

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Separace elektronického odpadu za použití miniaturních
magnetických robotů

Autor práce: **Bc. Ondřej Carvan**
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Kuthan**
Konzultant práce: **Ing. Martin Juřík**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej CARVAN**
Osobní číslo: **E19N0001P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Separace elektronického odpadu za použití miniaturních magnetických robotů.**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište globální problémy s elektronickým odpadem a současné metody pro jeho separaci a případnou recyklaci.
2. Prostudujte a popište problematiku magnetického ovládání miniaturních robotů. Zaměřte se především na platformu vyvíjenou na FEL ZČU v Plzni.
3. Analyzujte materiály vhodné pro separaci pomocí miniaturních robotů. Navrhněte koncepci separátoru využívající danou platformu.
4. Navrhněte a zkonstruujte miniaturní magnetické roboty určené k separaci elektronického odpadu. Navrhněte algoritmy využívající optické lokalizace k detekci materiálu.
5. Experimentálně ověřte možnosti navržené technologie.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. WIDMER, Rolf, et al. Global perspectives on e-waste. Environmental impact assessment review, 2005, 25.5: 436-458.
2. KUTHAN, J., MACH, F. Magnetically guided actuation of ferromagnetic bodies on the planar surfaces: numerical modeling and experimental verification. ISBN: 978-1-5386-1040-4
3. KUTHAN, J., JUŘÍK, M. Key aspects of magnetically guided actuation on planar surfaces. In Elektrotechnika a informatika 2018. ISBN: 978-80-261-0785-9
4. Sitti M. Mobile Microrobotics. MIT Press; 2017 Jun 9
5. KUTHAN, J., JUŘÍK, M., Collective Planar Actuation of Miniature Magnetic Robots Towards Individual Robot Operation. doi: 10.1109/MARSS49294.2020.9307877
6. JUŘÍK, M., ŠMÍDL, V. Trade-off Between Resolution and Frame Rate for Visual Tracking of Mini-robots on Planar Surfaces. doi: 10.1109/MARSS.2019.8860966.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kuthan**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



L.S.

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

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá separací elektronického odpadu. Toto téma je již v současné době velmi palčivým problémem a v budoucnu se celosvětově stane ještě významnějším. K jeho řešení by mohl přispět separační systém představený v této práci. Tento systém využívá miniaturních magnetických robotů a algoritmů optické lokalizace pro zajištění separace vybraných komponent elektronického odpadu.

Vlastní práce je rozdělena do celkem sedmi částí. První kapitola je zaměřena na vymezení řešené problematiky, popis jejího výchozího stavu a vyjádření motivace pro její řešení. Ve druhé kapitole je vysvětlena volba a získání vhodných komponent z pohledu uvažovaného způsobu separace. Třetí kapitola popisuje návrh a výrobu separační platformy a robotů. Ve čtvrté kapitole je představen manuální separační systém. Výsledný proof-of-concept systém a algoritmy zajišťující jeho automatizaci jsou popsány v páté kapitole. V šesté kapitole jsou nastíněny směry dalšího možného vývoje a poslední kapitola je zaměřena na závěrečné zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova

Separace, elektronický odpad, miniaturní magnetický robot, optická lokalizace, neuronová síť, plánování trajektorie, automatizace, MATLAB

Abstract

The submitted master thesis is focused on the electronic waste separation. This topic is already a very pressing issue nowadays and will become even more important globally in the future. The separation system presented in this thesis could contribute to its solution. This system uses miniature magnetic robots and optical localization algorithms to perform the separation of selected e-waste components.

The thesis itself is divided into seven parts. The first chapter is focused on the topic definition, description of its initial state and motivation for its solution. In the second chapter, the selection and retrieval of suitable components with respect to the considered separation method are explained. The third chapter describes the design and fabrication of the separation platform and robots. The manual separation system is presented in chapter four of this thesis. The resulting proof-of-concept system and algorithms providing its automation are described in chapter five. In the sixth chapter, the directions of possible further development are defined, and the last chapter focuses on the final evaluation of the results achieved.

Keywords

Separation, electronic waste, miniature magnetic robot, optical localization, neural network, trajectory planning, automation, MATLAB

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Kuthanovi a konzultantovi Ing. Martinovi Juříkovi za skvělý přístup, metodické pokyny a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této práce.

Obsah

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	viii
1 Úvod do problematiky	1
1.1 Definice základních pojmů	1
1.2 Vymezení řešené oblasti	2
1.3 Motivace práce	2
1.4 Současný stav řešené oblasti	3
1.4.1 Problematika elektronického odpadu	3
1.4.2 Aktuální možnosti separace elektronického odpadu	5
1.4.3 Projekt miniaturních magnetických robotů	8
1.4.4 Neuronové sítě pro rozpoznávání objektů v prostředí MATLAB	11
2 Komponenty pro separaci	14
2.1 Volba komponent pro separaci	14
2.2 Získání komponent pro separaci	16
3 Systém miniaturních magnetických robotů	18
3.1 Využívaná platforma	18
3.2 Miniaturní magnetické roboty	19
3.2.1 Analýza miniaturních magnetických robotů	20
3.2.2 Postupný vývoj separačního robota	22
4 Manuální separace	25
4.1 Systém manuální separace	25
4.2 Testování	25
5 Automatizovaná separace	28
5.1 Neuronová síť	28
5.1.1 Experimentální implementace neuronových sítí	28
5.1.2 Tréninková data	31
5.1.3 Trénování neuronové sítě	33
5.1.4 Výsledky neuronové sítě	33
5.2 Definice tlačících bodů	34
5.3 Plánování separační trajektorie	35
5.4 Aktuace robota	37

5.5	Popis systému automatizované separace	37
5.6	Testování	38
6	Možné směry dalšího vývoje	40
6.1	Vylepšení neuronové sítě	40
6.2	Optimalizace separačních robotů	40
6.3	Přidání zpětné vazby	41
6.4	Kontinuální automatizovaná paralelní separace	42
7	Zhodnocení a závěr	43
	Seznam použité literatury	47

Seznam obrázků

1	Spalování elektronického odpadu v ghanském městě Accra. Převzato z [17].	4
2	Znázornění obvyklých směrů transportu elektronického odpadu. Převzato z [19]. . .	5
3	Princip bubnové separace. Překresleno z [21].	6
4	Princip deskové separace. Překresleno z [21].	7
5	Robot Daisy od společnosti Apple. Převzato z [25].	8
6	Platforma pro ovládání magnetických minirobotů <i>Gryllus</i> ² . Převzato z [12].	9
7	Princip pohybu magnetických minirobotů. Převzato a upraveno z [28].	9
8	Znázornění jednotlivých vrstev neuronové sítě. Převzato z [27].	12
9	Komponenty na CPU k separaci. A) pozlacené piny, B) keramické kondenzátory.	15
10	Kamery (zvýrazněny modře) a čipy (zvýrazněny červeně) na desce plošných spojů mobilního telefonu určené k separaci.	16
11	Získávání komponent pro separaci - piny a kondenzátory CPU. A) CPU v laboratorní komorové peci, B) získání komponent CPU.	17
12	Na obrázcích vlevo: vzorky komponent pro separaci. A) čipy, B) kamery, C) piny, D) kondenzátory. Jednotlivé snímky komponent nejsou v odpovídajícím měřítku. V tabulce vpravo: zjištěná průměrná hmotnost jednotlivých komponent.	17
13	Výsledná platforma s vyrobenou maskou a separačními koši.	19
14	Výchozí verze miniaturního magnetického robota.	20
15	Geometrie řešeného numerického modelu.	21
16	Závislost působící síly na počtu magnetů.	22
17	Tělo robota zhotovené pomocí velkoplošného laserového plotru.	23
18	Vlevo: nástavec vyrobený FFF technologií 3D tisku, vpravo: stejný nástavec se vsazeným robotem výchozí verze.	23
19	Nová generace miniaturních magnetických robotů určených k separaci elektronického odpadu.	24
20	Systém manuální separace.	25
21	Ukázka postupu manuální separace. A) robot vjíždí do komponenty, B) robot tlačí komponentu, C) komponenta byla odseparována, D) robot se vzdaluje od separačního koše.	26
22	Přichycení pinů CPU k robotu během separace.	26
23	Robot <i>Maxi</i> na separační platformě.	27
24	Problematické případy použití YOLO detektoru s rozlišením 227 x 227 px.	31
25	Výsledky detekce snímku pomocí YOLO detektoru s rozlišením 681 x 681 px.	31

26	Vizualizace výsledků detekce objektů pomocí neuronových sítí.	34
27	Vizualizace výsledků algoritmu pro definici tlačících bodů.	35
28	Trajektorie k vykonání (zeleně) a další detekované cesty.	36
29	Systém automatizované separace.	38
30	Ukázka procesu automatizované separace elektronického odpadu. A) detekce objektů pomocí neuronové sítě, B) přidělení separačních košů, C) plánování trajektorie od komponenty do separačního koše, D) vybraná trajektorie od tlačícího bodu robota do separačního koše k vykonání E) probíhající separace.	39
31	Vizualizace funkce KLT trackeru pro sledování pozice robota. Červeně je zobrazena aktuální detekovaná pozice středu robota. Oranžově je zobrazen předchozí postup.	41

Seznam tabulek

1	Příklad matice záměn (confusion matrix).	13
2	Analýza délky trvání detekce jednoho snímku.	29
3	Matice záměn pro všechna testovaná rozlišení YOLO v3.	30
4	Analýza délky trvání detekce pomocí YOLO v3 pro různá rozlišení.	30

1 Úvod do problematiky

Cílem úvodu do problematiky je přehledné vymezení oblasti řešené v této práci na základě definovaných základních pojmů. Dále je zde vysvětleno, proč byla tato práce vytvořena, a je nastíněn výchozí stav řešené oblasti před vypracováním diplomové práce.

1.1 Definice základních pojmů

Elektronický odpad (zkráceně také e-waste nebo WEEE) nemá pevně stanovenou definici. Za elektronický odpad však lze považovat jakákoliv elektrická či elektronická zařízení a součástky, které jsou na konci svého života a byly vyřazeny z provozu. A to ať už z důvodu nefunkčnosti nebo zastaralosti. Z hlediska názvosloví není důležité, zda je vyřazené zařízení patřičně recyklováno či vyhozeno do směsného odpadu. Mezi typické zástupce elektronického odpadu patří komunikační a informační zařízení (např. mobilní telefony) a dále také různé kancelářské i domácí spotřebiče (např. tiskárny či televize) [1] [2].

Pojem *mikroaktuátor* vychází z oblasti mikroinženýrství. Jedná se o zařízení, které přeměňuje elektrickou energii na mechanickou [3]. Samotný mikroaktuátor lze definovat jako mobilní robotický systém, jehož pohyblivý komponent v žádném rozměru nepřesahuje 1 milimetr a zároveň není menší než 1 mikrometr. Jeho mechanika by měla být dominantně závislá na fyzikálních silových účincích. Vzhledem k minimálním rozměrům se využití mikroaktuátorů nabízí v množství nových aplikací, např. neinvazivních operacích v rámci lidského těla [4]. *Robotem* je označován stroj, který pracuje do jisté míry samostatně a předepsaným způsobem vykonává určené úkoly [5]. Miniaturní robot je zmenšenou verzí takového stroje [6].

Hluboké učení (i v českém prostředí často označované jako *Deep Learning*) je jednou z metod strojového učení (anglicky Machine Learning). Poskytuje počítači základní lidskou schopnost učit se na základě příkladů. Deep Learning modely se mohou učit na základě zvukových, textových či obrazových dat. Pro toto učení se využívají specifické struktury - tzv. architektury neuronových sítí. Hluboké učení si získává stále více pozornosti i díky zajímavým aplikacím v automobilovém průmyslu nebo v medicíně [7]. *Neuronové sítě* (někdy také *umělé neuronové sítě*) jsou adaptivní systémy, které je možné učit pomocí propojených uzlů a neuronů ve vrstvené struktuře. Ta může připomínat lidský mozek. Neuronovou síť lze trénovat pro budoucí rozpoznávání vzorců, klasifikaci dat či předpovědi budoucích událostí [8].

1.2 Vymezení řešené oblasti

Hlavním tématem práce je návrh nového systému pro separaci elektronického odpadu. Vypracovaný koncept by měl aktivně využívat miniaturních magnetických robotů vyvíjených na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Tyto miniaturní roboty vznikají spojením několika permanentních magnetů do jednoho pevného těla. Pro polohování robota je využíváno elektromagnetického pole, které je generováno cívkami aktuální desky. Samotné polohování je možné realizovat ve dvou stupních volnosti. Projekt magneticky ovládaných miniaturních robotů je blíže představen v části 1.4.3. Jedním z hlavních úkolů práce je také výběr vhodných separovaných materiálů či komponent z ekonomického hlediska s ohledem na funkční možnosti realizovaného separačního systému.

V programové části práce je cílem vytvoření algoritmů využívajících optické lokalizace pro detekci různých materiálů či komponent. Tyto algoritmy by měly být realizovány pomocí hlubokého učení a neuronových sítí. V závislosti na výstupech těchto algoritmů by měl být následně zvolen vhodný postup separace. Součástí práce je rovněž ověření funkčnosti navrženého konceptu praktickým testováním.

1.3 Motivace práce

Hlavní motivací této práce je návrh nového možného způsobu řešení palčivé problematiky elektronického odpadu. V současné době, pravděpodobně více než kdykoliv jindy, se nejen vědci a výzkumníci zaměřují na udržitelnost. A přestože se to části společnosti nelíbí, recyklace a znovupoužitelnost jsou klíčem k udržitelnosti. Recyklace elektronického odpadu probíhá, stejně jako recyklace skla či plastů, již celá desetiletí. Komerčně je k dispozici několik řešení, která umožňují minimálně částečnou separaci e-waste. Tyto možnosti jsou popsány v části 1.4.2. Nejsou však ideální a zřejmě i díky tomu bylo v roce 2019 celosvětově recyklováno pouhých 20 % světového elektronického odpadu [9].

Problém se bude bohužel pravděpodobně dále prohlubovat díky neúprosnému nárůstu produkováného množství elektronického odpadu. Zatímco v roce 2018 byla jeho produkce 50 milionů tun, v roce 2050 to bude už 120 milionů tun [10]. Velkým problémem je také stále nelegální převážení elektronického odpadu do rozvojových zemí. Zde probíhá velmi neekologická separace cenných materiálů spalováním. Během něho se do okolního ovzduší uvolňují toxické materiály. Ty mají neblahý vliv nejen na místní obyvatele, kteří s elektronikou pracují, ale i na jejich blízké a na unikátní přírodní prostředí v daných lokalitách [11]. Problematika e-waste je blíže popsána v části 1.4.1.

Právě z těchto důvodů je motivací práce navrhnout a prozkoumat nový koncept systému, jenž posune recyklaci elektronického odpadu o krok kupředu. Systému, který zvýší množství recyklovaného elektronického odpadu a přidá další argumenty pro zastavení vývozu odpadu do rozvojových zemí. Tím přispěje k zachování životního prostředí i pro následující generace.

Další motivací práce je možnost podílet se na větším projektu v rámci výzkumného týmu CIMRA, který je tvořen především studenty. Po prvotním vývoji samotného systému miniaturních robotů, který proběhl v minulých letech, se lze nyní zaměřit na potenciální aplikace tohoto systému v praxi. Průkopníkem v této oblasti byl student Vojtěch Lapuník, který se ve své diplomové práci věnoval elektronickým digitálním materiálům a miniaturním robotům [12]. Jeho práce byla pro vznik mé práce značnou inspirací, protože dokázala, že lze pomocí systému minirobotů sestavovat jednotlivé komponenty do jednoho celku. Tato práce je však zadána inverzně, má ověřit, zda lze jednotlivé komponenty od sebe separovat.

Je důležité si uvědomit, že cílem této práce není vývoj finálního komerčního řešení. Primárním cílem je ověření využitelnosti systému magneticky ovládaných miniaturních robotů pro aplikaci separace elektronického odpadu. Až v případě pozitivních výsledků lze uvažovat o možném využívání v reálných podmínkách. I v případě takového výsledku a možného komerčního využití však systém neznamena vítězství v boji s komplexním problémem elektronického odpadu. Vzhledem k funkčním možnostem již vyvinutého systému miniaturních robotů lze totiž uvažovat o praktickém využití především pro velmi vzácné a rozměrem nevelké komponenty. Systém by se však mohl stát jedním ze základních pilířů separace elektronického odpadu, což by mělo samo o sobě obrovský význam.

1.4 Současný stav řešené oblasti

V této části je popsán aktuální stav řešené problematiky elektronického odpadu a možnosti jeho separace. Je zde také představen projekt miniaturních magnetických robotů probíhající na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, o němž se tato práce opírá. Kapitola je zakončena uvedením možností hlubokého učení a neuronových sítí v prostředí MATLAB.

1.4.1 Problematika elektronického odpadu

Problematika elektronického odpadu není nikterak nová. S touto výzvou totiž lidstvo bojuje již od sedmdesátých let minulého století [1]. Velkou nepříjemností, která vyřazená elektronická zařízení provází, je jejich materiálové složení. Kromě kovových částí e-waste (železo, měď, hliník, zlato atd.) totiž obsahuje významné množství toxinů (olovo, rtuť, arsen, kadmium a další). Tyto látky mohou poškodit mozek či způsobit alergickou reakci nebo dokonce rakovinu. Kromě lidského zdraví jsou tyto prvky nebezpečné rovněž pro přírodu a životní prostředí [13]. Elektronický odpad však obsahuje také velmi cenné látky, kterými mohou být například prvky vzácných zemin. Díky celosvětovému nedostatku těchto prvků je vytvářen tlak na těžbu nových zdrojů či kompletní vytěžení stávajících [14]. Tato těžba probíhá převážně v místech s vypjatou politickou situací (Afgánistán, Severní Korea, Čína či post-koloniální africké země). Lidé jsou zde navíc často nuceni pracovat ve velmi špatných podmínkách. Z těchto důvodů pokračují snahy o nalezení alternativních zdrojů [15].

Obrovským problémem do budoucna je neustálý růst celosvětového množství elektronického odpadu. Podle studie vypracované pro Organizaci spojených národů bude nárůst v příštích desetiletích kritický [10]. Je také zajímavé si uvědomit, kolik elektronického odpadu ročně vygeneruje každý z nás a jak se mění naše priority. Zatímco před několika lety docházelo k výměně mobilního telefonu standardně až v případě jeho nefunkčnosti, v současné době nastává výměna v řádu jednotek či desítek měsíců z důvodu postupné modernizace.

Je evidentní, že materiálové složení elektronického odpadu je až příliš významné na to, aby se e-waste neseparoval a nerecykloval. Obzvláště s jeho stále rostoucím množstvím, přičemž tento trend bude pokračovat i v budoucnu. Z toho důvodu se celosvětově rozvíjejí možnosti separace elektronického odpadu, které jsou blíže popsány v části 1.4.2. Tyto možnosti však nejsou dostačující, neboť v současnosti je recyklováno pouze 20 % elektronického odpadu [9].

Vědci a výzkumníci z celého světa pracují na nových metodách pro efektivní a především ekologickou separaci e-wastu. Obzvláště ekologický parametr je totiž klíčový v boji za udržitelnost. Historicky je totiž obrovským problémem přesun odpadu do chudších zemí (převážně afrických, dále jihoasijských či jihoamerických), kde je elektronika separována spalováním místními obyvateli. Ti však ale často vůbec nevědí, jaké látky tímto způsobem uvolňují do ovzduší.

Příkladem, jak to často vypadá, může být hlavní město Accra v západoafrické Ghaně. Toto město se postupně stává největším skladištěm elektronického odpadu na světě. Postup separace je zde jednoduchý - elektronika se zapálí a po roztavení plastů a spojovacích materiálů se odebírá zlato a další cenné materiály. Tento proces je samozřejmě extrémně neekologický a ohrožuje nejen životy a zdraví místních obyvatel, ale rovněž místní přírodu a všeobecný boj za záchranu životního prostředí [16].



Obrázek 1: Spalování elektronického odpadu v ghanském městě Accra. Převzato z [17].

Toto se děje navzdory Basilejské úmluvě - mezinárodní smlouvě, která omezuje transport nebezpečných odpadů. Mezi ty, dle znění zmíněné smlouvy, patří také elektronický odpad. Například v roce 2017 připevnila nezisková organizace Basel Action Network GPS sledovače na celkem 314 vyrazených zařízeních (např. obrazovky, počítače či tiskárny). Bylo zjištěno, že celkem 19 z nich bylo přesunuto do jiného státu, přičemž 11 z nich skončilo v rozvojových zemích

jako je Ghana nebo Nigérie. Těchto 19 exportovaných zařízení dohromady urazilo cestou dlouhou 78408 km, což je nepochybně nepřijatelné [18]. Obvyklé směry transportu jsou znázorněny na Obrázku 2.



Obrázek 2: Znázornění obvyklých směrů transportu elektronického odpadu. Převzato z [19].

Podle statistik z roku 2012 byly největšími světovými producenty e-waste USA (7,1 milionu tun ročně) a Čína (6 milionů tun ročně). Co se týče relativního množství, největším světovým producentem je Norsko, které ročně vyprodukuje 28,3 kg elektronického odpadu na obyvatele. Zato Čína díky velkému počtu obyvatel vyprodukuje ročně v přepočtu pouze 4,4 kilogramu na obyvatele. To je méně, než vyprodukuje třeba Rovnicková Guinea, největší africký relativní producent, pro nějž bylo stanoveno množství 10,8 kg na obyvatele [11].

1.4.2 Aktuální možnosti separace elektronického odpadu

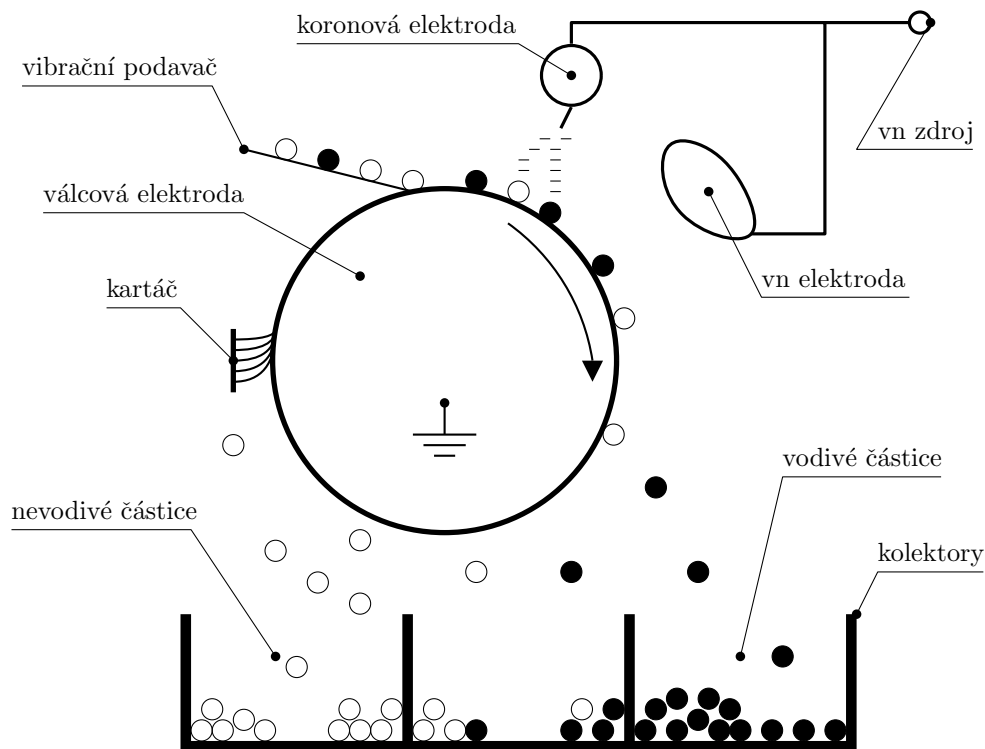
Recyklace elektronického odpadu sestává ze tří základních fází. V první fázi dochází k demontáži elektronického zařízení, které chceme recyklovat. Zde se využívají demontážní zařízení bubnového či tunelového typu, často s využitím ohřevu. Druhá fáze je přípravná a dochází při ní k předzpracování jednotlivých demontovaných částí (např. redukce velikosti frakčními mlýny) a následné separaci. V poslední třetí fázi již může docházet k rafinaci na základní materiál, případně ke znovupoužití funkčních komponent [20]. Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá separací elektronického odpadu, je třeba se blíže zaměřit právě na tuto část. A ačkoliv množství odpadu, který je recyklován, není vysoké, v praxi lze najít několik systémů, které se mechanickou separací elektronického odpadu zabývají.

První možností je tzv. gravitační (někdy také hustotní) separace. Při té jsou separovány materiály na základě jejich relativního pohybu v kapalném nebo vzduchovém médiu. Je zřejmé, že tento typ separace není závislý pouze na hustotě jednotlivých materiálů, ale i na jejich tvaru a velikosti, a samozřejmě na samotném separačním médiu. Touto metodou jsme schopni separovat měď s přesností 76 %, zlato s přesností 83 % a stříbro s přesností 91 %. Tato metoda byla zpočátku využívána výhradně pro separaci částic mědi a postupem času byla nahrazena přede-

vším magnetickou a elektrostatickou metodou. Gravitační separaci je vhodnější zvolit v případě, že rozdíly mezi hustotami jednotlivých separovaných materiálů jsou opravdu výrazné. V rámci této metody však vzniká také množství reziduálního materiálu, který je sám o sobě ekologicky výraznou překážkou [20].

Druhou možností mechanické separace je separace elektrostatická, která je pro elektronický odpad využívána nejčastěji. Touto metodou mohou být od sebe odseparovány kovové a nekovové materiály. V první fázi jsou nabity materiálové částice, které mají být od sebe odděleny. Toto je řešeno bombardováním ionty, vodivostní indukci nebo pomocí triboelektrického jevu, jenž je používán nejčastěji [20]. Tento jev je založen na vzájemném tření (řecky *tribo*) různých typů materiálu, čímž dochází ke vzniku elektrického náboje. Nejčastěji je využíváno bubnových či deskových separátorů [21].

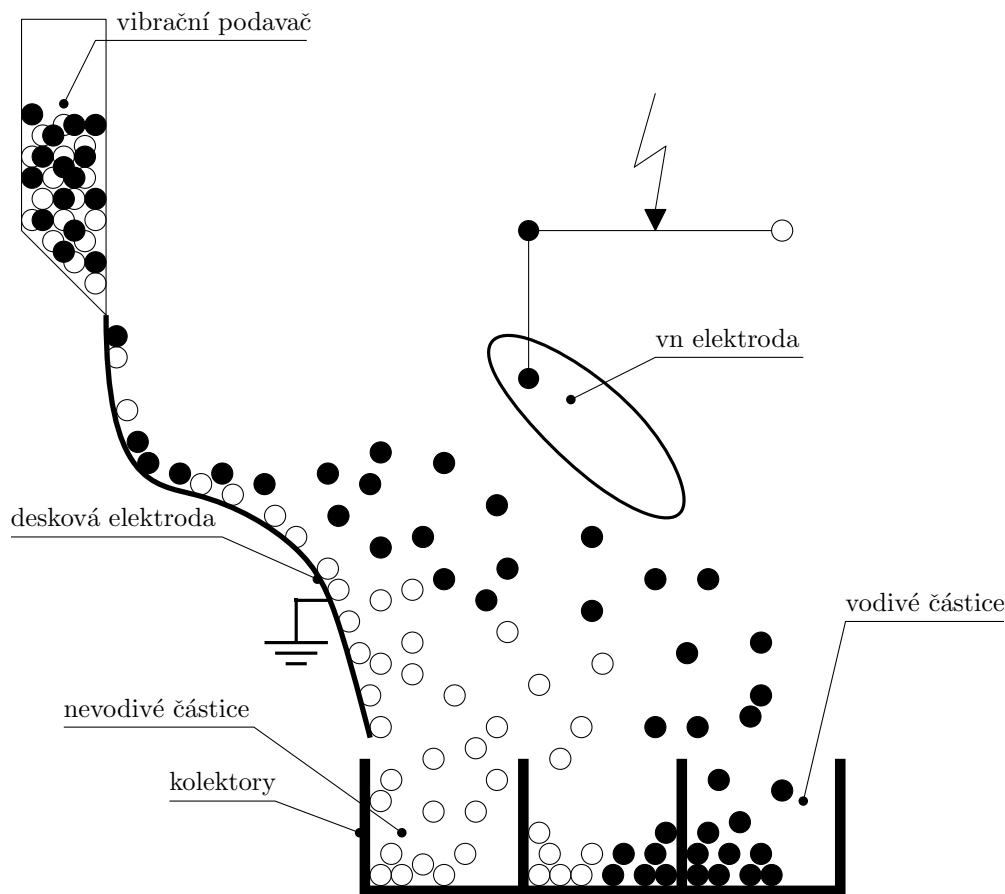
Princip bubnové elektrostatické separace je znázorněn na Obrázku 3. V bubnovém separátoru jsou částice umístěny na uzemněnou rotující válcovou elektrodu, aby byly následně nabity koronovým výbojem, vyvolaným tzv. koronovou elektrodou, jež je napájena vysokým stejnosměrným napětím. Nekovy přilnou díky průchodu elektrickým polem k rotujícímu válci a do kolektorů spadnou až v momentě, kdy je gravitační a odstředivá síla větší než síla elektrická. Případně až po kontaktu s kartáčem. Naproti tomu vodivé částice rychle ztrácejí původní náboj a vlivem působení vysokonapěťové elektrody získají náboj opačné polarity. Následně jsou zachycovány v kolektoru vpravo. Pro efektivnější separaci jednotlivých materiálů může být využito většího počtu kolektorů [20] [21].



Obrázek 3: Princip bubnové separace. Překresleno z [21].

Naproti tomu v deskovém separátoru jsou částice umístěny na uzemněnou elektrodu ve tvaru zahnuté desky. Kovové částice jsou vlivem indukce nabity a následně přitahovány ke vzdálenější

elektrodě (vpravo) díky vysokonapěťové elektrodě. Na nekovové částice působí pouze gravitační síla, a tak vlivem své vlastní hmotnosti padají přímo dolů do kolektoru. Princip deskové elektrostatické separace je znázorněn na Obrázku 4 [20] [21].

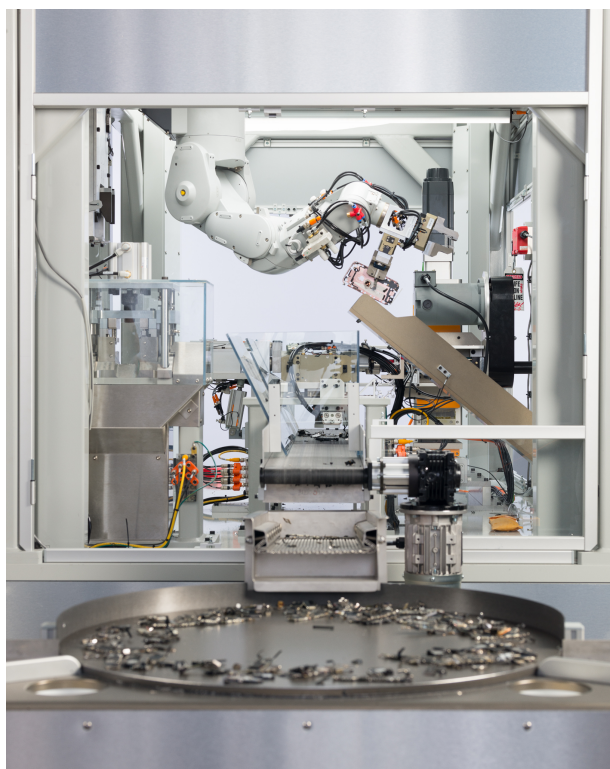


Obrázek 4: Princip deskové separace. Překresleno z [21].

Třetí možností mechanické separace je tzv. magnetická separace. Ta umožňuje oddělovat magnetické a nemagnetické materiály pomocí magnetického pole. Princip takové separace je jednoduchý. Zatímco paramagnetické a feromagnetické materiály jsou k magnetu přitahovány, diamagnetické materiály jsou od magnetu odpuzovány [20].

Výrazně komplexnější a komplikovanější možnosti jsou systémy, které k separaci využívají robotiky. Takové systémy však začínají teprve dobývat oblast separace elektronického odpadu, nicméně v oblasti všeobecné recyklace už je možné některé zástupce najít. Průkopníkem v této oblasti byla nizozemská společnost Bollegraaf, která svůj první recyklační robot představila v roce 2009. Společnost nadále produkuje jednoduché robotické linky, které odpad rozpoznávají pomocí spektroskopie a rozměrů objektů. Dalším příkladem může být finská společnost ZenRobotics. Ta svůj první robot vyvinula v roce 2012 na základě neurorobotického výzkumu na Aalto University. Tento robot detekuje jednotlivé typy materiálů pomocí neuronových sítí a separuje je pomocí robotických rukou [22] [23]. Systém RoCycle je další alternativou vyvinutou na MIT. Ten využívá robotických rukou z teflonu se zabudovanými senzory. Vyvinutá ruka zachytí recyklovaný objekt a stlačením rozezná, zda se jedná o papír, kov či plast [24].

Velmi specifickým řešením je robot společnosti Apple, který se jmenuje Daisy (Obrázek 5). Tento robot byl vyvinut na míru pro demontáž vyřazených mobilních telefonů iPhone. Je schopný za hodinu rozebrat celkem 200 těchto telefonů. Společnost cílí především na znovupoužití vysoce kvalitních materiálů a snaží se rovněž o opětovné použití získaných stále funkčních komponent v rámci jiných zařízení. Přestože tento robot funguje spolehlivě, potřebuje společnost i nadále lidskou sílu k dosažení optimálních výsledků [25].



Obrázek 5: Robot Daisy od společnosti Apple. Převzato z [25].

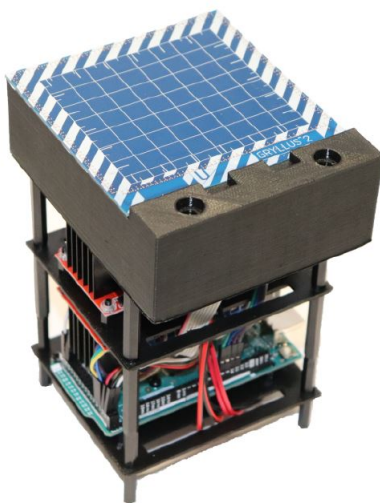
Další velmi slibný recyklační robotický systémem vyvíjí v současné době americká společnost AMP Robotics. Tato společnost využívá pro detekci umělé inteligence, konkrétně metodu počítačového vidění (computer vision). Pomocí této metody je schopna rozpoznávat celou řadu možných odpadů. Na základě definice jednotlivých typů materiálu je možné pneumatickou robotickou rukou manipulovat za účelem jejich separace [23].

1.4.3 Projekt miniaturních magnetických robotů

Tato diplomová práce navazuje na vývoj v oblasti miniaturních magnetických robotů prováděný na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Konkrétně tento vývoj probíhá již několik let na Katedře elektrotechniky a počítačového modelování. Vyvíjená technologie staví své působení na cíleném ovládní miniaturních magnetických robotů pomocí vnějšího magnetického pole.

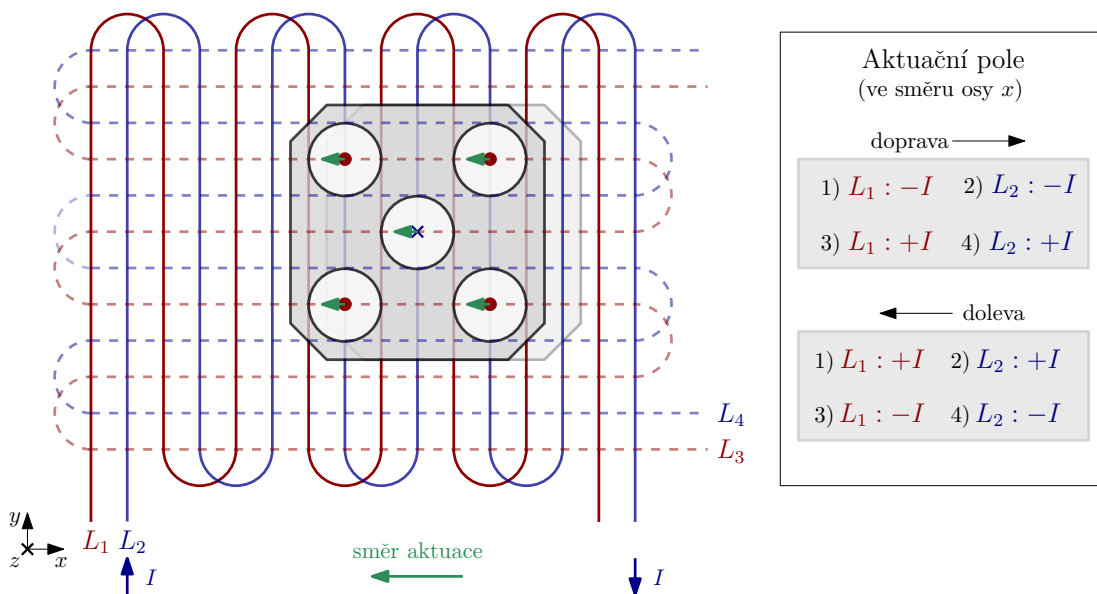
Platforma umožňující pohyb robota v ploše je zobrazena na Obrázku 6. Robot se může pohybovat po modré desce o rozměrech 100 x 100 mm v horní části platformy. V této desce se nachází

system koplanárních cívek. Plastová konstrukce pod modrou plochou nese řídicí jednotku, desku plošného spoje s mikroprocesorem a spínací prvky [12].



Obrázek 6: Platforma pro ovládání magnetických minirobotů *Gryllus²*. Převzato z [12].

Využívaný princip pohybu robota po platformě je znázorněn na Obrázku 7. Zobrazen je robot osazený pěti válcovými permanentními magnety. Průměr každého z nich je 1 mm a výška také 1 mm. Tečka či křížek v každém z magnetů znázorňuje orientaci magnetické indukce. Pohybu tohoto robota je docíleno pomocí dvou vrstev koplanárních cívek (označených jako $L_1 - L_4$). Tyto cívky je možno postupně spínat v čase, a tím vytvářet proměnlivé magnetické pole. Rozteč závitů každé z cívek je vždy 1 mm a posun vůči druhé koplanární cívice je 0,5 mm. Tyto parametry určují optimální vzájemnou polohu a orientaci permanentních magnetů v těle využívaného robota. Pro ideální využití musejí být magnety stejné polaroty umístěny ve vzdálenosti 2 mm ve směru osy x s nulovým posunem ve směru osy y nebo naopak s nulovým posunem ve směru osy x a ve vzdálenosti 2 mm ve směru osy y [26] [27].



Obrázek 7: Princip pohybu magnetických minirobotů. Převzato a upraveno z [28].

Vlastní pohyb robota (např. doleva ve směru osy x) je vyvolán správnou sekvencí spínání cívek. Nejprve dojde k sepnutí první cívky L_1 kladně. Cívka L_1 je zvolena pro počáteční napájení proto, že jsou magnety robota umístěny právě nad touto cívkou. Díky silovému účinku magnetického pole se robot posune o 0,5 mm doleva a pozice magnetů je nyní přímo nad cívkou L_2 . Tento posun je znázorněn na Obrázku 7. Následuje kladné sepnutí cívky L_2 . Tím se robot opět posouvá v daném směru o 0,5 mm a je nyní opět v pozici nad cívkou L_1 . Po následném sepnutí cívky L_1 záporně se robot znovu posouvá směrem doleva. Posledním krokem této sekvence je záporné sepnutí cívky L_2 . Pokud s robotem poté chceme nadále pohybovat doleva ve směru osy x , budeme opakovat tuto sekvenci. Inverzním opakováním této sekvence bude docíleno pohybu opačným směrem. Ekvivalentně je zajištěn pohyb ve směru osy y . Cívky L_1 a L_2 zajišťují pohyb robota ve směru osy x , zatímco cívky L_3 a L_4 ve směru osy y v rámci popisovaného obrázku [28].

V rámci postupného vývoje bylo vytvořeno hned několik robotických platform, přičemž každá z nových generací vždy představila nějakou novou funkcionalitu. Možný směr pro tento výzkum nastínily prototypy *MagSnail* a *MagStriver*. *MagSnail* byl schopen operovat s jedním stupněm volnosti. *MagStriver* již disponoval systémem koplanárních cívek, což umožnilo pohyb robotů se dvěma stupni volnosti, tedy ve 2D prostoru. Zmíněné prototypy sloužily především k ověření principů a funkčnosti dané technologie. Přesto se již v tomto bodě vývoje začalo uvažovat o průmyslovém využití pro separaci elektronického či jiného odpadu [6]. První vyrobenou funkční platformou, která již disponovala standardizovanými rozměry popsány výše, byla platforma *Scarabeus*. Kromě rozměrů pracovní plochy došlo rovněž k optimalizaci poměru šířky vodiče ku šířce izolační mezery. Tato platforma, stejně jako její předchůdce *MagStriver*, umožňovala pohyb ve dvou stupních volnosti díky použitému systému koplanárních cívek. Tento základní princip však neumožňuje vzájemně nezávislé paralelní polohování většího počtu robotů, jelikož napájením dané cívky dojde k aktivaci celé platformy [29] [30].

Popsaný nedostatek částečně vyřešila následující platforma nesoucí název *Isoptera*. Její pracovní plocha byla totiž rozdělena na 4 stejně velké segmenty, z nichž každý disponuje vlastním systémem koplanárních cívek. V každé z těchto částí je tedy možné s robotem pohybovat jiným způsobem. Tento prototyp sloužil především k ověření možnosti přejezdů robota mezi různými segmenty. Na další úroveň technologii posunuly platformy *Gryllus 1* a *Gryllus 2* využívající superpozice více magnetických polí. Pod původní systém koplanárních cívek byly umístěny tzv. umrtvovací cívky. Pokud touto cívkou protéká elektrický proud, je současně vytvořeno odpovídající magnetické pole, které může být opačné k magnetickému poli vyvolanému ovládací koplanární cívkou. Díky tomu lze v konkrétních místech platformy kompletně potlačit silové účinky magnetického pole a robota tedy zastavit. Zásadní nevýhodou tohoto způsobu paralelního polohování robotů je nutnost počáteční definice dále již neměnných pozic umrtvovacích oblastí, na základě které je platforma vyrobena. Dále tedy již není možné umrtvovací oblasti dynamicky přizpůsobit realizované aplikaci. Pro následující platformou *Gryllus²* bylo proto navrženo tzv. paralelně selektivní ovládání umožňující dynamický výběr umrtvovací oblasti. I zde je využíváno principu superpozice magnetických polí cívek, avšak předchozí technika byla dále zdokonalena. Umrtvovací oblasti jsou zde předdefinovány návrhem a následnou výrobou desky, ale zapínají se pomocí různých kombinací proudů do jednotlivých ovládacích i umrtvovacích koplanárních cívek. Díky tomu je možné přizpůsobovat pozice umrtvovacích oblastí aktuálním potřebám [26] [28].

Pokročilé řízení je možné realizovat pomocí připojeného počítače a uživatelského rozhraní *MagNet*. Jedná se o aplikaci navrženou a fungující v prostředí MATLAB. Tato aplikace zprostředkovává uživateli možnost řízení jednotlivých platforem a ovládání zdroje napětí a proudu. Díky této aplikaci lze také roboty pohybovat s využitím počítačové myši, klávesnice nebo připojeného gamepadu. V neposlední řadě aplikace obsahuje také tři algoritmy pro plánování trajektorie v ploše. Dijkstrův algoritmus je vhodný pro komplikovaná uspořádání, vždy nalezne optimální cestu, avšak s výrazně delší dobou výpočtu. Greedyho algoritmus je naopak vyhovující pro jednoduchá zadání, pro která je schopný nalézt optimální cestu za výrazně kratší dobu. U složitějších uspořádání však jím nalezená trasa často není tou ideální. Kompromisem může být A* algoritmus, který je prakticky kombinací Dijkstrova a Greedyho algoritmu. Aplikace *MagNet* společně s analýzou a následným zpracováním algoritmů je výsledkem bakalářské práce Jiřího Šedivce [31].

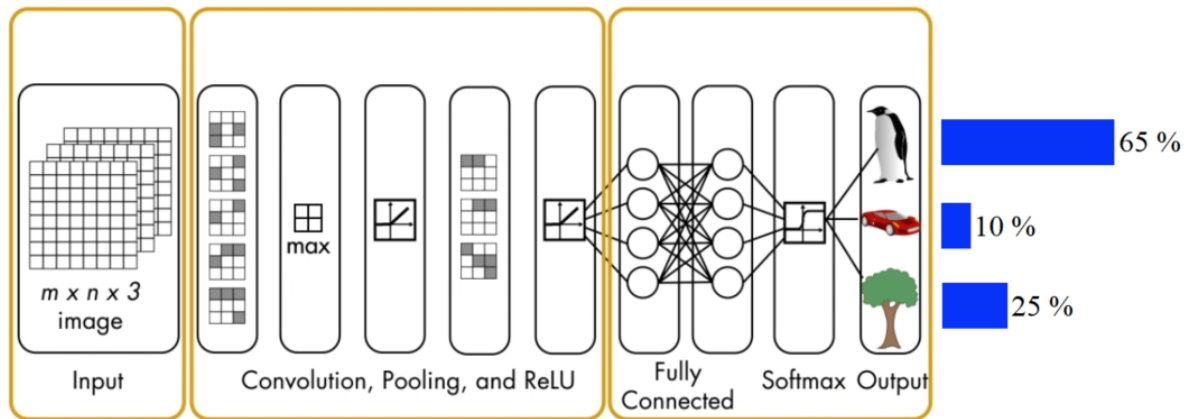
1.4.4 Neuronové sítě pro rozpoznávání objektů v prostředí MATLAB

Témata hlubokého učení a neuronových sítí v posledních několika letech silně rezonují odbornou i laickou společností. Neuronové sítě jsou již využívány i v těch nejkritičtějších a nejzranitelnějších částech našich životů. Příkladem může být veřejná a osobní doprava či medicína. Význam používání neuronových sítí pro účely rozpoznání obrazu staví na rychlém a spolehlivém určení objektu vyskytujícího se v daném obrázku. Výsledná síť může rozpoznávat pouze jeden typ objektu (tzv. single-class, kupříkladu objekty třídy pes) nebo větší počet různých typů objektů (tzv. multi-class, kupříkladu třídy pes a kočka). Pro zjednodušení je možné využít již dostupných předtrénovaných neuronových sítí nebo si kompletně vytvořit vlastní síť dle požadavků.

Vývojové prostředí MATLAB nabízí využití principů Deep Learning a neuronových sítí. Pro správnou funkci je nutné získat rozšíření Deep Learning Toolbox a Computer Vision Toolbox. K těmto technikám nabízí společnost MathWorks také online proškolení - základní Deep Learning Onramp [32] a pokročilé Deep Learning with Matlab [33]. Tato školení jsou základem pro následující část popisující funkcionalitu neuronových sítí v prostředí MATLAB.

Architektura neuronových sítí sestává z několika samostatných vrstev, které mohou být rozděleny do tří hlavních částí. Vstupní část je tvořena pouze jednou, velmi specifickou vrstvou Image Input Layer. Tato vrstva zajišťuje kontrolu vstupního obrázku a v případě, že je vše v pořádku, jej posouvá do další části. Druhá část již sestává z většího množství různých vrstev - Convolutional Layer, ReLU Layer a Pooling Layer. Tyto vrstvy poskytují praktický základ pro rozpoznávání obrazu. Na vstupní data jsou zde aplikovány různé filtry o různých velikostech. Pomocí těchto filtrů jsou detekovány významné rysy detekovaných tříd potenciálně se vyskytující v obrázku. Počet jednotlivých vrstev je v této části individuální pro každou síť. Propojení daných vrstev může být značně komplikované v případech, kdy používáme komplexní síť. Poslední část sítě sestává z Fully Connected Layer, Softmax Layer a Output Layer. Tyto vrstvy již zajišťují odpovídající výstup dané sítě. Uživatel získává pravděpodobnost (skóre) správné predikce pro každou z možných tříd. Čím vyšší je tato pravděpodobnost, tím jistější si neuronová síť správností své predikce je.

Vizualizace jednotlivých vrstev základní neuronové sítě je znázorněna na Obrázku 8.



Obrázek 8: Znázornění jednotlivých vrstev neuronové sítě. Převzato z [27].

Jak již bylo zmíněno, propojení jednotlivých vrstev mohou být pro jednotlivé sítě více či méně komplexní a složité. Pro rozpoznávání obrazu se využívá několika různých detektorů využívajících neuronových sítí:

- Konvoluční neuronová síť (CNN). Jedná se o nejjednodušší možné využití klasických konvolučních neuronových sítí, které obvykle není vhodné pro samostatné využití v komplikovanějších aplikacích. Jako takové je však ideální volbou pro jednoduché rozpoznání jednoho objektu v daném obrázku.
- Regiony s konvoluční neuronovou sítí (R-CNN). Tato možnost staví na jednoduchosti CNN, ale je výrazně komplexnější. Je již využíváno ohraničujících boxů (tzv. bounding boxů) pro praktickou detekci několika objektů v rámci jednoho obrázku. Jedná se o dvoustupňovou metodu detekce. V první fázi je provedena segmentace obrázku na jednotlivé regiony, ve druhé fázi je pak využito funkce neuronové sítě v určených regionech. Postupem času byly vytvořeny další generace tohoto algoritmu vylepšující jeho rychlost - Rychlé R-CNN a Rychlejší R-CNN.
- You Only Look Once detektor objektů (YOLO). Jak již název napovídá, jedná se o jednostupňovou metodu detekce objektů. V porovnání s předchozí dvoustupňovou metodou by tedy měl být tento algoritmus výrazně rychlejší. YOLO detektor využívá opět neuronové sítě, která pro vstupní obrázek poskytne predikce. Ty následně algoritmus dekóduje a na jejich základě vytvoří ohraničující boxy. Také zde se tedy využívá bounding boxů pro detekci několika objektů v rámci jednoho obrázku. Postupným vývojem bylo dosaženo několika dalších verzí YOLO detektoru, které lze v prostředí MATLAB využívat.

Jednou z nejdůležitějších součástí pro vytváření neuronových sítí je kvalitní dataset. Dataset představuje tréninková data, na jejichž základě bude neuronová síť učena. Obsahuje množinu obrázků, pro které platí určitá pravidla. Všechny obrázky v jednom konkrétním datasetu musejí být stejné požadované velikosti. Je možné využívat jak barevné, tak černobílé obrázky. Nicméně v rámci jednoho datasetu musí být opět zvolena pouze jedna z těchto možností, nikoliv jejich kombinace. Toto je kontrolováno na vstupu vrstvou Image Input Layer.

Dataset by měl být dostatečně rozmanitý. Během učení detektoru je třeba neuronovou síť seznámit s co nejširší škálou možných situací, které mohou v rámci detekce obrázku nastat. Detektor není třeba trénovat velkým množstvím stejných či velmi podobných tréninkových obrázků, naopak je to spíše kontraproduktivní. Může tím dojít k chybám způsobeným tzv. *overfittingem*, kdy je síť nadměrně uzpůsobena pro rozpoznávání určitého jevu či scény. Vlivem toho není poté schopna rozpoznávat jevy odlišné. Ještě před zahájením učení sítě je obvykle dataset rozdělen na dvě části. Jedna z nich je následně využita pro samotné trénování neuronové sítě, zatímco druhá pro možné automatizované vyhodnocení spolehlivosti výsledného detektoru. Ve chvíli, kdy je definována architektura neuronové sítě a vytvořen odpovídající dataset, je možné zahájit postupné trénování detektoru.

Jak bylo zmíněno výše, na závěr procesu učení neuronové sítě je vhodné vykonat vyhodnocení funkčnosti výsledné sítě. Jednou z nejjednodušších a současně nejčastěji používaných metod je tvorba tzv. matice záměn (*confusion matrix*). Příklad takové matice je znázorněn v Tabulce 1. Tato matice zobrazuje počty správně a nesprávně detekovaných objektů pro každou z detekovaných tříd. Matice záměn je často využívána z důvodu její přehlednosti a jednoduchosti. Samotné prostředí MATLAB disponuje metodou *confusionmat*, která matici záměn vytvoří.

Tabulka 1: Příklad matice záměn (*confusion matrix*).

n = 100	Predikce: pes	Predikce: kočka
Skutečnost: pes	40	10
Skutečnost: kočka	5	45

Pro neuronové sítě využívající funkce ohraničujících boxů je také vhodné vyhodnocovat poměry překrytí bounding boxů předpokládaných a těch detekovaných natrénovaným detektorem. MATLAB pro toto vyhodnocení disponuje metodou *boxOverlapratio*, která přímo poskytuje výsledek tohoto porovnání pro dané dva boxy.

2 Komponenty pro separaci

Pro správný návrh a realizaci separačního systému bylo nutné znát výchozí komponenty, které by měl být systém schopný odseparovat. Zároveň byla jedním z cílů této práce volba vhodných komponent elektronického odpadu pro separaci zadaným způsobem. V této kapitole je proto diskutována právě volba komponent elektronického odpadu a následně jsou popsány postupy pro jejich získání.

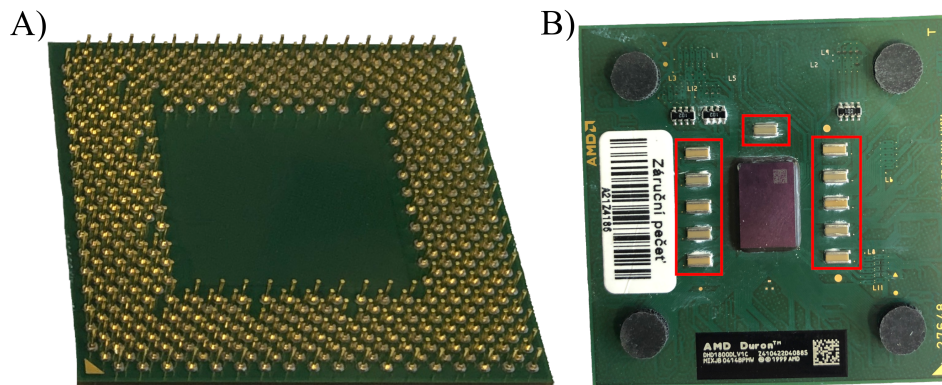
2.1 Volba komponent pro separaci

Jedním z prvních důležitých rozhodnutí v této práci byla volba vhodných komponent pro separaci pomocí miniaturních magnetických robotů. Tato volba musela být vykonána s přihlédnutím ke dvěma základním faktorům. Prvním byl faktor funkční. Zvolené komponenty musejí být separovatelné pomocí dostupného minirobotického systému. Zde by měly být uvažovány především základní fyzikální vlastnosti jednotlivých komponent, případně jejich materiálové složení. Druhým z faktorů byl faktor ekonomický. Zde bylo třeba zohlednit ekonomický přínos separace zvolených komponent. Pomocí minirobotického systému totiž nelze separovat příliš velké množství elektronického odpadu. Ani s výrazně optimalizovaným systémem nelze dosahovat takových objemů, s jakými se pracuje kupříkladu u elektrostatické separace. Z toho důvodu je nutné se zaměřit především na separaci hodnotnějších komponent pro maximalizaci zisku z provozu separačního systému. Právě potenciální ziskovost by totiž byla rozhodující pro případnou možnost budoucího komerčního využití.

Přístup k výběru vhodných komponent pro separaci se může lišit. Je možné se zaměřit na získávání specifických materiálů obsažených v daných komponentách. V takovém případě by musela být odseparovaná komponenta dále zpracovávána až do získání čistého cílového materiálu. Ten by následně mohl být znovu využit v některé z dalších aplikací. Druhou možností je zaměřit úsilí na získávání konkrétních komponent. Ty by po separaci mohly být po drobné údržbě znovu využity v původní podobě.

V první fázi byl výběr zaměřen na materiály obsažené v jednotlivých komponentách. Logickou volbou materiálu, který by bylo ekonomicky zajímavé získávat, bylo zlato. To se řadí mezi drahé kovy a jeho separace tedy naplňuje požadovaný ekonomický faktor. Zlato je navíc diamagnetický materiál, což je pro využívaný princip vhodné. Je obsaženo v deskách plošných spojů nebo v procesorech (CPU) [34]. Pro jednoduchost prvotních experimentů byly jako vhodné komponenty zvoleny piny CPU. Přestože nejsou kompletně zlaté, jsou pokryty vrstvou ryzího zlata. Z toho důvodu by bylo pro získání čistého zlata nutno odseparované piny dále zpracovat. Piny CPU k separaci jsou zobrazeny na Obrázku 9A.

Alternativními komponentami (tedy těmi, od kterých bude třeba piny oddělovat) byly zvoleny keramické kondenzátory využívané rovněž na CPU. Kondenzátory byly pro separaci vybrány právě díky umístění na stejném zařízení jako piny, tedy na CPU. Tato volba byla provedena s cílem značného zjednodušení a zrychlení postupu pro získávání komponent. Kondenzátory CPU k separaci jsou zobrazeny na Obrázku 9B.



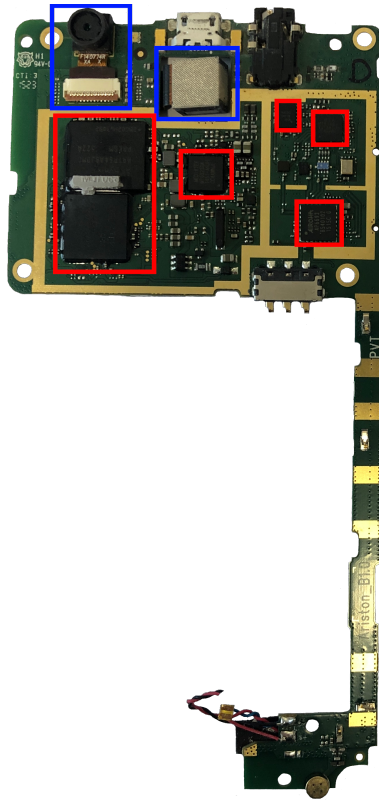
Obrázek 9: Komponenty na CPU k separaci. A) pozlacené piny, B) keramické kondenzátory.

Velmi zajímavě se jevila také možnost separace prvků vzácných zemin. Jejich těžba je velmi náročná, navíc z větší části probíhá v nestabilních regionech. Dostupný systém pro separaci takových materiálů by tedy byl velkým přínosem. Přes takřka ukázkový případ z pohledu ekonomického byla tato možnost zavržena z důvodů funkčních. Vzácné zeminy totiž mají výjimečně dobré magnetické vlastnosti. Magnetické roboty by tím pádem měly problémy s takovými materiály pracovat, ačkoliv by se obvykle jednalo o relativně malé množství těchto materiálů [35] [36].

Ve druhé fázi práce byl přístup k výběru komponent změněn. Primárním cílem se stala separace elektronického odpadu za účelem opětovného využití samotných odseparovaných komponent. K této změně došlo po konzultacích s experty v oboru. První konzultace byla vedena s prof. Ing. Vladimírem Kočím, Ph.D., MBA [37]. Profesor Kočí je odborníkem na posuzování životního cyklu a mimo jiné se zaměřuje také na problematiku elektronického odpadu. Již z této konzultace vyplynulo, že řešením vymezené problematiky nemůže být separace za účelem recyklace základních materiálů. Důvodem je výrazné zdržení, ke kterému by docházelo při následném zpracovávání odseparovaných komponent vedoucím k získání čistého materiálu. Smysl by separace získala až ve chvíli, kdy by na jejím výstupu byly takové komponenty, jež by bylo možné bez většího úsilí znovu využít v nových výrobcích.

Druhá konzultace byla uskutečněna s RNDr. Milošem Polákem, Ph.D, který disponuje expertními znalostmi v oblasti elektronického odpadu a životního prostředí [38]. Je také zakladatelem neziskové společnosti Remobil, z.s. Tato společnost se dlouhodobě snaží o sběr vyřazených mobilních telefonů a jejich následnou efektivní recyklaci [39]. Výstup z této konzultace byl klíčovým pro následnou volbu konkrétních separovaných komponent. Bylo dojednáno, že komponenty budou pro prvotní testování získány z mobilních telefonů od společnosti Remobil. Opět byly vybrány dvě základní komponenty, které od sebe budou separovány. První z nich byly čipy. Současné mobilní telefony obsahují velmi výkonné čipy, které jsou po vyřazení daných telefonů z provozu stále využitelné, a to především v jednodušších aplikacích. Zvolení čipu jako jedné ze základních kom-

ponent bylo dále umocněno akutním nedostatkem čipů v elektronice a automobilovém průmyslu, který by měl pokračovat i v následujících letech [40] [41] [42]. Alternativní komponentou byla zvolena kamera mobilního telefonu. I ta může totiž být v případě správné manipulace opětovně využita v dalších aplikacích. Kamery a čipy na desce plošných spojů mobilního telefonu jsou zobrazeny na Obrázku 10.

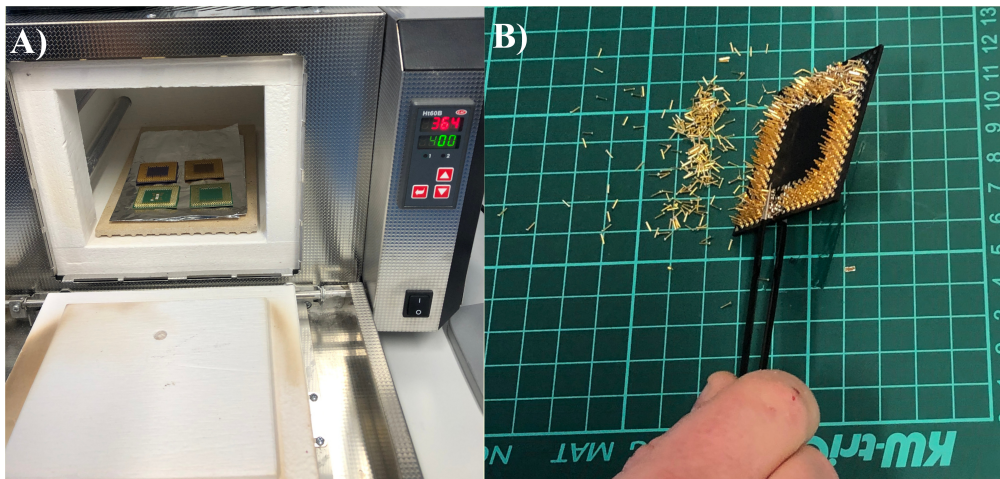


Obrázek 10: Kamery (zvýrazněny modře) a čipy (zvýrazněny červeně) na desce plošných spojů mobilního telefonu určené k separaci.

2.2 Získání komponent pro separaci

Po prvotním výběru vhodných komponent pro separaci bylo nutné dané komponenty získat. Primárním důvodem k tomu byla nutnost zajištění testovacího materiálu pro pokročilejší fáze práce. Sekundárním důvodem pak bylo ověření možností a posouzení náročnosti získávání zvolených komponent.

Pro komponenty zvolené v první fázi práce - pozlacené piny a kondenzátory CPU - je postup jejich získání následující. Z vybraných procesorů byly nejprve ručně odstraněny přilepené plastové a papírové části, které není z praktických důvodů vhodné vystavovat vysokým teplotám. Poté byla laboratorní komorová pec předehřáta na teplotu 365 °C. Následně byly procesory vloženy do této pece. Tento stav je zobrazen v části A) Obrázku 11. Pec byla uzavřena a po několika desítkách vteřin byly procesory z pece vyjmuty pinzetou. Pouze lehké poklepání o podložku pak stačilo k oddělení požadovaných komponent od povrchu desky procesoru. Toto je zobrazeno v části B) Obrázku 11.



Obrázek 11: Získávání komponent pro separaci - piny a kondenzátory CPU. A) CPU v laboratorní komorové peci, B) získání komponent CPU.

Pro komponenty zvolené ve druhé fázi práce - čipy a kamery mobilních telefonů - byl postup jejich získání následující. V první fázi došlo k ruční demontáži mobilních telefonů získaných od společnosti Remobil. Byly odstraněny kryty, displej, baterie a další mechanicky odjímatelné komponenty. Mezi ty patřily i první z vybraných komponent - kamery. Dále bylo možné vyjmout reproduktory, mikrofony či různé konektory. Na výstupu manuální demontáže telefonu zbyla již pouze základová deska s několika čipy a množstvím dalších komponent. Další postup je obdobný s tím pro získání pinů a kondenzátorů z CPU. Nejprve byly z desky telefonu opět odstraněny plastové a papírové části. Poté bylo rovněž využito laboratorní komorové pece, ve které byla deska vystavena několik desítek vteřin teplotě 365 °C. Obvykle pak pro získání jednotlivých komponent ze základové desky opět stačilo pouze lehké poklepání touto deskou o podložku.

Jako vhodné komponenty pro separaci byly tedy zvoleny a následně také získány pozlacené piny a kondenzátory CPU z důvodu obsahu konkrétního materiálu. Dalšími zvolenými a získanými komponentami jsou kamery a čipy z mobilních telefonů z důvodu jednoduchého znovupoužití. V průběhu výše popsaných procesů se dále ověřilo poměrně jednoduché získávání jednotlivých komponent, které by se v případě možného komerčního využití zajisté dalo automatizovat. Vzorky komponent pro separaci a jejich zjištěná hmotnost jsou zobrazeny na Obrázku 12.



Obrázek 12: Na obrázcích vlevo: vzorky komponent pro separaci. A) čipy, B) kamery, C) piny, D) kondenzátory. Jednotlivé snímky komponent nejsou v odpovídajícím měřítku. V tabulce vpravo: zjištěná průměrná hmotnost jednotlivých komponent.

3 Systém miniaturních magnetických robotů

Klíčovými prvky pro navržený separační systém jsou miniaturní magnetické roboty, které samotnou separaci zajišťují, a platforma, jež umožňuje těmito roboty pohybovat. Tyto dvě základní části separačního systému budou popsány v této kapitole.

3.1 Využívaná platforma

Pro fáze návrhu a následného testování realizovaného řešení bylo nejprve třeba vybrat vhodnou platformu. Výběr byl prováděn z platformem využívajících standardizované rozměry a byl velmi zjednodušen několika skutečnostmi. Platformu *Scarabeus* nebylo možné využít kvůli jejímu mechanickému poškození v rámci předchozího vývoje. *Isoptera* není pro náročnější aplikace vhodná z důvodu členění na čtyři segmenty, což není ideální pro časté přejezdy robotů. Z toho důvodu byly při výběru uvažovány pouze platformy *Gryllus*. Vybranou nejvhodnější platformou je *Gryllus*². Jedná se o nejpokročilejší platformu bez znatelného mechanického poškození. Technologie využívaná platformou byla blíže popsána v části 1.4.3.

Pro účely této práce není potřeba využívat všech možností, které *Gryllus*² nabízí. V aktuální fázi separace elektronického odpadu bude totiž využíván v daný moment vždy pouze jeden robot. Právě z důvodu absence paralelního polohování více robotů není nutné aktivovat žádné umrtvovací zóny. V rámci budoucího vývoje však *Gryllus*² nabízí ze standardizovaných platformem nejpokročilejší možnosti paralelní separace elektronického odpadu.

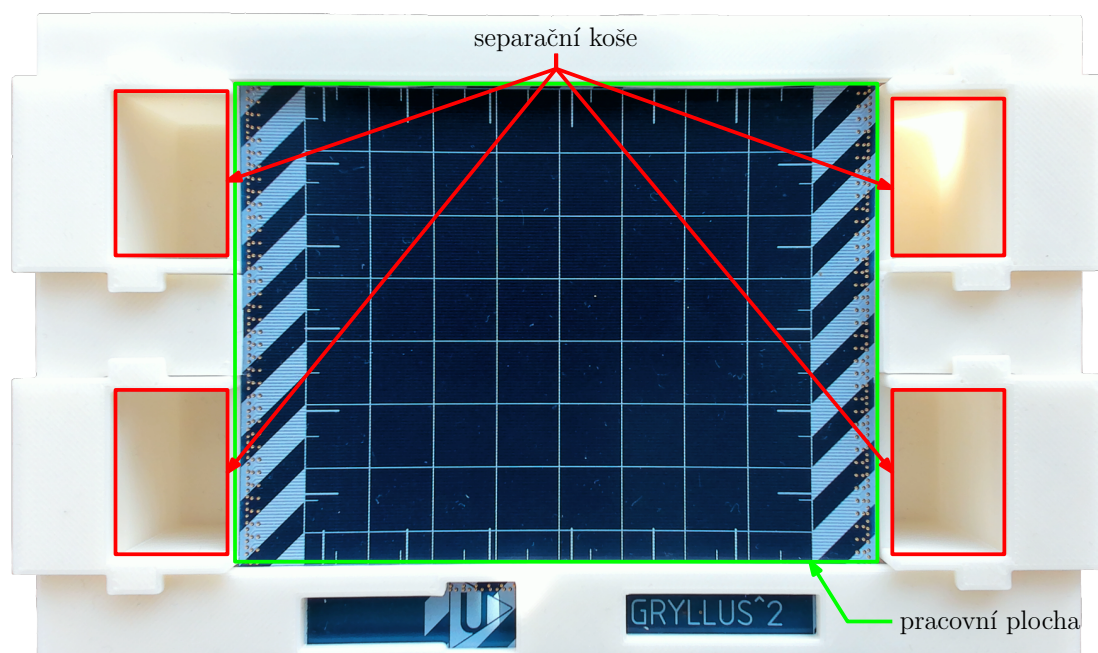
V programu SolidWorks byla na vybranou platformu *Gryllus*² navržena maska. Ta se po výrobě umístí na horní část platformy. Disponuje čtyřmi otvory, do nichž lze vložit separační koše. Do těchto košů může robot cíleně separovat jednotlivé komponenty elektronického odpadu. Do každého z košů by měly být separovány pouze ty komponenty, které uživatel v úvodu separačního procesu zvolí. Tvar separačních košů byl v průběhu práce několikrát optimalizován pro bezproblémovou funkci. Jejich stabilitu zajišťuje několik opěrných bodů v horní části koše. Na konci separace je možné koše z masky jednoduše vysunout a vysypat jejich obsah. Rozměry byly zvoleny s přihlédnutím k velikosti separačního robota a jím separovaných komponent. Vnitřní rozměry koše jsou 25,50 x 15,50 x 28 mm.

Otvory v masce pro vložení separačních košů byly umístěny na dvě protilehlé strany platformy. Důvodem tohoto umístění bylo akutální využití pouze jednoho separačního robota. Ten byl zhotoven ve tvaru písmene "H" (bude diskutováno v části 3.2), což mu v praxi umožňuje separovat pouze dvěma směry. Robot se totiž nemůže na platformě otáčet. Bude-li však v rámci budoucího vývoje přidána možnost paralelní separace větším počtem robotů, bude možné na platformu

přidat druhého robota pootočeného o 90° a vést separaci také zbylými dvěma možnými směry. Tato konfigurace by umožnila přidat separační koše taktéž do čela platformy.

I z těchto důvodů byla pro výrobu masky a separačních košů zvolena FFF (Fused Filament Fabrication) technologie 3D tisku. Ta spočívá v postupném nanášení roztaveného materiálu v tenkých vrstvách. Jedná se o výrobní metodu, která v případě potřeby umožní změnu podoby daných prototypů ve velmi krátkém čase. Pro samotný tisk byl využit světlý filament PLA. Světlá barva filamentu byla zvolena cíleně. Je díky ní možné v separačních koších jednoznačně rozpoznat odseparované komponenty. Tato možnost výrazně urychlí kontrolu výsledků separace a přispěje k její názornosti.

Navržené a vyrobené mechanické součásti mají za úkol udělat separaci vizuálně pochopitelnější pro běžného uživatele. Dalším důvodem pro využití separačních košů je rychlé a jednoznačné určení správného či chybného výsledku separace. V neposlední řadě je zhotovenou maskou a separačními koši ohraničena pracovní plocha, ve které může robot provádět separaci. Výsledná platforma je zobrazena na Obrázku 13. V rámci budoucího vývoje lze platformu rozšířit o dopravníky zajišťující nepřetržitý přísun komponent elektronického odpadu na pracovní plochu.

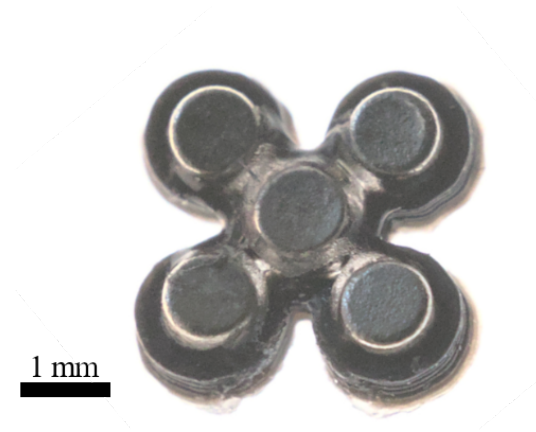


Obrázek 13: Výsledná platforma s vyrobenou maskou a separačními koši.

3.2 Miniaturní magnetické roboty

Miniaturní magnetické roboty zajišťují praktickou separaci jednotlivých komponent. Toho je docíleno odtačením těchto komponent do zvolených separačních košů. Výchozím bodem vývoje separačních robotů byla verze robota osazeného pěti permanentními magnety, která byla popsána v rámci prezentace článku [43]. Pro účely pochopení daného konceptu a inspirace bylo tělo této verze robota vyrobeno FFF technologií z materiálu PLA. Následně bylo osazeno pěti válcovými neodymovými magnety (o průměru 1 mm a výšce 0,5 mm) přesně tak, jak bylo pro výchozí verzi

uvedeno. Vyhotovená výchozí verze robota je zobrazena na Obrázku 14.



Obrázek 14: Výchozí verze miniaturního magnetického robota.

3.2.1 Analýza miniaturních magnetických robotů

Před samotným návrhem separačních robotů byla provedena numerická simulace za účelem analýzy působení magnetického pole. Při matematickém odvození řešeného modelu vycházíme z Ampérova zákona v diferenciálním tvaru

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole a \mathbf{J} je proudová hustota. Intenzitu magnetického pole lze také vyjádřit pomocí magnetické indukce a získáme rovnici ve tvaru

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \mathbf{B} = \mathbf{J}, \quad (2)$$

kde μ značí permeabilitu a \mathbf{B} magnetickou indukci. Zavedeme vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} rovnicí

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (3)$$

a jeho dosazením do rovnice (2) získáme parciální diferenciální rovnici ve tvaru

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{J}, \quad (4)$$

kterou dále doplníme o okrajové podmínky

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_0; -\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n_0} = K_0, \quad (5)$$

kde K_0 představuje povrchovou proudovou hustotu, jež protéká danou hranicí. Je-li v popisovaném systému přítomno magnetické pole \mathbf{A} , jehož zdrojem je remanentní indukce permanentního magnetu \mathbf{B}_r , rovnice (4) získá tvar

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \text{rot } (\mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = \mathbf{J}. \quad (6)$$

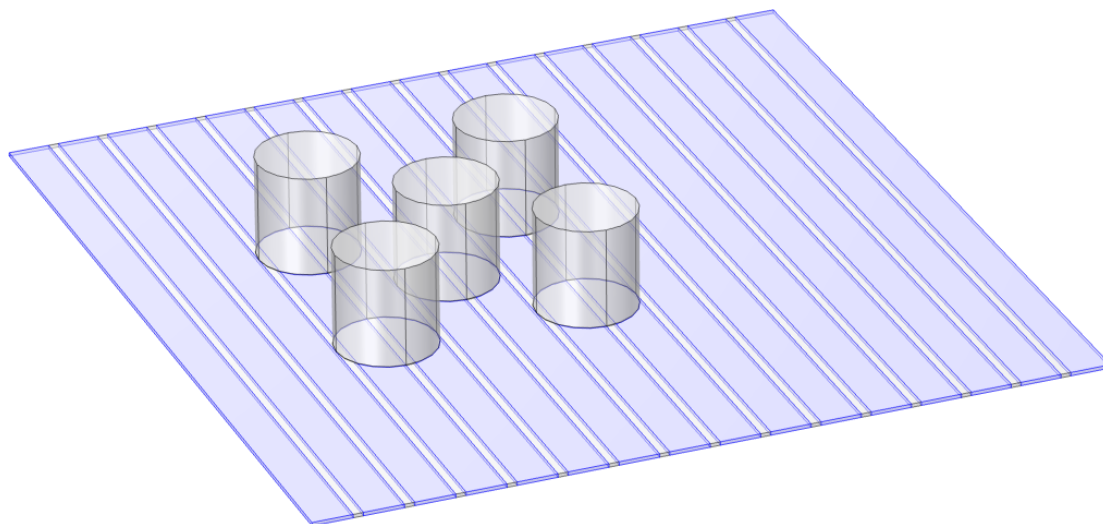
V rámci tohoto modelu byla analyzována především výsledná síla působící na robota. K této analýze byla použita Lorentzova síla, kterou lze vyjádřit ve tvaru

$$\mathbf{F} = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV, \quad (7)$$

kde \mathbf{F} je výsledná síla působící na vodiče a V představuje celkový objem vodičů tvořících polohovací systém.

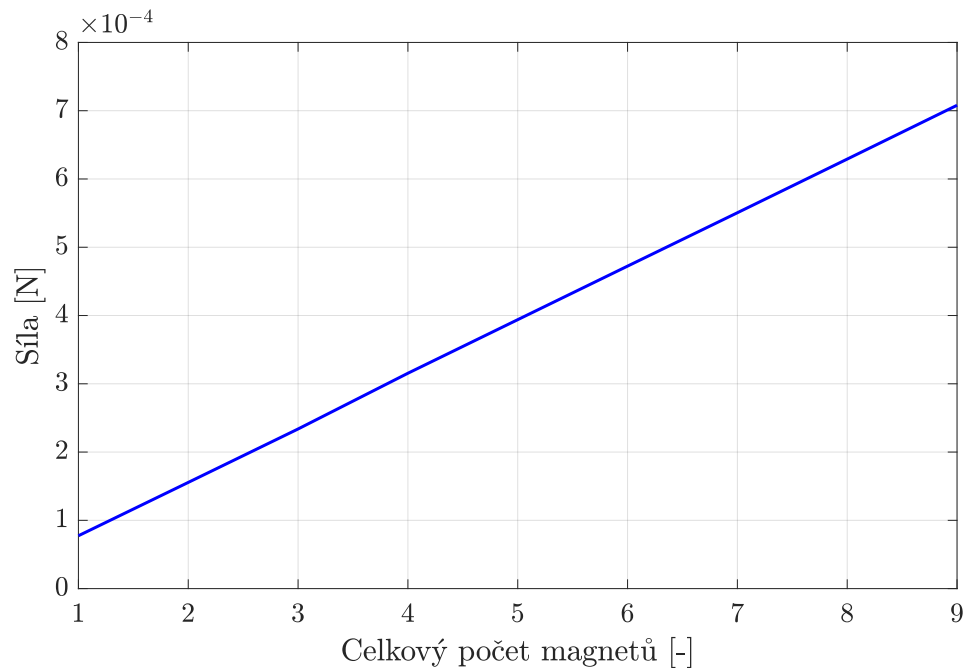
Řešený model sestává ze dvou částí. První částí je polohovací systém tvořený dvěma koplanárními cívkami. Za účelem zjednodušení modelu byl použit pouze jeho výřez. Díky tomu byla v modelu eliminována zahnutí cívek. Namísto koplanárních cívek byl proto v modelu uvažován systém rovných vodičů o odpovídajících vlastnostech. Pro výsledky modelu však toto zjednodušení nebylo zásadní. Popsaná první část modelu reprezentuje robotickou platformu.

Druhá část modelu je pak tvořena soustavou magnetů. Tato část zjednodušeně představuje miniaturní magnetický robot. Její značné zjednodušení spočívá v zanedbání těla robota. Tělo robota je nemagnetické, a tudíž nemá na výsledky analýzy působení magnetického pole vliv. Model byl řešen pro různé konfigurace s jedním až devíti magnety. Parametry řešeného modelu byly zvoleny na základě dostupného separačního systému a používaných magnetů. Model byl řešen v programu COMSOL Multiphysics. Prostorové zobrazení řešeného modelu je znázorněno na Obrázku 15. Soustava pěti magnetů je znázorněna šedou barvou, zatímco polohovací systém je znázorněn modře.



Obrázek 15: Geometrie řešeného numerického modelu.

Hlavní motivací pro řešení tohoto modelu bylo vyjádření závislosti výsledné síly na počtu použitých magnetů. Analýzou výsledných modelů bylo zjištěno, že tato závislost je lineární. Závislost je znázorněna v Obrázku 16. V praxi to znamená, že čím vyšší je počet využitých magnetů, tím vyšší je i působící síla. Je však třeba si uvědomit, že bylo při výpočtu zanedbáno tělo robota a jeho tření.



Obrázek 16: Závislost působící síly na počtu magnetů.

3.2.2 Postupný vývoj separačního robota

Cílem první fáze postupného vývoje byl robot tvořený pevným tělem, které lze osadit pěti permanentními magnety výše uvedených standardních rozměrů. Tvar tohoto robota již však měl být uzpůsoben pro účely separace. V programu SolidWorks byla navržena různá těla robotů a na definované pozice v rámci nich byly umístěny díry pro permanentní magnety. První pokusy o zhotovení těchto robotů probíhaly opět s využitím FFF technologie. Bylo zjištěno, že přesnost tisku pro výrobu takovýchto miniaturních robotů není dostatečná. Ani při optimalizaci nastavení 3D tiskárny nebylo možné vytvořit přesné díry na návrhem zadaných pozicích.

Další pokus o zhotovení těla robota proběhl ve studentské laboratoři Makerspace ZČU, kde byl použit velkoplošný laserový plotr. Výchozím materiálem zde bylo plexisklo, které bylo pomocí laserového plotru formováno do požadovaného tvaru. Plexisklo bylo zvoleno jako vhodný materiál z důvodu poměru hmotnosti ku pevnosti s ohledem na použitou technologii výroby. Výsledné tělo robota však bylo laserovým plotrem ztlačeno, což zabránilo jeho následnému využití. K tomu došlo i přes úpravu výkonu laseru. Hlavní překážkou se zde stala velikost vyráběného robota. Výsledek tohoto procesu výroby je znázorněn na Obrázku 17. Přes následnou snahu nebyl nalezen jiný vhodný materiál, který by byl dostatečně lehký a zároveň spolehlivě upravitelný pomocí laserového plotru. Zhotovení těla robota tímto způsobem bylo proto zamítnuto.

Pro druhou fázi vývoje bylo rozhodnuto o využití výchozí verze robota popsané v úvodu této části. Na tento robot bylo cílem navrhnout a vyrobit nástavec, který robotu umožní separovat komponenty. Na základě poznatků z první fáze bylo také rozhodnuto o finálním tvaru robota ve tvaru písmene "H". Pozitivním důsledkem tohoto tvaru je stabilita robota při tlačení komponent po pracovní ploše. Limitací může být možnost separace pouze ve dvou směrech, protože se robot na platformě nemůže otáčet.



Obrázek 17: Tělo robota zhotovené pomocí velkoplošného laserového plotru.

Nástavce různých velikostí byly opět navrženy v programu SolidWorks a vyrobeny FFF technologií z materiálu PLA. Tyto nástavce byly poté využity ve spojení se zhotoveným robotem výchozí verze. Příklad vyrobeného nástavce a zhotoveného separačního robota ve druhé fázi vývoje je zobrazen na Obrázku 18. Při krátkém experimentálním testování těchto robotů bylo zjištěno, že pět permanentních magnetů zdaleka nedostačuje pro vytvoření potřebné síly k odtažení komponent.



Obrázek 18: Vlevo: nástavec vyrobený FFF technologií 3D tisku, vpravo: stejný nástavec se vsazeným robotem výchozí verze.

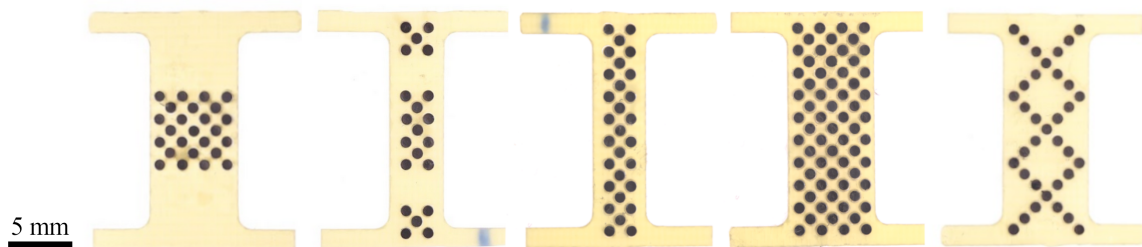
Třetí fází vývoje separačního robota proto byla snaha o zhotovení nového typu nástavce, který by k pohybu využíval více než jednoho výchozího robota. Z toho důvodu bylo nutné do nástavců přidat další otvory, do nichž mohou být roboty vsazeny, a především bylo třeba vyrobit několik dalších robotů výchozí verze. Po zhotovení a osazení robotů však bylo zjištěno, že byly opět dosaženy limity využívané 3D tiskárny¹. Jak bylo zjištěno měřením celkem dvaceti zhotovených výchozích robotů pod mikroskopem², pozice magnetů byly v robotech v průměru

¹Průša MK2.5S, 0,25mm tryska.

²Univerzální digitální mikroskop Dino-Lite AM7915MZT.

posunuty o 0,2 mm. S přihlédnutím k dalším očekávaným posunům způsobeným tiskem nástavce a vsazováním robotů dosahuje celková chyba až 0,5 mm, což je však kritickou hodnotou, při které již robot přestává fungovat.

Vzhledem k nespolehlivosti výše popisované výrobní metody bylo rozhodnuto o poslední fázi vývoje robotů. Ta spočívala v návrhu a výrobě kompletně nové generace robotů určených výhradně k separaci. Návrh pěti typů těl separačního robota byl proveden v programu KiCad určenému pro návrhy plošných spojů. Důvodem volby tohoto programu byla následná výroba těla robota zajišťovaná společností PragoBoard s.r.o. Na základě předloženého návrhu vyrobila tato společnost těla robotů z materiálu FR-4, tedy základního materiálu pro výrobu desek plošných spojů. Jelikož není použita měď, je materiál lehčí a tenčí (0,5 mm). Po osazení permanentními magnety (21-67 pro různé tvary) bylo možné těmito roboty separovat komponenty umístěné na platformě. Celá generace separačních robotů zhotovená v této fázi jejich vývoje je zobrazena na Obrázku 19.



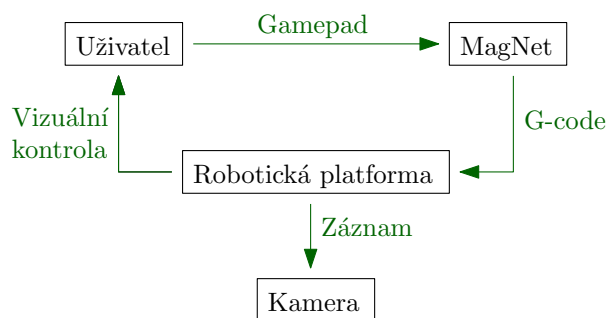
Obrázek 19: Nová generace miniaturních magnetických robotů určených k separaci elektronického odpadu.

4 Manuální separace

Díky získání vhodných komponent (popsáno v části 2) a zhotovení mechanické části separačního systému (popsáno v části 3) bylo možno realizovat manuální separaci elektronického odpadu. V této kapitole bude představen kompletní systém pro manuální separaci, dále jeho testování a dosažené výsledky.

4.1 Systém manuální separace

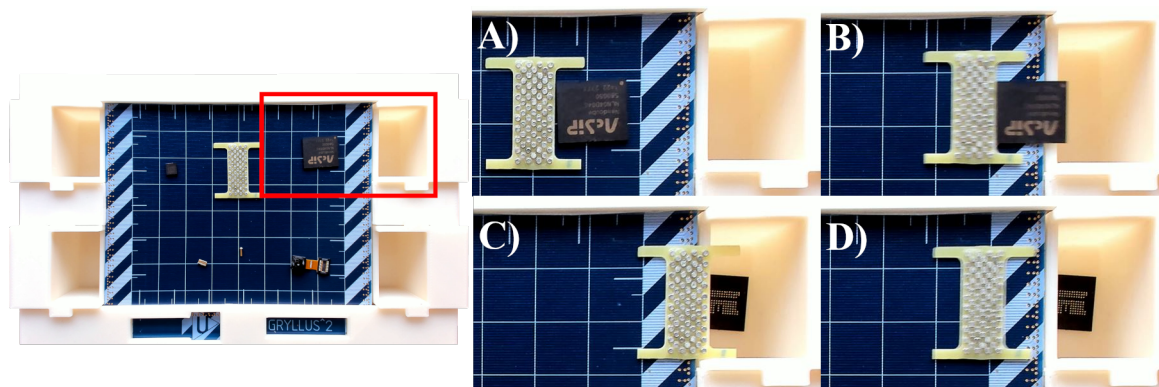
Systém manuální separace je znázorněn na Obrázku 20. V této variantě separačního systému je nutná neustálá aktivní účast uživatele. Dále je zde značně využíváno aplikace pro ovládání miniaturních magnetických robotů *MagNet* blíže popisované v části 1.4.3. Tato aplikace běží na připojeném počítači a umožňuje využít připojený gamepad pro řízení pohybu robotů po platformě. Uživatel pomocí gamepadu zadává požadovaný směr pohybu robota. Algoritmy aplikace *MagNet* takto zadané údaje převádějí na G-code, který je následně odeslán k vykonání mikrokontroléru robotické platformy. Na základě toho je realizován pohyb robota, který může uživatel v reálném čase pozorovat na samotné platformě. Uživatel robotem pohybuje takovým způsobem, aby postupně do odpovídajících košů odseparoval všechny komponenty elektronického odpadu vyskytující se na platformě. Po celou dobu separačního procesu je kamerou (umístěnou nad platformou) snímána pracovní plocha za účelem následné vizualizace průběhu a výsledků separace.



Obrázek 20: Systém manuální separace.

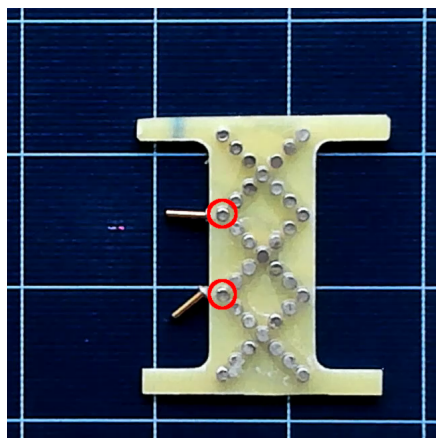
4.2 Testování

V rámci testování manuálního způsobu separace bylo provedeno velké množství experimentů. Hlavním cílem těchto experimentů bylo především ověřit možnosti odtlačování jednotlivých komponent elektronického odpadu do separačních košů pomocí robotů. Nutným minimem pro separaci jakékoliv komponenty je do komponenty robotem najet, postupně komponentu odtlačit až do separačního koše a následně se od koše opět bezproblémově vzdálit. Tento proces je znázorněn na Obrázku 21.



Obrázek 21: Ukázka postupu manuální separace. A) robot vjíždí do komponenty, B) robot tlačí komponentu, C) komponenta byla odseparována, D) robot se vzdaluje od separačního koše.

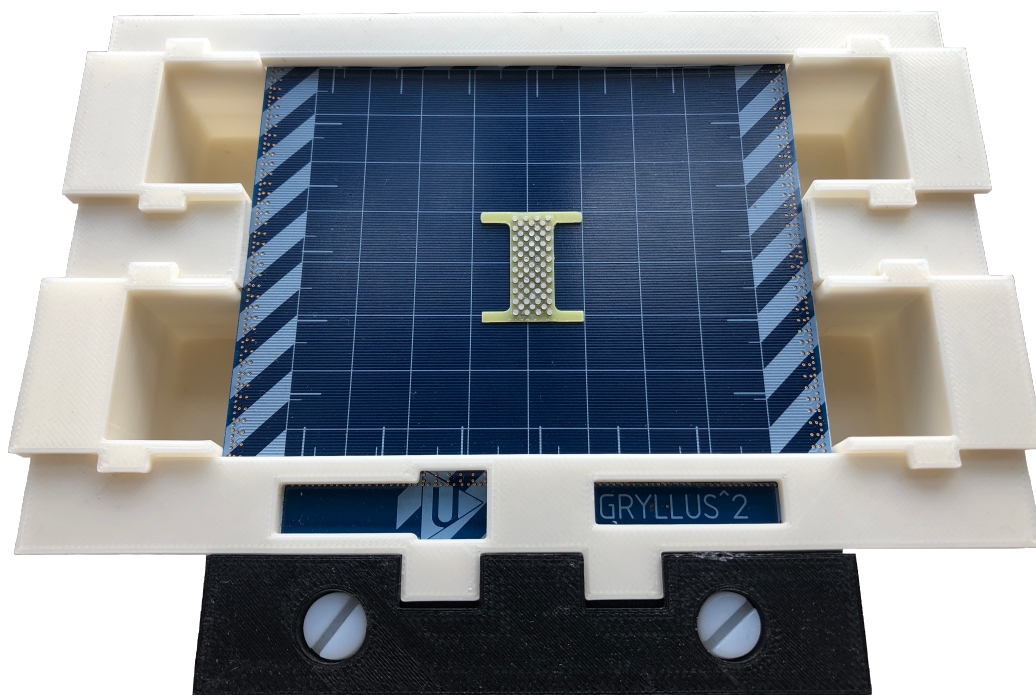
Separace probíhala bez větších problémů u všech komponent vyjma pozlacených pinů z CPU. Zde došlo kvůli nízké hmotnosti pinu a výraznému silovému působení magnetů robota k přichycení pinu k robotu. Piny se k robotu přichytí v těch místech, kde jsou permanentní magnety osazeny nejbližší k okraji tohoto robota. Tato situace je znázorněna na Obrázku 22. Samotným pohybem robota již následně nebylo možné piny oddělit. Musel být proto proveden zásah uživatele, který ručně piny od robota oddělil. Této situaci by bylo možno předejít návrhem a zhotovením robota s většími okraji bez osazených magnetů.



Obrázek 22: Přichycení pinů CPU k robotu během separace.

Dalším cílem testování této varianty byl výběr vhodného typu separačního robota pro následnou automatizaci tohoto systému. Nejprve byly pro všechny typy zhotovených robotů experimentálně zjištěny ideální napájecí proudy jednotlivých vrstev koplanárních cívek. Tento krok byl nezbytný z důvodu využití dvou vrstev koplanárních cívek. Každá je od robota jinak vzdálena (konkrétně 0,03 a 0,23 mm), bylo proto nutné je napájet rozdílně velkým proudem. Zjištění odpovídajících napájecích proudů umožnilo plynulý pohyb robotů po pracovní ploše. Dále byla již při nastavení těchto ideálních proudů testována schopnost odtlačení všech možných komponent jednotlivými typy robotů. Nejvíce spolehlivým typem se ukázal být robot *Maxi*, obsahující celkem 67 permanentních magnetů. Jedná se o největšího vyrobeného robota s největším množstvím osazených magnetů. Při velmi nízkém napájecím proudě (0,12 A pro první vrstvu a 0,5 A pro druhou vrstvu koplanárních cívek) dokázal plynule odtlačit všechny testované komponenty

s výjimkou pinů. Tento robot váží 581 mg a je schopný odtlačit komponenty o hmotnosti až 1,5 g. Je tedy schopný odtlačit komponenty téměř třikrát těžší, než je on sám. Robot *Maxi* umístěný na separační platformě je zobrazen na Obrázku 23.



Obrázek 23: Robot *Maxi* na separační platformě.

5 Automatizovaná separace

Manuální separační systém umožnil separovat komponenty elektronického odpadu pomocí gamepadu za neustálé účasti uživatele. Takové řešení je však velmi pomalé, neefektivní a drahé. Dalším logickým krokem kupředu proto byla automatizace procesu. Pro tu bylo nutné využít softwarového řešení. Tato kapitola popisuje jednotlivé části tohoto řešení, které bylo kompletně vyvinuto v prostředí MATLAB. Zároveň má tato kapitola za cíl představit výsledný automatizovaný systém pro separaci elektronického odpadu, jeho testování a výsledky.

5.1 Neuronová síť

Základním kamenem softwarové části této práce je neuronová síť. Elementární principy práce s neuronovými sítěmi v prostředí MATLAB byly popsány v části 1.4.4. Cílem výsledné neuronové sítě je rozpoznání robota a jednotlivých komponent elektronického odpadu v rámci snímku pracovní plochy separační platformy. Výsledná síť by proto měla být jednoznačně multi-class, tedy být schopna rozpoznávat více různých typů objektů. K získání využitelné neuronové sítě vedla poměrně dlouhá cesta, která je popsána v následujících částech této práce.

5.1.1 Experimentální implementace neuronových sítí

V prvé řadě bylo nutné se seznámit s použitelnými typy detektorů. Tomuto tématu jsem se věnoval během stáže na ESIEE Paris, kde bylo možné problematiku konzultovat s experty v tomto oboru. Základním požadavkem na výslednou neuronovou síť byla schopnost rozpoznávat větší množství objektů v rámci jednoho obrázku. Z toho důvodu byly jako potenciálně využitelné detektory zvoleny R-CNN a YOLO. Obě tyto možnosti totiž využívají ohraničujících boxů v rámci posuzovaného snímku. To je pro řešenou aplikaci velmi výhodné. Kromě rozpoznání jednotlivých komponent a robotů lze totiž díky tomu přesně určit jejich pozici v rámci pracovní plochy. Těchto informací mohou dále využívat ostatní implementované algoritmy.

Experimentální implementace probíhala ještě před druhou fází výběru komponent (viz kapitola 2). Z tohoto důvodu byly pro experimenty využívány pouze piny a kondenzátory CPU, které byly vybrány již během první fáze volby komponent. V této době také ještě nebyla zahájena práce na separačním systému miniaturních magnetických robotů (viz kapitola 3). Proto byla pro účely tohoto testování využita platforma *Isoptera* a zastaralejší verze robota.

Prvním dílčím cílem byla experimentální implementace detektorů R-CNN [44] a YOLO v3 [45] pro účely single-class rozpoznávání objektů. Jediným objektem rozpoznávaným těmito detektory měl být robot. Motivací této fáze vývoje bylo porozumění elementárním možnostem práce s neuronovými sítěmi.

Pro tvorbu datasetu bylo využito videa zachycujícího pohyb robota po platformě *Isoptera*. Video sestávalo z celkem 843 snímků, právě tolik jich tedy bylo k dispozici pro tvorbu datasetu. Samotné vytvoření datasetu bylo automatizováno vyvinutým algoritmem, který bude blíže popsán v části 5.1.2. Pomocí tohoto algoritmu byly vytvořeny dva datasety s rozdílným rozlišením obsažených snímků. Rozlišení 406 x 378 px bylo reálným rozlišením výřezu pracovní plochy z původního snímku. Rozlišení 227 x 227 px pak odpovídalo rozměrům první aktivační vrstvy využívané předtrénované sítě SqueezeNet [46]. Po úvodní analýze problematiky bylo totiž rozhodnuto o využití předtrénovaných neuronových sítí, nikoliv tvorbě kompletně nové sítě. Vytvořené datasety byly následně využity pro trénování neuronových sítí. K tomu bylo využito výpočetního clusteru z důvodů časové i výpočetní náročnosti.

Po úspěšném dokončení procesu trénování bylo přistoupeno k porovnání výkonnosti obou detektorů pro obě možná rozlišení. Porovnání bylo provedeno z pohledu přesnosti a délky trvání detekce. Pro tento účel bylo využito dalšího videa pohybuujícího se robota po platformě *Isoptera*. Implementované detektory byly využity k detekci robota v každém snímku tohoto videa. Díky předchozímu výzkumu [47] byly pro každý snímek známy přesné souřadnice pozice robota. Bylo proto možné tyto pozice porovnat s pozicemi získanými detekcí snímku neuronovou sítí. Pro každý snímek byla určena absolutní chyba obou souřadnic v pixelech. Průměrná chyba detekce se pohybovala kolem 0,5 pixelu. Pro nejhorší dosažený výsledek činila chyba 2,39 px ve vodorovném směru a 2,47 px ve vertikálním směru. Tohoto výsledku bylo dosaženo při použití detektoru R-CNN o rozlišení 227 x 227 pixelů. Maximální chyba stanovení polohy robota tedy odpovídala přibližně 1 % rozměru pracovní plochy. To je pro účely dané aplikace naprosto dostačující. Všechny čtyři detektory byly proto z tohoto pohledu považovány za vyhovující.

Druhým zkoumaným parametrem implementovaných detektorů byla délka trvání detekce. Pro tento účel byl měřen čas detekce každého snímku. Výsledky detektorů z pohledu délky trvání detekce jsou zobrazeny v Tabulce 2. Stejně jako pro trénování sítí bylo i pro samotnou detekci využíváno GPU¹. Ta snímky detekovala v průměru o 40 % rychleji než dostupný CPU².

Tabulka 2: Analýza délky trvání detekce jednoho snímku.

Detektor	Čas detekce - průměr [ms]	Čas detekce - medián [ms]
R-CNN 406x378	403,00	397,66
R-CNN 227x227	136,43	133,76
YOLO 406x378	64,68	61,76
YOLO 227x227	60,43	56,49

S ohledem na výsledky analýzy zobrazené v Tabulce 2 byl jako vhodný detektor pro další vývoj vybrán YOLO. Zatímco přesnost detekce byla pro R-CNN i YOLO velmi podobná, benefitem YOLO se ukázala být jeho rychlost. Detektor YOLO pracoval výrazně rychleji než detektor R-CNN. Dále se ukázalo, že by čas detekce nemusel být závislý na využívaném rozlišení.

Cílem druhé fáze experimentální implementace neuronových sítí bylo ověření možností multi-class detekce a rozpoznání komponent právě s ohledem na využívané rozlišení. K dříve rozpoznávanému robotu přibýly další dva objekty - piny a kondenzátory CPU. Pro tvorbu da-

¹Dostupná GPU: GeForce-GTX-1050-Ti.

²Dostupný CPU: i7-7700HQ.

tasetu se snímky robota bylo použito stejné video jako v první fázi. Dále bylo k dispozici 105 snímků kondenzátorů a 96 snímků pinů. Také ty byly pořízeny na platformě *Ispotera*. Stejně jako v první fázi byl využit pro automatizované vytvoření datasetu speciální algoritmus (blíže popsán v části 5.1.2). Vytvořeny byly datasey o rozlišení 227 x 227, 454 x 454 a 681 x 681 pixelů. Jedná se tedy o celé násobky rozměru první aktivační vrstvy sítě SqueezeNet. Po vytvoření těchto tří datasetů bylo přistoupeno k trénování, k němuž byl opět využit výpočetní cluster.

Nejprve byla provedena validace detektorů pomocí testovacích dat, které byly ještě před procesem trénování náhodně vyjmuty z datasetu. Síť tedy těmito snímky nebyla trénována. Výsledky byly nad očekávání dobré. Pro všechna rozlišení totiž platí, že ani jeden z celkem 208 detekovaných objektů nebyl rozpoznán chybně. To dokumentuje matice záměn v Tabulce 3.

Tabulka 3: Matice záměn pro všechna testovaná rozlišení YOLO v3.

n = 208	Predikce: kapacitor	Predikce: pin	Predikce: robot
Skutečnost: kapacitor	22	0	0
Skutečnost: pin	0	11	0
Skutečnost: robot	0	0	175

Dále byla s využitím stejných testovacích dat validována přesnost pozic detekovaných bounding boxů kolem objektů. Analyzován byl poměr překrytí bounding boxu získaného při tvorbě datasetu (předpokládaného) a toho detekovaného neuronovou sítí. K tomu bylo využito funkce *bboxOverlapRatio* přímo v prostředí MATLAB. Výsledky této analýzy byly obdobné pro všechna zkoumaná rozlišení. Průměrný poměr překrytí dosáhl hodnoty 0,9, což je velmi kvalitní výsledek. Minimální poměr (tedy nejhorší dosažený výsledek) se pohyboval těsně pod hodnotou 0,6. Prakticky to znamená, že alespoň polovina plochy bounding boxu byla vždy detekována správně.

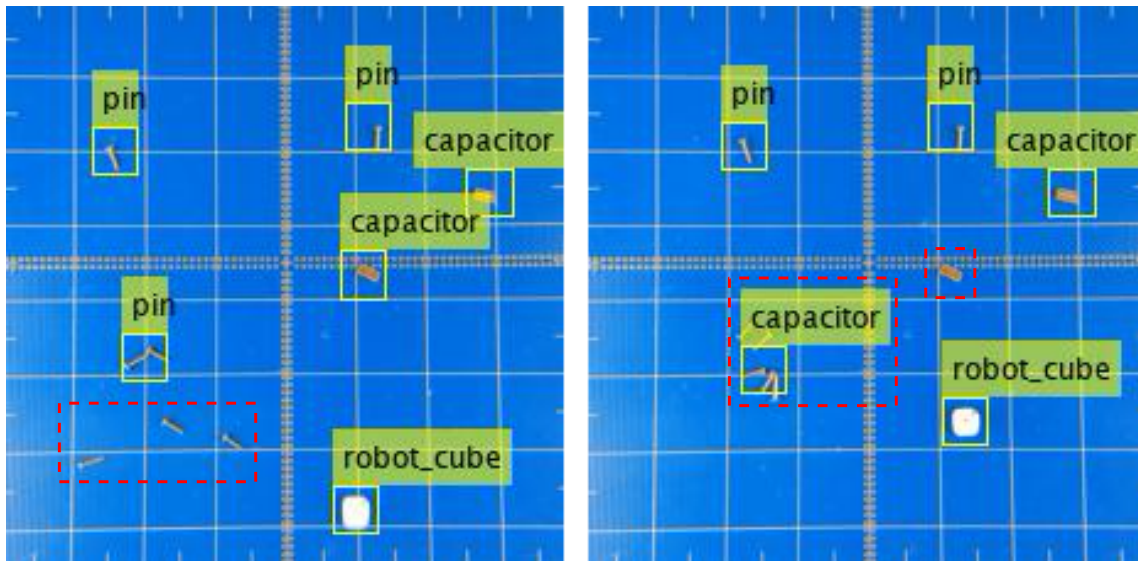
Pro účely ověření implementovaných detektorů na reálných datech bylo využito video (celkem 1985 snímků) zachycující 7 pinů, 2 kondenzátory a jednoho robota. Pro každý snímek byl opět měřen čas detekce. Cílem bylo ověřit, zda není délka trvání detekce pro YOLO detektor výrazně závislá na využívaném rozlišení. Výsledky této analýzy jsou zobrazeny v Tabulce 4.

Tabulka 4: Analýza délky trvání detekce pomocí YOLO v3 pro různá rozlišení.

Detektor	Průměrný čas detekce [ms]
YOLO 227x227	72,829
YOLO 454x454	77,212
YOLO 681x681	78,819

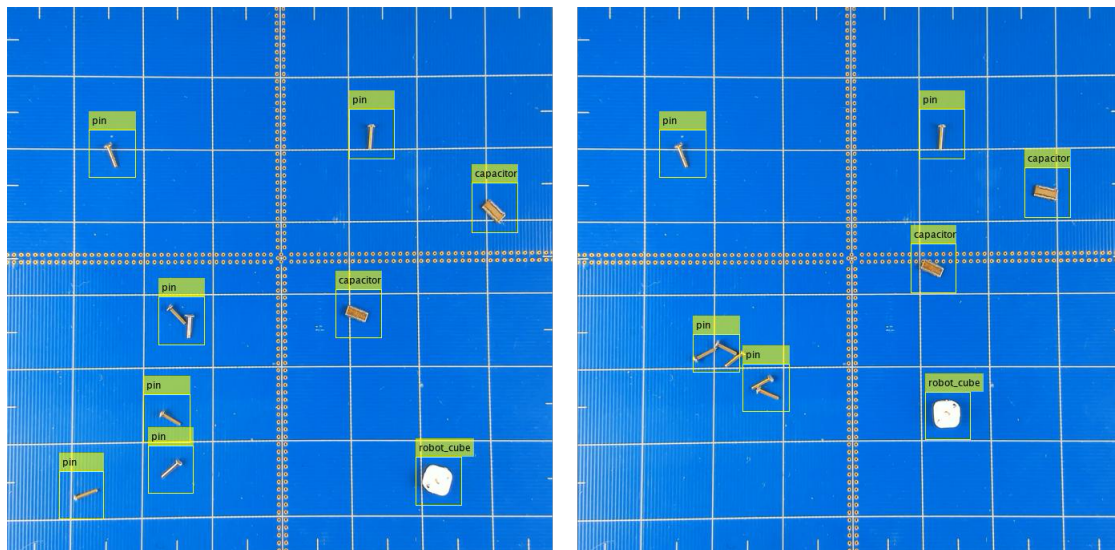
Přestože se čas detekce s vyššími rozlišeními prodlužuje, nejedná se vůbec o velké rozdíly. Pro výsledný detektor používaný v reálné aplikaci by proto bylo vhodné použít vyšší rozlišení. Důvodem je rapidní zlepšení přesnosti detekce, které ukázala vizuální kontrola analyzovaného videa. Detektor využívající rozlišení 227 x 227 px totiž komponenty poměrně často přehlédl. Nejčastěji se tak stávalo ve chvílích, kdy bylo více komponent v těsné blízkosti, vyskytly se však i jiné případy. Tyto problémy jsou znázorněny červeně na Obrázku 24.

Tyto potíže byly naštěstí vyřešeny použitím detektorů o vyšších rozlišeních. Při využití YOLO detektoru s rozlišením 681 x 681 px nebyla v rámci detekce celého videa objevena žádná nedetekovaná komponenta. V některých momentech, kdy byly komponenty stejného druhu blízko



Obrázek 24: Problematické případy použití YOLO detektoru s rozlišením 227 x 227 px.

u sebe, došlo k jejich společné detekci jako jediné komponenty. Byly proto ohraničeny pouze jedním bounding boxem. S ohledem na výslednou aplikaci však toto nebylo považováno za kritický problém. Ukázka takových výstupů detekce videa pomocí YOLO detektoru s rozlišením 681 x 681 px je znázorněna na Obrázku 25.



Obrázek 25: Výsledky detekce snímku pomocí YOLO detektoru s rozlišením 681 x 681 px.

Výstupem experimentální implementace neuronových sítí bylo proto doporučení dále využívat detektor YOLO při použití vyšších rozlišení. Takovýto detektor byl shledán dostatečně přesným a zároveň byl schopen snímky detekovat velmi rychle.

5.1.2 Tréninková data

Požadavkem na výslednou neuronovou síť bylo, aby byla schopna rozpoznávat objekty vyskytující se ve snímku pracovní plochy separační platformy. Těmito objekty mohou být v první

řadě separační roboty nové generace (viz kapitola 3). Pro samotnou separaci byl zvolen jako vhodný typ robot *Maxi*. Pro ověření, zda je neuronová síť schopna od sebe rozpoznat také dva roboty s různým uspořádáním magnetů, byl jako referenční objekt přidán robot typu *Crusader*. Ten má ve svém těle magnety osazeny křížem, zatímco robot *Maxi* má tělo osazeno magnety kompletně. Výsledná neuronová síť by měla dále rozpoznávat jednotlivé komponenty elektronického odpadu, jejichž volba byla provedena v kapitole 2. Celkem by měla být tedy neuronová síť schopna rozpoznat 7 různých tříd objektů:

- robot typu *Maxi* - *robot_maxi*,
- robot typu *Crusader* - *robot_crusader*,
- pozlacený pin CPU - *pin*,
- kondenzátor CPU - *capacitor*,
- kamera mobilního telefonu - *camera*,
- malý (do 5 mm ve všech rozměrech) čip mobilního telefonu - *small_chip*,
- velký (nad 5 mm ve všech rozměrech) čip mobilního telefonu - *big_chip*.

Pro každou z komponent elektronického odpadu bylo k dispozici celkem 150 snímků. Pro každý typ separačního robota bylo k dispozici celkem 200 snímků. Komponenty a roboty byly na těchto snímcích již umístěny na platformě *Gryllus*² s nasazenou maskou a separačními koši. Snímky byly pořízeny ve 4K rozlišení kamerou umístěnou přímo nad pracovní plochou pro zajištění co nejkvalitnějších tréninkových dat.

Jelikož manuální tvorba datasetu je poměrně zdlouhavá, byl již v rámci experimentální implementace vytvořen algoritmus, který je schopný ze vstupních dat vytvořit dataset automatizovaně. Tento algoritmus sestává z několika základních kroků. V první řadě je z pořízeného snímku získán výřez pracovní plochy platformy, který je zmenšen na využívané rozlišení a převeden do černobílé podoby. Následně je porovnán se stejně zpracovaným snímkem pozadí (tedy pracovní plochy separační platformy bez přítomnosti objektu). Tímto je získána 2D matice, která vyjadřuje absolutní změnu na jednotlivých pixelech při porovnání těchto dvou snímků. Místa s nejvyšší hodnotou signalizují přítomnost komponenty či robota. Na tuto matici je aplikována Gaussova filtrace (v prostředí MATLAB lze využít metodu *imgaussfilt*) pro vyhlazení těchto dat. Následně dochází k prahování (anglicky *thresholding*). Hodnoty v matici jsou porovnány s předem definovanou konstantou. Je-li hodnota vyšší než konstanta, na daném pixelu se nachází komponenta či robot. Takto je možno určit obrysy objektu, díky čemuž lze následně stanovit také jeho střed. Při znalosti středu objektu lze poté jednoduše definovat bounding box o předem stanovených rozměrech. Tento algoritmus je využíván v cyklu pro všechny snímky konkrétního objektu, ze kterých je dataset vytvářen. Definovaný postup je nutno aplikovat na všechny požadované typy objektů.

Výhodou tohoto řešení je samozřejmě obrovská úspora času oproti manuálnímu vytváření datasetu. Nevýhodou pak je vnesení určité nepřesnosti do tréninkových dat a nutná opatrnost

při manipulaci s kamerou i platformou. Všechny snímky pro daný dataset totiž musejí být nasnímány s kamerou ve stejné pozici vůči pracovní ploše.

Celkem sedm sad tréninkových dat získaných pomocí výše popsaného algoritmu je v následujícím kroku převedeno do finálního datastoru. Ten si lze představit jako tabulku o osmi sloupcích. V prvním sloupci je definována systémová cesta ke snímku. Každý ze zbývajících sedmi sloupců definuje pozici bounding boxu pro jeden ze sedmi možných objektů. Nevyskytuje-li se daný objekt v aktuálním snímku, buňka zůstává prázdná. V opačném případě je v odpovídajícím sloupci zapísána poloha bounding boxu. Datastore je uložen a lze jej využít pro trénování finální neuronové sítě, které bude popsáno v následující části.

5.1.3 Trénování neuronové sítě

Z analýzy výsledků prvotní experimentální implementace neuronových sítí (viz část 5.1.1) vzešlo doporučení pro využití detektoru typu YOLO s vyšším rozlišením. YOLO v3 využívané v dané fázi však bylo svou strukturou zbytečně složité pro splnění cílů této práce. Proto bylo rozhodnuto o využití YOLO v2 detektoru [48]. Práce s ním je výrazně jednodušší, takřka na úrovni R-CNN. Zároveň však byl zachován princip YOLO, tedy jednostupňová detekce, která bylo zvolena z důvodu její rychlosti. Využívané rozlišení bylo stanoveno na 640 x 640 pixelů. Stejně jako u experimentální implementace se jedná o celočíselný násobek rozměrů první aktivační vrstvy předtrénovaného detektoru. Tím byl v tomto případě *vehicleDetectorYOLOv2* [49].

Pro trénování sítě byly nastaveny potřebné hodnoty. Jedním z nejdůležitějších parametrů byl *InitialLearnRate*, vyjadřující rychlost učení, který byl nastaven na 0,001. Parametr *MiniBatchSize*, nastavující velikost dávky pro každou z tréninkových iterací, byl nastaven na 16. To v praxi znamená, že při každé iteraci se bude neuronová síť učit na vzorku celkem 16 snímků z poskytnutého datasetu. Kritickým bylo správné nastavení *MaxEpochs* určující maximální počet epoch využívaných pro trénování neuronové sítě. Tento parametr byl po delším ladění nastaven na 50. Pro učení sítě byl použit řešič *sgdm*.

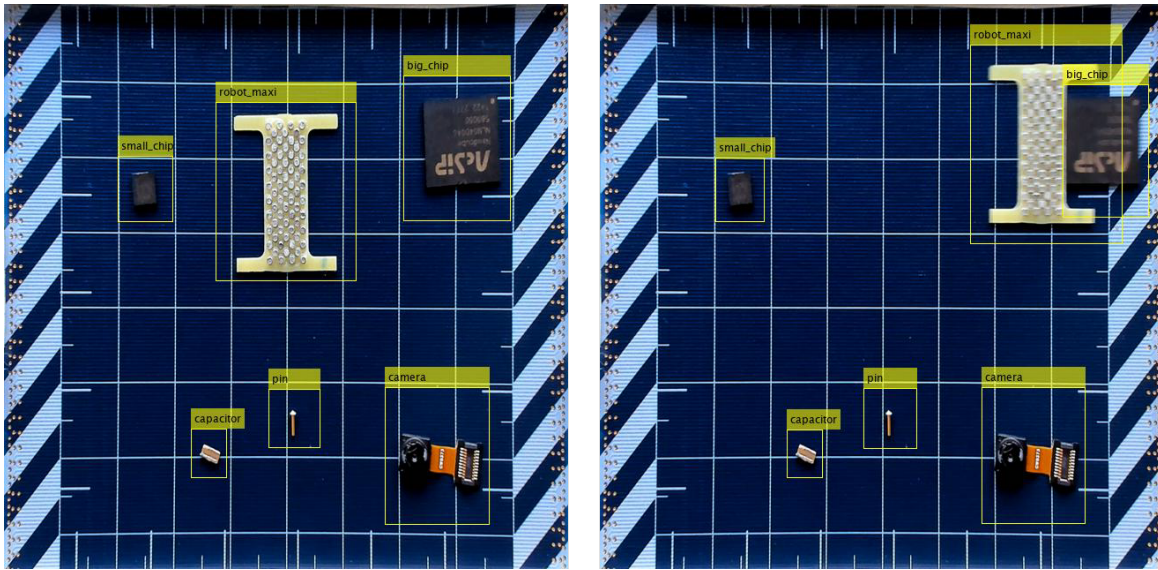
Trénování sítě probíhalo na jedné GPU³. Trénink detektoru byl tvořen celkem 50 epochami, 3300 iteracemi a trval necelých 30 minut. V závěru tréninku dosahovala loss funkce hodnot v řádech tisícín.

5.1.4 Výsledky neuronové sítě

Na základě výše popsaného procesu trénování neuronové sítě byl získán výsledný detektor, který lze využívat pro účely separace elektronického odpadu. Tento detektor je schopný najít a rozpoznat dva typy separačních robotů a pět různých komponent elektronického odpadu na platformě *Gryllus*². Pro detekci snímku lze v prostředí MATLAB využít metody *detect*, jejíž vstupními parametry jsou právě výsledný detektor a snímek, ve kterém je třeba rozpoznat komponenty a roboty. Správný výstup z této detekce je extrémně důležitý pro další algoritmy

³Využívaná GPU: GeForce-GTX-1050-Ti.

implementované v rámci této práce. Vizualizace výsledků funkce implementovaného detektoru je znázorněna v Obrázku 26.



Obrázek 26: Vizualizace výsledků detekce objektů pomocí neuronových sítí.

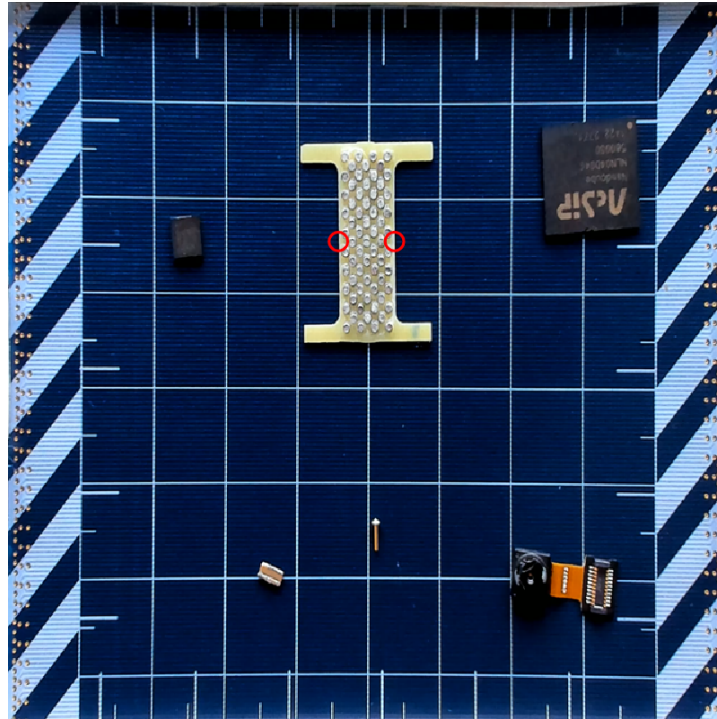
5.2 Definice tlačících bodů

Při pohledu na tvar separačního robota připomínající písmeno "H" si lze poměrně jednoduše představit, v jakých místech by měl robot do komponent během separace tlačít. Komponenta by se při posouvání nikdy neměla vychýlit z prostoru ohraničeného nožičkami a tělem robota. V takovém případě by totiž bylo ohroženo úspěšné dokončení separačního procesu. Naprosto ideálním stavem by naopak bylo, kdyby po celou dobu tlačil robot do komponenty pouze v jednom konkrétním místě. Jedná se o bod, který leží přesně uprostřed mezi nožičkami na vnitřní hraně těla robota (v těsné blízkosti magnetů). Díky zvolenému tvaru robota jsou takovéto body na robotu dva - jeden vpravo a druhý vlevo. Právě díky tomu je umožněna separace ve dvou směrech. Při manuální separaci popisované v části 4 si člověk tyto body nadefinuje podvědomě a následně se do komponent snaží robotem tlačít právě v těchto místech. Pro účely automatizace procesu separace byl navržen tento algoritmus, který tlačící body definuje pomocí analýzy vizuálních dat.

Algoritmus pro definici tlačících bodů robota je prvním, který aktivně využívá implementované neuronové sítě popsané v předchozí části práce. Tento algoritmus je velmi krátký a zároveň jednoduchý. Na základě výsledků předchozí detekce snímku je již známa pozice středu separačního robota. Jelikož se tlačící body nacházejí přesně uprostřed vnitřní hrany těla robota, je jedna z jejich souřadnic okamžitě známa. Druhou souřadnici je nutno dále určit. K tomu je využít řádek matice na indexu první známé souřadnice tlačících bodů. Tento řádek lze reprezentovat jako vektor, který představuje jednu řádku pixelů daného snímku. Využitím derivace (v prostředí MATLAB metoda *diff*) zjistíme, kde dochází v rámci daného řádku k největším barevným přechodům. Cílovou hodnotu přechodu mezi robotem a platformou definuje předem stanovená konstanta. Nejbližší body ke známému středu robota (v obou směrech), které této

hodnoty dosahují, představují hranu robota, a tedy druhou hledanou souřadnici tlačících bodů.

Výstupem algoritmu pro definici tlačících bodů jsou jak přesné souřadnice tlačících bodů pro aktuální snímek, tak vzdálenost od středu robota právě k tlačícím bodům. Toho lze využít v pokročilejších fázích procesu separace. Výsledek funkce algoritmu je znázorněn v Obrázku 27.



Obrázek 27: Vizualizace výsledků algoritmu pro definici tlačících bodů.

5.3 Plánování separační trajektorie

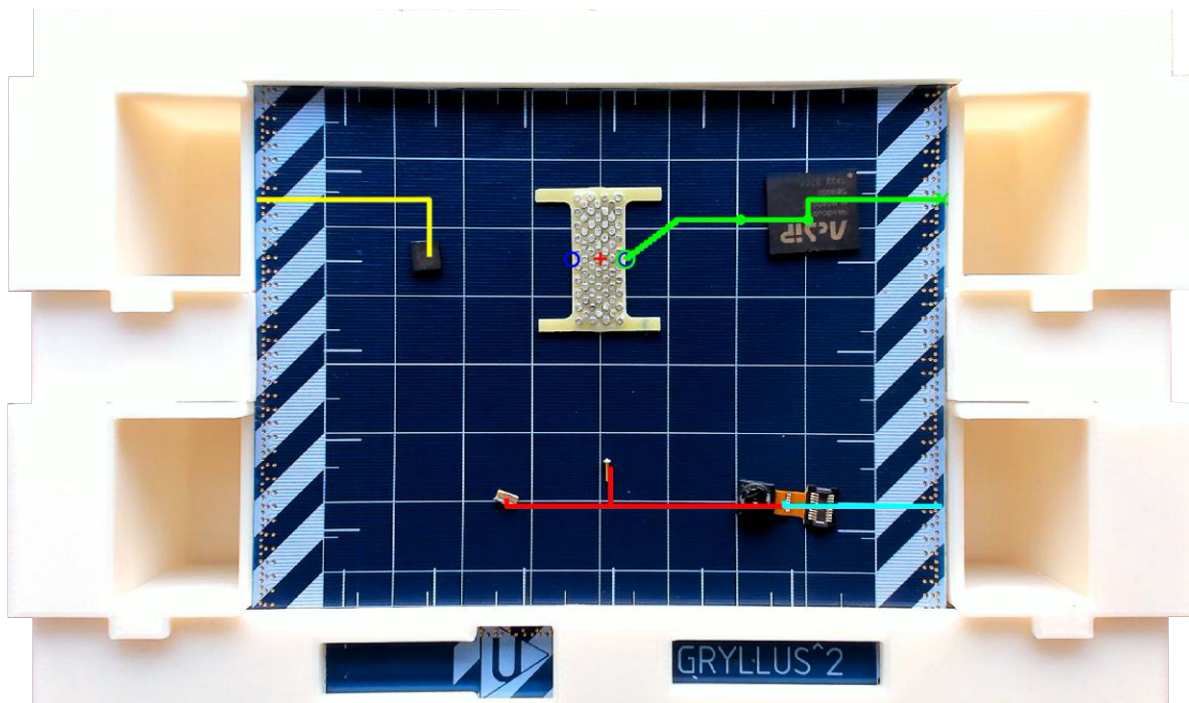
Na základě výsledků implementovaného detektoru a následné detekce tlačících bodů lze plánovat separační trajektorie. Separační trajektorie je taková cesta, kterou musí separační robot urazit pro vykonání separace jedné komponenty.

V první fázi je pro každou rozpoznanou komponentu definována cesta z jejího středu až do separačního koše. K tomu je využito výsledků detekce aktuálního snímku pracovní plochy. Výchozím bodem cesty je střed dané komponenty, cílový bod se pak nachází uprostřed hrany, na které pracovní plocha přechází v separační koš. Pro tento účel je vždy uvažován ten separační koš, který uživatel pro danou komponentu v úvodu separace zvolil. Pro vyjádření trasy o těchto parametrech je použito speciálního algoritmu plánování cesty. Ten byl vytvořen z důvodu minimalizace změn směru pohybu. K tomuto bylo přistoupeno za účelem eliminace hrozby, že robot danou komponentu při odtlačování ztratí. Tento algoritmus proto navrhuje cestu obsahující pouze jednu změnu směru. Nejprve je cesta vedena směrem nahoru či dolů (v závislosti na poloze separačního koše) od středu komponenty až na vertikální úroveň cílového bodu. Poté cesta pokračuje doprava či doleva (opět v závislosti na poloze odpovídajícího separačního koše) až do momentu úplného dosažení cílového bodu. Dále je vyhodnoceno, zda je tato cesta proveditelná s ohledem

na zjištěné překážky. Za překážku je pro výpočet dané cesty považována každá další komponenta na pracovní ploše. Po definici této první fáze trajektorie pro každou z komponent jsou jednotlivé cesty seřazeny vzestupně podle jejich délky.

Druhou fází plánování trajektorie je vyjádření trasy od vhodného tlačícího bodu robota (s ohledem na polohu separačního koše) k okraji bounding boxu dané komponenty. Protože v této fázi ještě robot neodtlačuje komponentu (není zde tedy riziko jejího ztracení), je využito komplexního algoritmu A^* . Jeho velkou výhodou je schopnost vyhýbat se překážkám. Algoritmus A^* byl implementován v rámci bakalářské práce studenta Jiřího Šedivce [31]. Za účelem zefektivnění běhu programu je tento algoritmus aplikován na jednotlivé komponenty postupně. Pořadí je určeno dle délky dříve definované cesty od komponenty do separačního koše. Algoritmus je aplikován vždy nejprve na tu komponentu, která má tento úsek separační cesty nejkratší a zároveň neprochází žádnou překážkou. Je-li pro danou komponentu algoritmem A^* nalezena trasa k vykonání, výpočet se již pro další komponenty neprovádí. Pokud posuzovaná trajektorie není vykonatelná, je A^* algoritmus aplikován na další komponentu v pořadí.

Následně zbývá již pouze propojit dvě definované fáze separační trajektorie pomocí krátké vodorovné cesty od hrany bounding boxu dané komponenty do jejího středu. Na základě tohoto posunu bude tedy robot do separované komponenty vjíždět. Příklad výsledné trajektorie k vykonání je zobrazen zeleně v Obrázku 28. V tomto obrázku jsou rovněž zobrazeny další detekované cesty od středu komponent do separačních košů. Kolidují-li tyto cesty s nějakou překážkou, jsou zvýrazněny červeně.



Obrázek 28: Trajektorie k vykonání (zeleně) a další detekované cesty.

5.4 Aktuace robota

Separáční platforma je propojena s uživatelským počítačem pomocí USB kabelu. Na začátku procesu separace jsou automaticky detekována takto připojená zařízení a je realizováno otevření portu pro komunikaci s platformou *Gryllus*². Od této chvíle je možné zasílat platformě pokyny pro aktuaci robota. Tyto pokyny jsou generovány na základě vybrané trajektorie k vykonání. Pro samotné odesílání příkazů je využito algoritmů uživatelské aplikace *MagNet* (viz část 1.4.3).

Jeden odeslaný příkaz představuje posun robota v konkrétním směru o určitou vzdálenost. Zvolená separáční trajektorie je postupně analyzována. Detekovány jsou především změny směru této cesty. Je-li detekován delší úsek, ve kterém má být pohyb veden pouze jedním směrem, je za něj odeslán jen jeden souhrnný příkaz. Jeho odeslání proběhne až ve chvíli, kdy algoritmus nalezne další změnu směru ve vykonávané separáční trajektorii.

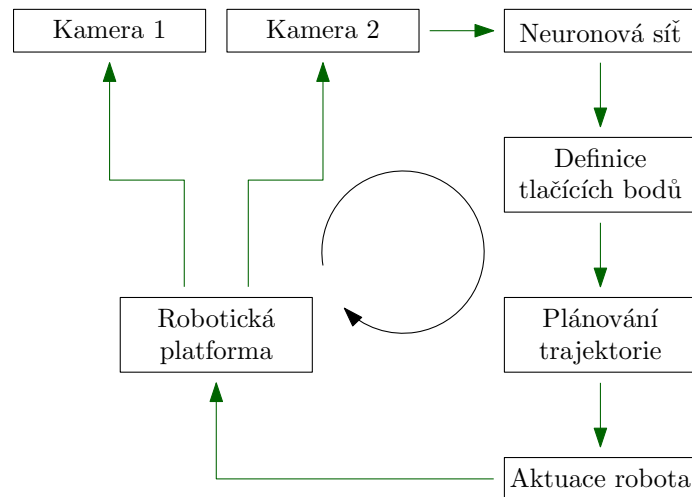
Zvolená cesta je zadána v pixelech. Příkazy zasílané modulu již musejí být přepočítány na kroky (jeden krok odpovídá 0,5 mm). K tomu slouží adekvátní přepočet. Jeho využíváním je však do systému zanesena chyba z důvodu zaokrouhlování. Rizikový je především pohyb diagonálně. Ten je tvořen velmi rychlým střídáním pohybů do stran a nahoru nebo dolů. V případě, kdy by byly tyto úseky kratší než 0,5 mm, by nebyl diagonální pohyb vůbec realizován. Z tohoto důvodu byl algoritmus rozšířen o korekci chyb způsobených zaokrouhlováním. Pro každý odeslaný příkaz je zjištěna tato chyba. Neustále je pak kontrolována kumulovaná chyba a ve chvíli, kdy přesáhne 0,5 mm, je vykonán krok v odpovídajícím směru, který tuto chybu koriguje.

5.5 Popis systému automatizované separace

Systém pro automatizovanou separaci je znázorněn na Obrázku 29. Mechanická stránka systému odpovídá verzi určené pro manuální separaci. Výjimkou je přidání sekundární kamery. Rozdíl oproti manuální separaci zajišťují implementované algoritmy popsané výše.

Proces separace iniciuje uživatel spuštěním programu v prostředí MATLAB. Prvním krokem je pořízení aktuálního snímku pracovní plochy separáční platformy. Tento snímek pořizuje Kamera 2 pro účely detekce pomocí neuronové sítě (viz 5.1). V tomto kroku jsou rozpoznány jednotlivé komponenty a robot. Na základě těchto dat je možné díky dalšímu algoritmu detekovat tlačící body robota (viz 5.2). Následuje plánování separáčních trajektorií a zvolení ideální cesty k vykonání (viz 5.3). Tato cesta je poté využita k vytvoření G-code zajišťujícího aktuaci separáčního robota po platformě (viz 5.4). Vykonáním této trajektorie robot odtláčí komponentu až do odpovídajícího separáčního koše. Ihned poté následuje sekvence zajišťující spolehlivé vzdálení se robota od okraje platformy.

Výše popsaný proces se opakuje až do momentu, kdy na pracovní ploše zbývá již pouze robot. Po dobu celé separace je pořizován záznam pomocí Kamery 1. Ten může sloužit pro vizualizaci výsledků či zpětnou kontrolu procesu.



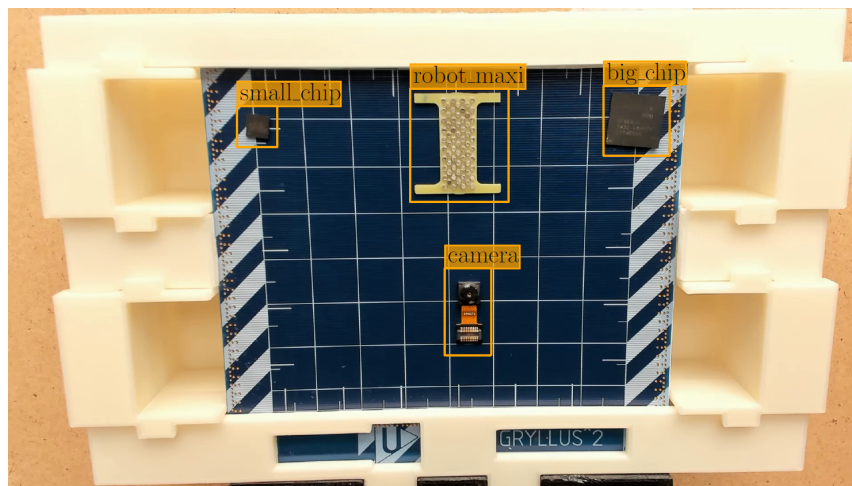
Obrázek 29: Systém automatizované separace.

5.6 Testování

Za účelem ověření funkce realizovaného konceptu bylo provedeno velké množství experimentů. Prvotním cílem bylo realizovat separaci alespoň jedné komponenty. Po úspěšných experimentech byl počet testovaných komponent postupně zvyšován pro ověření správné návaznosti algoritmů v rámci možné kontinuální separace. Ukázky důležitých fází procesu experimentální automatizované separace jsou znázorněny na Obrázku 30. Výsledné video zobrazující experimentální separaci včetně vysvětlivek je k dispozici⁴.

Testování ukázalo, že je možné automatizovat původně manuální separační systém pomocí implementovaných algoritmů. Výsledky testování výrazně zvýšily šanci na budoucí komerční využití separačního systému.

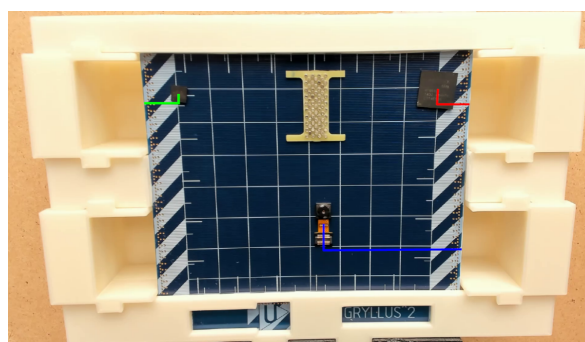
⁴Video zachycující experiment: <https://cimra.fel.zcu.cz/1/ewavi>



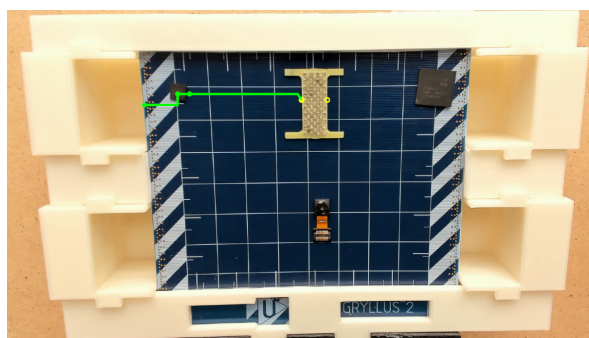
A)



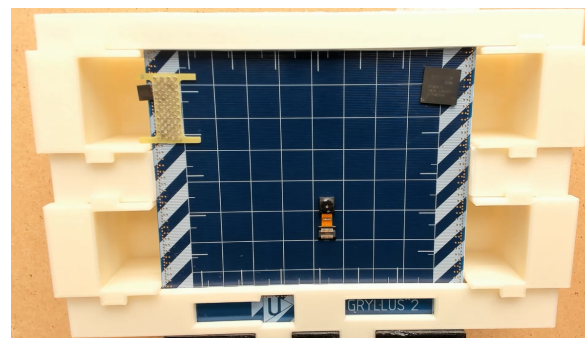
B)



C)



D)



E)

Obrázek 30: Ukázka procesu automatizované separace elektronického odpadu. A) detekce objektů pomocí neuronové sítě, B) přidělení separačních košů, C) plánování trajektorie od komponenty do separačního koše, D) vybraná trajektorie od tlačíšho bodu robota do separačního koše k vykonání E) probíhající separace.

6 Možné směry dalšího vývoje

Jelikož výstupem této práce je první prototyp a proof-of-concept řešení, je zde prostor pro další vývoj a postupné zlepšování realizovaného separačního systému. Nejzásadnější směry dalšího vývoje jsou nastíněny v této kapitole.

6.1 Vylepšení neuronové sítě

Implementaci detektoru pro rozpoznání objektů byl v této práci věnován značný prostor. Přesto se pravděpodobně jedná o místo, které další vylepšení potřebuje nejvíce. Pro trénování neuronové sítě bylo totiž použito pouze 1150 snímků, což v kontextu standardů oblasti hlubokého učení není mnoho. Dalším důvodem je variabilita využívaného datasetu. Přestože snahou bylo vytvářet co nejméně podobné snímky a pokrýt co nejvíce možných situací, stále to nebylo zcela dostatečné. V rámci dalšího rozšiřování datasetu by bylo vhodné se zaměřit především na situace, kdy robot tlačí komponentu nebo kdy jsou dvě komponenty velmi blízko sebe či se dokonce překrývají. Tyto situace nebyly ve využívaném detektoru pokryty především z důvodu použití algoritmu pro automatizovanou tvorbu datasetu. Ten totiž není v současné verzi schopen ve snímku lokalizovat více než jeden objekt.

Prvním velmi důležitým vylepšením by tedy mělo být vytvoření výrazně širšího a variabilnějšího datasetu a následné přetrénování využívaného detektoru. Výsledný detektor objektů by měl být výrazně robustnější, přesnější a spolehlivější. To by umožnilo dále vylepšovat i zbylé algoritmy z programové části.

6.2 Optimalizace separačních robotů

Dalším možným rozšířením práce je optimalizace tvaru separačních robotů. Hlavní motivací je omezit působení magnetického pole vyvolaného soustavou magnetů robota na komponenty kolem něj. Jak již bylo popsáno v části 4, v současnosti používaný robot *Maxi* není schopen z tohoto důvodu separovat piny CPU. Pro tyto účely by bylo vhodné znovu využít programu pro modelování a simulace COMSOL Multiphysics. Pomocí tohoto programu by mohly být zjištěny limity mechanické konstrukce robota s ohledem na separaci komponent částečně tvořených magnetickými materiály.

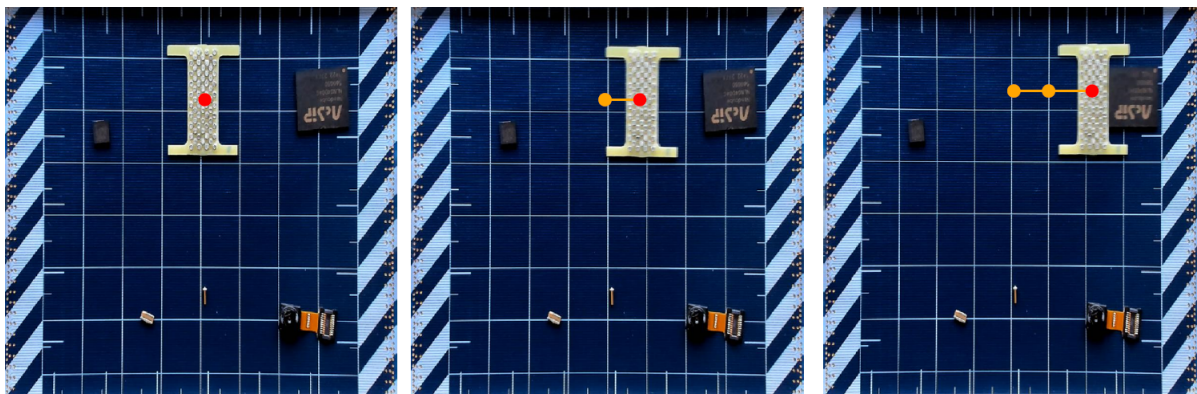
Dále by bylo přínosné navrhnout nové typy robotů, které by se nezabývaly separací samotnou, ale zajišťovaly by další úkony přispívající k jejímu hladkému průběhu. Diskutovány jsou především dva zcela nové typy robotů. Rozhrnovací robot by byl využit v případě, kdy je větší množství komponent elektronického odpadu na jednom místě blízko u sebe. Tento robot by do daného

místa vjel a komponenty by rozhrnul. Tím by zvětšil mezery mezi nimi, usnadnil tak neuronové síti správnou detekci a zároveň separačnímu robotu následnou separaci. Druhým uvažovaným typem robota je odhrnovací robot. Ten by byl využíván v případech, kdy je komponenta tak blízko okraji pracovní plochy, že ji nelze separačním robotem odpovídajícím způsobem zachytit. Jeho úkolem by bylo komponentu odsunout dále od okraje pracovní plochy a tím opět umožnit použití separačního robota.

6.3 Přidání zpětné vazby

Pro kontrolu správné funkce automatizované separace by bylo vhodné do systému přidat zpětnou vazbu. Pro zajištění bezpečnosti provozu systému dává smysl kontinuálně sledovat pozici robota s ohledem na vykonávanou trajektorii. Situace, kdy by se pozice robota výrazně odchylovala od předpokládané trajektorie, by značila nesrovnalost v procesu separace. Separační systém by mohl být pozastaven a pokud by to bylo možné, byla by provedena automatická korekce. V případě výraznějšího problému by byla informována obsluha systému.

Pro účely zavedení zpětné vazby byl v rámci této práce implementován KLT tracker [50]. Jedná se o algoritmus, který je schopný sledovat pozici (v tomto případě střed) robota ve snímcích jdoucích za sebou. Algoritmus byl navázán na výstupy implementované neuronové sítě. Vizualizace sledování robota ve snímku pomocí KLT trackeru je znázorněna na Obrázku 31. Pro správnou funkci však KLT tracker vyžaduje přísun aktuálních snímků několikrát za vteřinu (s ohledem na rychlost pohybu robota a princip KLT trackeru). V opačném případě není jeho použití vhodné. Zde bylo bohužel dosaženo limitu využívané technologie. V prostředí MATLAB nebylo možné pořizovat snímky v požadované frekvenci a zároveň zajišťovat plynulý pohyb robota po separační trajektorii. V rámci budoucího vývoje by proto mohlo dojít k optimalizaci programu nebo k přesunu části funkce programového řešení do jiného zařízení.



Obrázek 31: Vizualizace funkce KLT trackeru pro sledování pozice robota. Červeně je zobrazena aktuální detekovaná pozice středu robota. Oranžově je zobrazen předchozí postup.

6.4 Kontinuální automatizovaná paralelní separace

Nejambicióznějším a zároveň nejkompexnějším cílem pro další výzkum je dosažení kontinuální automatizované paralelní separace. Kontinuita by mohla být zajištěna určitým dispenzerem, který by na platformu distribuoval vždy daný počet komponent k separaci. Automatizace procesu již byla popsána v rámci této práce. Výrazným posunem kupředu by pak byla možnost paralelní separace. Proces separace už by nebyl zajišťován pouze jedním robotem, ale hned několika. To by umožnilo výrazně zvýšit rychlost separace a tím pádem i výsledný objem odseparovaných komponent. V případě dosažení tohoto cíle by bylo na místě uvažovat o možnostech komerčního využití výsledného separačního systému.

7 Zhodnocení a závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývá důležitou problematikou separace elektronického odpadu. Problémy související s elektronickým odpadem se budou v následujících letech dále prohlubovat. Díky tomu je současné aktivní řešení této problematiky velmi perspektivní.

V úvodu této práce byly definovány její cíle a motivace. Cílem práce bylo ověření využitelnosti představených technologií - miniaturních magnetických robotů a algoritmů optické lokalizace. Hlavním cílem pak bylo vzájemné propojení těchto technologií za účelem návrhu a realizace systému pro separaci elektronického odpadu. Dalším důležitým cílem bylo definovat takové komponenty, které je vhodné separovat navrženým způsobem. Mezi tyto komponenty byly zařazeny piny a kondenzátory CPU nebo čipy a kamery pocházející z mobilních telefonů.

V rámci práce byly navrženy a realizovány dva separační systémy. Prvním z nich byl systém pro manuální separaci komponent elektronického odpadu. Ten staví především na mechanické části této práce. Za tímto účelem byla navržena a zhotovena separační platforma, která využívá předchozího vývoje modulu *Gryllus*². Tato platforma byla upravena pro účely separace pomocí speciálních separačních robotů, které byly rovněž navrženy a vyrobeny v rámci této práce. Manuální separační systém musí být nicméně neustále ovládán uživatelem pomocí gamepadu, což dělá jeho provoz poměrně nevýhodným. Z toho důvodu bylo přistoupeno k automatizaci separačního procesu pomocí implementovaných algoritmů. Zde bylo využito funkce neuronových sítí pro účely detekce objektů a algoritmů pro detekci tlačících bodů, pro plánování trajektorie, pro samotnou aktuaci robotů a dalších.

Výstupem této práce je automatizované řešení pro separaci elektronického odpadu. Jedná se o první prototyp takového systému a především o proof-of-concept řešení. Navzdory tomu splňuje toto řešení veškeré požadavky, které na něj byly již před samotnou prací kladeny. Manuální i automatizovaný systém byly experimentálně testovány a výsledky byly velmi dobré.

S ohledem na dosažené výsledky a perspektivu řešené oblasti byly v závěru práce definovány směry dalšího výzkumu. Následný rozvoj používaných technologií může vést až ke komerčnímu využití představeného separačního systému. To by bylo nejen obrovským úspěchem, ale především výrazným přispěním k řešení problematiky elektronického odpadu a udržitelnosti.

Seznam použité literatury

- [1] *What is E-waste? - Definition and Why It's Important [online]*, Dostupné z: <https://www.ewaste1.com/what-is-e-waste/>, cit. 12.11.2021.
- [2] *What Is E-Waste? [online]*, Dostupné z: <https://www.calrecycle.ca.gov/electronics/whatisewaste>, cit. 12.11.2021.
- [3] M. Husák, *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Academia, 2008, ISBN: 978-80-200-1478-8.
- [4] M. Sitti, *Mobile Microrobotics*. MIT Press, čvn. 2017.
- [5] *Robot: Wikipedia: the free encyclopedia [online]*, Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Robot>, cit. 12.11.2021.
- [6] J. Kuthan, „Elektromagnetický systém pro polohování magnetických těles,“ Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [7] *What Is Deep Learning? - How It Works, Techniques & Applications - MATLAB & Simulink [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/deep-learning.html>, cit. 12.11.2021.
- [8] *What Is a Neural Network? - MATLAB & Simulink [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/neural-network.html>, cit. 12.11.2021.
- [9] A. Islam, T. Ahmed, M. R. Awual et al., „Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste-A review,“ *Journal of Cleaner Production*, roč. 244, 2020.
- [10] G. Bel, C. van Brunschot, N. Easen et al., „A New Circular Vision for Electronics - Time for a Global Reboot,“ *World Economic Forum*, 2019.
- [11] Z. Wang, B. Zhang a D. Guan, „Take responsibility for electronic-waste disposal,“ *Nature*, roč. 536, s. 23–25, 2016.
- [12] V. Lapuník, „Elektronické digitální materiály a miniaturní roboty,“ Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- [13] R. Widmer, H. Oswald-Krapf, D. Sinha-Khetriwal, M. Schnellmann a H. Böni, „Global perspectives on e-waste,“ *Environmental Impact Assessment Review*, roč. 25, s. 436–458, 2005.
- [14] K. Binnemans, P. T. Jones, B. Blanpain et al., „Recycling of rare earths: a critical review,“ *Journal of cleaner production*, roč. 51, s. 1–22, 2013.
- [15] J. M. Klinger, „Rare earth elements: Development, sustainability and policy issues,“ *The Extractive Industries and Society*, roč. 5, s. 1–7, 2018.
- [16] V. Koval, *Vladimír Kočí: Neházejme problém s odpady na jiné země [online]*, Dostupné z: <https://www.mujozhlaz.cz/budoucnost-r/vladimir-koci-nehazejme-problem-s-odpady-na-jine-zeme>, cit. 12.11.2021, 2020.

- [17] *E-Waste Is Taking Over the World. 5G Will Make It Even Worse [online]*, Dostupné z: <https://www.worldpoliticsreview.com/articles/29169/how-to-manage-the-world-s-growing-e-waste-problem>, cit. 12.11.2021.
- [18] *The road to recovery*, <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0231-4>, 2019.
- [19] E. Hsu, K. Barmak, A. C. West a A.-H. A. Park, „Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: a review of metal extraction and recovery technologies,“ *Green Chemistry*, roč. 21, s. 919–936, 2019.
- [20] M. Kaya, „Current WEEE recycling solutions,“ *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*, roč. 21, s. 33–93, 2018.
- [21] J. Kacerovský, „Elektrostatický separátor plastových materiálů,“ Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [22] T. J. Lukka, T. Tossavainen, J. V. Kujala a T. Raiko, „ZenRobotics Recycler – Robotic Sorting using Machine Learning,“ Citeseer, 2014, s. 1–8.
- [23] *Rise Of The Recycling Robots [online]*, Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/kenrickcai/2020/11/12/rise-of-the-recycling-robots/?sh=748e31b65f9e>, cit. 12.11.2021.
- [24] *Robots that can sort recycling - Massachusetts Institute of Technology [online]*, Dostupné z: <https://news.mit.edu/2019/mit-robots-can-sort-recycling-0416>, cit. 12.11.2021.
- [25] *Apple adds Earth Day donations to trade-in and recycling program [online]*, Dostupné z: <https://www.apple.com/newsroom/2018/04/apple-adds-earth-day-donations-to-trade-in-and-recycling-program/>, cit. 12.11.2021.
- [26] J. Kuthan, M. Juřík, M. Vitek a F. Mach, „Collective Planar Actuation of Miniature Magnetic Robots Towards Individual Robot Operation,“ *2020 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, s. 1–6, 2020.
- [27] M. Juřík, J. Kuthan, J. Vlček a F. Mach, „Positioning Uncertainty Reduction of Magnetically Guided Actuation on Planar Surfaces,“ *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, s. 1772–1778, 2019.
- [28] J. Kuthan, M. Juřík a F. Mach, „Magnetic Actuation of Multiple Robots by the Coplanar Coils System,“ *2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, s. 1–5, 2019.
- [29] J. Kuthan a M. Juřík, „Robotic system based on magnetically guided actuation on the planar surfaces,“ *Elektrotechnika a informatika: XVIII. ročník konference doktorských prací Zámek Nečtiny*, s. 15–19, 2017.
- [30] J. Kuthan a M. Juřík, „Klíčové parametry pro polohování magnetických těles v planární rovině,“ *2018 Elektrotechnika a Informatika*, s. 90–94, 2018.
- [31] J. Šedivec, „Systém na ovládání miniaturních robotů,“ Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [32] *Deep Learning Onramp - MATLAB & Simulink Tutorial [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/learn/tutorials/deep-learning-onramp.html>, cit. 23.06.2021.

- [33] *Deep Learning with MATLAB | MATLAB and Simulink Training [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/training-schedule/deep-learning-with-matlab.html>, cit. 23.06.2021.
- [34] *Precious Metal Removal from Electronic Components [online]*, Dostupné z: <https://www.conceptmanagement.co.uk/knowledge/materials/precious-metal>, cit. 19.04.2022.
- [35] A. Marra, A. Cesaro a V. Belgiorno, „Separation efficiency of valuable and critical metals in WEEE mechanical treatments,“ *Journal of Cleaner Production*, roč. 186, s. 490–498, 2018.
- [36] K. Binnemans, P. T. Jones, B. Blanpain et al., „Recycling of rare earths: a critical review,“ *Journal of Cleaner Production*, roč. 51, s. 1–22, 2013.
- [37] Konzultace s prof. Ing. Vladimírem Kočím, Ph.D. MBA dne 14.04.2021.
- [38] Konzultace s RNDr. Milošem Polákem, Ph.D. dne 16.08.2021.
- [39] *Remobil | Sběr nepotřebných mobilních telefonů [online]*, Dostupné z: <https://remobil.cz/>, cit. 19.04.2022.
- [40] *Global Chip Shortage Makes It Tough to Buy Certain Cars - Consumer Reports [online]*, Dostupné z: <https://www.consumerreports.org/buying-a-car/global-chip-shortage-makes-it-tough-to-buy-certain-cars-a8160576456/>, cit. 19.04.2022.
- [41] *Chip Shortage, Covid, War Make Car Options, Safety Assists Unavailable - Forbes Wheels [online]*, Dostupné z: <https://www.forbes.com/wheels/news/options-chip-shortage/>, cit. 19.04.2022.
- [42] *VW predicts global chip shortage will last until 2024 | CAR Magazine [online]*, Dostupné z: <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/industry-news/global-chip-shortage/>, cit. 19.04.2022.
- [43] M. Vitek, „Intelligent Robot for the Minirobotics Platform,“ *Elektrotechnika a Informatika 2020*, s. 169–172, 2020.
- [44] *Train a Faster R-CNN deep learning object detector - MATLAB trainFasterRCNNObjectDetector [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/trainfasterrcnnobjectdetector.html>, cit. 23.06.2021.
- [45] *Object Detection Using YOLO v3 Deep Learning - MATLAB & Simulink [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/object-detection-using-yolo-v3-deep-learning.html>, cit. 23.06.2021.
- [46] *SqueezeNet convolutional neural network - MATLAB squeezeNet [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/squeezenet.html>, cit. 23.06.2021.
- [47] M. Juřík, V. Šmídl a F. Mach, „Trade-off Between Resolution and Frame Rate of Visual Tracking of Mini-robots on an Experimental Planar Platform,“ *Journal of Micro-Bio Robotics*, 2020.
- [48] *Train YOLO v2 object detector - MATLAB trainYOLOv2ObjectDetector [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/trainyolov2objectdetector.html>, cit. 09.05.2022.

- [49] *Detect vehicles using YOLO v2 Network - MATLAB vehicleDetectorYOLOv2 [online]*, Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/driving/ref/vehicledetectorYOLOv2.html>, cit. 09.05.2022.
- [50] C. Tomasi a T. Kanade, „Detection and tracking of point,“ *Int J Comput Vis*, roč. 9, s. 137–154, 1991.