

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Bakalářská práce

ELEKTROMAGNETICKÝ SYSTÉM PRO PARALELNÍ
POLOHOVÁNÍ MAGNETICKÝCH TĚLES

Jakub TUREČEK

červen 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub TUREČEK**
Osobní číslo: **E17B0054P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Elektromagnetický systém pro paralelní polohování magnetických těles**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte a popište problematiku prostorového polohování magnetických těles pomocí magnetického pole, se zaměřením především na polohování v rovině.
2. Formulujte matematický model magnetického pole popisující systém koplanárních cívek pro paralelní polohování.
3. Provedte pomocí matematického modelu analýzu a návrh prototypu.
4. Zkonstruujte navržený prototyp a experimentálně ověřte základní funkčnost.
5. Formulujte pravidla pro řídicí algoritmy paralelního polohování na daném prototypu.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. HUSÁK, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, 2008.
2. MAYER Daniel. Aplikovaný elektromagnetismus. 2012.
3. PELRINE, Ronald E.; WONG-FOY, Annjoe. Levitated-micro manipulator system. U.S. Patent Application No 10/044,253, 2018.
4. PELRINE, Ron, et al. Diamagnetically levitated robots: An approach to massively parallel robotic systems with unusual motion properties. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012. p. 739-744.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kuthan**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Předložená bakalářská práce se zabývá elektromagnetickým systémem pro paralelní polohování magnetických těles. Systém se skládá z miniaturních robotů tvořených permanentními magnety a aktuátorem sestávajícím ze soustavy planárních cívek.

Práce se skládá z návržení matematického modelu, simulací, návrhu experimentálního prototypu a samotného experimentálního zařízení.

Nejprve je určen matematický model vycházející z rovnice pro rozložení magnetického pole. Následoval test na konvergenci modelu na energii magnetického pole. Na základě sestaveného matematického modelu byly provedeny simulace v programu Agros2D, v němž byly analyzovány silové účinky koplanárního vinutí na minirobota. Cílem této části bylo zjištění velikosti proudů v jednotlivých vrstvách experimentálního zařízení, aby silové účinky od každé vrstvy byly stejné. Získané hodnoty byly graficky zpracovány pomocí programu MATLAB.

V kapitole experimentální zařízení byly využity předcházející výsledky stejně jako zkušenosti s planárním polohováním na FEL ZČU pro návrh nového prototypu *Gryllus* 2. Dále je popsáno rozložení vinutí v jednotlivých vrstvách desky plošných spojů a jejich funkce. Celé zařízení je dále modelováno v programu SolidWorks. Návrh samostatné desky plošných spojů byl proveden v programu KiCad.

V podkapitole výroba DPS je popsáno skutečné zapojení všech vinutí a změny oproti návrhu zařízení. Dále je stručně vysvětlen kód pro řízení mikrokontroléru. Práce je zakončena výsledky experimentů. Během dvou experimentů bylo cílem zjistit základní funkčnost zařízení. Při prvním byly testovány možnosti pohybu robotů v osách x a y , taktéž bylo vyzkoušeno znemožnění pohybu jednoho robota, zatímco druhý v pohybu mohl setrvat. Druhý experiment byl zaměřen na vzájemné ovlivňování robotů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Agros2D, aktuátor, KiCad, matematický model, MATLAB, miniaturní robot, permanentní magnet, polohování magnetických těles, programování, simulace

ANOTATION AND KEYWORDS

The submitted bachelor thesis deals with electromagnetic system for parallel positioning of magnetic bodies. The system consists of miniature robots created by permanent magnets, and an actuator created by the system of planar coils.

The thesis consists of the design of mathematical model, simulations, the design of an experimental prototype and the experimental prototype itself.

First, a mathematical model based on the equation for magnetic field distribution is determined. This was followed by a test for the convergence of the model to magnetic field energy. Based on compiled mathematical model, simulations were performed in the Agros2D program, in which the force effects of the coplanar winding on the mini-robot were analyzed. The aim of this part was to determine the magnitude of the currents in the individual layers of the experimental device so that the force effects from each layer were the same. The obtained values were graphically processed using the MATLAB program.

In the chapter experimental device, the previous results were used as well as the experience with planar positioning at FEE UWB for the design of a new prototype *Gryllus 2*. The distribution of windings in individual layers of the printed circuit board and their functions are also described. The entire device is further modeled in SolidWorks. The design of a separate printed circuit board was performed in the KiCad program.

The actual connection of all windings and changes compared to the device design are described in the subchapter PCB production. Next, the code for controlling the microcontroller is briefly explained. The thesis ends with the results of experiments. During two experiments, the aim was to determine the basic functionality of the device. In the first, the possibilities of moving the robots in the axes x and y were tested, and the impossibility of moving one robot while the other could remain in motion was also tested. The second experiment was focused on the interaction of robots.

KEYWORDS

Agros2D, actuator, KiCad, mathematical model, MATLAB, miniature robot, permanent magnet, positioning of magnetic bodies, programming, simulation

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Kuthanovi za skvělé vedení, časté podněty a pomoc při jejich vypracování. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Martinovi Vítкови za vstřícnost, ochotu a pomoc při získávání potřebných informací a podkladů.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení bakalářskou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů, a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, dne 19.6.2020

Jakub Tureček

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	T	magnetická indukce
A	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$	vektorový magnetický potenciál
J	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	proudová hustota
μ	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	permeabilita
γ	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	elektrická vodivost
W_m	J	energie magnetického pole
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost
F	N	síla
P	W	elektrický výkon
U	V	elektrické napětí
I	A	elektrický proud
R	Ω	elektrický odpor
L	H	indukčnost
m	g	hmotnost
l	m	délka
t	s	čas
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	–	složení permanentního magnetu (neodym, železo, bor)

OBSAH

i ÚVOD DO PROBLEMATIKY	2
I.1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	3
I.2 VYMEZENÍ ŘEŠENÍ A MOTIVACE PRÁCE	4
I.3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	5
I.3.1 Planární polohování	5
I.3.2 Experimentální zařízení na FEL ZČU	11
I.3.3 Prostorové polohování	12
I.3.4 Možné řídicí algoritmy	14
ii NÁVRH MIKROAKTUÁTORU	16
II.1 PRINCIP POHYBU	17
II.2 SIMULACE	19
II.2.1 Matematický model	19
II.2.2 Výsledky simulace	21
II.3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	24
II.3.1 Návrh DPS	24
II.3.2 Výroba DPS	25
II.3.3 Programování mikrokontroléru	28
II.3.4 Experimenty	30
iii ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	34
III.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE	35
III.1.1 Zhodnocení dosažených výsledků	35
III.1.2 Směry pokračování práce	36

Část I

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

i.1

DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

POJEM mikroaktuátor má svůj původ v mikroinženýrství. Tento vědní obor vznikl za účelem výroby senzorů tlaku a teploty v řádech mikrometrů. Mikroaktuátor označuje mikroakční člen, jenž vykonává funkci opačnou k mikrosenzoru. Vstupní energii (nejčastěji elektrickou) převádí na energii mechanickou. Získaných poznatků z výroby mikrosenzorů tlaku a teploty se využívá při konstrukci dalších mikrosystémových součástí a zařízení, jako jsou mikrozcadla, mikropumpy, gyroskopy a převodníky elektrických veličin na jiné než elektrické. Při návrhu mikroaktuátoru je nutné uvažovat vnější vlivy, jež budou na zařízení během provozu působit [1].

Magnet je objekt, který ve svém okolí vytváří magnetické pole. Permanentní magnet nepotřebuje k vytváření magnetického pole vnější vlivy. Tyto magnety jsou složeny z látek magneticky tvrdých. Aktuálně nejvýkonnějšími magnety jsou magnety neodymové ($Nd_2Fe_{14}B$). Vyrábějí se práškovou metalurgií, lisováním a spékáním v magnetickém poli. Jsou náchylné na korozi, a proto se jejich povrch pokovuje (niklováním či zinkováním) [2].

Robot je stroj vykonávající dané úkoly s určitou mírou samostatnosti předepsaným způsobem. Robot je schopen vnímat své okolí pomocí senzorů a reagovat na vnější podněty [3]. Součástí této práce je využití mikrorobota - magnetu pro manipulaci ve dvou stupních volnosti.

Kolektivní robotika je založena na pozorování chování sociálního hmyzu - např. včel, vos, mravenců a termitů. Slouží ke spolupráci více robotů jako forma decentralizované kontroly, jež může být užitečná při řízení více robotů za účelem vykonání společného úkolu. Takový systém však bude vyžadovat řídicí systém, který bude jednoduchý a škálovatelný s rostoucím počtem robotů [4].

Mikrofaktory je zmenšený výrobní systém, jehož velikost je s ohledem na rozměry produktů velmi malá. Umožňuje výrazné úspory energie, zastavěného prostoru a zdrojů. Zmenšení rozměrů takových továren je podmíněno vysokou automatizací všech souvisejících procesů [5].

i.2

VYMEZENÍ ŘEŠENÍ A MOTIVACE PRÁCE

TÉMATEM práce je návrh polohovacího systému pro miniaturního robota. Polohovací systém je dán soustavou planárních cívek na vícevrstvé desce plošných spojů. Miniaturní robot tvoří permanentní magnet nebo jejich spojení. Polohování, jež je zajištěno elektromagnetickým polem generovaným cívkami, je možné ve dvou stupních volnosti.

Hlavní motivací je práce na projektu, ve kterém je zapojeno několik studentů bakalářského i doktorského studia. Celý projekt minirobotů je složen z návrhů nových experimentálních zařízení, vývoje řídicího kódu pro jednotlivá zařízení a vývoje kódu nadřazeného - *MagNet*. Chtěl bych tímto zmínit práci studenta Jiřího Šedivce, jež se zabývá návrhem tohoto nadřazeného řídicího systému [6].

Polohování magnetických těles pomocí elektromagnetického pole může značně pomoci díky miniaturizaci zejména v armádních a vesmírných technologiích, lékařství, farmacii i průmyslu. Objekty ovládané elektromagnetickým polem mohou dosahovat přesného a zároveň rychlého pohybu. Díky těmto bodům by mohl takový systém předčít lidskou zručnost a zvýšit produktivitu výroby.

i.3

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

ZA POČÁTEK mikroelektroniky lze považovat objev polovodičové elektroniky (prvků) v polovině 50. let minulého století. Vznik tranzistorů, integrovaných obvodů, pamětí, mikroprocesorů a mikrosystémů - to vše se událo do dnešní doby. Polovodičové struktury se dnes blíží k hranici kvantového světa, mluvíme o nanoelektronice. V tomto světě přestávají platit klasické fyzikální zákony. Při porovnání vývojem mikroelektroniky s automobilovým průmyslem z hlediska rozměrů, ceny a výkonu bychom zjistili, že změny v automobilovém průmyslu jsou zanedbatelné. Pokud by vývoj automobilů byl shodný s vývojem mikroelektroniky, automobily by dnes stály 3,60 Kč/kus a dosahovaly by rychlosti 16 000 km/h se spotřebou 0,2 l/100 km.

Ve své práci se dále budu zabývat mikroaktuátory založenými na fyzikálních jevech magnetické domény (někdy nepřesně nazývaných jako magnetické). Patří k nejstarším typům aktuátorů. V makroskopickém světě jsou jimi například relé, elektromotory či magnetické ventily. Dané mikroaktuátory mohou generovat přitažlivé i obráceně působící síly (na rozdíl od aktuátorů elektrostatických). Problémem implementace magnetických aktuátorů v rozměrech mikrometrů je realizace vinutí a vhodného magnetického materiálu na čip. V planárním provedení je obtížné vytvořit vinutí s velkou indukčností.

Paralelní operace velkého množství miniaturních robotů tvořících makrostruktury jsou dlouhodobým snem inženýrských i vědeckých týmů. Inspiraci lze nalézt u druhů sociálního hmyzu, např. včel či mravenců [1].

1.3.1 PLANÁRNÍ POLOHOVÁNÍ

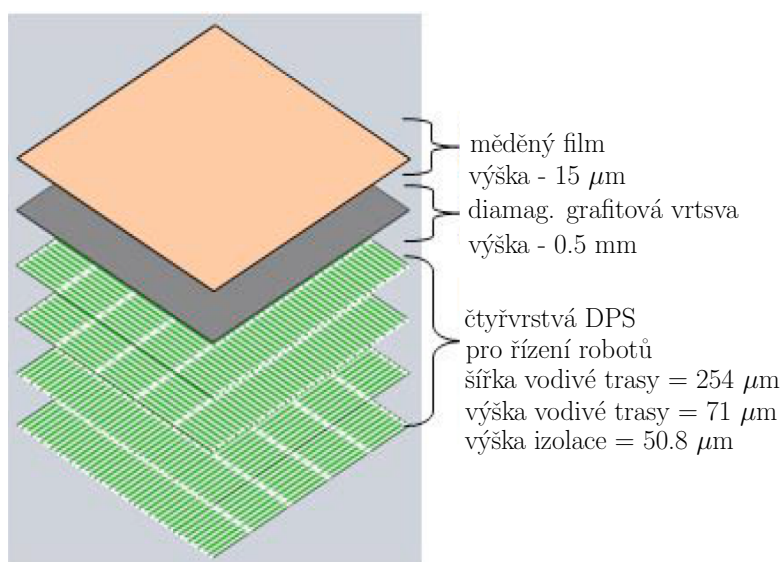
Planární systém polohování je jedním z nejvíce prozkoumaných systémů pro polohování magnetických těles. Tento systém je založen na soustavě rovinných cívek, jež tvoří proměnlivé magnetické pole. Vhodným prostorovým natočením cívek je dosaženo druhého stupně volnosti. Roboty mohou být tvořeny z magnetů různých tvarů a velikostí [7].

Dále se budu zabývat řízením robotů v rovině pomocí koplanárních cívek budících magnetické pole. Důležitým tématem je individuální aktuace vícero robotů, neboť na všechny působí stejné magnetické pole.

i.3.1 PLANÁRNÍ POLOHOVÁNÍ

Problematikou polohování mikrorobotů se kromě týmu ze ZČU v Plzni zabývá tým vědců z SRI International, neziskového výzkumného centra ve Spojených státech amerických nebo francouzský tým z FEMTO-st Institute.

Snížení tření robota při pohybu na pracovní desce by mohlo vyřešit použití systému, jenž by umožnil levitaci robotů. Způsobem, jímž by bylo možno snižovat třecí sílu mezi robotem a pracovní deskou, je systém nazvaný DiaMagnetic Micro Manipulator (DM₃), zobrazen je na Obr. 1. Na aktuální vrstvy je uložena diamagnetická uhlíková vrstva a měděný film. Tento systém dovoluje relativně velké rychlosti a nulové opotřebení robotů, také zajišťuje velkou přesnost polohování díky absenci tření a hystereze, stejně jako díky nízké přilnavosti k povrchu. Samotná levitace může být úplná nebo jen částečná - částečného vznášení bude dosaženo tehdy, pokud odpudivá síla mezi robotem a pracovní deskou nebude větší než tíhová síla robota [8]. Přířímými důsledky levitace je zvýšená spolehlivost bez opotřebení a možnost výroby robotů malých rozměrů (<1 mm). Ukázka je na Obr. 2 [9].



Obr. 1: Rozměry DM₃ systémů [8]

Diamagneticky levitované roboty je možné využít pro výrobu mikrosetav z křemíkových mikrodílů a polymerních mikrosfér. Dané roboty ve spojení s magnetickými poli z desek plošných spojů mohou umožnit nízké náklady a vysokou hustotu paralelního mikrosetavování. Při výzkumu strategií pro mikrosetavování byly uvažovány především následující postupy: tiskové, nebo postupy podobné razítkům; technologie založené na sebesestavení vedoucí k minimalizaci energie; přímá 3D manipulace s díly pomocí různých manipulátorů. Každá z těchto metod má kompromisy mezi propustností a pružností výroby. Ačkoli přímá 3D manipulace má největší rozsah flexibility, tyto manipulátory jsou relativně velké a mají omezený dosah. Mikroroboty jsou však atraktivní variantou,

1.3.1 PLANÁRNÍ POLOHOVÁNÍ



Obr. 2: Robot pro systém DM3 [9]

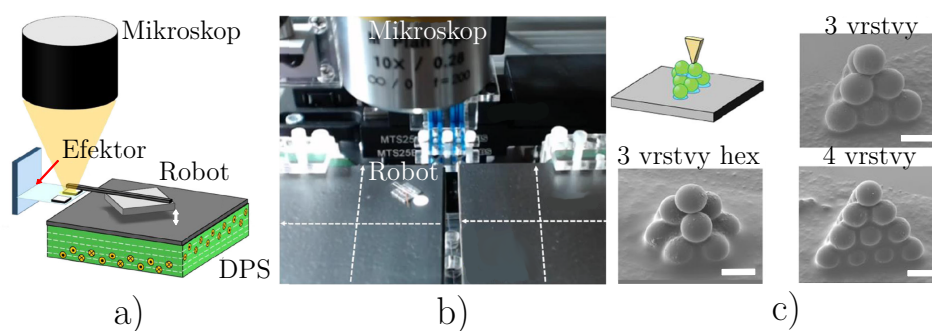
neboť mají malé rozměry a potenciál pro paralelní práci. Bohužel i nejmodernější systémy jsou omezeny silou, jíž jsou možny působit. Navíc tento systém je citlivý na rušení z okolí, jež může vyvolat kmitání robota při přesunu na jinou pozici. Na potlačení tohoto jevu byla využita tlumící měděná deska, jež pomocí vzniku vířivých proudů při pohybu robota zmenšovala jeho překmity. Dále byl demonstrován proces mikromontáže, při níž pomocí pasivního efektoru došlo k nanášení lepidla. Kapilární síly však mohou přesunout lepenou část. Proto musí konstrukce efektorů s tímto jevem počítat. Při rozměrech v řádech desítek mikrometrů je také náročné regulovat pohyb robota a přesně snímat jeho polohu pomocí mikroskopu v reálném čase - viz Obr. 3.

Diamagneticky levitované roboty mohou být výhodné při pokroku v oblast snímání a kontroly oproti jiným technologiím díky:

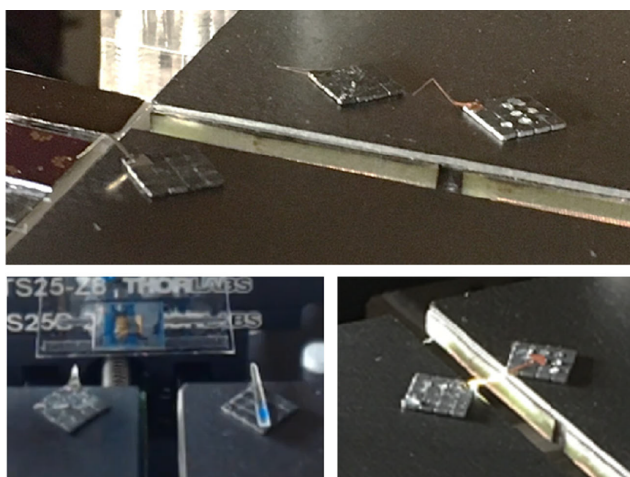
- značnému dosahu (v rozměrech od centimetrů do metrů) s vysokou přesností opakovatelnosti pohybu,
- husté miniaturizaci procesů na jednoho robota (31 mm^2),
- podpoře mnoha robotů pracujících paralelně pomocí prostorově řízených polí - viz Obr. 4,
- levné a snadno přizpůsobitelné možnosti výroby [10].

Planární systém *MagPieR* patří mezi nejrychlejší polohovací systémy. Roku 2011 zvítězil ve sprintu na 2 mm pořádaném IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICEM 2011). Daný model využívá kombinace elektromagnetického pole a piezoelektrického jevu. Robot se pohybuje pomocí 4 prostorově posunutých cívek. Tyto cívky generují elektromagnetické pole, jež zajišťuje přesný pohyb v rovině. Používaný robot se tak může pohybovat se sníženým třením. Tohoto jevu je dosaženo na základě piezoelektrického principu. Ten je způsoben elektrodou, na níž je připojeno napětí 300 V o frekvenci 100 Hz. Samotný robot (viz Obr. 5) je vyroben z feromagnetického materiálu a piezoelektrického materiálu. Vznikem piezoelektrického jevu robot ztrácí adhezi a pohybuje se po podložce s téměř nulovým třením. Aréna pro robota je naznačena na Obr. 6 [11].

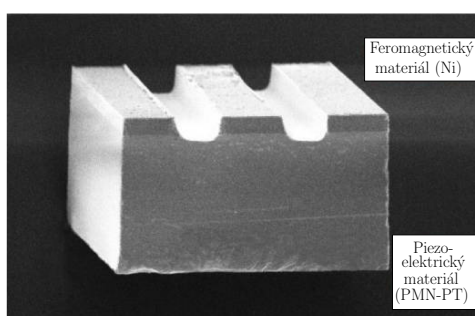
i.3.1 PLANÁRNÍ POLOHOVÁNÍ



Obr. 3: 3D výroba: a) schematické zobrazení (bílá šipka zobrazuje vzduchovou mezeru), b) fotografie systému, c) ukázka 3D výroby (bílý obdélník odpovídá délce 10 μm) [10]

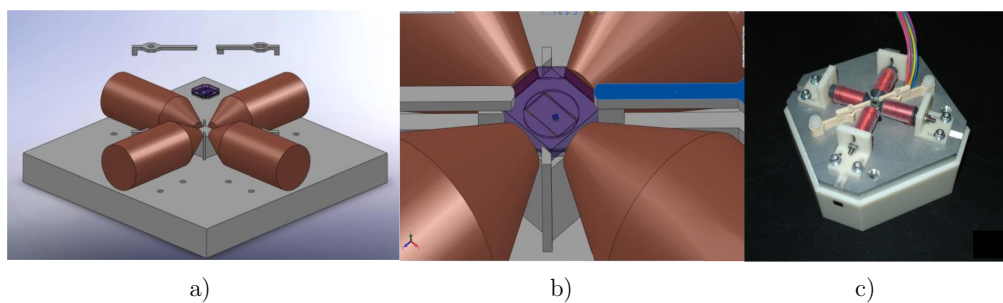


Obr. 4: Spolupráce více robotů [10]



Obr. 5: Robot *MagPieR* [11]

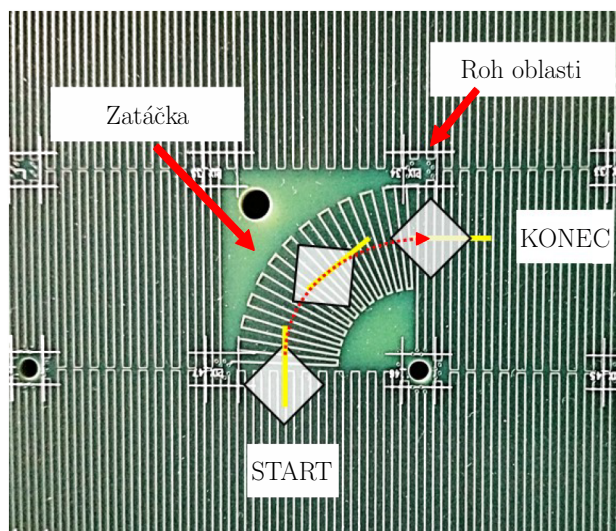
1.3.1 PLANÁRNÍ POLOHOVÁNÍ



Obr. 6: Systém *MagPieR*: a) model arény, b) detail modelu arény, c) skutečné provedení arény [11]

Ačkoliv translační pohyb robotů je dobře zvládnut, rotování roboty podle vlastní osy je náročné. Níže jsou nastíněny některé možnosti řešení daného problému.

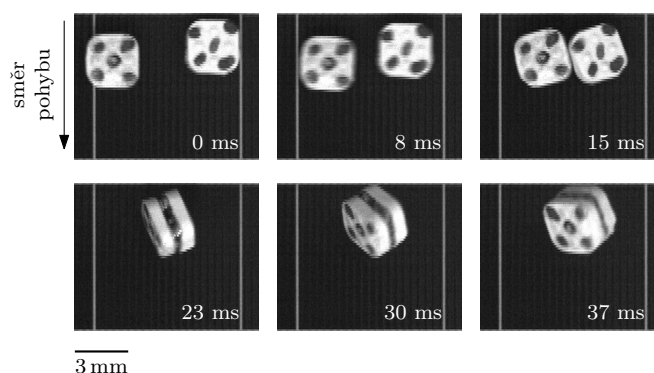
- Vytvořením závitů (viz Obr. 7) ve tvaru zatáčky je dosaženo otočení robota (nejčastěji o 90° , resp. násobky 90°). Nevýhodou je požadavek na větší plochu, neboť s rotačním pohybem se ještě uplatňuje pohyb translační.
- Umístěním robota na hranici "zón". Pokud na jednu polovinu robota působí síla v kladném směru osy x a na druhou polovinu robota síla ve směru opačném, dojde k jeho rotaci. Touto metodou se však podařilo natočit robota jen o $\pm 10^\circ$.
- Postavením mechanické zářky do trajektorie robota můžeme taktéž změnit jeho natočení [12].



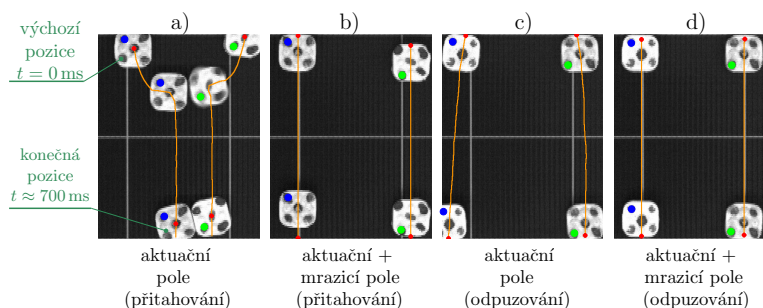
Obr. 7: Zatáčka tvořená planárními závitými [12]

1.3.1 PLANÁRNÍ POLOHOVÁNÍ

Při problematice polohování je nutno uvážit přesnost, s níž můžeme s roboty pohybovat. Důležitými parametry jsou provedení těla robota, resp. počet permanentních magnetů jej tvořících. Tato měřítka určujeme s ohledem na provedení koplanárních cívek. Značným problémem je pohyb robotů blízko sebe. Při přiblížení robotů na kritickou mez dojde vlivem magnetických polí vyvolaných permanentními magnety k jejich přitažení - viz Obr.8. Opětovné rozdělení je již na samotné pracovní ploše nemožné. Zvýšené přesnosti polohování dosahujeme též superpozicí aktuálních polí v osách x a y , kde je využito vinutí, které nehýbe robotem, k jeho udržení v přesném (přímém) pohybu - tato technika se označuje *rail* - viz Obr. 9. Pole tvořící *rail* ale brání robotu v pohybu, dochází tedy ke snížení zatížitelnosti robota při dané rychlosti [13].



Obr. 8: Srážka dvou robotů [13]

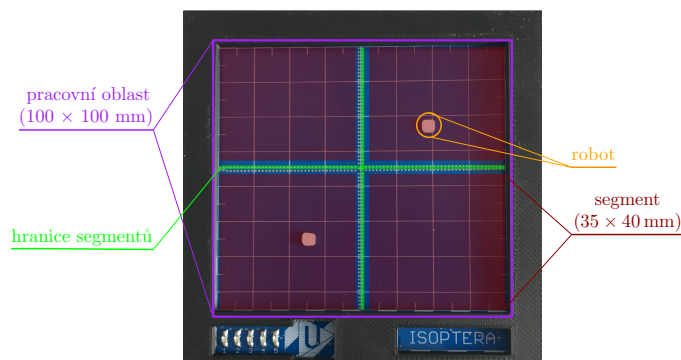


Obr. 9: Vzájemné ovlivňování robotů [13]

Při paralelním polohování je nutné řešit otázku pohybu jednotlivých robotů. První možností je uzpůsobit pracovní desku tak, aby se na některých místech nacházely mechanické zarážky. O tyto zarážky by se mohly jen některé roboty zastavit a bylo by možné změnit vzájemné vzdálenosti robotů. Výhodou je v tomto případě jednoduchost desky.

Dalším způsobem je rozdělit pracovní plochu na více segmentů - viz Obr. 10. Každý segment je možno ovládat samostatně vlastními cívkami. Pokud by se v něm nacházelo větší množství robotů, budou se všechny pohybovat opět stejným směrem. Je tedy zapotřebí

větší počet spínacích prvků, další nevýhodou je nutnost řešení rozložení na hraničních oblastech (mezi jednotlivými segmenty) [14].



Obr. 10: Prototyp *Isoptera* s pracovní deskou rozdělenou na segmenty [14] [15]

Třetí variantou je přidání tzv. mrazicích polí. V určitých částech desky by se s aktuálním polem vektorově sečetlo pole mrazicích cívek tak, aby aktuální síla na povrchu pracovní plochy byla nulová. Nevýhodou této možnosti je větší spotřeba energie vynaložená na aktuaci mrazicích vrstev. Výhodami jsou ale nízký počet spínacích prvků a možnost reverzního pohybu [15].

I.3.2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ NA FEL ZČU

Rád bych nyní krátce shrnul experimentální zařízení vyvinutá na FEL ZČU. Prvním z nich byl *MagSnail*, jenž dosahoval nízkých rychlostí a sloužil pro ověření základní funkčnosti. Deska obsahuje dvě prostorově posunutě cívky, jež umožňovaly pouze jeden stupeň volnosti. Nedostatky jako překmitávání robota, nestabilita robota při menších hodnotách proudu či pootáčení robota byly odhaleny a vedly k vylepšené druhé verzi [7].

MagStriver již byl koncipován jako systém se dvěma stupni volnosti. Tato platforma se vyznačovala menším počtem spínačů i menší pracovní plochou. Došlo také ke zvýšení nosnosti samotného robota a značnému snížení energetické náročnosti [7] [16].

Hlavním cílem modelu *Scarabeus* bylo zmenšit rozměry při zanechání či vylepšení výkonu. Daný model zvýšil možné procentní zatížení robota (bylo dosaženo i zmenšení rozměrů robota), došlo ovšem k navýšení odporu cívek tvořících polohovací systém [14].

Platforma *Isoptera* měla za cíl snížit odpor jednotlivých cívek a umožnit nezávislé ovládání robotů rozdělením pracovní plochy na 4 segmenty. Vhodným algoritmem spínání cívek bylo dosaženo přechodu robota z jednoho segmentu do vedlejšího [14] [15].

Experimentální zařízení *Gryllus* již obsahuje mrazicí části v několika pružích ve směrech osy x a y . Cílem *Gryllusu* bylo snížit počet spínacích prvků oproti *Isoptere* a zároveň zachovat možnost paralelního polohování. Oba prototypy se skládají z pracovní oblasti a desek s mikrokontrolérem a spínacími prvky. Pracovní oblast je vícevrstvou deskou ploš-

1.3.3 PROSTOROVÉ POLOHOVÁNÍ

ných spojů (DPS) o rozměrech 100×100 mm. Každá vrstva DPS obsahuje koplanární cívky. Topologií DPS jsou tedy nadefinovány oblasti, ve kterých je možné pohybu robota zabránit. Pro experimenty byla použita vysokorychlostní kamera, jež sloužila jako zpětná vazba pro ovládací elektroniku. Samotný robot se skládá z nemagnetického těla s otvory na válcové neodymové permanentní magnety. Tělo robota je vyrobeno CNC strojem z vysokopevnostního polymeru s konečnými rozměry $3,5 \times 3,5$ mm [15].

Cílem mé práce bude návrh nové desky s označením *Gryllus 2*. Tato platforma bude disponovat lokálními mrazicími oblastmi díky využití slepých proků, dojde však nejspíše k nárůstu počtu spínacích prvků. Všechna vyvíjená zařízení mají shodné vnější rozměry, teoreticky je možné mezi nimi při experimentech v laboratoři přejíždět.

1.3.3 PROSTOROVÉ POLOHOVÁNÍ

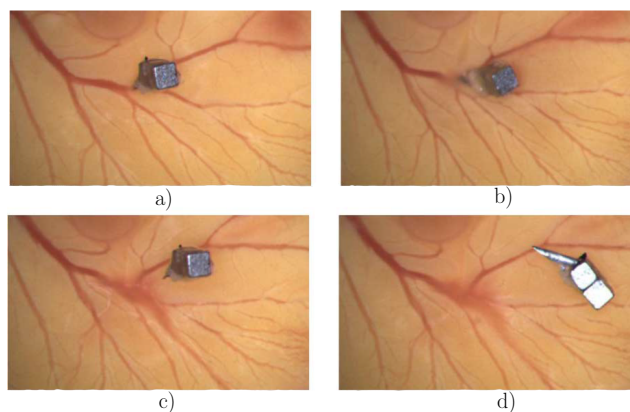
Systém *OctoMag* je systémem pro polohování v prostoru. Slouží pro řízení robota určeného pro oční chirurgii (viz Obr. 11). Umožňuje generovat magnetické pole ve třech směrech. Při návrhu *OctoMagu* byly uvažovány následující cíle/požadavky:

- Byly vybrány nepohyblivé elektromagnety z důvodu bezpečnosti: nevyžadují pohyblivé části k řízení intenzity magnetického pole a při selhání napájení dojde ke klesání robota vlivem své hmotnosti. Jádra cívek jsou tvořena magneticky měkkým materiálem, neboť oproti cívce s jádrem vzduchovým vytvoří zkrát silnější magnetické pole. Nevýhodou je však nelinearita pole, což komplikuje modelování a ovládání. Pokud se ale cívky pohybují v lineární části magnetizační charakteristiky, omezují modelování a ovládání jen velmi málo.
- Ačkoli nebyl znám počet potřebných elektromagnetů, výsledný návrh musel respektovat geometrii lidské hlavy, krku a ramen.
- Pro ověření teoretických výsledků měl být sestaven prototyp, jenž by byl dostatečně velký, aby po experimentech na umělých očích mohl být použit pro pokusy s živými zvířaty, např. kočkami či králíky.
- Pracovní prostor by měl být téměř izotropní, schopný vytvářet dostatečné magnetické síly v jakémkoliv směru s jakoukoliv pozicí mikrorobota. Toto rozhodnutí bylo učiněno z důvodu různých chirurgických zákroků.

OctoMag je tvořen osmi cívkami s feromagnetickými jádry. Samotný mikrorobot je vhodný pro dodávání malého množství léčiva nebo pro dálkový průzkum. Potenciální nevýhodou mohou být omezené generované síly či omezená nosnost. Systém byl úspěšně otestován na propíchnutí krevních cév kuřecího embrya in vitro [17].

Jiným systémem je možnost aktace robota pomocí řady rotujících permanentních magnetů. Tento systém je schopen v pracovním prostoru vytvářet pole a gradienty s nulovou velikostí. Je možné takto ovládat robota i v omezených prostorech, neboť můžeme

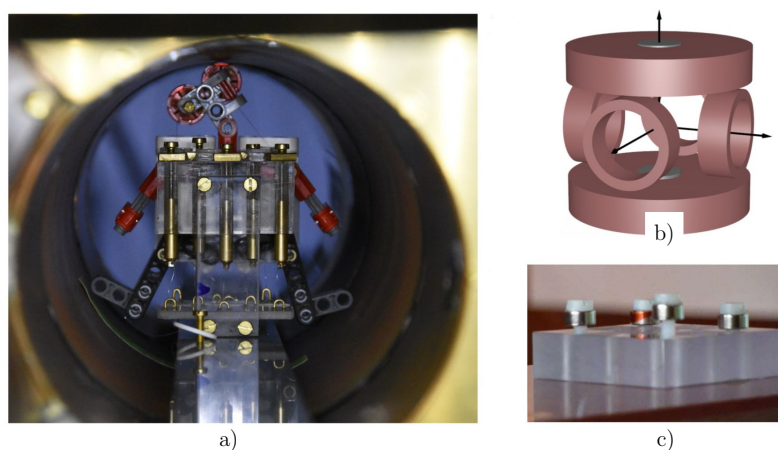
1.3.3 PROSTOROVÉ POLOHOVÁNÍ



Obr. 11: *OctoMag* s injekční jehlou [17]

dosahovat silného magnetického pole s 5 stupni volnosti. Využití je v manipulaci s jednotlivými buňkami v laboratorních podmínkách nebo v lékařských postupech zahrnujících větší magnetické nástroje, jako jsou kapslová endoskopie a říditelné jehly [18].

Jiný systém je zajímavý tím, že je pomocí něj možné pohybovat v prostoru tělesy nezávisle na sobě. Šest prostorově posunutých cívek vytváří magnetické pole, jež lze vhodným nastavením buzení v určitém bodě vyrušit - viz Obr. 12. Tohoto poznatku lze využít k zmrazení pohybu robota v daném místě. Přidáním slabého točivého pole lze pohybovat s předměty pouze v oblasti s nulovým magnetickým polem. Během experimentů byly použity šrouby, jež byly tímto způsobem utahovány či povolovány. Výsledkem bylo otáčení právě jedním šroubem, zatímco ostatní zůstaly v klidovém stavu. Pokusy bylo dosaženo selektivity v řádu milimetrů [19].



Obr. 12: a) Panák, b) soustava cívek, c) hlavy šroubů [17]

Spermboty jsou výsledkem bádání vědců z Institutu integrální vědy IFW v Drážďanech. Jedná se o magneticky poháněné obleky pro spermie, jež lze dálkově ovládat až k vajíčku - viz Obr. 13. Mají tvar šroubovice, jež se vlivem vnějšího magnetického pole otáčí a tím dochází k pohybu vpřed. Natočením magnetického pole dojde také k zatočení *Spermbota*. Již zmíněný oblek či motor najede přes bičík na spermii, zachytí ji za hlavičku a nasměruje na správné místo. Tento způsob oplodnění by mohl pomoci v oblasti neplodnosti z důvodu špatné pohyblivosti spermií. Zatím byl tento systém ověřen pouze v laboratorních podmínkách in vitro [20].



Obr. 13: *Spermbot* [20]

I.3.4 MOŽNÉ ŘÍDICÍ ALGORITMY

Pohyb robota po pracovní desce může být řízen pomocí optické nebo magnetické zpětné vazby. Z technických důvodů bude robot řízen pomocí optické zpětné vazby. Dále bych rád nastínil možné algoritmy řízení robota. Dané algoritmy se nazývají algoritmy nejkratší cesty. Měly by sloužit pro výpočet optimální trajektorie robota. Pracovní desku lze totiž převést do grafu, přičemž každá pozice je dána kartézskou soustavou souřadnic. V následujících odstavcích jsou zmíněny možné řídicí algoritmy.

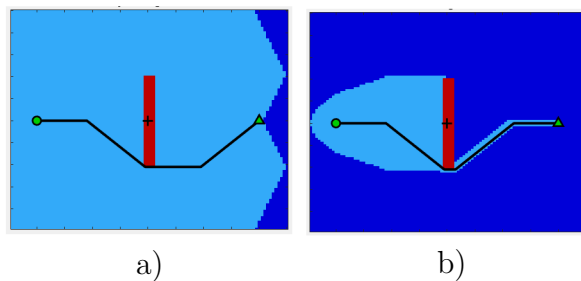
Dijkstrův algoritmus vymyslel Edsger Wybe Dijkstra v roce 1956. Jeho princip je založen na navštívení vrcholů v grafu od počátečního bodu. Následně zkoumá nejbližší dosud nezkoumaný vrchol a přidává jeho vrcholy do sady vrcholů, jež mají být prozkoumány. Rozšiřuje se od výchozí bodu, dokud nedosáhne cílového bodu. Dijkstrův algoritmus najde vždy nejkratší cestu.

Algoritmus uspořádaného prohledávání pracuje podobně jako Dijkstrův algoritmus. Odhaduje ale vzdálenost jednotlivých vrcholů grafu od cílového bodu a směřuje své hledání přímo k cílovému bodu. Tomuto odhadu se říká heuristický. Tento algoritmus může v určitých případech vyhledat cestu rychleji než Dijkstrův algoritmus, nemusí být ale vždy nejkratší. Problémovými jsou grafy s překážkami.

Spojením dvou předcházejících algoritmů vznikne A^* (A star) algoritmus. Ten je více přizpůsobivý než algoritmus uspořádaného prohledávání a skončí v méně krocích než Dijkstrův algoritmus. Upřednostňuje z Dijkstrova algoritmu vrcholy blízko výchozího bodu a vrcholy poblíž cíle z algoritmu uspořádaného prohledávání [21] [22] [23].

i.3.4 MOŽNÉ ŘÍDICÍ ALGORITMY

Na Obr. 14 je grafická ukázka problému hledání nejkratší cesty. Tmavě modrá barva reprezentuje volný prostor, červená barva překážku, světle modrá prohledanou oblast. Startovní bod je znázorněn zeleným kruhem, cílový bod trojúhelníkem [6].



Obr. 14: Hledání nejkratší cesty: a) Dijkstrův algoritmus, b) A* algoritmus [6]

Část II

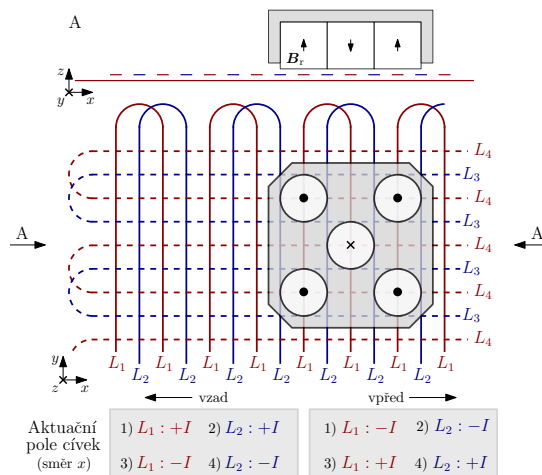
NÁVRH MIKROAKTUÁTORU

ii.1

PRINCIP POHYBU

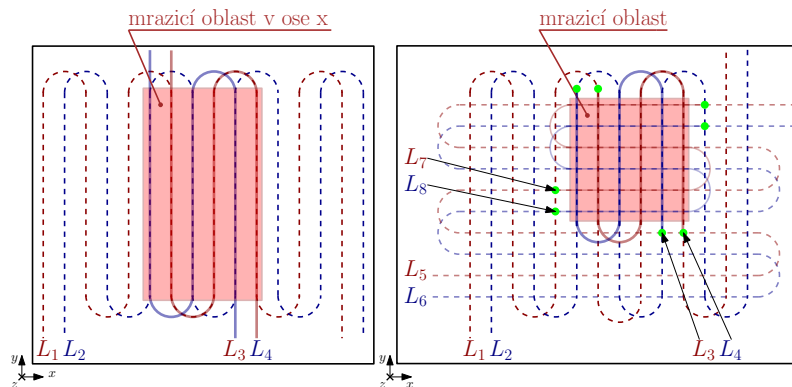
Princip pohybu robotů bych chtěl vysvětlit pomocí Obr. 15. Obrázek zobrazuje koplárnární cívky ve dvou vrstvách a robota tvořeného pěti permanentními magnety - tečky a křížky ilustrují orientaci magnetické indukce B_r . Jednotlivé cívky jsou označeny L_{1-4} . Cívky kreslené plnou čarou (L_1, L_2) umožňují pohyb robota ve směru osy x , cívky kreslené čarou čárkovanou (L_3, L_4) umožňují pohyb ve směru osy y . Dvě tabulky v dolní části obrázku odkazují na spínací sekvenci cívek pro pohyb vzad, resp. vpřed v ose x . Pohled A ukazuje řez rovinou A rovnoběžnou s rovinou danou osami x a z .

Při spínání se opakují čtyři stavy definované směry proudů a jednotlivými cívkami. Dále budu popisovat pohyb v kladném směru ose x . Pokud budeme uvažovat jako výchozí stav robota jeho pozici dle Obr. 15, jsou v klidovém stavu všechny aktuální cívky vypnuty. V nákrese jsou aktuální cívky v ose x orientovány následovně: vlevo mají začátek a vpravo konec. Při požadavku na pohyb v kladném směru osy x by byla sepnuta cívka L_1 se zápornou orientací proudu. Tím by došlo k odpuzení robota nad nenapájený vodič L_2 . Robot by se tedy posunul o jeden krok vpravo. Na stejném principu je založena celá spínací sekvence [15].



Obr. 15: Rozložení cívek elektromagnetického polohovacího systému [15]

Princip mrazení pohybu je naznačen na Obr. 16. Cívky v různých vrstvách jsou nad sebou uloženy tak, aby při průchodu elektrického proudu došlo na povrchu pracovní desky k vyrušení silových účinků. Průtok proudu v záporném směru aktuální cívkou vede na pohyb robota - viz Obr. 15. Pokud při stejné konstelaci poteče vinutím v jiné vrstvě proud opačným směrem než ve vinutí uložení ve vrstvě první, dojde na povrchu pracovní desky k superpozici magnetických polí od obou cívek. Úplné mrazení pohybu může nastat, pokud níže uloženou vrstvou poteče proud opačného směru než v první vrstvě a pokud bude jeho velikost taková, že se silové účinky od obou vodičů na povrchu desky vyruší. Na Obr. 16 je vyobrazeno mrazení v ose x , resp. v osách x a y . Na levém obrázku je ukázána mrazicí oblast v ose x tak, že v případě jejího zapnutí dojde k rozdělení pracovní desky na dvě oddělené části. Pokud se robot před zapnutím mrazení nalézá nalevo od mrazicí oblasti, již se zapnutým mrazením nemůže přejít do pravé části. Tento problém je vyřešen pomocí tvorby lokální mrazicí oblasti naznačené na pravém obrázku. Při zapnutí mrazení je možno danou lokální mrazicí oblast objet a nemrazené roboty mohou dále využívat celý nemrazený prostor pracovní desky. Nevýhodou tohoto způsobu mrazení je však nutnost použití slepých prokůvů, které umožňují překlenout druhou koplanární cívku v jiné vrstvě. Jejich výroba je však náročnější než u předešlého případu [15]. Z předešlých úvah vyplývá, že v jednu dobu musí být sepnuty dvě cívky, aby mohlo dojít k mrazení jedné osy pohybu. Tato spínání musí být synchronizována, neboť při sepnutí jen jedné cívky, ať už aktuální či mrazicí, dojde k vychýlení robota z klidové polohy. Tento problém je uvažován při tvorbě kódu v podkapitole ii.3.3. Cílem simulací tedy bude zjistit takové hodnoty proudů v jednotlivých vrstvách, aby jejich silové účinky na povrchu pracovní desky byly stejné.



Obr. 16: Princip mrazení pohybu robota - v pravé části obrázku jsou zobrazeny slepé prokovy zelenou barvou [15]

ii.2

SIMULACE

II.2.1 MATEMATICKÝ MODEL

Elektromagnetický systém byl řešen pomocí matematického modelu, jenž lze popsat parciální diferenciální rovnicí. Ta určuje rozložení magnetického pole a lze ji zapsat ve tvaru

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) - \gamma \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{ext}, \quad (1)$$

kde μ značí permeabilitu, \mathbf{A} je magnetický vektorový potenciál, \mathbf{B}_r remanentní indukce, γ elektrická vodivost, \mathbf{v} je rychlost a \mathbf{J}_{ext} je vnější proudová hustota.

Neboť při polohování dochází k relativně nízké rychlosti \mathbf{v} i malé časové změně magnetického potenciálu \mathbf{A} , lze členy obsahující tyto veličiny zanedbat. Při uvažování malých hodnot \mathbf{v} a \mathbf{A} lze tedy druhý a třetí člen rovnice neuvažovat. Rovnici popisující rozložení pole vyvolaného cívkami lze tedy zapsat následovně:

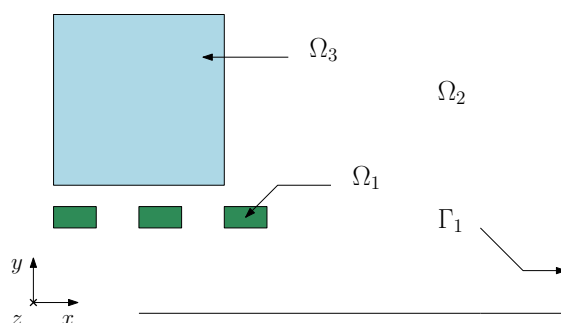
$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{J}_{ext}. \quad (2)$$

Definiční oblast modelu je znázorněna na Obr. 17; sestává z jednotlivých obdélníkových vodičů cívky Ω_1 a okolního vzduchu Ω_2 , resp. substrátu desky (ten má však velmi podobné magnetické vlastnosti jako vzduch). Magnet robota je označen Ω_1 . Definiční oblast je ohraničena čtvercovou hranicí, na níž platí Dirichletova okrajová podmínka $\mathbf{A} = \mathbf{0}$ [2]. Pro výpočty simulací byl využit program Agros2D, pro následné zobrazení vypočítaných závislostí program MATLAB R2019b.

Síla \mathbf{F} působící na permanentní magnety je dána Lorentzovo silou \mathbf{F}_L , kterou lze popsat následující rovnicí [15]:

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (3)$$

Na Obr.18 a Obr. 19 jsou zobrazeny výsledky ze simulací v programu Agros2D. Velký čtverec symbolizuje jeden magnet robota, pod ním je pro zjednodušení soustava dvou koplanárních cívek. Ty jsou naznačeny obdélníky. První vrstva vodičů odpovídá aktuálnímu vinutí v ose x . Pod ní následuje vinutí pro pohyb v ose y , dále je uloženo vinutí pro znemožnění pohybu v ose x a poslední řadu tvoří vodiče pro mrazení pohybu v ose



Obr. 17: Definiční oblast modelu magnetického pole

y. Barevné škálování odpovídá rozložení magnetické indukce v okolí vodičů a magnetu. Pro modelování bylo uvažováno pro zjednodušení 9 vodičů v jedné vrstvě. Na Obr. 18 je zobrazen průběh magnetické indukce při mrazení pohybu robota. Jeho magnetické pole je pro jednodušší interpretaci výsledků neuvažováno, tedy magnetická indukce magnetu je nulová. Obrázek odpovídá situaci, při níž protéká první cívkou aktuální vrstvy pro osu *x* proud v záporném směru - viz podkapitola ii.1. Současně protéká 3., 5. a 7. vodičem třetí vrstvy (mrazicí vrstva pro osu *x*) takový proud, aby nad vodiči byla hodnota magnetické indukce nulová. Záporný směr proudu je naznačen červenými obdélníky, kladný směr proudu zelenými. Tento obrázek odpovídá lokálnímu mrazení pohybu robota. Obr. 19 zobrazuje magnetické pole kolem permanentního magnetu používaného v minirobotech. Při porovnání hodnot magnetické indukce z Obr. 18 a Obr. 19 je zřejmé, že robot vytváří mnohem silnější magnetické pole než vodiče (cca 1000krát).

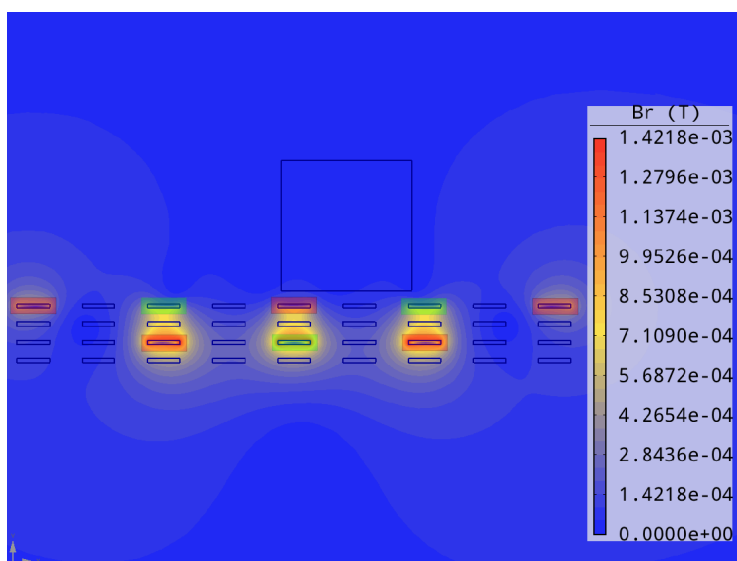
Sestavený matematický model počítá s následujícími rozměry:

Tab. 1: Rozměry prototypu *Gryllus 2* pro simulace

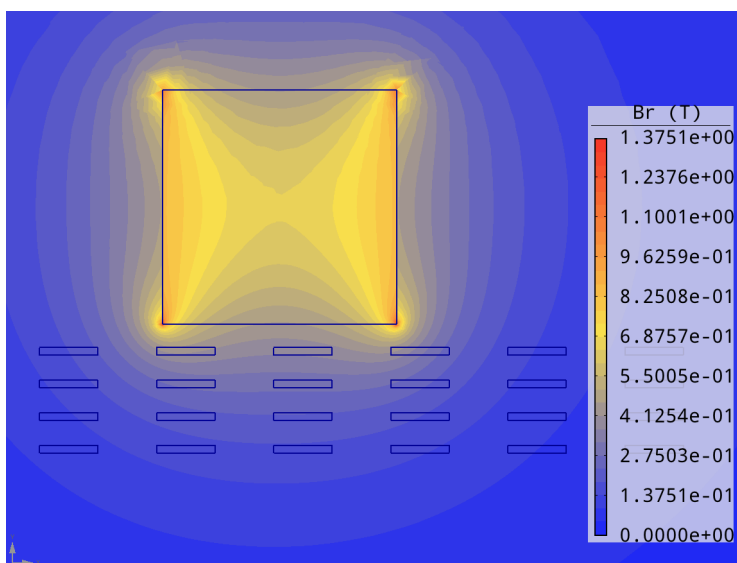
Parametr	Hodnota
Šířka vodiče	0,25 mm
Mezera mezi vodiči	0,25 mm
Mezera mezi vrstvami	0,106 mm
Výška vodiče	33 μm

Pro zjištění konvergence modelu byl umístěn magnet hranou nad poslední vygenerovaný vodič. Relativním zvětšováním řešené oblasti o násobek *n* docházelo ke změnám magnetické energie W_m . Pro stupeň zjemnění 1 a řád polynomu 2 jsou získané hodnoty zobrazeny na Obr. 20.

ii.2.2 VÝSLEDKY SIMULACE



Obr. 18: Rozložení magnetické indukce od vodičů. Zelené obdélníky značí kladný směr a červené záporný směr proudu

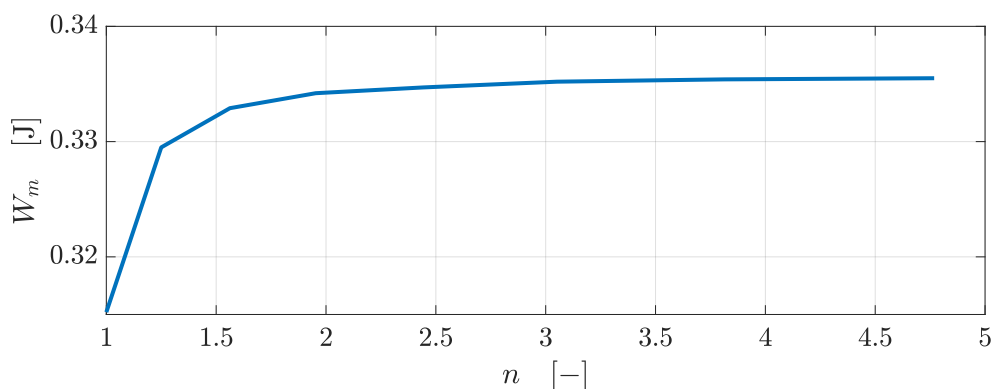


Obr. 19: Rozložení magnetické indukce od permanentního magnetu.

II.2.2 VÝSLEDKY SIMULACE

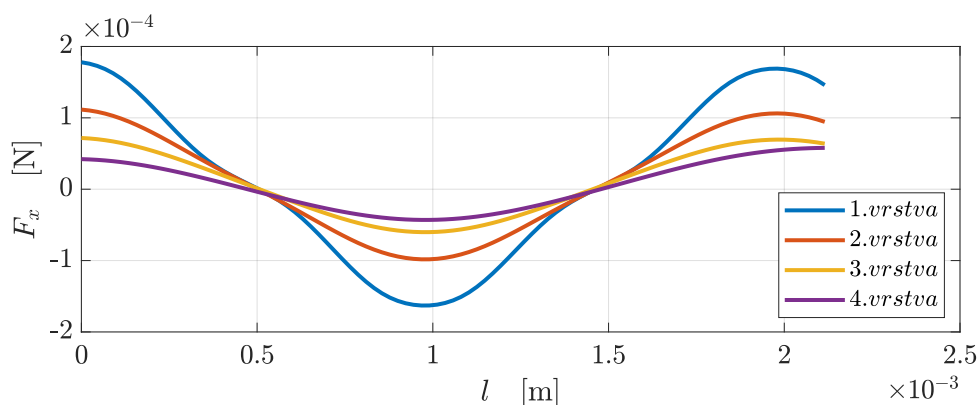
Cílem simulací bylo určení velikostí proudů v jednotlivých vrstvách desky plošných spojů takových, aby na magnet působily stejnými silovými účinky. Tato podmínka je dána z důvodu možnosti znemožnění pohybu některých robotů, tedy k vyrušení silových

ii.2.2 VÝSLEDKY SIMULACE



Obr. 20: Konvergence modelu se změnou velikosti řešené oblasti

účinků v daném místě pracovní desky - zmrazení robota. Prvními experimenty bylo zjištěno, že pro plynulý pohyb robota po pracovní desce je nutné první vrstvou protlačovat proud o velikosti 0,2 A. Při stejných proudech ve všech vrstvách je průběh síly zobrazen na Obr.21.



Obr. 21: Průběh síly působící na robota při stejných proudech

Na základě určeného matematického modelu jsem simuloval působení mikroaktuátoru na pracovní desce s magnetem i bez magnetu. S magnetem jsem také pohyboval ve směru rovnoběžném s pracovní deskou a kolmém na vodiče mikroaktuátoru, z čehož jsem zjišťoval průběh síly F_x působící na magnet.

Pro výpočty simulace byly zvoleny materiálové konstanty pro vzduch a měď $\mu_r = 1$. Výsledky hledání proudů se stejným silovým účinkem byly následující:

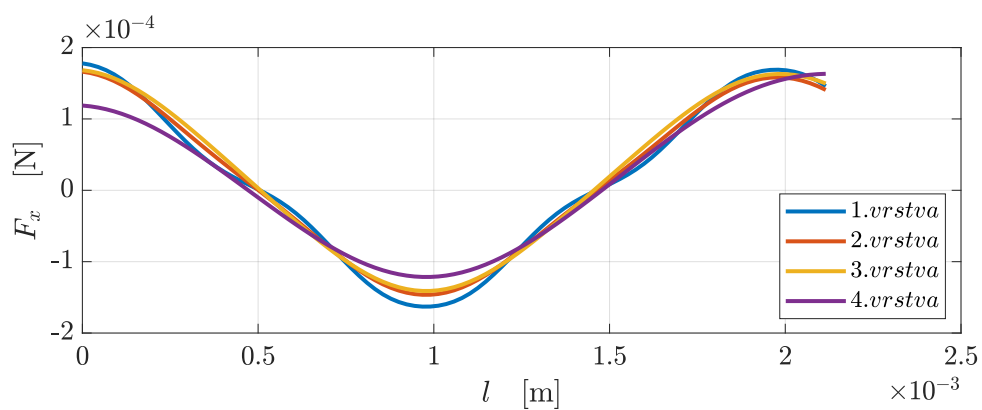
Dané proudy jsem využil v simulaci velikosti síly působící na magnet při jedné aktivované vrstvě. Průběh sil je vidět na Obr. 22.

Dále jsem simuloval průběh síly působící v ose z. Výsledky jsou ukázány na Obr. 23.

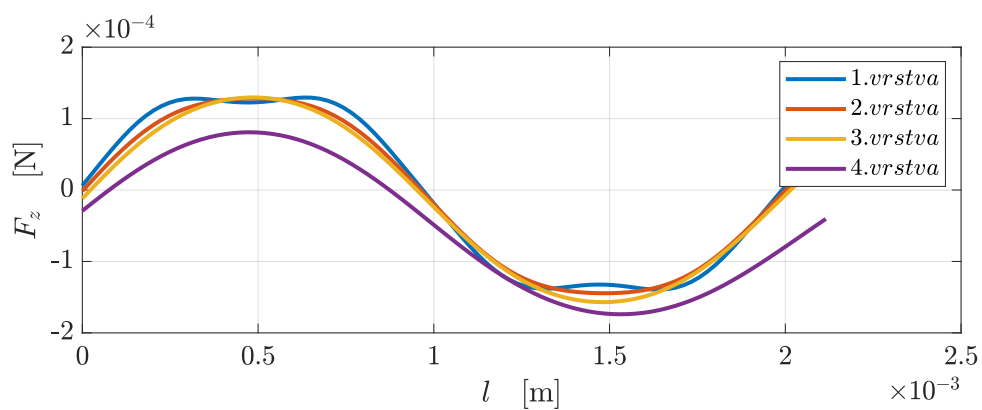
ii.2.2 VÝSLEDKY SIMULACE

Vrstva	I [A]	Vrstva	I [A]
1.	0,2	3.	0,469
2.	0,298	4.	0,564

Tab. 2: Nalezené proudy v jednotlivých vrstvách



Obr. 22: Průběh síly působící na robota při nalezených proudcích

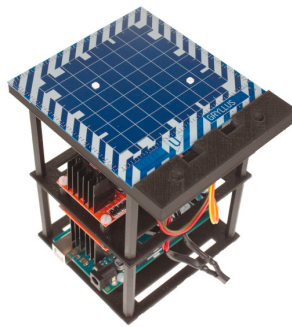


Obr. 23: Průběh síly působící na robota v ose z

ii.3

EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Experimentální zařízení *Gryllus 2* vychází z poznatků získaných zejména při výrobě a testování prototypu *Gryllus*. Předchozí prototyp je zobrazen na Obr. 24. Přihlédnuto bude také k výsledkům dříve uskutečněných simulací.



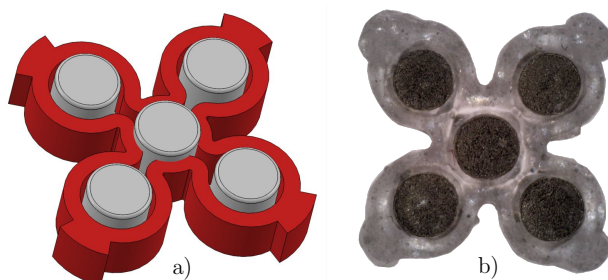
Obr. 24: Prototyp *Gryllus*

II.3.1 NÁVRH DPS

Původní návrh počítal s 6vrstvou deskou plošných spojů. Celý následující popis lze sledovat též na Obr. 26. V první vrstvě je umístěno planární vinutí pro polohování robotů v ose x (dále značeno AX). To je rozloženo tak, aby zaujímalo co největší plochu pod pracovní oblastí. Ve druhé vrstvě je uloženo planární vinutí pro polohování v ose y (AY). Opět je navrženo tak, aby bylo možno polohovat robotem po celé ploše pracovní desky. Aktuální vinutí se skládá vždy ze dvou koplanárně vedených vinutí. Díky aktuálním vinutím je možno polohovat robota v osách kartézských souřadnic.

Pokud bychom však chtěli polohovat více robotů různými směry, nebylo by to možné, neboť na všechny roboty by působily stejné síly. Proto je v dalších dvou vrstvách - třetí a čtvrté - uloženo tzv. mrazicí vinutí. Při vhodném proudu protékajícím mrazicím vinutím dojde k vyrušení sil na povrchu pracovní desky mezi aktuální a mrazicí vrstvou a robot nacházející se na takovém místě by se neměl pohybovat. Mrazicí vrstvy (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5)

ii.3.2 VÝROBA DPS



Obr. 25: a) 3D model robota, b) snímek robota pod mikroskopem

jsou různě rozloženy po celé ploše desky. Mrazicí vinutí pro znemožnění pohybu v ose x je umístěno ve třetí vrstvě. Mrazicí vinutí pro znemožnění pohybu v ose y je umístěno ve čtvrté vrstvě.

Mrazicí vrstvy F_2 a F_3 jsou navrženy pro mrazení pohybu vícero robotů uprostřed desky. Mrazicí vrstva F_1 by měla sloužit k mrazení robotů u okraje pracovní plochy. Mrazicí vrstva F_4 je určena pro mrazení právě jednoho robota. Mrazicí vrstva F_5 je umístěna u okraje desky, navíc je rozdělena na části s možností mrazit pohyb jen v jedné ose.

Aby byl lépe využit prostor DPS, byly k dříve zmíněným vinutím navrženy speciální oblasti (R , C , F_{45}). Oblast označená R (od anglického slova "rail" - kolej) by měla sloužit k ověření možnosti rozdělení dvou k sobě přitáhnutých robotů, nebo obráceně k cílenému sloučení více robotů. Oblast pojmenovaná C (z angličtiny "curve" - zatáčka) byla navržena s cílem otáčet roboty. Plocha nazvaná F_{45} je určena pro pohyb robota v osovém systému pootočeném o 45° vůči aktuálním vinutím.

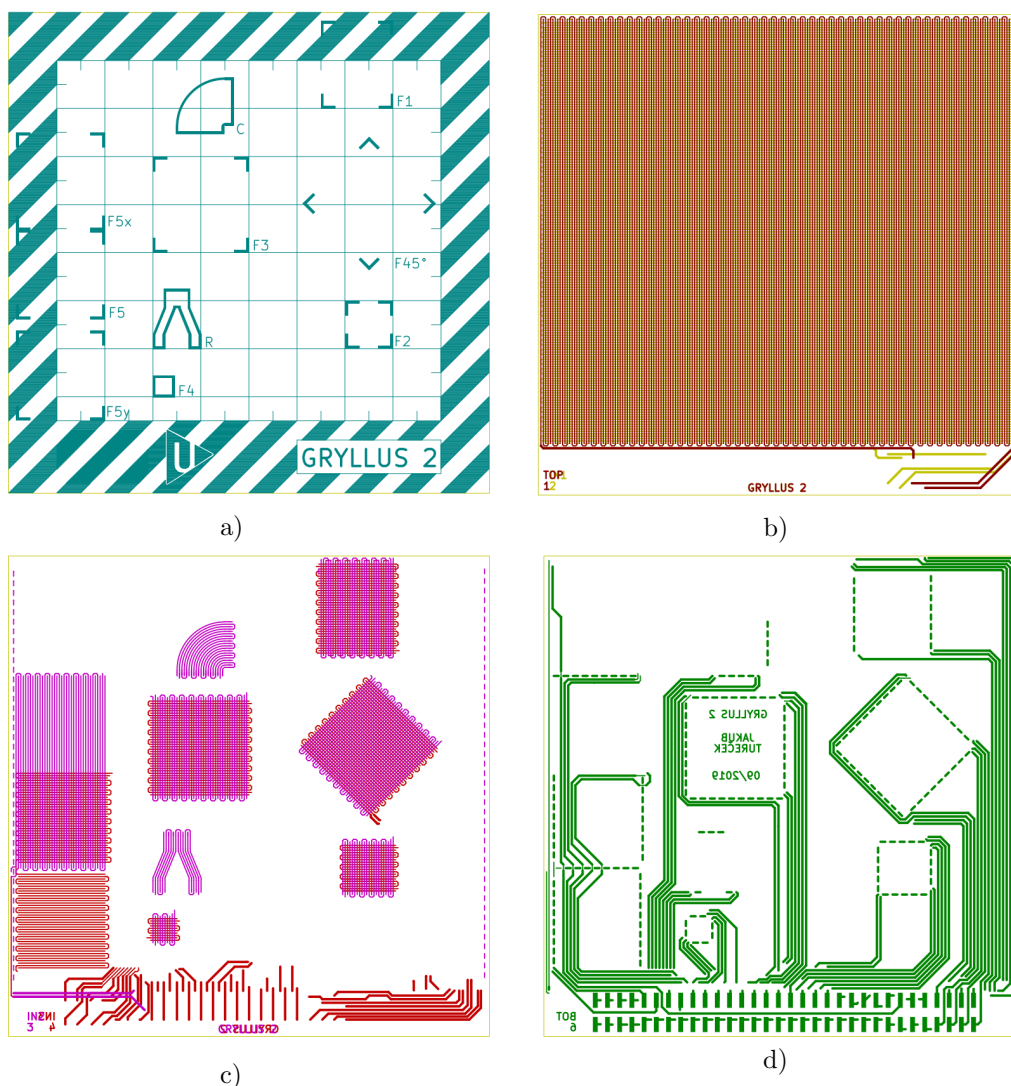
Pátá vrstva byla navržena bez vinutí, v šesté vrstvě měla být vyvedena jednotlivá vinutí (začátky a konce) na konektor, jež se skládá z 64 pinů. Pátá vrstva měla za účel co nejvíce oddálit šestou vrstvu, aby proudy jí protékající nepříznivě neovlivňovaly roboty na pracovní ploše.

II.3.2 VÝROBA DPS

Z důvodu náročnosti výroby takovéto DPS však bylo nutné původní záměry opustit, nakonec byla vybrána možnost pětivrstvé desky s vyšší izolační vrstvou mezi 4. a 5. vrstvou. Stack-up této DPS je zobrazen na Obr. 28. Stack-up zobrazuje vrstvy měděných a izolačních vrstev DPS s jejich rozměry. Výroba této desky vyšla přibližně na 20 000,- Kč.

Celé experimentální zařízení tvoří věž. Nahoře je pracovní deska připevněna na držák. Deska je pomocí konektoru propojena se spínacími prvky, které jsou uloženy v jednotlivých patrech věže, spínány jsou signály z mikrokontroléru. Ten je umístěn do nejnižšího patra věže. Dole je též uložen konektor pro napájení spínacích prvků a mikrokontroléru.

ii.3.2 VÝROBA DPS

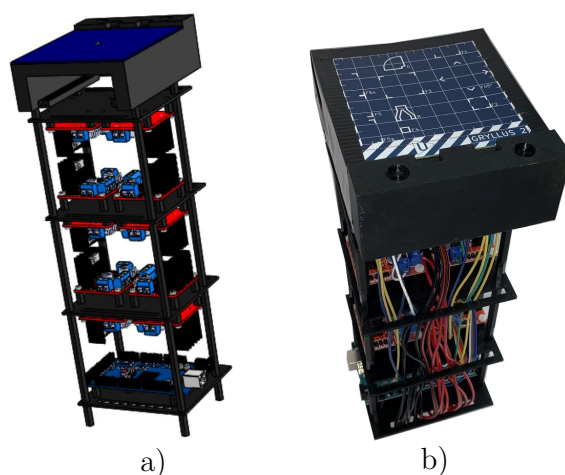


Obr. 26: Ukázky z programu KiCad: a) vrchní potisk, b) aktuační vinutí (AX, AY), c) mrazící vinutí (F1, F2, F3, F4, F5, F45, R, C), d) propojení desky

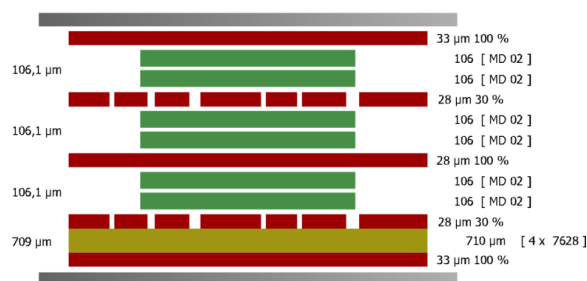
Z důvodu náročné výroby desky plošných spojů firmy byla původní vize osmivrstvé či šestivrstvé DPS opuštěna a nahrazena pětivrstvou verzí. Z důvodu náročné výroby však deska vykazovala značný průhyb - viz Obr. 29, jenž znemožňoval přesný pohyb. Proto jsem navrhl formu na přilepení DPS ke sklolaminátové desce. Forma je vyobrazena na Obr. 30.

Jednotlivá patra a držák desky byly vtištěny na 3D tiskárně Prusa i3 MK3S. Neboť konektor na desce plošných spojů je širší než na předchozích experimentálních zařízeních, bylo nutné upravit konstrukci tak, aby bylo možno konektor do držáku zasunout.

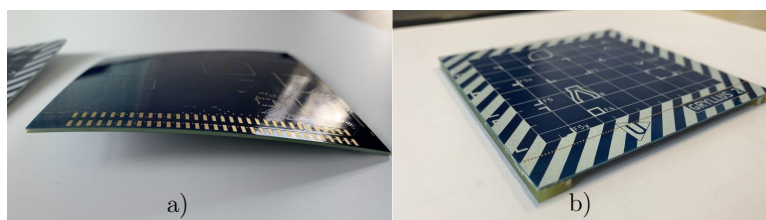
ii.3.2 VÝROBA DPS



Obr. 27: a) 3D model prototypu, b) snímek prototypu



Obr. 28: Stack-up DPS pro *Gryllus 2*



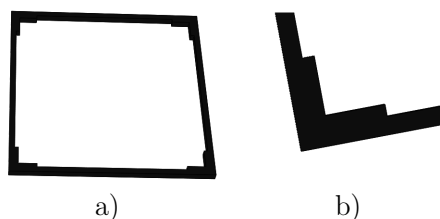
Obr. 29: a) Prohnutá DPS, b) podlepená DPS

Těž velikost děr pro vyvedení jednotlivých napájecích či signálových vodičů patry byla upravena.

Pro spínání cívek byly použity H-můstky L298N. Každý H-můstek spíná právě dvě cívky. Řízení spínání H-můstek zajišťuje mikrokontrolér Arduino ATmega 2560.

Z rozměrových důvodů není každé vinutí vyvedeno zvlášť, takové řešení by vedlo na značné množství spínacích prvků, též by bylo nutné použít několik mikrokontrolérů pro řízení. Proto jsou mrazicí vrstvy F_2 a F_4 zapojeny sériově, stejně tak vrstvy F_1 a

ii.3.3 PROGRAMOVÁNÍ MIKROKONTROLÉRU



Obr. 30: Forma pro lepení desky: a) celkový pohled, b) detail rohu

F_5 . K mrazicímu vinutí F_{45X} bylo zapojeno do série vinutí R a k mrazicímu vinutí F_{45Y} bylo sériově zapojeno vinutí C . Zmíněná propojení byla provedena pod držákem DPS na konektoru na plochem kabelu.

Při samotných experimentech bylo zjištěno, že při návrhu došlo k chybě a mrazicí oblast F_4 , resp. vinutí F_4 je nevhodně posunuto vůči aktuálním cívkám - není tedy možné tuto část použít pro mrazení pohybu.

II.3.3 PROGRAMOVÁNÍ MIKROKONTROLÉRU

Pro správný sled spínacích sekvencí je využita vývojová platforma Arduino Mega R3 s mikrokontrolérem ATmega 2560. První testovací programy s napevno nastavenými spínacími sekvencemi byly naprogramovány v Arduino IDE. Stav byl takový, že každé z předchozích experimentálních zařízení (*Scarabeus*, *Isoptera*, *Gryllus*) mělo vlastní firmware, který nebyl kompatibilní s ostatními. Tím se velmi ztížilo přidávání nových funkcí, protože je bylo nutné implementovat v několika různých programech. Proto jsem navrhl nový objektově orientovaný firmware v jazyce C++, který pomocí dědičnosti a šablon obsahuje základní implementaci řídicích struktur a algoritmů, která je sdílená mezi zařízeními. U každého zařízení je pouze potřeba nastavit ovládací piny pro jednotlivé cívky a případně implementovat funkce, které ostatní zařízení nemají. Pro programování tohoto firmwaru jsem použil Atmel Studio 7. Pro ovládání je využito tzv. G-kódu a M-kódu (viz Tab. 3), pomocí nichž je ovlivňován pohyb robotů na desce. Kódy jsou přenášeny sériovou komunikací.

Celý kód lze rozdělit do několika částí, jež budu postupně popisovat: nastavení cívek, moduly, komunikace a časování.

Základní třídou části ovládání cívek je třída `Coil_pair`. Tato třída obsahuje pozici v sekvenci, v jaké byly naposledy sepnuty cívky, směr, kterým mohou cívky robotem pohybovat, a piny cívek, které zajišťují daný pohyb. Daná třída obsahuje informace o směru pohybu pomocí výčtové třídy `Direction`. Spínání cívek je závislé na použitých H-můstcích. Proto byla implementována abstraktní třída `H_bridge`, z níž dědí třída H-můstku `L298N` a `Motor_Shield`. Správný datový typ pro instanci H-můstku k dané cívce je určen šablonovým parametrem třídy `Coil_pair`. Z třídy `Coil_pair` dědí

Tab. 3: Soupis používaných M-kódů

M-kód	Význam
M0	Zapnutí techniky <i>rail</i>
M1	Vypnutí techniky <i>rail</i>
M2 S3	Zapnutí mrazení v segmentu 3
M3 S2	Vypnutí mrazení v segmentu 2
M9	Nastavení rychlosti
?	Odpovědí je verze firmwaru a název zařízení

třídy `Actuation_coil` a `Freezing_coil`, které slouží k určení funkce dané dvojice cívek.

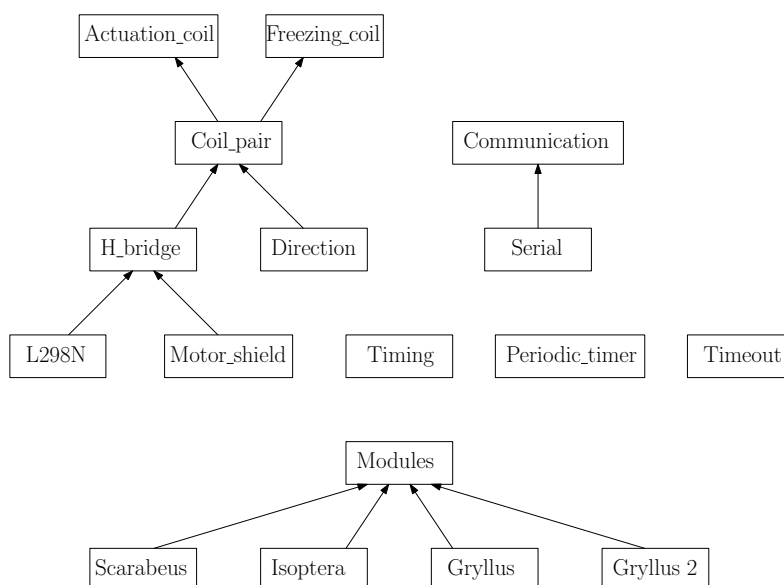
Třída `Modules` v sobě obsahuje instance jednotlivých cívek, proměnné a metody společné pro všechny experimentální zařízení. Ty jsou následně používány či individuálně implementovány ve třídách a dědí od třídy `Modules` - např. *Scarabeus*, *Isoptera*, *Gryllus* a *Gryllus 2*.

Třída `Communication` slouží k ovládání experimentálního zařízení. Pro umožnění různých způsobů ovládání je komunikace s ovládacím zařízením implementována až ve třídách, které z ní dědí. Naprogramoval jsem třídu `Serial`, která umožňuje komunikaci s počítačem přes sériový port. Firmware je tak připraven i na implementaci tříd pro ovládání.

Třídy `Timing`, `Periodic_timer` a `Timeout` slouží k práci s časem. Třída `Timing` je použita v metodě `Modules::step()`, jež slouží ke krokování robota. Třídu `Periodic_timer` je možno použít pro periodické spínání nějaké sekvence. Třída `Timeout` může být použita pro vykonání příkazu po zadaném čase, tedy s určitým zpožděním. Všechny tyto třídy využívají proměnnou `ms_timer::time`, která je inkrementována v přerušení od čítače/časovače `TCCR1` každou milisekundu. V tomto přerušení je také volána metoda `Modules::step()`, která řídí časování spínací sekvence cívek. Tím je dána teoretická maximální rychlost robota, kdy nejkratší interval mezi kroky může být 1 ms.

Dále bych rád blíže popsal třídu `Modules`. Obsahuje pole aktuálních a mrazicích cívek, jež je inicializováno v konstruktorech tříd samotných zařízení. Dále zde jsou proměnné pro časování a rychlost v osách x a y . Třída obsahuje metodu `move()` v různých modifikacích (u některých je možno zadat pouze vzdálenost, u dalších i rychlost pohybu, popř. rychlost pohybu pro každou osu zvlášť). Následně jsou všem cívkám třídy `Actuation_coil` dle směru nastaveny parametry pohybu (vzdálenost, o kterou se má minirobot posunout). V metodě `step()` je řešeno časování a vykonávání spínací sekvence pro aktuální a mrazicí cívky dle nastavených parametrů vzdálenosti, rychlosti a aktivovaných mrazicích cívek.

ii.3.4 EXPERIMENTY



Obr. 31: Zjednodušený UML diagram

II.3.4 EXPERIMENTY

V rámci experimentů byl zkoušen paralelní pohyb dvou robotů v osách x a y , dále diagonální pohyb a mrazení pohybu jednoho robota, zatímco druhý mohl pokračovat v pohybu, a vzájemné ovlivňování robotů. Použitá rychlost spínání cívek byla 20 ms na krok.

Před samotnými experimenty bych popsal techniku pro zpřesnění pohybu robotů, která byla použita - *rail*. Tato metoda je založena na skutečnosti, že při pohybu robota v jedné ose (např. v ose x) jsou požadované cívky spínány dle dané sekvence. Díky znalosti polohy robota je možné sepnout aktuální cívky v ose y tak, aby díky přitažlivé síle nedovolily vychýlit robota ve směru osy y .

Po sérii prvních experimentů byly z důvodu značné chybovosti pohybu robotů zvýšeny pro následující experimenty proudy ve všech vrstvách DPS 1,3 krát.

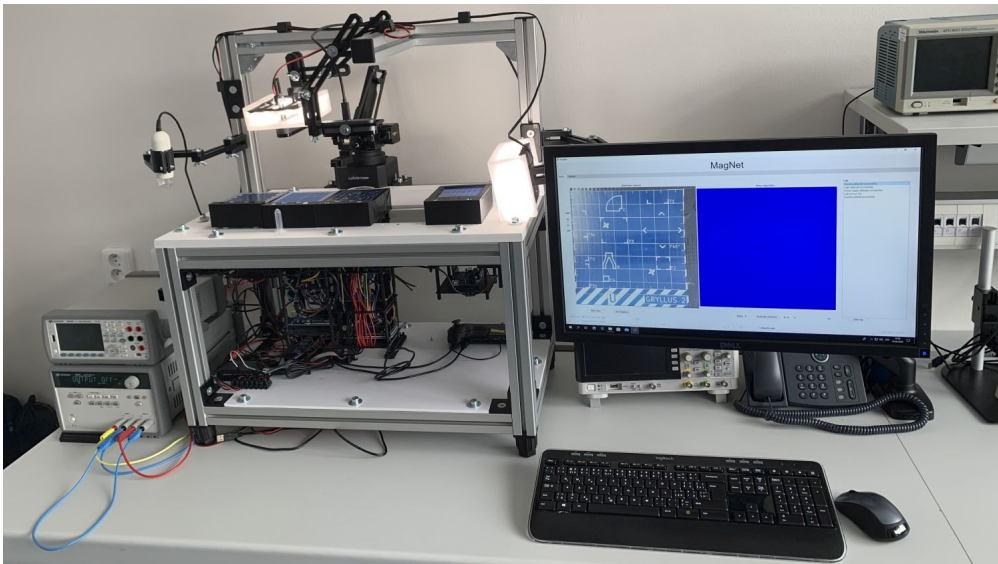
Záznam pohybu prvního experimentu je naznačen na Obr. 33. Během tohoto experimentu byly umístěny na pracovní desku dva roboty. Následně byl zaslán požadavek na pohyb v ose x a y najednou, celý pohyb byl uskutečněn bez použití jakékoliv mrazicí oblasti. Po přesunu robotů na požadované souřadnice byl pomocí MagNetu (nadřazeného kódu) spuštěn předdefinovaný sled G-kódů pro pohyb po čtverci. Roboty se pohybovaly nejprve v kladném směru osy x , následně v záporném směru osy y , pak v záporném směru osy x a nakonec v kladném směru osy y . V dalším kroku bylo zapnuto mrazení v mrazicí oblasti F_3 , a to v obou osách. Pokračovala stejná sekvence pohybu po čtverci jako je popsána výše. V této fázi experimentu se po dráze ve tvaru čtverce pohyboval pouze robot označený na Obr. 33 žlutou barvou. Červeně označený robot je při mrazení

ii.3.4 EXPERIMENTS

držen v oblasti F_3 , je však patrné, že svoji polohu mírně měnil. Po dokončení této sekvence kódu bylo mrazení v mrazicí oblasti F_3 vypnuto. Následně byl zadán požadavek na pohyb obou robotů jen po dvou stranách výše zmíněného čtverce.

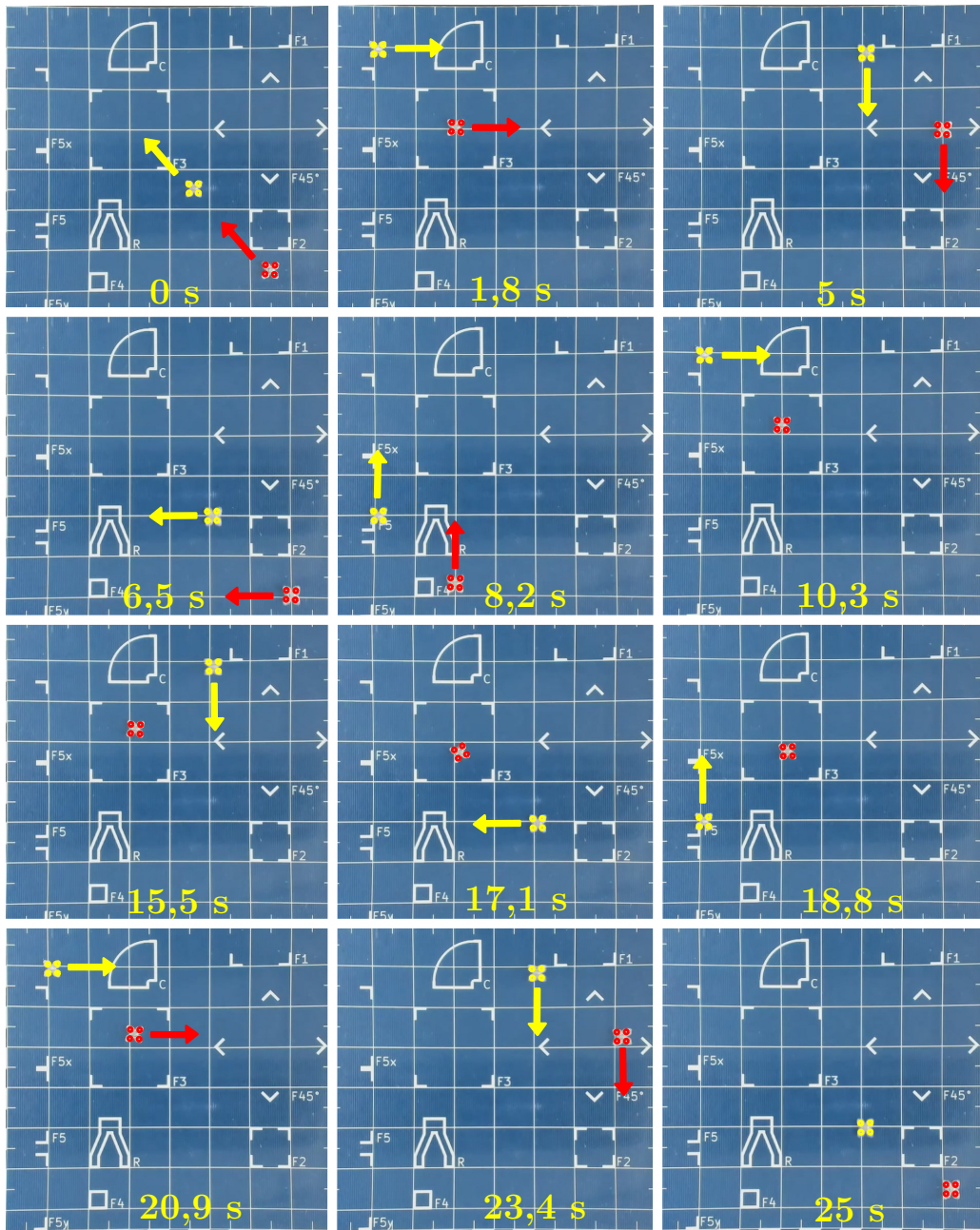
Trajektorie obou robotů je zaznamenána na Obr. 34. Z něj je patrné, že veškeré pohyby byly prováděny bez větších odchylek, jen při mrazení robota docházelo i k jeho malému pohybu - to lze vysvětlit nevhodným nastavením mrazicího proudu nebo nepřesností v kódu mikrokontroléru.

Dále bylo experimentálně testováno vzájemné ovlivňování robotů. Roboty byly umístěny na pracovní desku dle Obr. 35. Následně došlo k zapnutí mrazení v oblasti F_3 , čímž byl znemožněn pohyb červeného robota. Také byl zapnut *rail*, čímž měl být žlutě značený robot držen v zadaném směru. Dále byl poslán požadavek na pohyb v kladném směru osy x . Sledováním polohy žlutě označeného robota byla zaznamenána jeho poloha v různých časech zelenými body. Z průběhu trajektorie žlutě označeného robota je zřejmé, že v oblasti blízké červeně značenému robotu je vychýlen ze zadaného směru pohybu.



Obr. 32: Laboratoř

ii.3.4 EXPERIMENTY



Obr. 33: Experiment pohybu robotů

Část III

ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

Hlavním tématem práce bylo vyhotovit experimentální zařízení pro polohování magnetických těles v rovině pomocí soustavy koplanárních cívek. Navržený systém by mohl nalézt uplatnění v lékařství stejně jako při miniaturizaci výrobních a zpracovatelských systémů.

III.1.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V první části práce byly definovány vybrané základní pojmy, vymezena oblast řešení práce a zmíněna motivace práce.

V druhé části práce bylo využito teoretických znalostí z rešerše, a to zejména z vývoje experimentálních zařízení na FEL ZČU, pro formulaci matematického modelu, kterým bylo dosaženo v simulačních programech výsledků zobrazujících průběhy proudů pro jednotlivé vrstvy DPS tak, aby silové účinky na povrchu DPS byly stejné. Dalším cílem simulací bylo zjistit průběh Lorentzovy síly ve dvou osách, a to ve směru rovnoběžném s pohybem robota a ve směru kolmém na pracovní desku (způsobující tření).

Výsledky simulací byly zohledněny při návrhu experimentálního zařízení, popsáno je také programování mikrokontroléru, jehož ovládací kód byl vytvořen jako objektově orientovaný.

Práci uzavírají experimenty na vyhotoveném zařízení. Během experimentů byla nejprve testována funkčnost jednotlivých segmentů. Těmito experimenty byla detekována chyba při návrhu desky - vinutí mrazicí oblasti F_4 bylo nevhodně prostorově posunuto, tudíž nebylo možné ji jako mrazicí oblast využít.

Následovaly experimenty náročnějších pohybů. Popsány jsou dva experimenty. První je zaměřen na možnosti paralelního polohování robotů, zkoušeny byly pohyby v osách x a y , také pohyb diagonální a možnost mrazení robota. Přesnost polohování byla zvýšena pomocí techniky *rail*. Z výsledků je zřejmé, že při mrazení robota docházelo k jeho mírnému vychylování z původní polohy. To mohlo být způsobeno nevhodným nastavením mrazicího proudu nebo nepřesností v kódu mikrokontroléru. Druhý experiment byl zaměřen na vzájemné ovlivňování robotů. Jeden z robotů byl mrazen, druhý dostal požadavek na pohyb podél mrazeného robota. Při tomto experimentu byl opět využit *rail*. Ze sledované trajektorie pohybovaného robota lze usoudit, že v okolí druhého robota došlo

k přiblížení pohybovaného robota směrem k robotu stojícímu. Tento poznatek je nutné uvažovat při paralelním polohování, neboť pokud by se oba roboty k sobě přiblížily na kritickou vzdálenost, došlo by k jejich spojení, čímž by byl znemožněn jejich další pohyb.

Díky lokálním mrazicím oblastem je možno na rozdíl od prototypu *Gryllus*, kde mrazení znamenalo rozdělení desky na několik vzájemně oddělených částí, dále pohybovat nemrazenými roboty po zbývající ploše desky. Ovšem vzhledem k prototypu *Gryllus* došlo ke zvýšení počtu spínacích prvků, čímž se zvýšila prostorová náročnost zařízení a snížila přehlednost zapojení. To bylo způsobeno požadavkem na možnost usazení této věže vedle předchozích prototypů, aby bylo možno vyzkoušet přejezdy mezi jednotlivými zařízeními. Značně také naroste náročnost možných oprav.

III.1.2 SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

Z časových důvodů nebylo možno vyzkoušet více experimentů. Proto by bylo dále vhodné otestovat například možnosti otáčení robotů pomocí natočené soustavy koplanárních cívek značených F_{45} , jež je o 45° natočena oproti cívkám aktuálním. Oblast zatačky C , jež byla primárně použita pro otočení robota o 90° , by mohla být využita jen pro mírné natočení robota. Pokud by se dva roboty k sobě přiblížily na kritickou vzdálenost, mohly by být odděleny pomocí oblasti R . Oblast F_4 , jež byla špatně navržena, by šla použít pro "microstepping". Při návrzích dalších zařízení by bylo možné využít možnosti snížení tření robotů pomocí docílení jejich levitace.

Navržený systém by mohl najít širokou škálu uplatnění v praxi. Při laboratorní manipulaci by bylo možné pohybovat se vzorky v ochranné atmosféře. Dané polohování by šlo využít při výrobě elektronických součástek, zejména při jejich rozmisťování na deskách plošných spojů. Další možností je manipulace s odpady, resp. separace malých kousků odpadu. Zde je však systém omezen na odpady nemagnetického charakteru.

Tab. 4: Parametry prototypu *Gryllus 2*

Obecné parametry prototypu	Hodnota
Šířka vodiče	0,25 mm
Mezera mezi vodiči	0,25 mm
Mezera mezi vrstvami	0,106 mm
Výška mědi	33 μ m
Parametry magnetů a robota	Hodnota
Hmotnost magnetu	0,006 g
Rozměry magnetu	1 x 1 mm
Magnet (BH)max	318 - 350 kJ/m ²
Hmotnost těla robota	0,0075 g

LITERATURA

- [1] Miroslav Husák. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Academia, 2008.
- [2] Daniel Mayer. *Aplikovaný elektromagnetismus*. 2. vyd. české budějovice: Kopp, 2012.
- [3] Robot. in: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Robot>. cit. 17.10.2019.
- [4] C. Ronald Kube and Hong Zhang. Collective robotics: From social insects to robots. *Adaptive behavior*, 2(2):189–218, 1993.
- [5] Makoto Tanaka. Development of desktop machining microfactory. *Riken Review*, (34), 2001.
- [6] Jiří Šedivec et al. Systém na ovládání miniaturních robotů. 2020.
- [7] Jiří Kuthan et al. Elektromagnetický systém pro polohování magnetických těles. 2017.
- [8] Ron Pelrine, Annjoe Wong-Foy, Brian McCoy, Dennis Holeman, Rich Mahoney, Greg Myers, Jim Herson, and Tom Low. Diamagnetically levitated robots: An approach to massively parallel robotic systems with unusual motion properties. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 739–744. IEEE, 2012.
- [9] Ron Pelrine, Allen Hsu, Cregg Cowan, and Annjoe Wong-Foy. Multi-agent systems using diamagnetic micro manipulation—from floating swarms to mobile sensors. In *2017 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [10] Allen Hsu, William Chu, Cregg Cowan, Brian McCoy, Annjoe Wong-Foy, Ron Pelrine, Joseph Lake, Joshua Ballard, and John Randall. Diamagnetically levitated milli-robots for heterogeneous 3d assembly. *Journal of Micro-Bio Robotics*, 14(1-2):1–16, 2018.
- [11] Ioan Alexandru Ivan, Gilgueng Hwang, Joël Agnus, Micky Rakotondrabe, Nicolas Chaillet, and Stéphane Régnier. First experiments on magpier: A planar wireless magnetic and piezoelectric microrobot. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 102–108. IEEE, 2011.

- [12] R. Pelrine, A. Hsu, and A. Wong-Foy. Methods and results for rotation of diamagnetic robots using translational designs. In *2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [13] Martin Juřík, Jiří Kuthan, Jiří Vlček, and František Mach. Positioning uncertainty reduction of magnetically guided actuation on planar surfaces. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1772–1778. IEEE, 2019.
- [14] Jiří Vlček et al. Paralelní polohování feromagnetických těles pomocí magnetického pole. 2018.
- [15] Jiří Kuthan, Martin Juřík, and František Mach. Magnetic actuation of multiple robots by the coplanar coils system. In *2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- [16] Tomáš Šašek et al. Paralelní polohování miniaturních robotů pomocí magnetického pole. 2017.
- [17] Michael P Kummer, Jake J Abbott, Bradley E Kratochvil, Ruedi Borer, Ali Sengul, and Bradley J Nelson. Octomag: An electromagnetic system for 5-dof wireless micromanipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(6):1006–1017, 2010.
- [18] Patrick Ryan and Eric Diller. Magnetic actuation for full dexterity microrobotic control using rotating permanent magnets. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(6):1398–1409, 2017.
- [19] Jürgen Rahmer, Christian Stehning, and Bernhard Gleich. Spatially selective remote magnetic actuation of identical helical micromachines. *Science Robotics*, 2(3):eaal2845, 2017.
- [20] Evan Ackerman. Steerable, motorized cyborg spermrobots take on infertility. <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/medical-robots/spermrobots-take-on-infertility>. cit. 17.03.2020.
- [21] Petr Havíček. Algoritmy pro směrování dopravních vozidel. 2010.
- [22] Tomáš Havránek. Vizualizace hledání nejkratší cesty na grafech. 2010.
- [23] Atim Patel. Introduction to A* [online]. <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming>. cit. 07.04.2020.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Rozměry DM3 systémů [8]	6
Obrázek 2	Robot pro systém DM3 [9]	7
Obrázek 3	3D výroba: a) schematické zobrazení (bílá šipka zobrazuje vzduchovou mezeru), b) fotografie systému, c) ukázka 3D výroby (bílý obdélník odpovídá délce 10 μm) [10]	8
Obrázek 4	Spolupráce více robotů [10]	8
Obrázek 5	Robot <i>MagPieR</i> [11]	8
Obrázek 6	Systém <i>MagPieR</i> : a) model arény, b) detail modelu arény, c) skutečné provedení arény [11]	9
Obrázek 7	Zatáčka tvořená planárními závity [12]	9
Obrázek 8	Srážka dvou robotů [13]	10
Obrázek 9	Vzájemné ovlivňování robotů [13]	10
Obrázek 10	Prototyp <i>Isoptera</i> s pracovní deskou rozdělenou na segmenty [14] [15]	11
Obrázek 11	<i>OctoMag</i> s injekční jehlou [17]	13
Obrázek 12	a) Panák, b) soustava cívek, c) hlavy šroubů [17]	13
Obrázek 13	<i>Spermbot</i> [20]	14
Obrázek 14	Hledání nejkratší cesty: a) Dijkstrův algoritmus, b) A* algoritmus [6]	15
Obrázek 15	Rozložení cívek elektromagnetického polohovacího systému [15]	17
Obrázek 16	Princip mrazení pohybu robota - v pravé části obrázku jsou zobrazeny slepé prokovy zelenou barvou [15]	18
Obrázek 17	Definiční oblast modelu magnetického pole	20
Obrázek 18	Rozložení magnetické indukce od vodičů. Zelené obdélníky značí kladný směr a červené záporný směr proudu	21
Obrázek 19	Rozložení magnetické indukce od permanentního magnetu.	21
Obrázek 20	Konvergence modelu se změnou velikosti řešené oblasti	22
Obrázek 21	Průběh síly působící na robota při stejných proudech	22
Obrázek 22	Průběh síly působící na robota při nalezených proudech	23
Obrázek 23	Průběh síly působící na robota v ose z	23
Obrázek 24	Prototyp <i>Gryllus</i>	24
Obrázek 25	a) 3D model robota, b) snímek robota pod mikroskopem	25
Obrázek 26	Ukázky z programu KiCad: a) vrchní potisk, b) aktuální vinutí (AX, AY), c) mrazičí vinutí ($F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_{45}, R, C$), d) propojení desky	26
Obrázek 27	a) 3D model prototypu, b) snímek prototypu	27

Seznam obrázků

Obrázek 28	Stack-up DPS pro <i>Gryllus 2</i>	27
Obrázek 29	a) Prohnutá DPS, b) podlepená DPS	27
Obrázek 30	Forma pro lepení desky: a) celkový pohled, b) detail rohu	28
Obrázek 31	Zjednodušený UML diagram	30
Obrázek 32	Laboratoř	31
Obrázek 33	Experiment pohybů robotů	32
Obrázek 34	Experiment pohybů robotů - trajektorie	33
Obrázek 35	Experiment vzájemného ovlivňování robotů	33