi-ballpos*, a tak jsem jej musel rozšířit o

nový *DropDetector*.

Třetím problémem bylo **zvolení správného tlaku** tlakového bodu. Příliš nízké tlaky neměly dostatečný vliv na kapičku a nebyly schopny ji rozpožehovat, příliš vysoké tlaky kapičku přivedly do bublajícího stavu a vzniklé bybliny ztěžovaly jak detekci, tak manipulaci. Při přílišném bublání se navíc kapička začínala rozprskávat do všech stran. Navíc použití vysokého tlaku přináší komplikace v podobě většího zvlnění tlaku v okolí tlakového bodu.

### ■ 5.1.1 Zvolení podložky

Jak bylo výše zmíněno, bylo třeba maximalizovat stykový úhel mezi kapičkou a povrchem, neboli najít povrch dostatečně hydrofobní. Zároveň bylo žádoucí, aby byl povrch průhledný pro detekci pozice kapičky kamerou umístěnou na spodním panelu Acoumana. Zkoušel jsem několik materiálů, které byly dostatečně hydrofobní a zároveň průhledné, pokusy jsem prováděl s vodou z vodovodu.

Sklo, plexislo a plastové víčko krabičky na CD měly velmi podobné výsledky, nicméně impregnace víčka na CD vodoodpudivým sprejem na boty jeho hydrofobnost výrazně zlepšila za cenu lehkého zhoršení průhlednosti. Kapičky na víčku dobře odstávaly, ale klouzaly pomalu, zřejmě impregnace zvýšila tření povrchu. Porovnání povrchů můžeme nalézt na obrázku 5.1. Pokus gravírovat sklo jeho hydrofobnost ještě snížil.

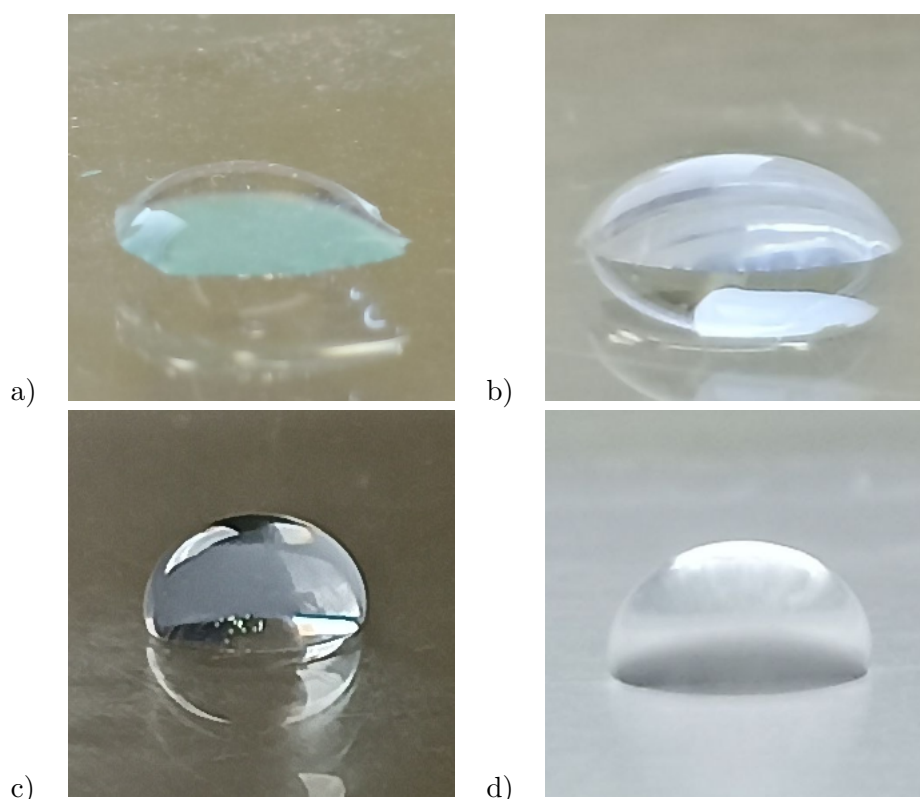
Dále jsem zkoušel pečicí papír, který je povoskovaný a tím pádem by měl být hydrofobní. Stykový úhel byl velmi dobrý, ale tření povrchu bylo opět velké. Zároveň není pečicí papír průhledný, takže by byla detekce kapiček skrz něj složitá. Vosková vrstva jako hydrofobní povrch se nicméně osvědčila. Kapičky na pečicím papíru jsou vidět na obrázku 5.5.

Nakonec jsem vyzkoušel **parafilm**<sup>1</sup>, což je tenká transparentní termoplastická krycí fólie pro použití v laboratoři, je povoskovaná parafinovými vosky a je výborně hydrofobní. Zároveň je velmi hladká a takřka bez hrbolů, škrábanců nebo jiných překážek, takže po ní kapičky snadnou kloužou. Kapičku na parafilmu můžeme vidět v porovnání s kapičkami na předchozích površích na obr. 5.1. S parafilmem jsem dosáhl nejlepších výsledků, a tak jsem jej použil pro všechny další pokusy. Parafilmovou folii jsem přilepil na skleněnou destičku, kterou jsem umístil na střední panel Acoumana, viz obr. 5.2.

### ■ 5.1.2 Detekce kapičky kamerou

Pro detekci kapiček jsem chtěl použít program *raspi-ballpos*, který byl použit pro detekci plovoucích kuliček na hladině v předešlých projektech. Detektory v tomto programu detekují na základě rozlišení barvy, a tak jsem chtěl kapičky obarvit, zároveň by tak bylo možné jednotlivé kapičky rozlišit od sebe.

<sup>1</sup>Použit parafilm mi poradil pan Jiří Zemánek. Ve škole se nacházela role parafilmu zbylá z předešlých pokusů Petra Brože v rámci projektu OpenDrop, který se snaží o vývoj "automatické laboratoře na čipu". Kapičkami různých roztoků je možné pohybovat pomocí elektrického pole a povrchem je právě parafilm. Více o OpenDrop na <https://www.gaudi.ch/OpenDrop>.



**Obrázek 5.1:** Porovnání povrchů: a) sklo, b) plexisklo, c) impregnovaný plast, d) parafilm

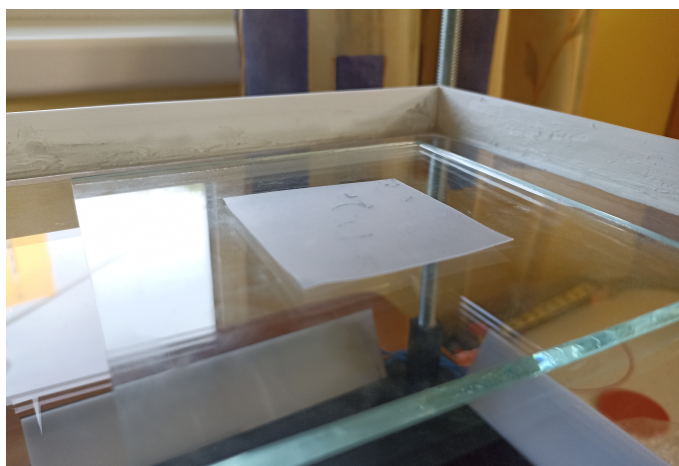
Bohužel použití vodových barev výrazně snížilo povrchové napětí a kapičky se rozplácly, viz obr. 5.3. Proto jsem byl nucen postupovat dále s průhlednými kapičkami a rozšířit program *raspi-ballpos* o nový detektor *DropDetector*<sup>2</sup>.

Při nasvícení prostředního panelu zespodu pomocí LED pásků je možné kapičku detekovat pomocí světlého kruhu, který vzniká na obvodu její styčné plochy s povrchem. Tento kruh detekuji pomocí python knihovny *OpenCV* a její funkce *HoughCircles*. Jelikož mají kapičky občas tendenci rozprsknout se na menší kapičky, vybírám z detekovaných kruhů pouze  $N$  největších, a ty budu řídit. Detekované kapičky jsou zobrazeny na obr. 5.4.

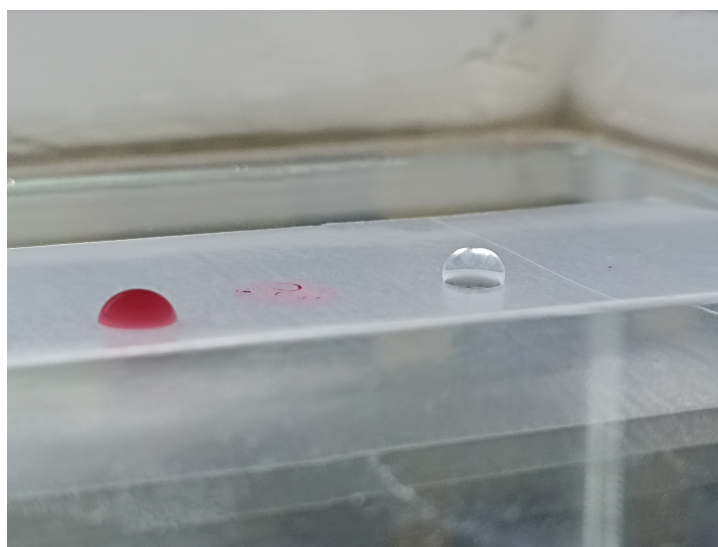
### ■ 5.1.3 Působení tlakového pole na kapičku

Hlavním cílem této části bylo zjistit, jak kapička interaguje s tlakovým polem a zda bude možné ji pomocí něj řídit. Z teorie vyplývá, že se bude kapalina pohybovat z místa s vyšším tlakem do místa s tlakem nižším. Uvažoval jsem nad dvěma různými přístupy, jak kapičkou pohybovat. Kapička by mohla jít tlakovým maximem tlačít nebo táhnout tlakovým minimem. Táhnutí tlakovým minimem jsem nicméně zavrhnul, protože v současné době není implementované počítání fázových posuvů pro vznik tlakového minima a

<sup>2</sup>K dispozici na <https://gitlab.fel.cvut.cz/svobop60/simulink2023>



**Obrázek 5.2:** Parafilmová folie na středním panelu Acoumana



**Obrázek 5.3:** Rozdíl mezi nabarvenou a nenabarvenou kapičkou

implementace by byla velmi složitá. Zvolil jsem tedy použití tlakového maxima.

### ■ Akustická lžíce

Přemýšlel jsem, jak nejlépe kapičku tlačit. Ideální by bylo vytvořit okolo kapičky kruhový tlakový val, který by nutil kapičku zůstat v jeho středu, a při posouvání valu by se posouvala i kapička.

Začal jsem pokusy s jednodušším tvarem, který jsem nazval "akustická lžíce". Jsou to tři tlakové body umístěné na kružnici se středem v pozici kapičky a poloměr oné kružnice i vzdálenosti bodů jsem chtěl určit na základě experimentů, podle toho, jak by se dařilo kapičku tlačit.

Experimenty jsem prováděl na vodní hladině, kde se akustický tlak promítá do zvlnění hladiny a je tak snadno pozorovatelný. Měnil jsem vzdálenost bodů a poloměr kružnice tak, aby vnikl v hladině hezký oblý důlek. Zde jsem





**Obrázek 5.4:** Detekce kapiček

bohužel narazil na omezení platformy Acouman, jejíž optimalizační algoritmus neumožňuje vytvářet tlakové body blízko u sebe. Problém spočívá v tom, že jedním z požadavků na tlakový bod je být lokálním maximem. Pokud jsou dva tlakové body blízko u sebe, je těžké tuto podmínku splnit a zároveň splnit podmínku na velikost rozdílu tlaků. Program řešící optimalizační úlohu potom najde nejbližší řešení, které však není dostatečné.

Dalším problémem je umístění "akustické lžice". V některých místech na hladině se mi povedlo vytvořit tři tlakové body relativně blízko u sebe, ale při jejich posunutí nebo otočení se hloubka důlek v hladině výrazně zmenšila nebo důlky téměř úplně vymizely. Problém pramení ze stejného zdroje jako předchozí, opět zde optimalizační algoritmus nenašel vhodné řešení. Vytváření složitějších tvarů vyššího tlaku jsem tedy byl nucen zavrhnout a začal jsem se zabývat pouze jedním tlakovým bodem.

### ■ Tlakový bod

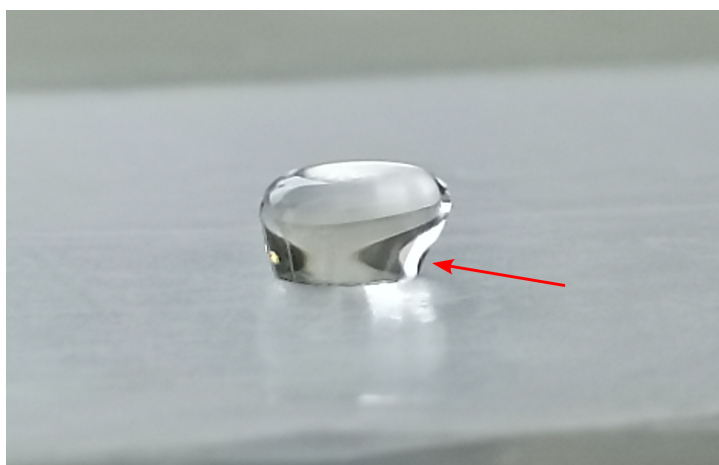
Tlakový bod jsem umísťoval do blízkosti kapičky<sup>3</sup> a pozoroval jsem, jak se kapička chová. Když umístím tlakový bod přímo nad kapičku, tak se kapička zmáčkne a na horní straně se vytvoří důlek, viz obr. 5.5. Toto chování bylo vcelku očekávané. Překvapivě se ale kapička začne chovat, když se tlakový bod umístí těsně vedle ní. Čekal jsem, že se kapička od tlakového bodu odsune, ale místo toho se kapička k bodu naklonila, jak je vidět na obrázku 5.6. Po delším

<sup>3</sup>Umístění tlakového bodu je v obrázcích označeno červenou šipkou.

zkoumání jsem zjistil, že tlakové maximum je umístěno několik milimetrů nad povrchem a nad ním je tlakové minimum. Kapička se lehce zdvihne a nakloní se nad tlakové maximum. Toto chování je velmi zajímavé a může být využito pro řízení kapičky tak, že bude kapička tlakovým maximem *tažena*<sup>4</sup>.



**Obrázek 5.5:** Deformace kapičky pod tlakovým bodem



**Obrázek 5.6:** Náklon kapičky k tlakovému bodu

#### ■ 5.1.4 Návrh regulátoru

Navrhl jsem jednoduché řízení kapičky pomocí tlakového bodu. Kamerou jsem sledoval pozici kapičky a tlakový bod jsem umístil do blízkosti kapičky ve směru, kterým se bude pohybovat. Nejlepších výsledků jsem dosáhl s kapičkou o objemu 0,035 ml a tlakovým bodem vzdáleným 1,5 mm od středu

<sup>4</sup>Ve skutečnosti je kapička tažena tlakovým minimumem, které obklopuje maximum.



kapičky, tehdy se kapička nejlépe převalovala ve směru tlakového bodu. Řízení však stále nebylo bezchybné. Občas se kapička převalila tak, že pohltila trochu vzduchu a zůstala v ní vzduchová bublina. Potom se kapička přestala převalovat a zůstávala na místě. Problém jsem vyřešil tak, že jsem nechal oscilovat velikost tlaku mezi hodnotami 2500 a 4500 Pa s frekvencí 10 Hz. Tímto způsobem se kapička neustále pohybovala nahoru a dolů, což vzniklé vzduchové bubliny vytlačilo z kapičky ven. Také se kapička tolik nelepila na povrch, jelikož se jej dotýkala menší plochou. I přes toto zlepšení se občas stávalo, že se kapička zasekla na místě, a to především při pohybu v diagonálním směru. Toto chování připisuji rozmístění akustických měničů, které jsou uspořádané v pravoúhlé mřížce, a tak je v diagonálním směru menší hustota akustických měničů a tedy i přesnost umístění tlakového bodu. Zároveň nebyl ani pohyb v horizontálním a vertikálním směru spolehlivý, proto jsem navrhl jiný regulátor.

Nový regulátor pracuje s lehce menším tlakem než předchozí, jako nejlepší hodnotu tlaku tlakového bodu jsem určil 2900 Pa. Tlakový bod umístím nad kapičku tak, že se lehce promáčkne a pak jím posunuji ve směru chtěného pohybu. Kvůli soudržnosti se kapička posune s tlakovým bodem. Tento posun poté opakuji ve smyčce s frekvencí  $1 \text{ rad} \cdot \text{sec}^{-1}$ , až kapička dosáhne referenční pozice. Jako ideální posun mi vyšlo umístění tlakového bodu 2 mm od středu kapičky a následný posun do vzdálenosti 7 mm. Pro názornost jsem vykreslil vzdálenost tlakového bodu od středu kapičky do grafu, viz obr. 5.7.

Jakmile se kapička dostane do vzdálenosti 3 mm od reference, řízení je pozastaveno, jelikož je velmi těžké přesouvat kapičku na takto jemné vzdálenosti. V sekci 5.1.5 ověřím funkčnost tohoto regulátoru.



**Obrázek 5.7:** Vzdálenost tlakového bodu od středu kapičky

Řízení kapičky jsem zkoušel v celém manipulačním prostoru platformy, což je čtverec o délce strany 19 cm. Při okrajích nicméně nebylo umístování tlakových bodů dostatečně přesné a řízení nefungovalo spolehlivě. To není překvapivé, jelikož je při okraji méně akustických měničů, které mohou k tvorbě tlakového bodu přispět. Proto jsem byl nucen omezit manipulační prostor kolem středu plochy. Jelikož jsou parafinové čtverce velikosti  $5 \times 5$  cm, zvolil jsem jako manipulační prostor čtverec  $5 \times 5$  cm uprostřed středního panelu.

### 5.1.5 Ověření funkčnosti regulátoru

S navrženým regulátorem<sup>5</sup> jsem provedl mnoho experimentů, některé z nich jsem nahrál na video a uložil na gitlab<sup>6</sup>. Pro demonstraci funkčnosti regulátoru jsem zpracoval jeden z experimentů i do grafů, které můžeme vidět níže na obrázcích 5.8 a 5.9. Ve webovém rozhraní jsem pohyboval referencí a pozoroval, jak bude referenci kapička sledovat. Aktuální eukleidovskou vzdálenost kapičky od reference (značenou jako odchylka) vidíme na třetím grafu obrázku 5.8. Červenými svislými čarami jsou vyznačeny okamžiky přesunu reference, ve kterých odchylka skokově vzroste.

Můžeme si povšimnout, že je pohyb kapičky velmi "skokový". To je dáno tím, že k rozpořybování kapičky musí být současně splněno několik podmínek. Kapička musí být správně nakloněna a tlakový bod musí být umístěn do správné vzdálenosti. Zároveň také pohybu občas brání bubliny, které se v kapičce nevyhnutelně tvoří a při určitém posunu tlakového bodu jsou z kapičky vytlačeny. Dalším faktorem ovlivňujícím pohyb mohou být nečistoty na povrchu nebo nerovnost povrchu.

Výsledek řízení kapičky je myslím velmi uspokojivý, kapička se v referenční poloze ustálí s velmi malou odchylkou.

### 5.1.6 Řízení více kapiček

Platforma je schopna generovat více tlakových bodů, čehož se dá využít pro paralelní řízení více objektů. V práci Josefa Matouše[4] byly řízeny až tři barevné kuličky nebo tři trojúhelníky. Náš navržený regulátor také vyzkoušíme na řízení více kapiček.

Na řízení tří kapiček jsem použil tři regulátory, které jsem popsal v předchozí sekci. Výstupem každého z nich je umístění a velikost tlaku tlakového bodu. Bohužel se tlakové body položené blízko sebe navzájem ovlivňují, na což jsem narazil již v sekci 5.1.3 při tvoření "akustické lžíce". Zde jsem narazil na stejný problém, paralelní řízení kapiček fungovalo jen tehdy, byly-li kapičky dostatečně vzdáleny (alespoň 3 cm), ale i tehdy byl pohyb kapiček velmi pomalý.

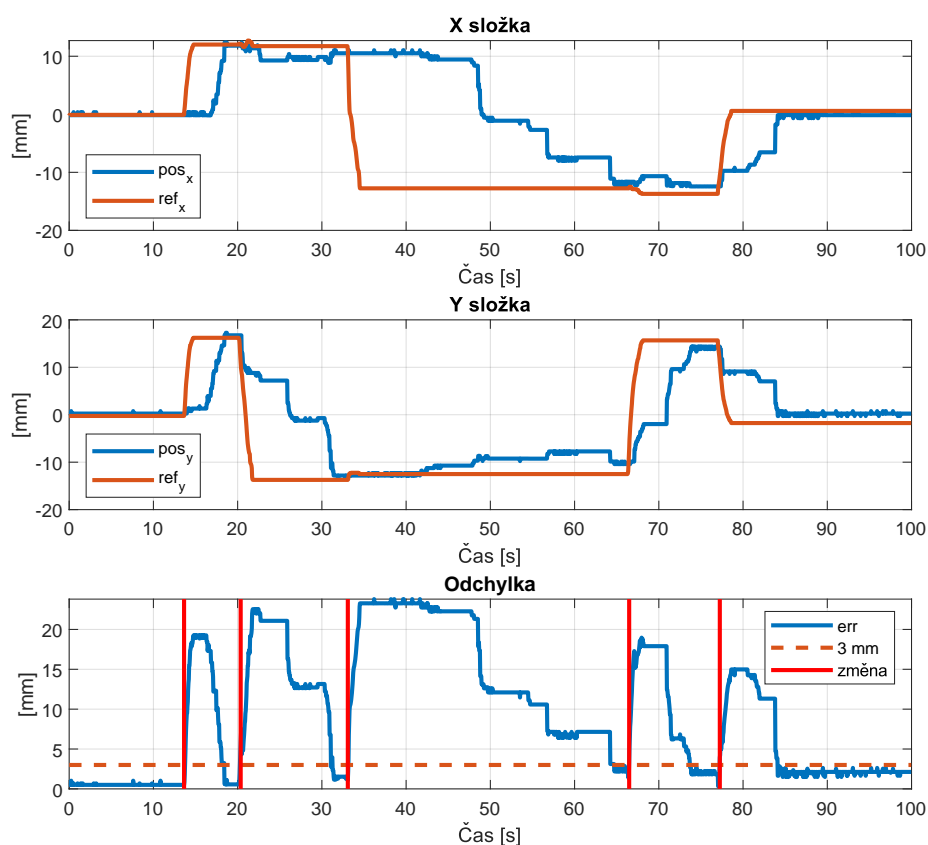
Jako řešení jsem tedy zvolil střídané řízení kapiček jednotlivě, což fungovalo velmi dobře. Pohybování jednou z kapiček ostatní vůbec neovlivňovalo, jelikož je k pohnutí kapičkou zapotřebí velmi přesného umístění tlakového bodu blízko ní. Demonstrační video je dostupné na gitlabu.

### 5.1.7 Nenevtonovská kapalina

Nenevtonovská kapalina je kapalina, která se chová jako pevné těleso při velkých rychlostech deformace. Tento jev se nazývá *tixotropie*. Velmi zajímavé mi přišlo prozkoumat chování nenevtonovské kapaliny v akustickém tlakovém

<sup>5</sup>K dispozici na <https://gitlab.fel.cvut.cz/svobop60/simulink2023>

<sup>6</sup>Videa jsou dostupná na <https://gitlab.fel.cvut.cz/svobop60/acouman/-/tree/main/bakalarka/videos>.



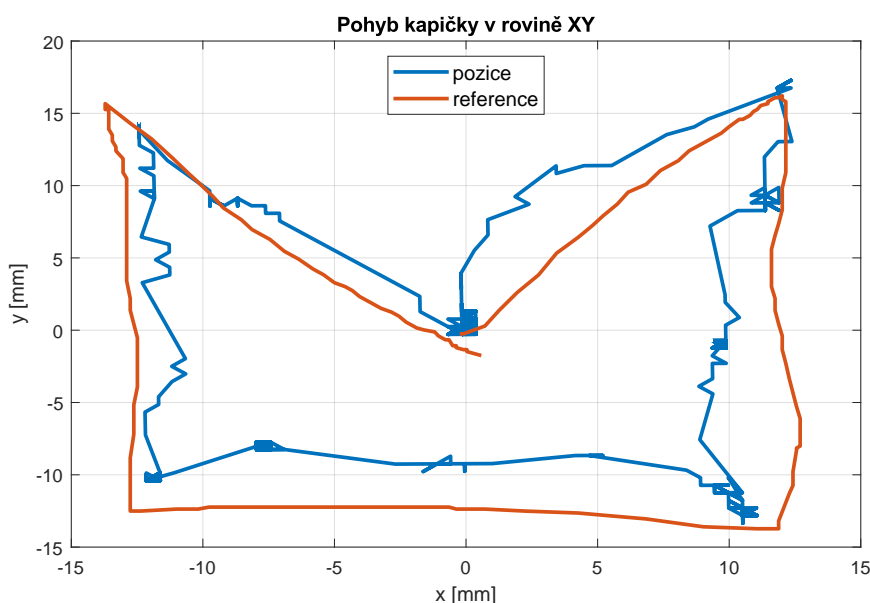
**Obrázek 5.8:** Časové průběhy složek pozice kapičky a reference, odchylka od reference

poli, zajímalo mě, jak budou její kapičky reagovat na působení tlakového bodu, jestli se nebudou při prudkém měnění tlaku kutálet po povrchu.

Newtonovskou kapalinu jsem získal smísením vody a kukuřičného škrobu. Vytvořil jsem několik směsí škrobu a vody, které se lišily poměrem těchto dvou látek, a testoval chování kapiček. Pokud byla kapalina příliš hustá (moc škrobu), netekly kapičky ani na kolmo k zemi nakloněném parafilmu. Pokud byla kapalina řidší, ale ne příliš řídká, aby si zachovala své newtonovské chování, vytvořily se na parafilmu kapičky, které při naklonění skla tekly, nicméně o poznání neochotněji než voda.

Kapičky newtonovské kapaliny reagovaly na tlakový bod podobně jako vodní kapičky, opět se v kapičce vytvořila prohlubeň, která se pohybovala podle pohybu tlakového bodu. Bohužel ale bylo tření s povrchem tak veliké, že se kapičku nepodařilo rozpohybovat.

Rychle měnící se akustické pole mělo za následek menší důlek v kapičce než neměnící se. To je chování očekávané, ale bohužel se mi nepodařilo jakkoli využít tixotropii k manipulaci s kapičkou.



Obrázek 5.9: Průběh pozice kapičky a reference v rovině XY

## 5.2 Míchání kapalin

Tlakových bodů je mimo pohybování s kapičkami možno použít i k míchání kapalin. V práci Ghost Touch[6] bylo míchání kapalin demonstrováno na inkoustu a mléku. Já jsem otestoval, jaké možnosti platforma Acouman k mísení kapalin nabízí, na mléku a tuši, jelikož je pro mě tuš dostupnější než inkoust.

Do mléka jsem kápnul kapku tuše a ta se rozprostřela na hladině, jak je vidět na obrázku 5.10. Následně jsem umístil tři tlakové body tak, že jejich vrcholy tvořily rovnostranný trojúhelník o délce strany 1 cm. Dva z nich měly hodnotu tlaku 1000 Pa a třetí 1300 Pa. Optimalizační program následně našel takové řešení, že vzniklé akustické tlakové pole vytvořilo v kapalině proudění, viz obr. 5.11.

Při zvýšení tlaku bodů na 2500 Pa a 2800 Pa bylo proudění tak intenzivní, že vytvářelo na hladině bubliny, viz obr. 5.12.

Videa z provedených experimentů jsou k dispozici na gitlabu<sup>7</sup>.

## 5.3 Diskuse výsledků manipulace s kapalinou

Pohybování kapičkami přineslo oproti pohybování pevnými objekty na vodní hladině několik výzev. Na kapičky bylo složité tlakem působit, jelikož byly kapičky řádově menší než dříve používané pevné objekty a zároveň na ně bylo třeba aplikovat větší tlak, aby se kapička nejen deformovala, ale i uvedla do pohybu. Tlakové body o vyšším tlaku navíc neměly takovou přesnost

<sup>7</sup><https://gitlab.fel.cvut.cz/svobop60/acouman/-/tree/main/bakalarka/videos>



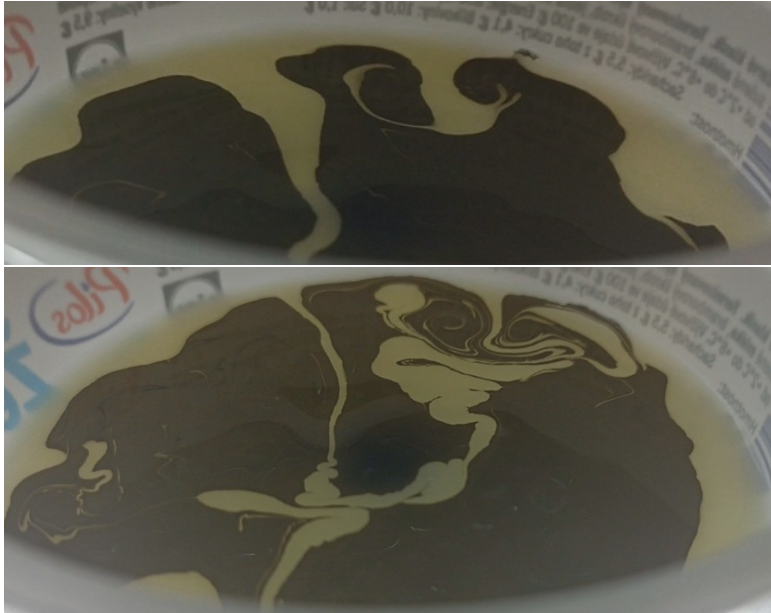
**Obrázek 5.10:** Tuš na hladině mléka

umístování.

Přese všechny komplikace se povedlo nastavit regulátor, který kapičky dokáže řídit s uspokojivou přesností, nicméně je velmi pomalý, protože zkouší pomalu posouvat tlakový bod, dokud nenarazí na pozici, ve které tlakové minimum obklopující tlakový bod kapičku rozpohybuje.

Pohybování více kapičkami najednou se nezdařilo, jelikož optimalizační program nenašel takové řešení, které by vytvořilo tři tlakové body v dostatečně přesných pozicích a s dostatečně velkými tlaky. Proto jsem implementoval sériové řízení více kapiček, kde je řízení postupně předáváno mezi kapičkami.

Experimenty s mícháním kapalin byly velmi úspěšné, je zřejmé, že míchání kapalin je v možnostech platformy. Bylo by možné dále tuto oblast rozvíjet a hledat uspořádání tlakových bodů tak, aby vzniklo proudění určitého tvaru.



**Obrázek 5.11:** Proudění tuše na hladině mléka



**Obrázek 5.12:** Bubliny tuše na hladině mléka

## Kapitola 6

### Webové rozhraní

Posledním úkolem této práce bylo vytvořit uživatelské webové rozhraní, které bude sloužit k snazšímu ovládání a přehlednějšímu zobrazení aktuálního stavu platformy. K inspiraci a jako základ jsem použil uživatelské rozhraní předchozích projektů<sup>1</sup>. Rozhraní je postavené na webovém frameworku *Flask* a napsané v jazyce *Python*. S webovým rozhraním komunikuje simulinkový model pomocí UDP packetů, které jsou posílány uvnitř *Raspberry Pi* zpětnou smyčkou přes IP adresu 127.0.0.1 na definovaný port. K webovému rozhraní se uživatel připojí pomocí webového prohlížeče připojením na IP adresu *Raspberry Pi* na port 5000.

V mém webovém rozhraní<sup>2</sup> jsou k dispozici tři módy: *Focal point*, *Drop* a *3 Drops*. V prvním módu je možné posouvat tlakový bod pomocí myši, a tak testovat, jak na něj budou různé materiály reagovat. V druhém a třetím módu je možné řídit jednu nebo tři kapičky do referenční pozice, kterou lze myší posouvat. Třetí mód *3 Drops* navíc nabízí demo-program rotace tří kapiček dokola v trojúhelníkové formaci.

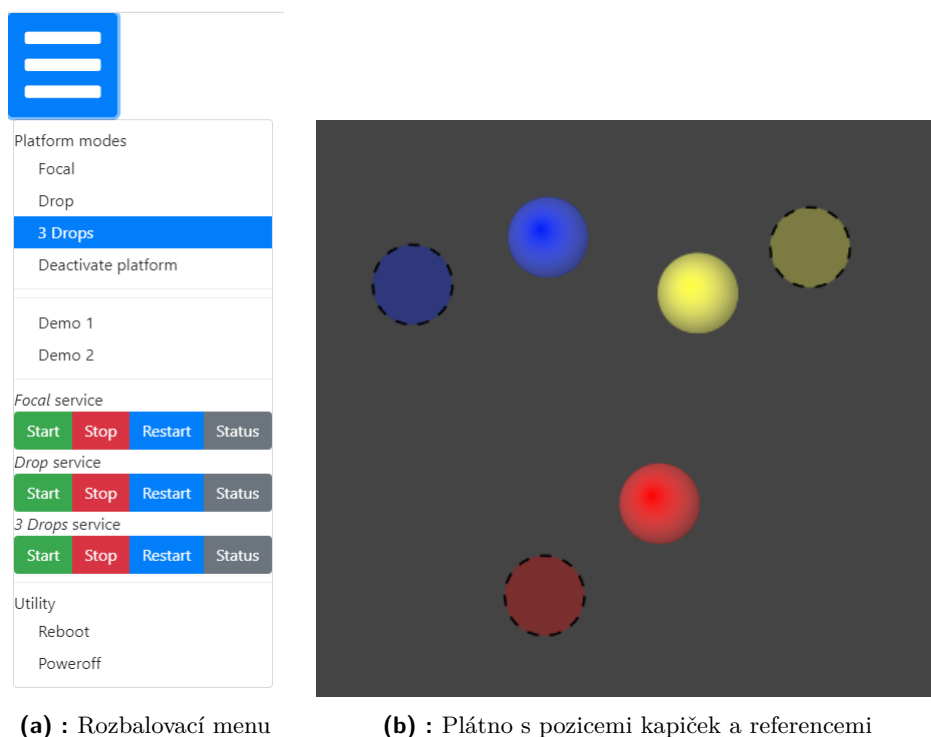
V hlavní části rozhraní se nachází plátno, kam je vykreslována aktuální pozice kapiček (syté kruhy) a myši lze posouvat reference (poloprůhledné kruhy), do kterých jsou následně kapičky řízeny. V levém horním rohu se nachází rozbalovací ovládací menu. Ukázka plátna i rozbalovacího menu jsou vidět na obrázcích 6.1b a 6.1a.

#### 6.1 Demo programy

Webové rozhraní nabízí dva demo programy pro snadnou demonstraci řízení. Teoreticky by bylo možné vymyslet nespočet různých trajektorií, které by měly kapičky sledovat, já pro jednoduchost zvolil pohyb po kružnici, přičemž kapičky udržují formaci rovnostranného trojúhelníku. První demo obsahuje současnou rotaci všech tří kapiček najednou, a jelikož byla současná rotace velmi pomalá a nespolehlivá, nastavil jsem i druhé demo, kde jsou kapičky do svých referenčních pozic řízeny sériově, jedna po druhé. Jakmile kapička dosáhne své referenční pozice, je řízení předáno další kapičce, a jakmile jich

<sup>1</sup>Dostupné na <https://gitlab.fel.cvut.cz/aa4cc/acouman/webinterface>.

<sup>2</sup>Mé webové rozhraní je k dispozici na <https://gitlab.fel.cvut.cz/svobop60/webinterface2023>.



(a) : Rozbalovací menu

(b) : Plátno s pozicemi kapiček a referencemi

**Obrázek 6.1:** Ukázka z webového uživatelského rozhraní

dosáhnou všechny tři, jsou referenční body posunuty po kružnici o daný úhel a celý postup se opakuje.

Po spuštění demo najde program nejprve rovnostranný trojúhelník se středem ve středu platformy tak, aby minimalizoval součet čtverců vzdáleností kapiček od jeho vrcholů. Následně jsou referenční body umístěny do jeho vrcholů a je spuštěna řídicí smyčka.



## Kapitola 7

### Závěr

V této práci jsem se zabýval průzkumem dalších možností dříve vytvořené platformy Acouman, konkrétně zda je platforma schopna manipulace se sypkými materiály a kapalinou. Nejprve jsem musel platformu znovu sestavit a zprovoznit všechny její části, jelikož byla několik let v rozebraném stavu.

Po zprovoznění platformy jsem mohl začít s průzkumem nových využití. Začal jsem manipulací se sypkými materiály a pro jednoduchost jsem se snažil o kreslení do vrstvy materiálu. Zkoušel jsem pohybovat s různými druhy mouky, se solí a s pilinami, přičemž nejlepších výsledků jsem dosáhl u jemných pilin. Zde jsem narazil na to, že je tlakový bod, který je dost silný na pohnutí moukou nebo pilinami, obklopen oblastí lokálního tlakového minima, která nepříjemně interaguje s materiálem a vytváří v okolí bodu hromádky. Lokální tlakové minimum se nachází i přímo nad tlakovým maximem, což má za následek vznášení materiálu do vzduchu. Tlakové body, které jsou v platformě akutálně dostupné, jsou pro kreslení do sypkého materiálu jen těžko použitelné.

Další oblastí, kterou jsem se zabýval, je manipulace s kapalinami, konkrétně pohybování kapičkami vody a míchání kapalin. Vyzkoušel jsem několik různých povrchů, z nichž jako nejvhodnější pro manipulaci s kapičkami vyšel *parafilm*. Ten je dostatečně hydrofobní a hladký, takže po něm kapičky vody mohou klouzat. Dále jsem vytvořil nový detektor, který zvládne detekovat průhledné kapičky vody. Prozkoumal jsem, jak vodní kapičky interagují s tlakovým bodem, a na základě experimentů jsem navrhl regulátor, který dokáže kapičku řídit do referenční pozice. Jeho funkčnost jsem ověřil a shledal jsem jej úspěšným. Pokoušel jsem se také o manipulaci třemi kapičkami, kde se bohužel nepodařilo pohybovat všemi třemi kapičkami zároveň. Proto jsem implementoval sériové řízení, které tlakový bod předává mezi kapičkami a pohybuje jimi postupně. Kromě pohybování kapičkami jsem také ověřil, že je možné míchat dvě kapaliny a dokonce i vytvářet bubliny na hladině. Pro snadné ovládání platformy jsem připravil webové uživatelské rozhraní.

Zkoumaná platforma nemá jiné využití než sloužit k dalšímu zkoumání a demonstraci akustické manipulace, pro kterou se postupem času i v průmyslu nachází stále více uplatnění. Na platformě Acouman je prostor k novým pracem, zajímavé by bylo například navrhnout optimalizační algoritmus pro vytváření bodů tlakového minima nebo i pro jiné tvary akustického pole.





## Bibliografie

- [1] Josef Matouš. „Manipulation with objects on a surface of a liquid using an array of ultrasonic transducers“. Bak. pr. ČVUT, 2018.
- [2] Adam Kollářčík. „Planární akustická manipulace s kulovými objekty na pevném povrchu“. Bak. pr. ČVUT, 2018.
- [3] Josef Matouš et al. „Optimization-based Feedback Manipulation Through an Array of Ultrasonic Transducers“. In: *IFAC-PapersOnLine* 52.15 (2019). 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems MECHATRONICS 2019, s. 483–488. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.722>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319317148>.
- [4] Josef Matouš. „AcouMan — Acoustophoretic Manipulation Platform“. Dipl. pr. ČVUT, 2020.
- [5] Petr Brož. „Multichannel Signal Generator of Phase-Shifted Square Waves“. Bak. pr. ČVUT, 2020.
- [6] Asier Marzo et al. „Ghost Touch: Turning Surfaces into Interactive Tangible Canvases with Focused Ultrasound“. In: 2015. ISBN: 978-1-4503-3899-8/15/11. DOI: 10.1145/2817721.2817727.
- [7] N.; Adamowski Andrade M.A.B.; Pérez. „Review of Progress in Acoustic Levitation“. In: *Brazilian Journal of Physics* 48 (2017).
- [8] Asier Marzo et al. „Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects“. In: *Nature Communications* 6.8661 (říj. 2015).
- [9] Charles R. P. Courtney; Bruce W. Drinkwater; Christine E. M. Demore; Sandy Cochran; Alon Grinenko; Paul D. Wilcox. „Dexterous manipulation of microparticles using Bessel-function acoustic pressure fields“. In: *Applied Physics Letters* 102.12 (2013).
- [10] Richard C. Oeftering. „Manipulating Liquids With Acoustic Radiation Pressure Phased Arrays“. In: *Research and Technology* (dub. 1999). URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050181958>.
- [11] The Editors of Encyclopaedia Britannica. „Surface tension“. In: *Encyclopaedia Britannica* (2023).