

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Štěpán Dvořáček



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ROBOT S AUTONOMNÍM AUDIO-VIZUÁLNÍM ŘÍZENÍM

ROBOT WITH AUTONOMOUS AUDIO-VIDEO CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Dvořáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Přinosil, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Bc. Štěpán Dvořáček

ID: 152475

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Robot s autonomním audio-vizuálním řízením

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte konstrukční návrh jednoduchého robota s kolovým pohonem vybaveného výpočetní jednotkou a zařízením pro záznam zvuku a obrazu. Na základě toho návrhu robota zkonstruujte a ověřte jeho základní funkčnost. Dále provedte návrh a implementaci softwarové části robota, která bude zodpovědná za autonomní řízení jeho pohybu na základě zpracování informací z audio-vizuálního obsahu získaného ze záznamových zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SUGANDI, Budi, Hyoungseop KIM, Joo Kooi TAN a Seiji ISHIKAWA. Object Tracking Based on Color Information Employing Particle Filter Algorithm. Object Tracking. InTech, 2011, 69-88.

[2] DOSTÁLEK, Petr; DOLINAY, Jan; VAŠEK, Vladimír. Embedded system for audio source localization based on beamforming. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 2012.

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jiří Přinosil, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a realizací mobilního robota s autonomním audio-vizuálním řízením. Tento robot je schopen pohybu na základě senzorů složených z kamery a mikrofону. Konstrukce se skládá z komponent vyrobených 3D tiskem a všesměrových kol Mecanum. Software využívá knihovnu OpenCV pro zpracování obrazu a algoritmy pro výpočet MFCC a DTW pro rozpoznávání hlasových pokynů.

KLÍČOVÁ SLOVA: Robot s autonomním audio-vizuálním řízením, zpracování obrazu a zvuku v reálném čase, kamera, mikrofón, ODROID, STM32, Linux, OpenCV, MFCC, DTW, C++, C, 3D tisk, Mecanum, všesměrová kola.

ABSTRACT

This thesis describes the design and realization of a mobile robot with autonomous audio-visual control. This robot is able of movement based on sensors consisting of camera and microphone. The mechanical part consists of components made with 3D print technology and omnidirectional Mecanum wheels. Software utilizes OpenCV library for image processing and computes MFCC a DTW for voice command detection.

KEYWORDS: Robot with autonomous audio-visual control, real-time video and audio processing, camera, microphone, ODROID, STM32, Linux, OpenCV, MFCC, DTW, C++, C, 3D print, Mecanum, omnidirectional wheels.

DVOŘÁČEK, Štěpán. *Robot s autonomním audio-vizuálním řízením*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118147>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Přinosil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „*Robot s autonomním audio-vizuálním řízením*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

. podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Přinosilovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

. podpis autora

Obsah

Úvod	7
1 Typy podvozku robota	8
Úvod	8
1.1 Tříkolový podvozek	8
1.2 Pásový podvozek	9
1.3 Čtyřkolový podvozek s pohonem všech kol	9
1.4 Výběr typu podvozku	10
2 Konstrukce	11
2.1 Rameno 1. generace	11
2.2 Rameno 2. generace	13
2.3 Centrální U profil	14
2.4 Centrální díl	15
2.5 Všesměrová kola Mecanum	16
2.6 Kinematika pohybu Mecanum kol	17
3 Návrh elektroniky	19
3.1 Pohon	19
3.2 Napájecí zdroj	20
3.3 Řízení motorů	20
3.4 Sběrnice UART	20
3.5 Řídící modul	21
3.5.1 Minipočítač ODROID U2	21
3.5.2 Mikrokontroler STM32F042	22
3.6 Snímače	24
3.6.1 Kamera	24
3.6.2 Mikrofon	24
3.7 Návrh napájecí a řídicí desky	26
3.8 Konektory	29
3.9 Technické parametry robota	29
4 Zpracování obrazu	31
4.1 OpenCV	31
4.2 Detekce obličeje	31
4.3 Haarovy příznaky	31
4.4 Integrální obraz	32

4.5	Adaboost	34
4.6	Použití Kaskádových klasifikátorů	34
4.7	Vektorové řízení	35
5	Zpracování zvuku	38
5.1	Rozpoznávání hlasových pokynů	38
5.2	MFCC	38
5.3	DTW	41
5.4	Vyhodnocení databáze	42
6	Návrh software	44
6.1	Příprava platformy Odroid	44
6.2	Obsluha kamery a zvukové karty	44
6.3	Hlavní program	45
6.4	Firmware mikrokontroleru STM32F0	46
7	Testování	48
8	Závěr	49
	Literatura	50
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	54
A	Obsah přiloženého CD	55

Seznam obrázků

1.1 Podvozek Robrouk, 2 hnací kola	8
1.2 Tankový podvozek TANK-04	9
1.3 Hackabot Nano	10
2.1 Rameno 1	12
2.2 Rameno 1 výkres	12
2.3 Rameno 2 v sestavě	13
2.4 U profil	14
2.5 Krajní polohy ramen podvozku	14
2.6 Centrální díl	15
2.7 Mecanum kolo	16
2.8 Charakteristické směry pohybu podvozku s všesměrovými koly	16
2.9 Rozměry podvozku určující kinematiku	17
2.10 Závislost rychlosti robota na intenzitě PWM	18
3.1 Motor s převodovkou Pololu 1124	19
3.2 Driver pro dva DC motory Pololu DRV8835	20
3.3 Datový rámec protokolu UART	21
3.4 ODROID U2	22
3.5 Konfigurace pinů v prostředí CubeMX	23
3.6 USB kamera LI-OV5640-USB-72	24
3.7 Zapojení mikrofonního předzesilovače	25
3.8 Návrh desky mikrofonního předzesilovače	25
3.9 Schéma zapojení napájecí a řídicí desky	26
3.10 Návrh napájecí a řídicí desky	28
3.11 Robot	30
4.1 Haarovy příznaky [26]	32
4.2 Integrovaný obraz	33
4.3 První a druhé příznaky vybrané algoritmem Adaboost [26]	34
4.4 Schématické znázornění kaskády detektoru [26]	35
4.5 Zorné pole robota	36
4.6 Rozdělení obrazu na oblasti s příslušnými povely	37
5.1 Postup při výpočtu MFCC	39
5.2 Melova banka filtrů	39
5.3 Zobrazení prvních tří vektorů MFCC pro pokyny doleva a dopředu, zarovnaných do rámce dlouhého 800 ms	40
5.4 Znázornění cesty DTW	41
6.1 Diagram	45

Seznam tabulek

3.1	Parametry pohonu Pololu 1124	19
3.2	Specifikace minipočítače ODROID U2	22
3.3	Parametry mikrokontroleru STM32F042F6P6	23
3.4	Parametry modulu kamery LI-OV5640-USB-72	24
3.5	Technické parametry robota	29
5.1	Vyhodnocení databáze	43
6.1	Příklad povelu <code>DIAGONAL_MOVE(FR, 100)</code>	46
6.2	Příklad povelu <code>ARC_MOVE(50, 100)</code>	46

Úvod

V současné době existuje vysoký počet různých druhů robotů pro širokou oblast použití (bezpečnost, zdravotnictví, montážní linky, zábavní průmysl apod.) Speciální kategorií jsou autonomní roboty, tedy roboty schopné samostatně bez zásahu člověka plnit úkoly. Zde patří například drony pro doručování zásilek [18], autonomní vysavače a sekačky na trávu [19], špionážní letadla, roboty pro průzkum Marsu [20]. Některé z nich dokážou získávat energii ze solárních článků nebo samy dorazit do místa s dobíjecí stanicí.

Jedním z nejvíce sledovaných témat v této oblasti je autonomní doprava osob. Jako příklad může být uveden projekt švýcarských mikrobusů Trapeze [21]. Mezi osobními automobily patří v použitých technologiích a spolehlivosti na přední místo projekt autopilot společnosti Tesla [22].

V následujících kapitolách bude popsán návrh dílčích komponent robota. Jedním vstupním parametrem mimo zadání byl výběr řídicího minipočítače ODROID U2 [1] a USB kamery [2]. Robot slouží pro zpracování obrazových a zvukových dat s mobilním použitím. Je navržen tak, aby jeho funkčnost bylo možné upravovat jak po hardwarové, tak po softwarové stránce.

Ve srovnání s první verzí byla pozměněna konstrukce robota a jednotlivé díly tvořící podvozek byly upraveny pro výrobu 3D tiskem.

1 Typy podvozku robota

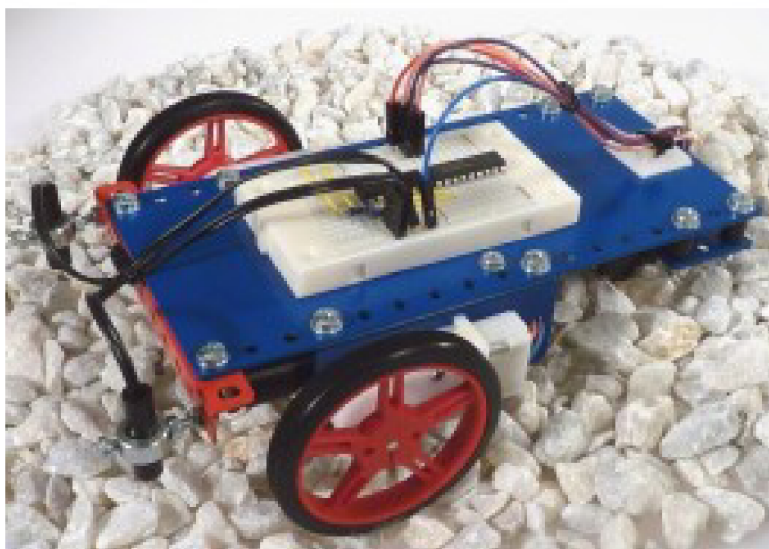
V této části jsou popsány možné typy podvozku, které jsou vhodné pro robota podle zadání této práce a v závěru je vysvětleno, proč byla zvolena cesta vlastního návrhu.

1.1 Tříkolový podvozek

Jedná se o velmi jednoduchou koncepci podvozku, kterou lze dále rozdělit na 2 typy:

- 1) Jedno hnací kolo, které zároveň směrové, a dvě pomocná volně otočná kola.
- 2) Dvě hnací kola, diferenčně řízená, a jedno pomocné volně otočné kolo.

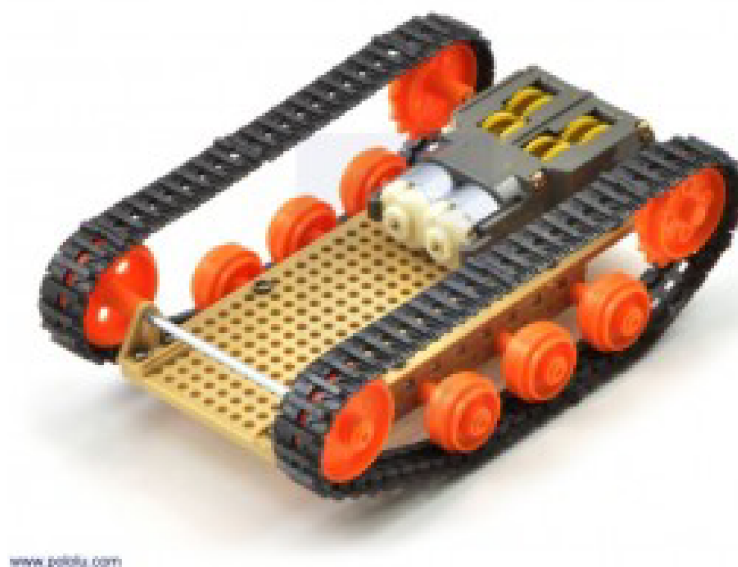
Tyto roboty lze dobře navádět do požadovaného směru, jsou velmi obratné, ale mají problém překonávat překážky. Další nevýhodou je odlišná kinematika zatáčení při změně polohy hnacích kol vůči směru jízdy.



Obr. 1.1: Podvozek Robrouk, 2 hnací kola [14].

1.2 Pásový podvozek

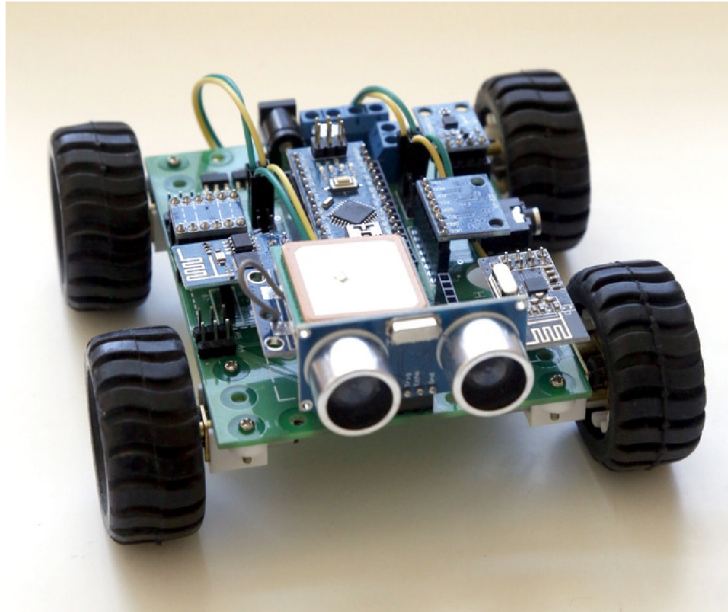
Jednoznačná výhoda pásového podvozku je prostupnost terénem a stejné chování při směru jízdy dopředu i dozadu. Nevýhodou je předozadní kývání během jízdy, které je nevyhnutelné a vadilo by při snímání obrazu kamerou. Nezanedbatelným fakt jsou větší energetické ztráty ve tření pásů a jejich náchylnost na poškození nebo ztrátu funkce při vniknutí drobného předmětu do mechanismu kladek.



Obr. 1.2: Tankový podvozek TANK-04 [15].

1.3 Čtyřkolový podvozek s pohonem všech kol

Tento typ podvozku je velmi vhodný pro zadanou aplikaci, dvojice kol po stranách jsou řízeny diferenčně, při jejich spřažení postačí jeden hnací motor na každou stranu. Jedná se o dobrý kompromis mezi ovladatelností, prostupností terénem a energetickou náročností.



Obr. 1.3: Hackabot Nano [16].

1.4 Výběr typu podvozku

Během průzkumu možných typů podvozku byla jako nejvhodnější vybrána konfigurace čtyř hnaných kol. Při hledání stavebnice s pojezdovými koly vhodné velikosti a kvality vznikla varianta zakoupení samotných kol a podvozek postavit dle vlastního návrhu. Díky tomu mohla být zvolena všesměrová kola Mecanum, která umožňují translační pohyb robota do všech směrů, což je velká výhoda při navádění robota kamerou, protože to umožňuje být za jakýchkoliv okolností čelem k překážce nebo zkoumanému objektu.

2 Konstrukce

V této části jsou popsány dílčí mechanické komponenty podvozku. Vzhledem k výběru všesměrových pojezdových kol, která musí být poháněna vždy vlastním motorem, byla navržena konstrukce s dvojicemi nezávisle zavěšených ramen, takže podvozek dobře kopíruje terén i v obtížných podmínkách.

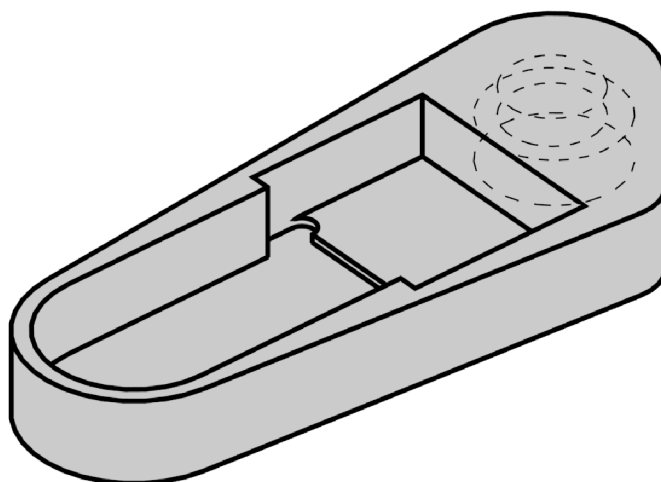
Konstrukce podvozku se skládá z centrálního dílu, ke kterému jsou otočně uchycena čtyři ramena, ve kterých jsou uloženy DC motory [4] s převodovkou a pojezdovými koly. Centrální profil dále nese desku pro napájení a řízení motorů a minipočítač ODROID U2 [1]. Díky této konfiguraci má robot velkou světlou výšku v poměru k celkovým rozměrům a posouváním ramen lze měnit rozvor.

Původní návrh ramen motorů s radiálními ložisky nalisovanými do připravených otvorů nevykazoval potřebnou tuhost. Současná verze obsahuje v každém rameni dvojici axiálních ložisek. Centrální díl byl upraven. Ve spodní části vznikl prostor pro akumulátor. V zadní části je upevněn hlavní páčkový spínač.

V následující části je popsán návrh a výroba jednotlivých komponent obou verzí, označeny jsou číslicemi 1 a 2.

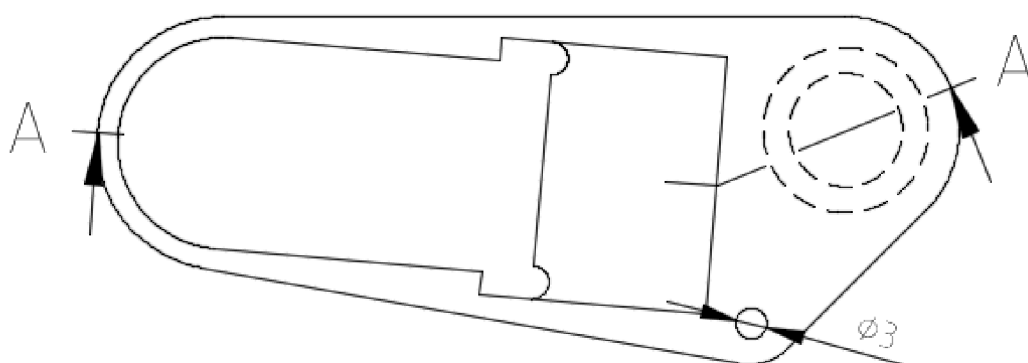
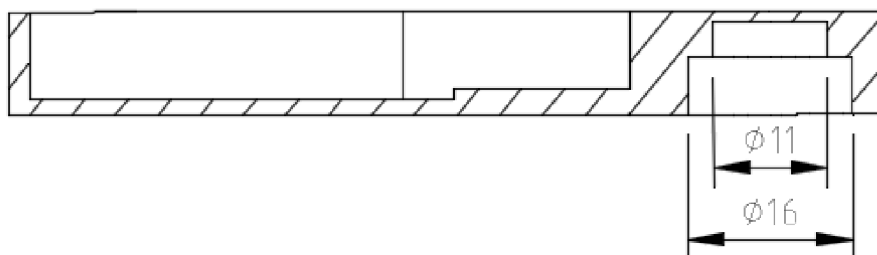
2.1 Rameno 1. generace

Každé rameno je vyfrézováno z hliníkové desky tloušťky 10 mm. Z jedné strany je zahlobení pro uložení motorů, které jsou dále zajištěny pryžovým páskem. Z druhé strany je v místě otáčení vyfrézováno uložení ložiska 625 a zahlobení pro půlkulatou hlavičku šroubu M5, kterým je rameno spojeno s centrálním profilem. Ramena byla vyrobena jako dvě zrcadlově otočené dvojice, což bylo dáno geometrií navrženého podvozku. Rameno má dodatečně provrtaný otvor pro drátěné vahadlo o průměru 2 mm, kterým jsou dvojice spřaženy.



Obr. 2.1: Rameno 1.

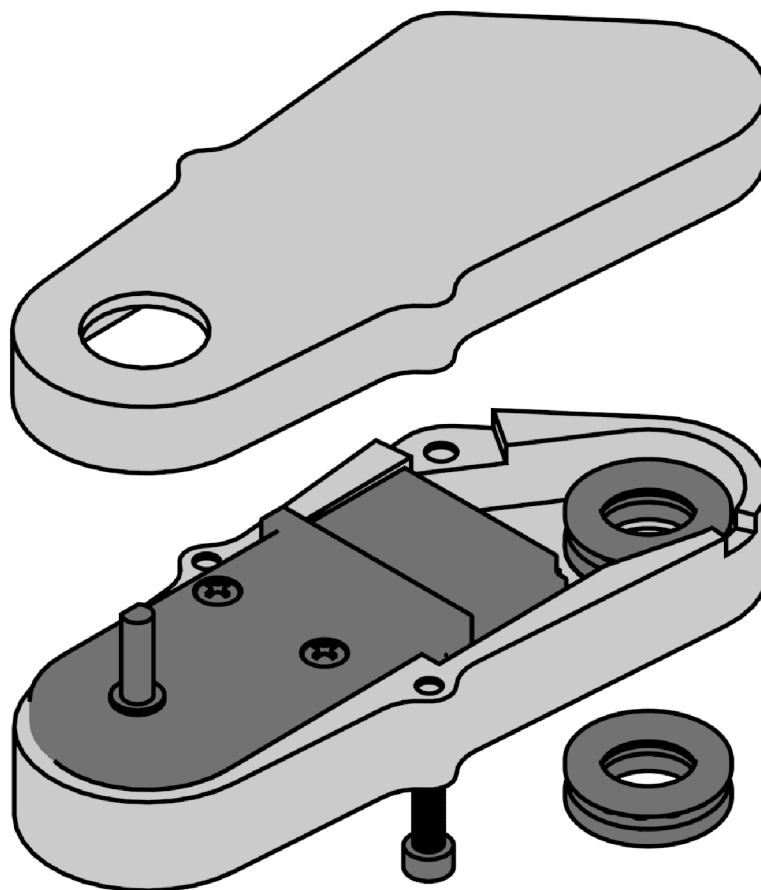
A - A
(1:1)



Obr. 2.2: Rameno 1 výkres.

2.2 Rameno 2. generace

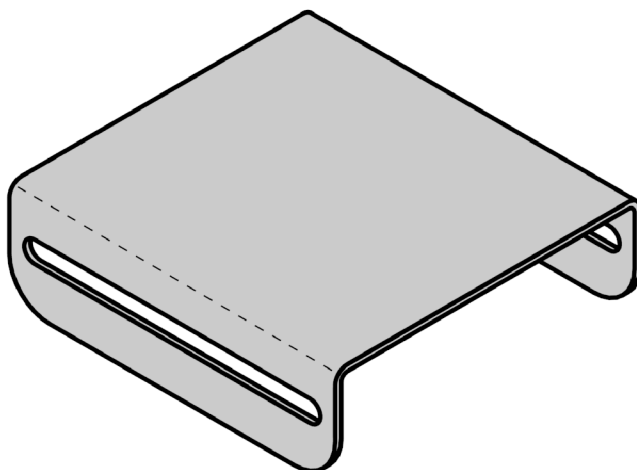
Ramena byla přepracována pro uložení kuličkových axiálních ložisek. Každé ložisko se skládá ze dvou vnějších kroužků s drážkou a prostředního věnečku s držákem kuliček. Při montáži jsou ložiska umístěna z obou stran stěny ramene a stažena šroubem a maticí. Díky tomu nebylo nutné frézovat přesná uložení do hliníkového obrobku a ramena se mohla tisknout z PLA (polylactic acid) filamentu. Ramena se nyní skládají ze dvou polovin, které jsou spojeny třemi šrouby M3. V horní polovině (krytu) orientované směrem ke kolu je otvor o 0.2 mm menší než je průměr šroubu. Při montáži se šroub do materiálu zařízne. Přestože se nejedná o technicky naprosto dokonalé řešení, plní bezproblémovou funkci.



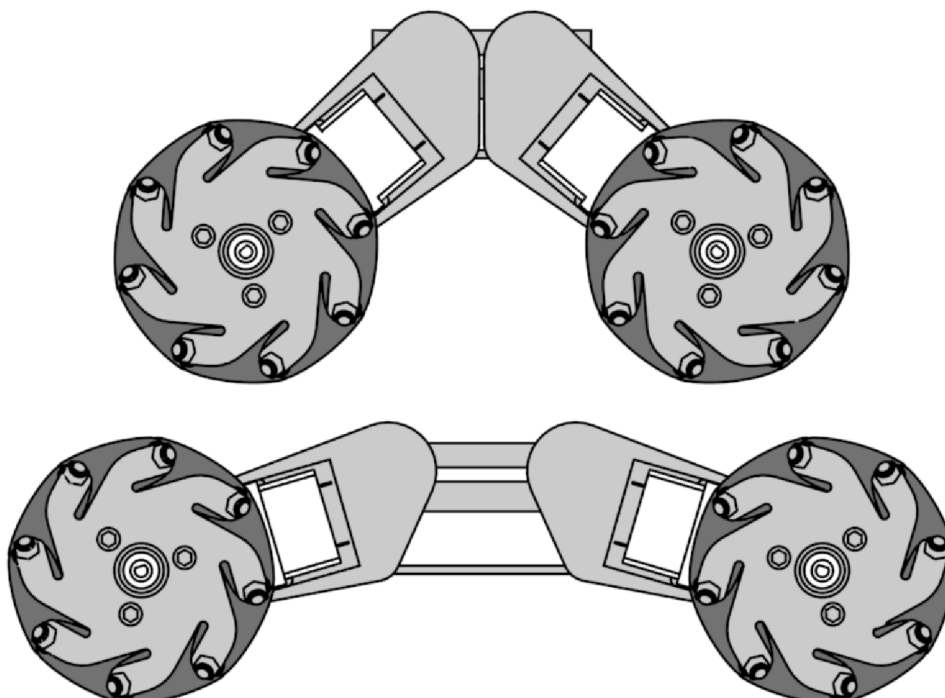
Obr. 2.3: Rameno 2 v sestavě.

2.3 Centrální U profil

Tento díl je vyroben z ohnutého hliníkového plechu tloušťky 1,5 mm. Má po obou stranách drážku pro posouvání šroubů upevňujících ramena. Zároveň plní funkci chladiče procesoru ODROID U2.



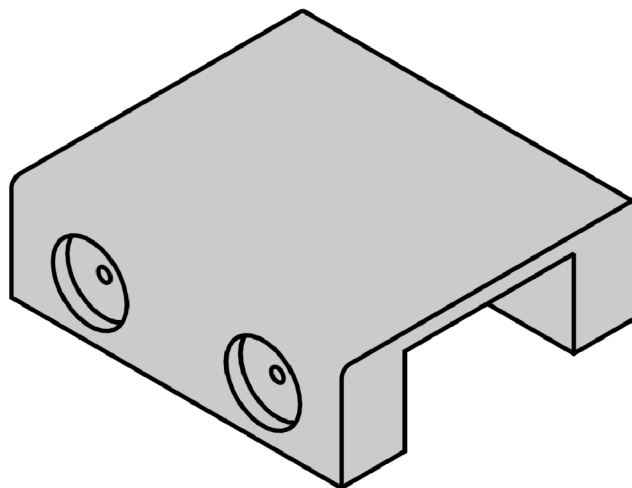
Obr. 2.4: U profil.



Obr. 2.5: Krajní polohy ramen podvozku.

2.4 Centrální díl

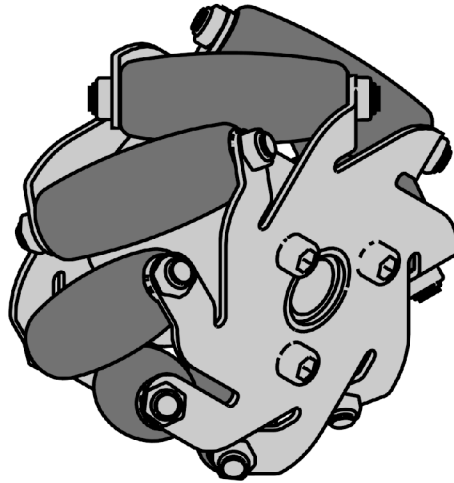
Tento díl má podobu kvádrů s vybráním pro uchycení akumulátoru a zahloubením pro matice šroubů M8 upevňujících ramena. Obdobně jako ramena 2. generace je vyroben 3D tiskem z PLA. V zadní části je držák pro centrální spínač.



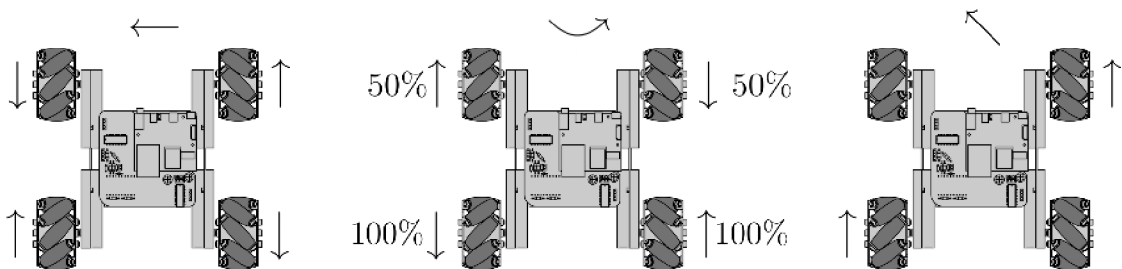
Obr. 2.6: Centrální díl.

2.5 Všesměrová kola Mecanum

Tato kola jsou vhodná pro robotickou platformu, která vyžaduje pohyb do více směrů. Ve srovnání s běžným pojzdovým kolem jsou vybavena po obvodu menšími elementy ve tvaru válce zúženého směrem k obou koncům. Malé válečky u tohoto typu kol svírají úhel 45° s osou rotace kola a mohou se volně otáčet. Při montáži na čtyřkolový podvozek je nutné dbát správné orientace a použít na každém boku kola s navzájem opačným směrem válečků tak, aby pomyslné spojnice os válečků svíraly pravý úhel a sbíhaly se směrem ke středu podvozku. Ve srovnání s podvozkem stejné konfigurace s konvenčními pojzdovými koly se kola Mecanum chovají podobně (jízda dopředu, dozadu, otáčení), ovšem při správné změně smyslu otáčení se s nimi lze pohybovat také po diagonále a směrem do stran.



Obr. 2.7: Mecanum kolo.



Obr. 2.8: Charakteristické směry pohybu podvozku s všesměrovými koly.

2.6 Kinematika pohybu Mecanum kol

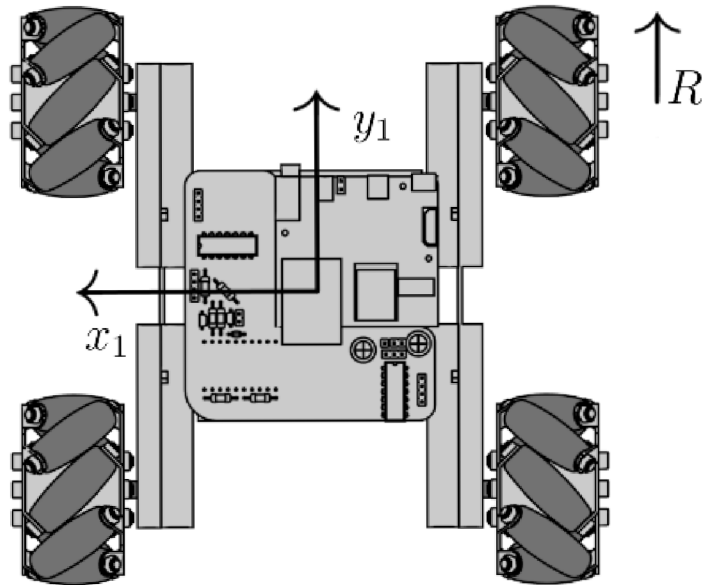
Podvozek s Mecanum koly má 3 stupně volnosti, což znamená, že může vykonávat translační pohyb v libovolném směru a zároveň rotovat kolem svislé osy. Tento pohyb je vyjádřen v následujícím vztahu [27]:

$$d = 1/(x_1 + y_1)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = R/4 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Zde je rozepsán pro úhlové rychlosti jednotlivých kol.

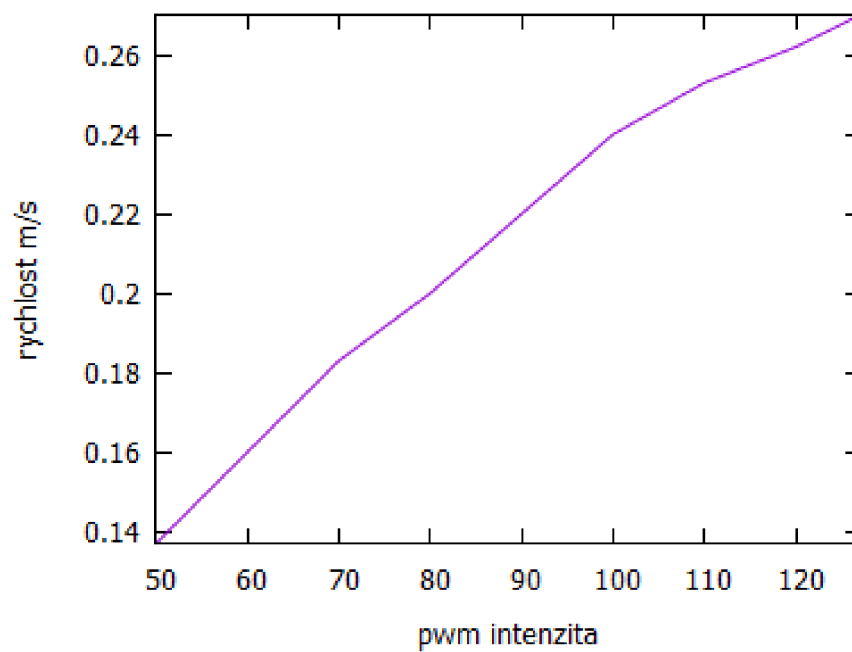
$$\begin{aligned} \omega_1 &= 1/R(v_x + v_y - d\omega_z) \\ \omega_2 &= 1/R(v_x - v_y + d\omega_z) \\ \omega_3 &= 1/R(v_x - v_y - d\omega_z) \\ \omega_4 &= 1/R(v_x + v_y + d\omega_z) \end{aligned} \quad (2.2)$$



Obr. 2.9: Rozměry podvozku určující kinematiku.

R je poloměr kola, ω je úhlová rychlost kola a x , y jsou kolmé vzdálenosti mezi středem podvozku a středem kola.

Experimentálně byly změřeny rychlosti v závislosti na použité střídě pro pohyb směrem dopředu.



Obr. 2.10: Závislost rychlosti robota na intenzitě PWM.

3 Návrh elektroniky

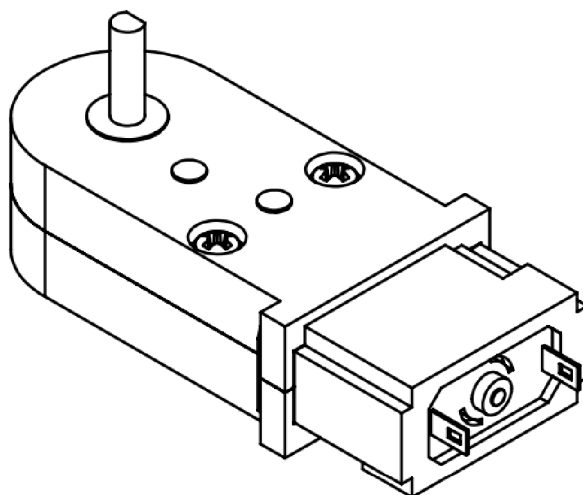
Navržená elektronika se skládá z minipočítače ODROID U2[1], který zpracovává na základě USB kamery[2] a mikrofону[9] podněty z okolí. Za použití sběrnice UART posílá příkazy pomocnému mikrokontroleru STM32F042[3], který PWM signály řídí 4 DC motory[4]. Veškerá elektronika je napájena baterií.

3.1 Pohon

Jako pohon byl vybrán DC motor s redukční převodovkou Pololu 1124[4] a osou o průměru 3 mm vyvedenou kolmo na hřídel motoru. Lze jej povozovat v rozsahu napětí 3-6 V.

Tab. 3.1: Parametry pohonu Pololu 1124

<i>Popis</i>	<i>Hodnota</i>
Jmenovité napětí	4,5 V
Proud naprázdno	80 mA
Maximální proud (brzda)	800 mA
Převodový poměr	120:1
Hmotnost	20 g



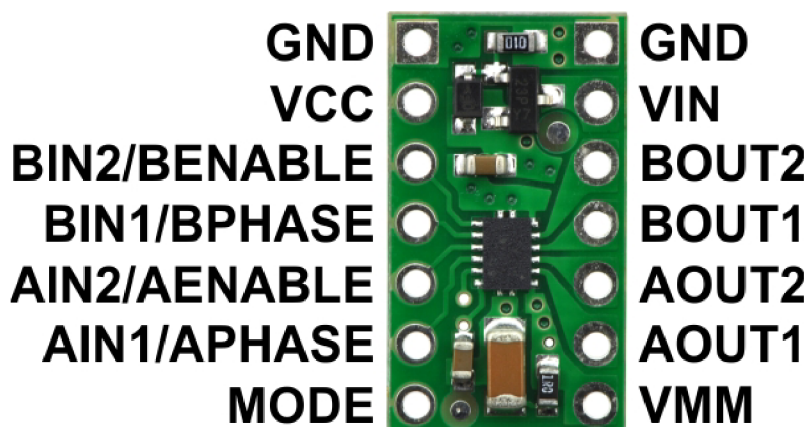
Obr. 3.1: Motor s převodovkou Pololu 1124.

3.2 Napájecí zdroj

Pro napájení celého robota slouží dvě Lipol baterie typu 18650 zapojeny do série s výslednými parametry 7,2 V/2400 mAh. Z baterie jsou napájeny jak motory, pro které je napětí softwarově regulováno na nominální hodnotu 6V pomocí PWM, tak zbylá elektronika, využívající 5V stabilizovaných pomocí regulátoru TRACO TSR 1-2450 [11].

3.3 Řízení motorů

Pro plynulé řízení otáček motorů byl zvolen modul od firmy Pololu [6] založený na obvodu Texas Instruments DRV8835 [7]. Tento obvod má integrovaný H-můstek, umožňuje nezávislé řízení dvou DC motorů a je schopný bez aktivního chlazení do motoru dodávat proud až 1.2 A na kanál (1.5 A ve špičce). Napájecí napětí může být v rozmezí 1-11 V a má vestavěnou ochranu proti přepólování, zkratu a příliš vysoké teplotě. V robotu je použito zapojení, kdy k řízení jednoho motoru postačí jeden PWM signál a smysl otáčení je určen pomocí vstupu PHASE.

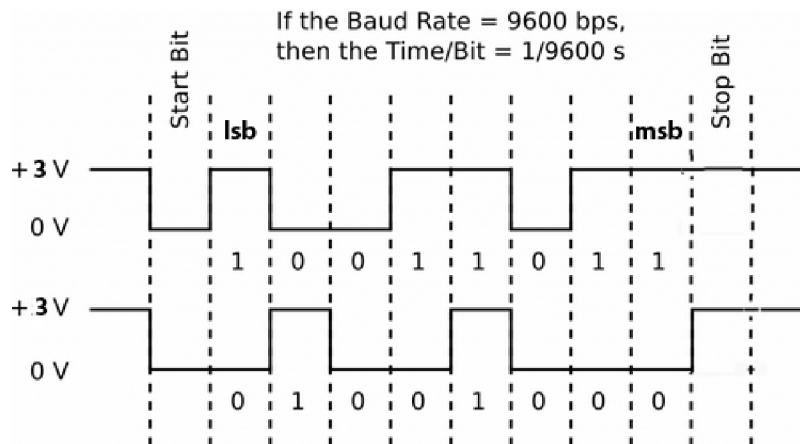


Obr. 3.2: Driver pro dva DC motory Pololu DRV8835.

3.4 Sběrnice UART

Jedná se o protokol pro sériovou komunikaci, který využívá asynchronní přenos informací, což znamená, že kromě datového signálu neexistuje žádný další synchronizační signál (clock). Pro úspěšnou komunikaci a správnou interpretaci zprávy je nutné, aby vysílací i přijímací zařízení znala rychlost přenosu. K detekci jednoduchých chyb může být použit paritní bit vyjadřující sudou či lichou paritu.

UART vysílá data na pinu označovaném obvykle jako TX (transmit), přijímá na pinu RX (receive). Klidová úroveň signálu je logická 1. Vysílání je zahájeno změnou hodnoty signálu na logickou 0 po dobu jednoho bitu (tzv. start-bit). Následovně se posílá nejnižší datový bit, poslední nejvýznamnější datový bit je následován stop bitem, který má opět úroveň logická 1. Po odvysílání stop-bitu může začít přenos dalšího bajtu. Na obrázku zobrazen jeden datový rámeček, čárkovaně jsou odděleny jednotlivé bity.



Obr. 3.3: Datový rámeček protokolu UART [13].

3.5 Řídící modul

3.5.1 Minipočítač ODROID U2

Jedná se o minipočítač založený na čtyřjádrovém procesoru 1.7Ghz ARM Cortex-A9 Exynos4412 Prime [1]. Minipočítač má podporu operačních systémů Linux a Android. Obsahuje 2 x USB2.0 Host port – slouží k připojení kamery a mikrofonu, případně myši a klávesnice při programování, micro HDMI konektor pro připojení externího monitoru a sběrnici UART obsluhující komunikaci s mikrokontrolerem.

Protože ODROID U2 postrádá zvukový vstup, byl použit mikrofon s externí USB zvukovou kartou.

Tab. 3.2: Specifikace minipočítače ODROID U2

<i>Popis</i>	<i>Hodnota</i>
CPU	Samsung Exynos4412 Prime Cortex-A9 Quad Core, 1MB L2 cache
Frekvence	1.7Ghz
GPU	Mali-400 Quad Core 440MHz
RAM	2048MB(2GB) LP-DDR2 880Mega data rate
Paměť	Slot pro SD karty, zásuvka eMMC modulu
Video výstup	micro HDMI konektor, podpora Full HD rozlišení
Audio výstup	sluchátkový jack 3,5mm, HDMI digitální výstup
USB2.0 Host	Dva USB konektory typu A
USB2.0 Device	Micro USB konektor, zařízení se chová jako čtečka karet
Napájení	5V/2A
Rozměry DPS	48 x 52 mm

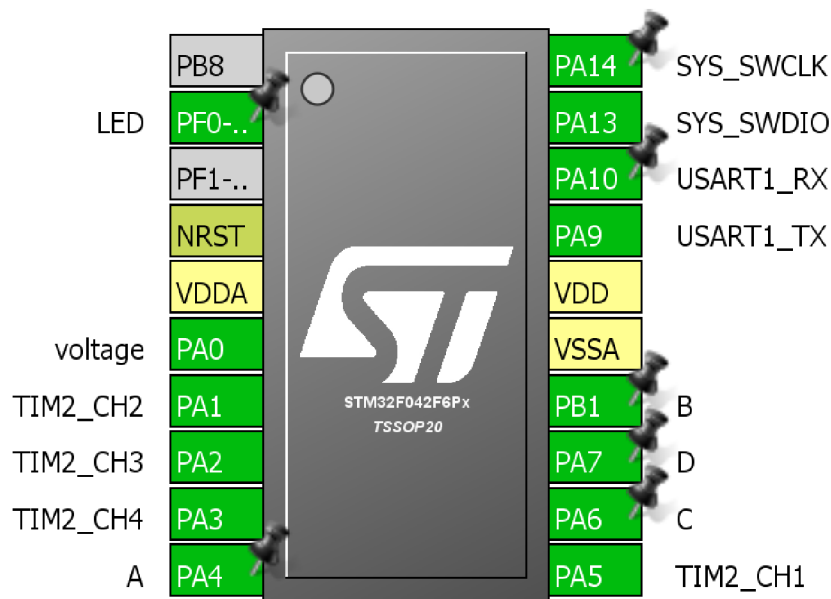


Obr. 3.4: ODROID U2.

3.5.2 Mikrokontroler STM32F042

Mikrokontroler pro ovládání DC motorů pomocí PWM je ST-Micro STM32F042F6P6 s jádrem Cortex-M0 v pouzdru TSSOP20 a paměti 32kB Flash a 6kB SRAM[3].

Obsahuje integrovaný oscilátor s frekvencí 48MHz. Nahrávání firmwaru do mikrokontroleru probíhá pomocí ST-Link v2 USB programátoru. Na desce jsou vyvedeny dva programovací piny (SWDIO, SWCLK) a dva piny pro napájení během programování (3.3V a GND). Pro řízení DC motorů slouží čtyři piny s PWM výstupem a čtyři piny s digitálním výstupem. Kvůli monitorování napětí baterie je pin PA0 nakonfigurován jako analogový vstup. Pin PF0 je nastaven jako digitální výstup a spíná LED na kameře. Pin PF1 je volný a lze jej v budoucnu použít. Pin PB8 je nutné uzemnit, abychom zajistili bootování mikrokontroleru z vnitřní paměti Flash a běh programu ihned po připojení napájení.



Obr. 3.5: Konfigurace pinů v prostředí CubeMX.

Tab. 3.3: Parametry mikrokontroleru STM32F042F6P6

<i>Popis</i>	<i>Hodnota</i>
Jádro	ARM® 32-bit Cortex®-M0
Frekvence	až 48MHz
FLASH	32kB
RAM	6kB
Rozlišení AD převodníku	12 bit
Typ rozhraní	CAN, CEC, I2C, SPI, USART, USB
Pouzdro	TSSOP20
Provozní napájecí napětí	2-3.6 V

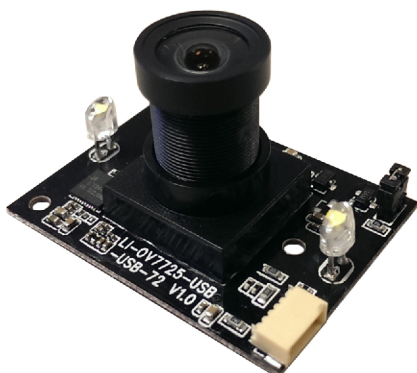
3.6 Snímače

3.6.1 Kamera

USB kamera s volitelným přisvětlením pomocí LED, pro použití v robotu se jeví jako nejlepší nastavení rozlišení 800x600 pixelů a snímkovací frekvence 30 snímků za sekundu [2].

Tab. 3.4: Parametry modulu kamery LI-OV5640-USB-72

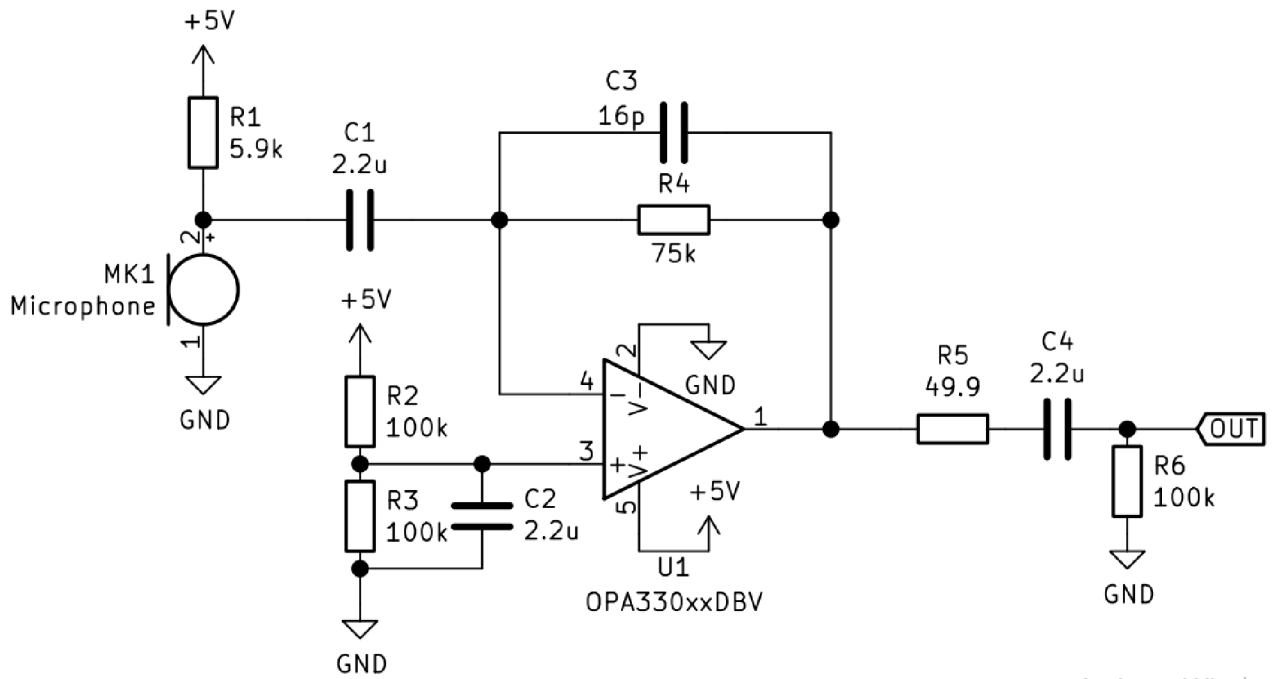
<i>Popis</i>	<i>Hodnota</i>
Zaostřovací vzdálenost	5mm-nekonečno
Clonové číslo	2,6
Zorný úhel	72°
Typ senzoru	OmniVision OV5640
Velikost senzoru	1/4"
Rozměry	40x30x23mm
Hmotnost	8g



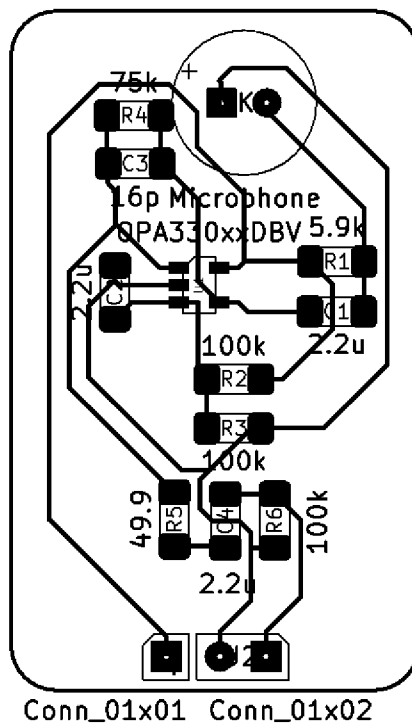
Obr. 3.6: USB kamera LI-OV5640-USB-72.

3.6.2 Mikrofon

Modul pro získávání zvukových podnětů z okolí se skládá z PCB desky malé USB zvukové karty s mono mikrofonním vstupem a elektretového mikrofonu Panasonic WM-61a [9] připojeného přes předzesilovač do mikrofonního vstupu. Zapojení předzesilovače bylo převzato z referenčního návrhu firmy Texas Instruments [8].



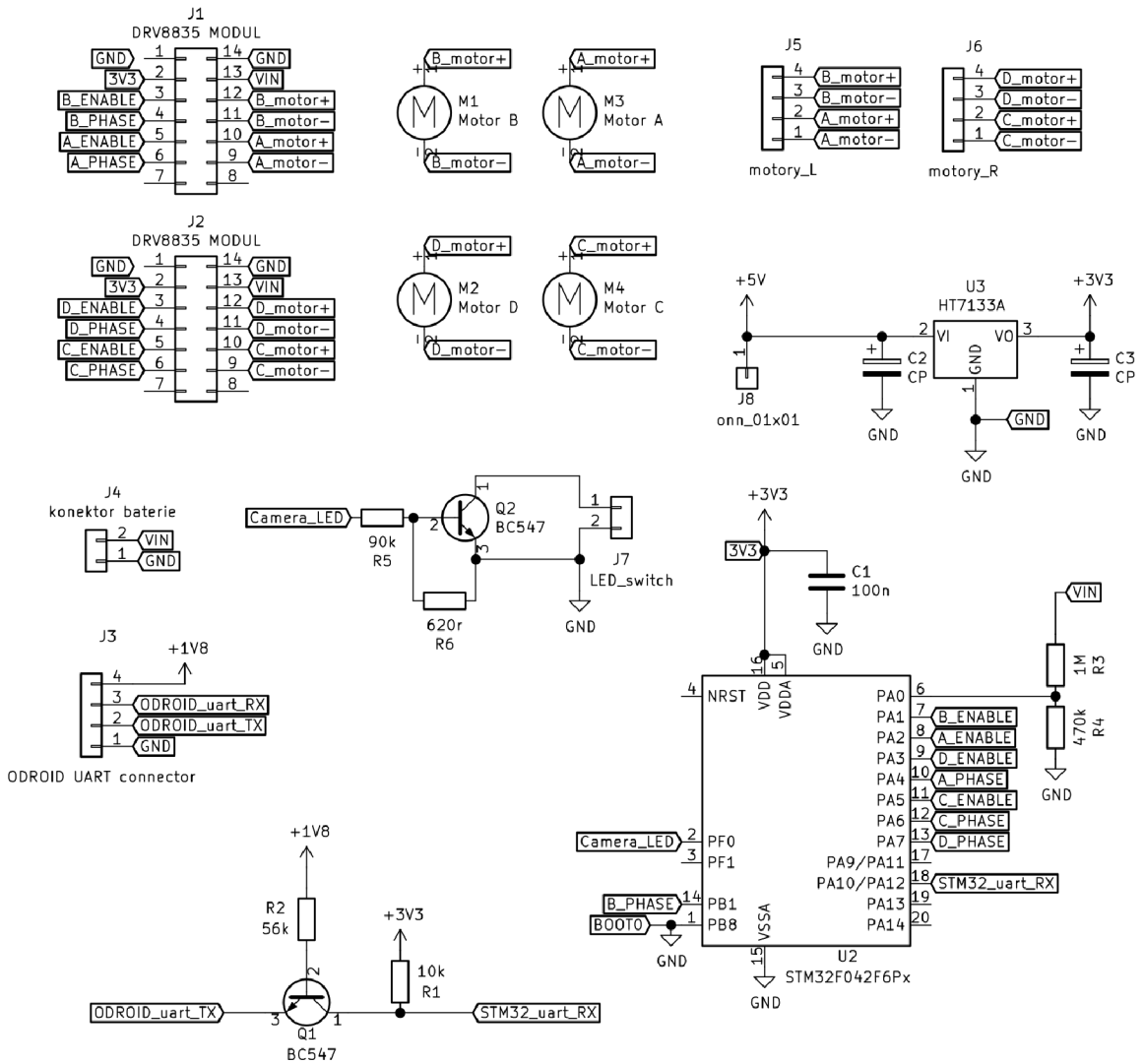
Obr. 3.7: Zapojení mikrofonního předzesilovače (převzato z [8]).



Obr. 3.8: Návrh desky mikrofonního předzesilovače.

3.7 Návrh napájecí a řídicí desky

Deska slouží k rozvedení napájení do příslušných obvodů a k propojení řídicích signálů mikrokontroleru *U2* s napájecími moduly *J1* a *J2* a s konektorem pro připojení LED na kameře *J7*. Mikrokontroler je ke sběrnici UART ODRROID U2 připojen konektorem *J3*. Napájení mikrokontroleru obstarává LDO HT7133A *U3* [5]. Dvojice konektorů *J5* a *J6* připojuje motory na obou stranách k desce.



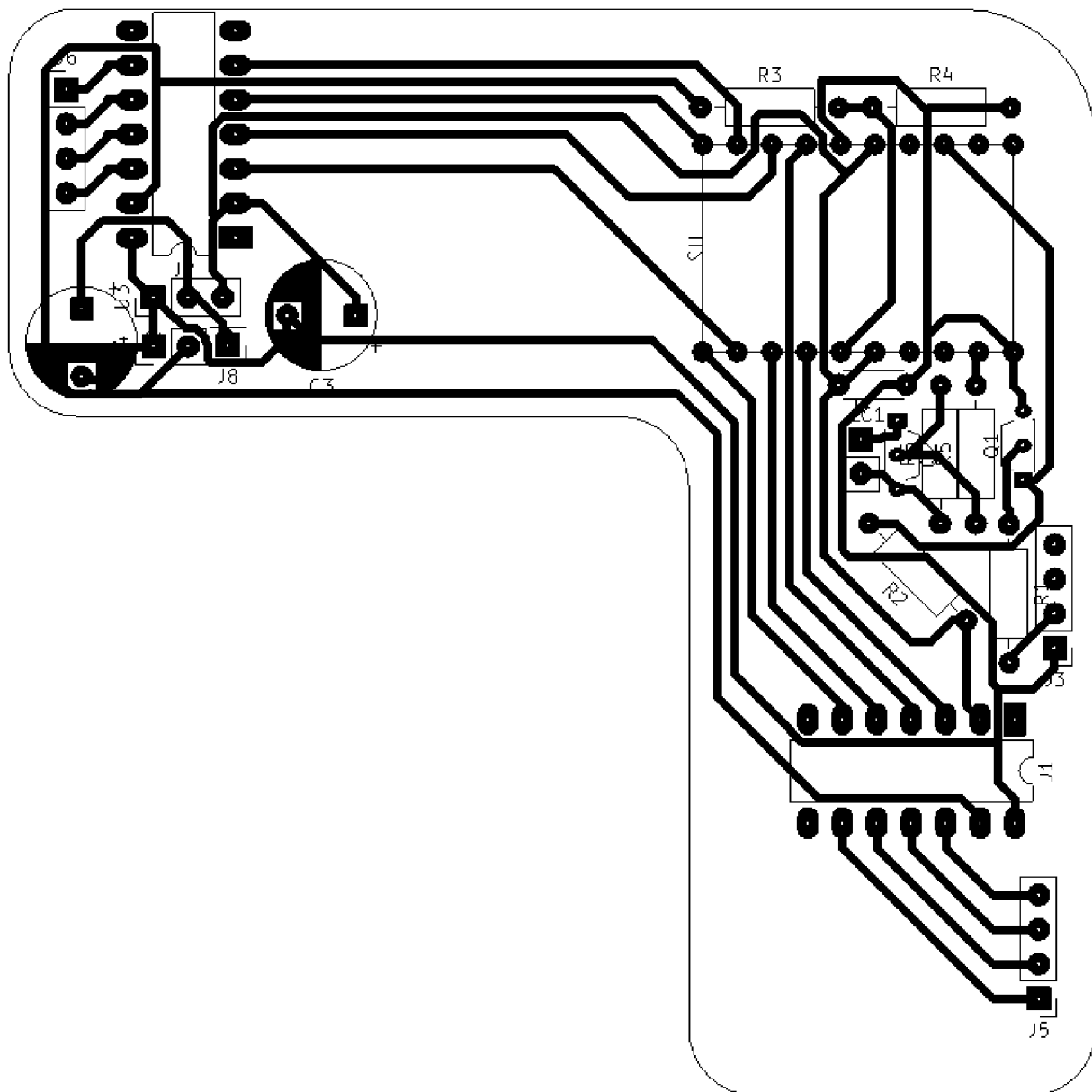
Obr. 3.9: Zapojení napájecí a řídicí desky.

Protože ODROID U2 používá na sběrnici UART napětí 1,8V jako logickou jedničku narozdíl od STM32F0, kde je to 3,3V, bylo nutné navrhnout převodník napětových úrovní. Navržený obvod se skládá z NPN tranzistoru $Q1$ a dvou rezistorů R_1 a R_2 . Kolektorový proud tranzistorem byl zvolen jako $I_C = 0,3mA$. Na bázi je přivedeno zmíněné vstupní napětí $U_B = 1,8V$. Napětí na kolektoru $U_C = 3,3V$. Koefficient zesílení tranzistoru $\beta = 200$ a napětí mezi bázi a emitorem $U_{BE} = 0,6V$. Napětí $U_{CE} = 0,2V$. Při použití tranzistoru jako spínač se proud bázi I_B volí jako několiknásobek hodnoty $\frac{I_C}{\beta}$. Z těchto údajů již lze vypočítat hodnoty rezistorů R_1 a R_2 . Nejbližší normované hodnoty rezistorů v řadě E12 jsou $R_1 = 10k$ a $R_2 = 56k$.

$$R_1 = \frac{U_C - U_{CE}}{I_C} = \frac{3,3 - 0,2}{3 \cdot 10^{-4}} = 10333\Omega \quad (3.1)$$

$$R_2 = \frac{U_B - U_{BE}}{I_B} = \frac{U_B - U_{BE}}{15 \cdot \frac{I_C}{\beta}} = \frac{1,8 - 0,6}{15 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-4}}{200}} = 53333\Omega \quad (3.2)$$

Podařilo se všechny cesty rozvést ve spodní straně, takže při osazování nebylo zapotřebí drátových propojek. Mikrokontroler STM32F042 byl připájen na pomocný DIP adaptér. Deska plošných spojů (DPS) byla navržena jako jednovrstvá a byla vyfrézována do jednostranné desky tloušťky 1,5 mm. Celkové vnější rozměry jsou 80x80 mm. V jednom z rohů je čtvercové vybrání 50x50mm pro ODROID U2.



Obr. 3.10: Návrh napájecí a řídicí desky.

3.8 Konektory

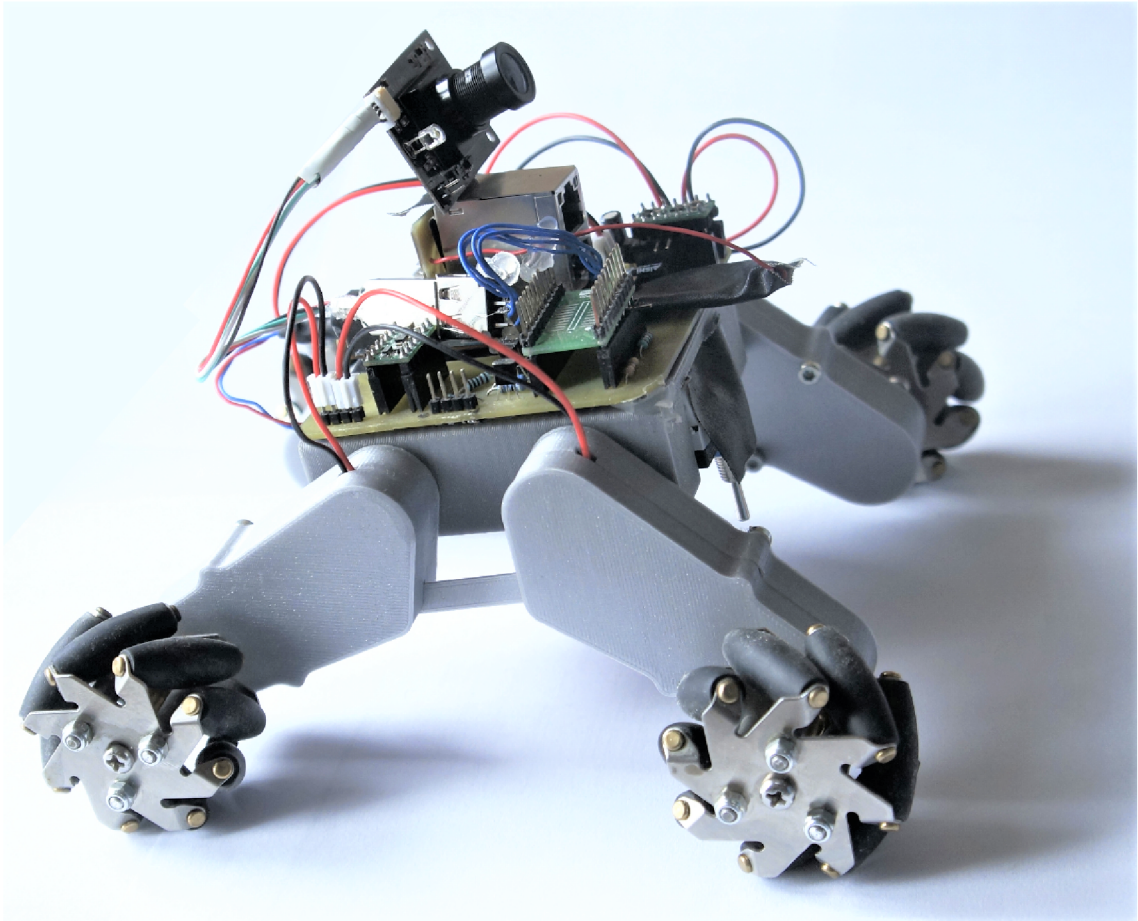
Akumulátor a DC motory pohonu jsou s hlavní deskou propojeny káblíky s JST RCY konektory, které jsou velmi rozšířeny v modelářském průmyslu. Jsou stranově orientovány, takže eliminují možnost nechtěného přepólování. Deska elektretového mikrofonu s předzesilovačem je trvale propojena s vyjmutou deskou USB zvukové karty, která je od okolí izolována převlečenou smršťovací bužírkou a připojená k ODROIDU U2. Modul kamery posílá výstup na pětipinový konektor JST SM05B-SRSS typu zdírka, který funguje jako standardní diferenciální pár se zemí a napájením, přičemž pátý pin je nepřipojen. Pro tento konektor byla vyrobena redukce na běžný USB kabel typu A.

3.9 Technické parametry robota

Zde jsou uvedeny parametry zkompletovaného robota. Hodnoty pro maximální rychlost a stoupavost byly měřeny za ideálních podmínek pro všesměrová kola v kontaktu s pryžovou podložkou. Teoretický dojezd je spíše odhadem doby vybití akumulátoru, hodnota závisí na optimalizaci programu běžícího na ODROID U2, nastavení kamery a rychlosti pohybu. V případě potřeby je možné přidat další (1-2) baterie.

Tab. 3.5: Technické parametry robota

<i>Popis</i>	<i>Hodnota</i>
Maximální rychlost	1.3m/s
Stoupavost	75%
Teoretický dojezd	2,5km
Spotřeba při plném výkonu	15W
Celkové rozměry	160x170x89mm
Hmotnost	430g



Obr. 3.11: Robot.

4 Zpracování obrazu

V této části je popsán princip detekce obličejů ve videosekvenci kamery pomocí OpenCV. Poslední podkapitola je věnována vektorovému řízení - převodu informací z obrazu kamery na podvozek robota.

4.1 OpenCV

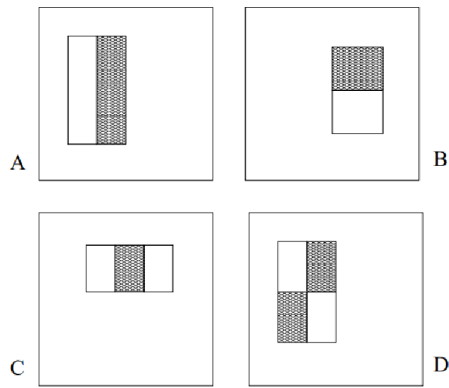
OpenCV (open source computer vision library) je knihovna funkcí pro zpracování digitálního obrazu. První verze byla zveřejněna už v roce 2000. Je psána v jazyce C/C++, ale má API (application program interface) také pro jazyky Python a Java. OpenCV je stále vyvíjeno a má početnou komunitu aktivních uživatelů.

4.2 Detekce obličeje

Detekce obličeje probíhá pomocí tzv. klasifikátorů. Klasifikátor lze zjednodušeně popsat jako algoritmus, který rozhoduje zda vstupní obraz obsahuje například obličej (vrací logickou 1) nebo obličej neobsahuje (logická 0). Každý klasifikátor musí být nejprve natrénován velkým množstvím (v řádu tisíců) obrázků s obličejí i bez obličejů. OpenCV pro tuto aplikaci obsahuje dva natrénované klasifikátory: LBP (Local Binary Pattern) a Haar Classifier. Dále bude vysvětlen princip fungování Haarova klasifikátoru.

4.3 Haarovy příznaky

Haarovy příznaky (Haar features) jsou pojmenované po Alfrédu Haarovi pro svou podobnost s vlnkovou transformací [30]. Tato procedura charakterizuje vstupní obraz na základě hodnot jednoduchých příznaků. Je mnoho důvodů pro využití právě příznaků místo jednotlivých pixelů. Jedním je nesporně vyšší rychlost zpracování a také schopnost vytáhnout nejpodstatnější parametry, které jsou jinak obtížné pro natrénování jiným způsobem při použití databáze omezené velikosti. Paul Viola a Michael Jones ve své práci Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features [26] použili právě myšlenku klasifikátoru Haarových příznaků, které jsou velmi podobné Haarovým báze funkcím [23].



Obr. 4.1: Haarovy příznaky [26].

Hodnota příznaku složeného ze dvou obdélníků je vyjádřena jako rozdíl součtu jasových složek vymezených těmito oblastmi. Příznak ze tří obdélníků počítá sumu vnějších obdélníků odečtenou od prostředního. Poslední příznak počítá rozdíl součtů dvojic obdélníků na diagonálách.

Příznaky složené z obdélníků jsou dosti primitivní ve srovnání například s říditelnými (steerable) filtry [31], neboť je lze orientovat pouze ve vertikálním, horizontálním nebo diagonálním směru. Jsou však pro reprezentaci obrazu v pixelech velmi rychlé.

Jiným dosti rychlým způsobem detekce obličeje (nebo jiného objektu v pohybu) ve videosekvenci je například porovnávání barvy jednotlivých pixelů po sobě jdoucích snímků. Pro popsany systém Haarových příznaků stačí na vstupu pouze s šedotónový obraz.

4.4 Integrovaný obraz

Integrovaný obraz je reprezentace obrazu, díky které je možné počítat Haarovy příznaky velmi rychle. Jak již bylo vysvětleno, princip klasifikátoru pracujícího s Haarovými příznaky spočívá v neustálém porovnávání součtu hodnot pixelů v různých oblastech. Problém je, že v každé vymezené části obrazu je počet všech možných příznaků mnohem větší, než je počet samotných pixelů. Algoritmus navržený pány Viola a Jones využívá okno s rozměry 24x24 pixelů, což představuje až 180 000 příznaků [26]. Řešením je koncept Integrovaného obrazu.

31	2	4	33	5	36
12	26	9	10	29	25
13	17	21	22	20	18
24	23	15	16	14	19
30	8	28	27	11	7
1	35	34	3	32	6

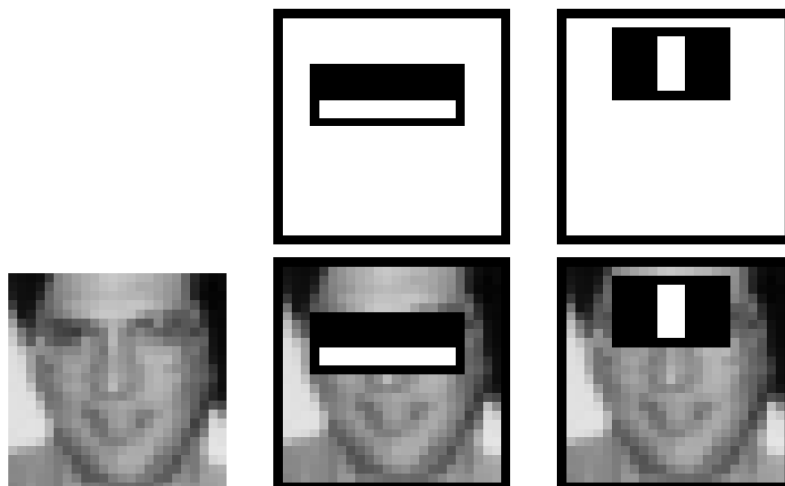
Obr. 4.2: Integrovaný obraz.

Integrovaný obraz využívá skutečnosti, že pro zjištění sumy pixelů pod vyznačeným obdélníkem nemusíme sčítat jednotlivé pixely, potřebujeme znát pouze součet pixelů ve čtyřech obdélníkových oblastech, které všechny vycházejí ze stejného bodu, a jejichž protější vrcholy se dotýkají vždy jednoho z vrcholů zjišťované oblasti. Součet pixelů obdélníku vymezeného vpravo dole na obrázku lze vyjádřit jako součet pixelů v obdélníku vlevo nahoře (101) a velkého čtverce vymezuujícího celou oblast (450), od kterého je odečten součet dvou menších vyznačených oblastí (254 + 186), dotýkajících se vrcholů ležících na protější diagonále.

$$(101 + 450) - (254 + 186) = 111$$

4.5 Adaboost

Z obrovského množství příznaků, které lze nalézt ve čtverci 24x24 pixelů, je pro detekci obličejů důležitá jen část. Pro výběr pouze nejlépe charakterizujících příznaků je použit algoritmus strojového učení zvaný Adaboost [24].



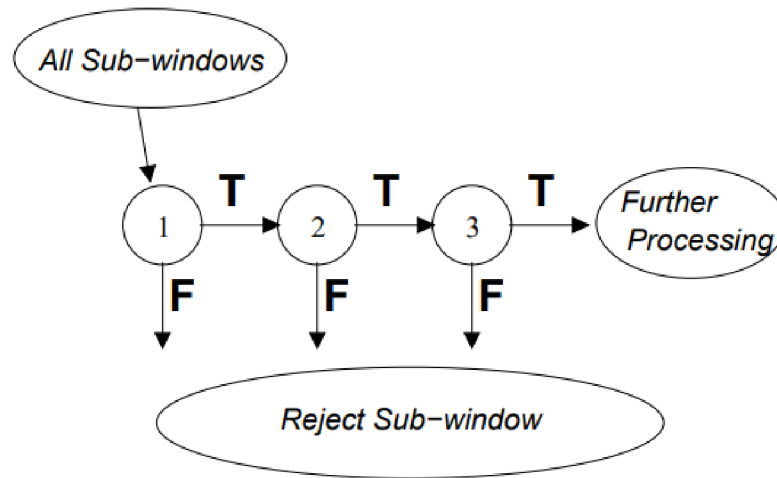
Obr. 4.3: První a druhé příznaky vybrané algoritmem Adaboost [26].

Na obrázku lze vidět, jakým způsobem si Adaboost poradil s výběrem prvních klíčových příznaků. První příznak je zaměřen na skutečnost, že oblast očí je často tmavější než oblast nosu a tváře od ní. Druhý příznak detekuje světlejší sloupec oblasti nosu mezi tmavšíma očima.

4.6 Použití Kaskádových klasifikátorů

Dalším způsobem pro urychlení algoritmu je využití tzv. kaskády klasifikátorů. Kaskáda klasifikátorů se skládá z jednotlivých úrovní, kdy každá úroveň obsahuje silný klasifikátor složený pouze z menšího počtu příznaků. To je výhodné, protože odpadá nutnost detekce všech příznaků v okně najednou. Namísto toho jsou příznaky seskupeny do jednotlivých vrstev a okno se testuje nejprve pro první klasifikátor. Pokud projde dál, je na něj znovu aplikován další klasifikátor. Pokud okno dále neuspěje, je zahozeno včetně všech příznaků v dané vrstvě. Klasifikátory ve vyšších úrovních jsou postupně čím dál složitější, ale zároveň vyhodnocují stále menší a menší oblasti obrazu. Ukázalo se, že v oblasti detekce obličeje lze dosáhnout méně než 1% nepravdivě vyhodnocených oblastí ve kterých se obličej nenachází a 40% chybně označených oblastí, kde se obličej nachází, pomocí klasifikátoru vyhodnocujícího pouze dva Haarovy příznaky [26]. Tímto způsobem se zmenší dále prohledávaná

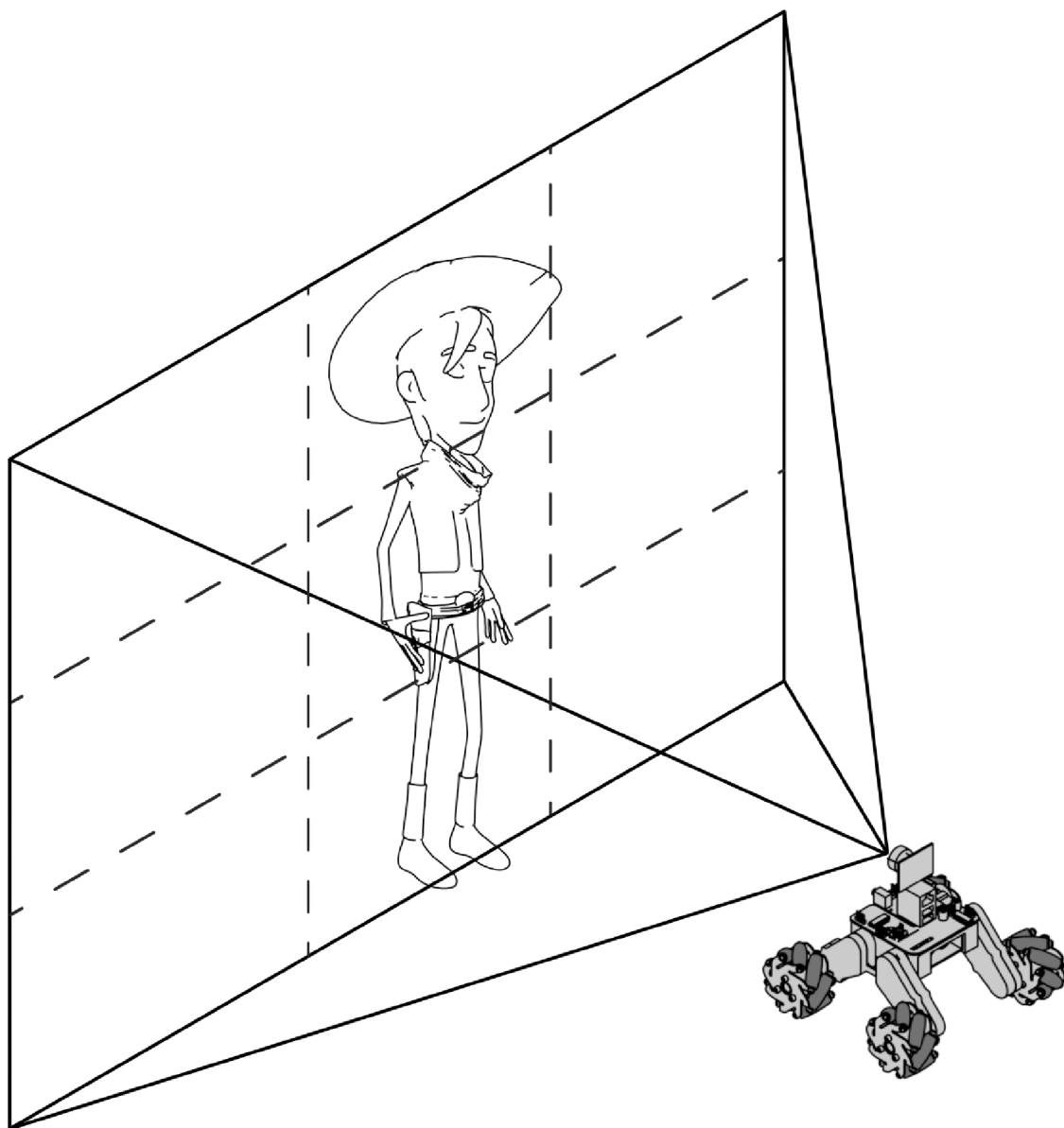
oblast a je výhodné nasadit složitější klasifikátor, který je již naladěný tak, aby měl mnohem menší procento chybně vyhodnocených oblastí, kde se obličej nenachází, a dále tak zmenšil prohledávanou oblast.



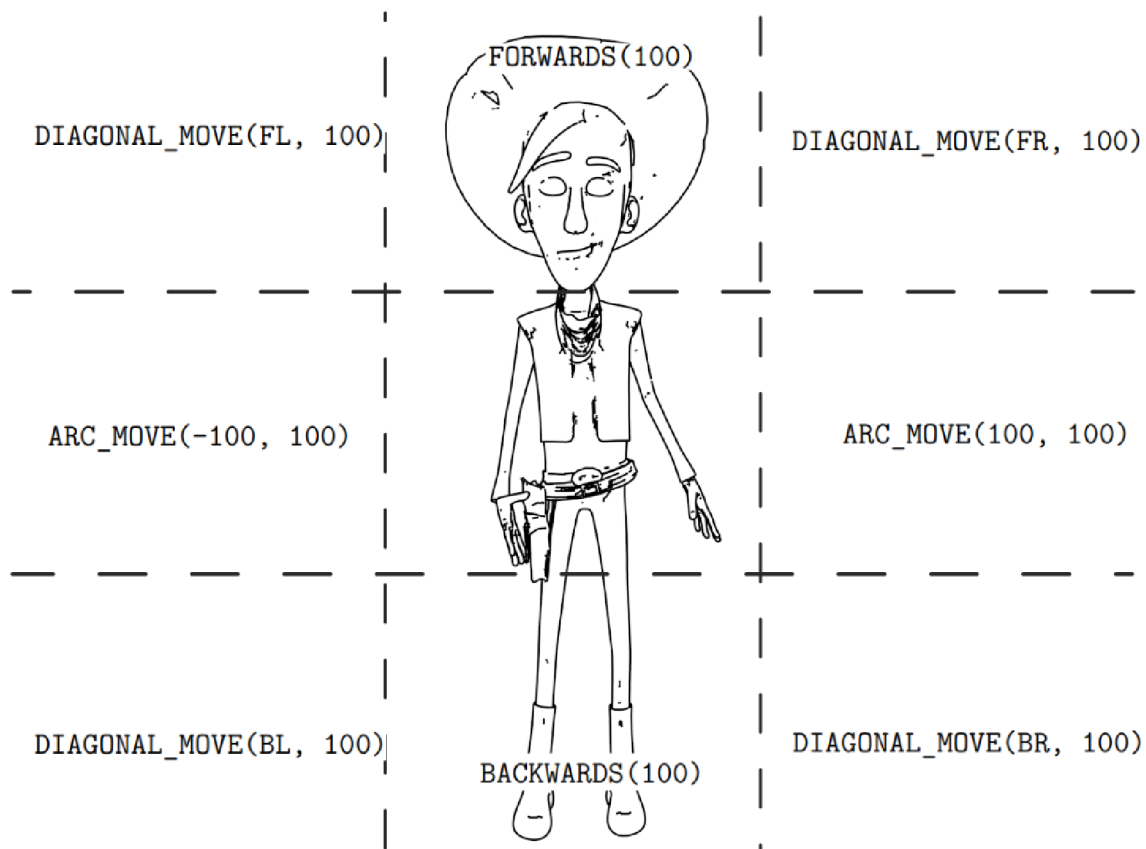
Obr. 4.4: Schématické znázornění kaskády detektoru. T znamená, že obraz prošel testem a postoupil dále, F značí zahozené snímky [26].

4.7 Vektorové řízení

Pro úlohu sledování osob bylo navrženo vektorové řízení. Obraz kamery s rozlišením 800x600 pixelů byl rozdělen na 9 oblastí, přičemž cílem je udržovat detekovaný obličej v prostředním čtverci. Pokud se nachází v horní části, robot couvá, naopak v případě detekovaného obličeje v spodní části jede směrem dopředu. Obdobným způsobem je realizován pohyb do stran. V případě, že se obličej nachází v prostředním pásu mimo střed, robot začne opisovat trajektorii po oblouku o poloměru cca 2,5 m, což je v tu chvíli jeho vzdálenost od průměrně vysokého stojícího člověka. Tímto pohybem se snaží obličej vystředit při minimalizaci možné ztráty detekovaného člověka. Pro řízení robota slouží příkazy LEFT, RIGHT, FORWARDS, BACKWARDS a ARC_MOVE. Jejich argumenty určují rychlost pohybu tímto směrem, příkaz ARCMOVE jako první argument očekává kladné/záporné číslo pro pohyb směrem *doleva/doprava* a druhý argument určuje poloměr oblouku, přičemž záporné číslo určuje střed otáčení ležící vzadu za robotem. V případě, že je poloměr nulový, robot se pohybuje pouze do stran.



Obr. 4.5: Zorné pole robota.



Obr. 4.6: Rozdělení obrazu na oblasti s příslušnými povely.

5 Zpracování zvuku

5.1 Rozpoznávání hlasových pokynů

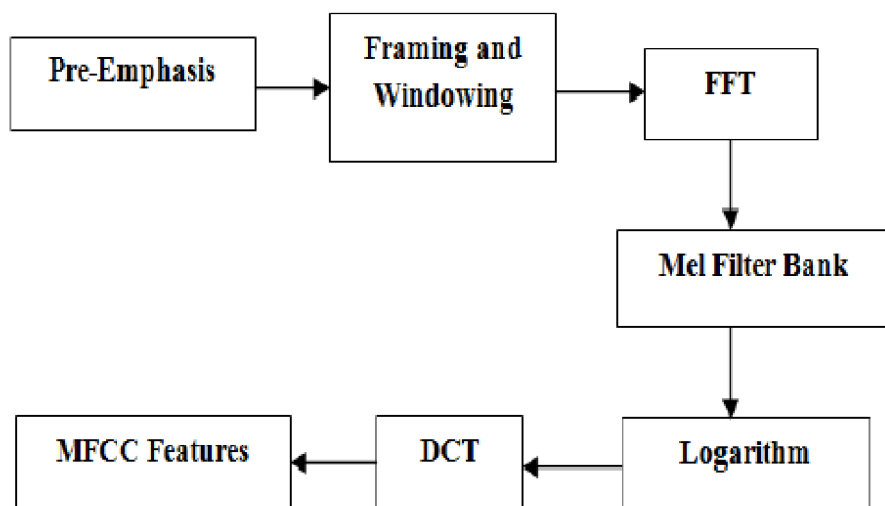
Bylo vybráno 5 základních pokynů: *dopředu*, *dozadu*, *doleva*, *doprava* a *stop*. Tyto pokyny by měl robot v kterýkoliv okamžik správně vyhodnotit a daným směrem zamířit. V následující části je popsán způsob pro získání vektorů mel-kepstrálních koeficientů MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients) a vyhodnocení jejich podobnosti s vzorovými vektory uložených příkazů pomocí algoritmu dynamického borcení času DTW (Dynamic Time Warping). Na závěr je vyhodnocena úspěšnost rozpoznávání při aplikaci algoritmu na připravenou databázi různých variant všech pěti pokynů.

5.2 MFCC

Odlišnosti v hlasu různých řečníků jsou způsobeny mnoha faktory, jako je věk, pohlaví, způsob artikulace a podobně. Pokud každý z nich vysloví stejné slovo, jsme schopni tomu porozumět, přestože každé zní odlišně. Je to dáno schopností ucha velmi citlivě vnímat pohyb formantů. Tvorbu lidského hlasu lze zjednodušeně vysvětlit jako zvukový generátor - hlasivky, které určují základní výšku hlasu každého člověka, a filtr - ústní dutinu, která spektrum tohoto signálu velmi komplexním způsobem tvaruje. Popsaný způsob platí pro tvorbu samohlásek. Souhlásky jsou kromě hlasivek tvořeny dechem, což lze přirovnat ke generátoru šumu. Tvar ústní dutiny tak představuje pohyblivou obálku spektra.

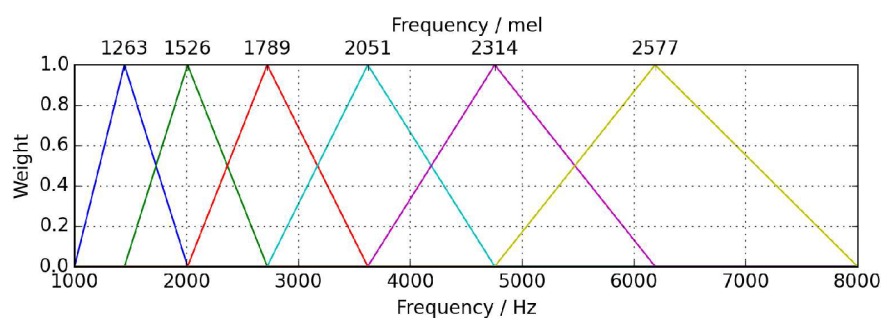
Pro implementaci ovládání robota hlasovými pokyny byla zvolena extrakce mel-kepstrálních koeficientů MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients), jejichž úkolem je věrně reprodukovat obálku spektra signálu čase.

Princip výpočtu MFCC je zobrazený v následujícím obrázku.



Obr. 5.1: Postup při výpočtu MFCC.

Nejprve je signál rozdělen na části dlouhé v tomto případě 128 samplů, což pro signál vzorkovaný frekvencí 8 kHz znamená 16 ms. Tyto části (dále okna) jsou váhována Hannovým oknem a každé dvě po sobě jdoucí okna se z poloviny překrývají. Pro každé okno je vypočteno spektrum pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Spektrum je poté filtrováno bankou trojúhelníkových filtrů rozmístěných podle melovy stupnice (Stevens et al., 1937). Melova banka filtrů modeluje citlivost lidského ucha na jednotlivá tzv. kritická frekvenční pásma v důsledku zakřivení bazilární membrány hlemýždě ve vnitřním uchu.

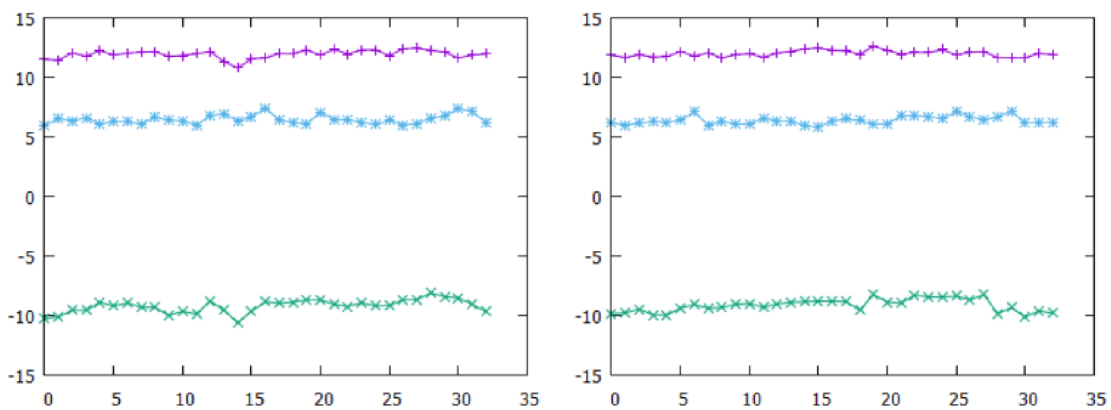


Obr. 5.2: Melova banka filtrů.

Z energie v každém pásmu v rámci jednoho okna je spočítán logaritmus. Význam logaritmování výkonového spektra je vedle modelování nelineární citlivosti ucha na hlasitost takový, že konvoluci v časové oblasti odpovídá sumace v této log-frekvenční doméně.

Posledním krokem je diskrétní kosinová transformace (DCT) zlogaritmovaného výkonového spektra. Existují dva důvody pro tento krok. Kvůli překryvu trojúhelníkových filtrů je energie v sousedních pásmech značně korelovaná. DCT je dekoreluje. Dalším důvodem je komprese dat, podobně jako u formátu JPEG. Pro danou aplikaci nás zajímá hlavně celková obálka kepra v každém okně, která je obsažena v prvních koeficientech. Další velkou výhodou pro implementaci algoritmu je ve srovnání s Fourierovou transformací fakt, že výstupem DCT jsou reálná čísla.

Tato transformovaná reprezentace signálu se nazývá *kepstrum* (přesmyčka ze slova spektrum). Podobně jako filtrace v časové oblasti zde lze uplatnit *liftrace*. Typicky je toto mel-frekvenční spektrum liftrováno zahazením všech kromě nejnižších DCT koeficientů (v mnoha standardních implementacích zůstává zachováno prvních 13 koeficientů). Tyto DCT koeficienty už jsou výsledné MFCC koeficienty. Zahazení vyšších MFCC odpovídá filtraci dolní propustí v časové oblasti, takže je odstraněna většina harmonického obsahu a zbylé koeficienty dobře vystihují celkový spektrální průběh, aniž by byly příliš citlivé na barvu zvuku.



Obr. 5.3: Zobrazení prvních tří vektorů MFCC pro pokyny doleva a dopředu, zarovnaných do rámce dlouhého 800 ms.

Předchozí koeficienty poskytují pouze statický popis a nevypovídají nic o trendu v posloupnosti jednotlivých příznakových vektorů [25]. Proto je vhodné je rozšířit o další koeficienty popisující změny v určitém časovém okolí sledovaného segmentu signálu, takzvané delta koeficienty. Výpočet těchto regresních koeficientů prvního řádu (delta) je dán vztahem

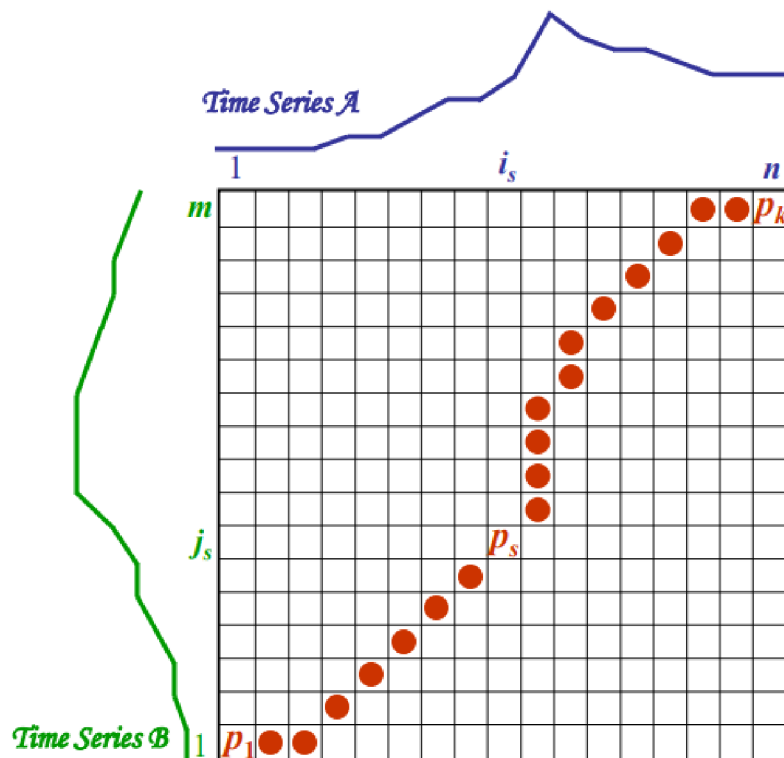
$$d_t = \frac{\sum_{n=0}^N n(c_{t+n} - c_{t-n})}{2 \sum_{n=1}^N n^2}, \quad (5.1)$$

kde d_t je delta koeficient z okamžiku t ve smyru pořadí vůči statickým MFCC c_{t+n} a c_{t-n} . Typická hodnota N je 2. Delta koeficienty druhého řádu (delta-delta) získáme stejným způsobem, ale vstupem jsou delta koeficienty prvního řádu namísto statických MFCC. Delta koeficienty tak vyjadřují rychlost a zrychlení MFCC. Výpočet delta koeficientů lze chápat jako filtrace časových průběhů jednotlivých kepstrálních koeficientů pásmovými filtry FIR [25].

V praxi to tedy znamená, že pokyn délky 1 sekunda při vzorkovací frekvenci 8 kHz, velikosti okna 128 vzorků a výpočtu prvních 13 MFCC včetně delta a delta-delta koeficientů naplní matici 39 sloupců a 40 řádků.

5.3 DTW

Při výzkumech zaměřených na rozpoznávání řeči bylo zjištěno, že pokud jeden řečník vyslovil několikrát stejné slovo, nebyly velké rozdíly ve spektru oblastí jednotlivých hlásek, ale v nepoměru délky těchto oblastí mezi sebou [25]. Proto byl navržen algoritmus dynamické borcení časové osy DTW (Dynamic Time Warping). Principem je 'smršťování' a 'natahování' částí testovaného signálu tak, aby se co nejvíce podobal vzoru. Tento proces lze graficky zobrazit jako cestu mezi dvěma vektory.



Obr. 5.4: Znázornění cesty DTW.

Pokud jsou vektory identické, cesta je nejkratší možná a vytvoří mezi nimi diagonálu. Čím je cesta delší, tím jsou oba vektory odlišnější.

Postup výpočtu DTW je vyjádřen následující rovnicí [28]

$$D(A, B) = \text{Min} \left(\frac{\sum_{k=0}^K d(c(k)) \cdot w(k)}{\sum_{k=0}^K w(k)} \right), \quad (5.2)$$

kde A, B jsou porovnávané signály, čítec obsahuje sumu vzdáleností jednotlivých prvků obou vektorů $c(k)$ váhovanou koeficienty $w(k)$, které dosahují minima při optimálním zarovnání obou signálů. V našem případě probíhá celý proces DTW velmi rychle, protože po získání MFCC povelu zaznamenaného mikrofonem pouze porovnááme tyto vektory koeficientů s připravenými MFCC vzorových povelů.

5.4 Vyhodnocení databáze

Byla vytvořena databáze různých variant všech pěti pokynů, které byly testovány navzájem vůči sobě. Varianty obsahují každý pokyn vyslovený různou rychlostí a v různé vzdálenosti. Testováním bylo zjištěno, že optimální velikost okna pro FFT je 128 vzorků a bylo zvoleno 13 MFCC pro porovnávání.

Celková průměrná úspěšnost rozpoznávání pokynů z databáze se pohybovala kolem 75 %, při vybrání nejvhodnějších vzorů se zvedla na 82 %. Největším problémem byla slova doprava a doleva, která byla algoritmem vyhodnocená jako nejpodobnější z dvojic rozdílných pokynů.

Tab. 5.1: Vyhodnocení databáze

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
dopředu(rychle)	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dopředu	287	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dopředu(pomalů)	64	482	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dozadu(rychle)	702	925	524	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dozadu	6273	2434	2001	841	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dozadu(pomalů)	22641	732	1547	442	348	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x
doprava(rychle)	1732	3374	2541	946	8471	1530	0	x	x	x	x	x	x	x	x
doprava	37283	634	4526	483	1480	8750	16104	0	x	x	x	x	x	x	x
doprava(pomalů)	1283	416	827	14317	14552	4003	527	321	0	x	x	x	x	x	x
doleva(rychle)	2024	946	2841	16923	12756	14502	7520	2596	427	0	x	x	x	x	x
doleva	8313	5027	4952	3458	6023	3313	1680	1423	296	388	0	x	x	x	x
doleva(pomalů)	5827	10894	9543	8671	4426	9318	282	596	810	347	98	0	x	x	x
stop(rychle)	3491	13082	15255	11703	11965	8849	1735	9285	10122	4148	11437	4868	0	x	x
stop	920	13748	4528	4374	6741	2382	5731	6650	4610	8513	6224	128	860	0	x
stop(pomalů)	1458	2408	1330	4133	8471	2352	7083	2497	2113	16851	11405	319	412	73	0

6 Návrh software

6.1 Příprava platformy Odroid

Jedním z nejdůležitějších rozhodnutí bylo použití kvalitní MicroSD karty Swissbit o velikosti 8Gb, která přinesla značné jednak značné zkrácení doby strávené bootováním systému a při kompilaci verzí programů, ale i celkovou pohotovost při používání programů Audacity [34] a Gucvview [35] pro testování připojených periférií. Vzhledem ke stáří minipočítače (ODROID U2 byl uveden v roce 2012) byla naistalována verze operačního systému Linux Lubuntu 14.04 Trusty Tahr. Po spuštění byly doinstalovány potřebné programy a hlavně knihovna OpenCV. Dále byl příkazem `echo "manual" | sudo tee /etc/init/network-manager.override` zakázán automatický start programu NetworkManager, který způsoboval občasné zamrznutí systému.

Pro snadné používání USB periférií byl vytvořen soubor pravidel `moje.rules` umístěný do adresáře `/etc/udev/rules.d`, který definuje symbolické odkazy:

```
SUBSYSTEM=="tty", ATTRS{Vendor}=="la86", ATTRS{Product}=="7523",  
MODE="0666", GROUP="dialout", SYMLINK="uartExt"  
KERNEL=="ttySAC1", MODE="0666", GROUP="dialout", SYMLINK="uartInt"
```

Díky tomu lze používat tyto aliasy v programu, a zařízení jsou obložena i při změně USB portu či rozbočovače, do kterého jsou připojena.

Programování probíhalo v IDE Eclipse. Pro použití novější verze kompilátoru bylo potřeba přidat v `C/C++ Build -> Settings -> Tool Settings -> GCC C++ Compiler -> Miscellaneous -> Other Flags` `"-std=c++11"` na konec.

Program je psán v jazyku C/C++, komentář je v angličtině.

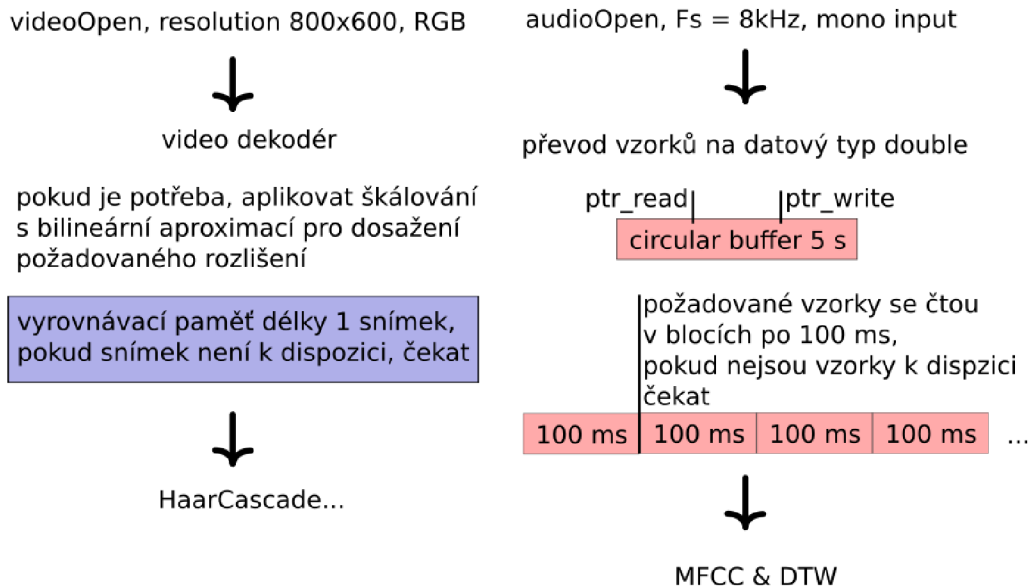
6.2 Obsluha kamery a zvukové karty

Pro získání dat ze senzorů v reálném čase byla pomocí knihoven `libswscale`, `opencv2` a `libav` implementována obsluha kamery a zvukové karty s mikrofonom. Obě zařízení běží ve vlastních vláknech za použití knihovny SDL.

Pro audio byl vytvořen kruhový buffer délky 5 s, do kterého se neustále ukládají vzorky. Jsou ošetřeny případy, kdy ukazatel čtení `ptr_read` je před i za ukazatelem pro zápis `ptr_write`. Při povelu ke čtení je vrácen blok délky 100 ms před povelům a požadovaný počet bloků po povelu. Pokud ve chvíli volání funkce čtení nejsou k dispozici všechny bloky, vlákno čeká.

Video vlákno naopak nehlídá žádnou historii snímků, ale přes vyrovnávací paměť velikosti jeden snímek zajistí, že jsou vždy k dispozici aktuální data. Pokud byla kamera ovládána pomocí funkcí vestavěných v OpenCV, vznikl problém, kdy

vyrovnávací paměť měla délku několik desítek snímků, které byly v momentu volání funkce již neaktuální a nový snímek bylo možné získat až po jejím vyprázdnění. Snímek je dále podle potřeby škálován s bilineární interpolací a uložen do formátu OpenCV matice.



Obr. 6.1: Diagram.

6.3 Hlavní program

Hlavní program neustále kontroluje, zda je v obraze kamery přítomný obličej nebo zda hladina zvuku překročila stanovený práh. V případě, že robot žádný obličej nedetekuje, je možné jej plně ovládat hlasovými pokyny. Pokud se v zorném poli kamery objeví postava a robot ji rozpozná, začne se k ní natáčet a udržovat konstantní vzdálenost. Kvůli pozdější optimalizaci programu jsou rozpoznané hlasové pokyny ukládány ve formátu wave, pojmenované jako index souboru a povel, např.: *4_LEFT.wav*. Obdobně jsou ukládány i snímky z kamery s vyznačeným obličejem, např.: *1_DIAGONAL_MOVE(FR, 100).jpg*.

V souboru `Vector_control.h` jsou definovány funkce pro vektorové řízení.

6.4 Firmware mikrokontroleru STM32F0

Firmware slouží jako mezičlánek mezi ODROID U2 a hardwarem ROBOTU. Přijímá příkazy od řídicího SW a ty pak vykonává.

Konfiguraci mikrokontroleru STM43F042 značně usnadnilo použití nástroje CubeMX [10], který je zdarma vyvíjen výrobcem. Program umožňuje vybrat libovolný mikrokontroler či vývojovou desku z portfolia STM a nakonfigurovat jednotlivé piny, periferie, sběrnice, clock apod. Před exportem projektu lze vybrat knihovnu funkcí, která bude danou periferii obsluhovat. Na výběr je STM32Cube HAL (hardware abstraction layer) a STM32Cube LL (low-layer). Knihovna LL má řadu výhod jako menší nároky na paměť a lepší optimalizaci, ale pro potřeby projektu byla zvolena knihovna HAL, která je jednodušší a výsledný kód lze téměř beze změn portovat i na ostatní mikrokontrolery STM.

Komunikační protokol mezi ODROID U2 a STM43F042 byl navržen jako zpráva o délce 5 bytů. První 4 byty udávají rychlost a směr otáčení pro každé kolo, poslední byte je vyhrazen pro povel rozsvícení/zhasnutí LED na kameře, případně další funkce. Hodnoty 0 a 255 jsou vyhrazeny jako start/stop byte.

Tab. 6.1: Příklad povelu `DIAGONAL_MOVE(FR, 100)`

START	1	2	3	4	5	STOP
0	100	1	100	1	1	255

Tab. 6.2: Příklad povelu `ARC_MOVE(50, 100)`

START	1	2	3	4	5	STOP
0	134	80	60	180	1	255

Programování probíhalo v IDE Keil MDK-ARM uVision5 [12], které je zdarma v odlehčené verzi omezené velikostí kódu 32kB. Program v nekonečné smyčce běží následovně: na začátku zkontroluje, pokud byla na sběrnici UART poslána zpráva o délce 5 bytů pomocí funkce `HAL_UART_Receive_IT` a uloží je do pole `buffer`. Poté je změřeno napětí baterie příkazem `HAL_ADC_Start_IT`. Tento údaj je dále převeden na koeficient, kterým se přenásobí první 4 byty z `buffer`. Kvůli maximálnímu využití elektrické energie jsou motory napojeny přímo na napětí akumulátoru. Aby se docílilo rovnoměrného pohybu v průběhu vybíjení akumulátoru, napětí je přes dělič přivedeno na analogový vstup mikrokontroleru. Maximální střída PWM při

plně nabitým akumulátoru byla omezena na 70% a postupně se zvyšuje až na 100% těsně před vybitím.

Dále je ošetřen stav při změně smyslu otáčení kol, kdy se kvůli přepólování vzájemně vymění hranice minima a maxima střídy PWM regulace. Dále je implementován jednoduchý filtr typu klouzavý průměr pro zabránění skokových změn při regulaci. Nakonec je v závislosti na MSB pátého bytu zprávy rozsvěcena LED na kameře.

Nahrávání různých verzí firmware probíhalo přes připojenou vývojovou desku STM32F072B-DISCOVERY [32], která obsahuje programovací část zvanou ST-link. Slouží primárně k programování hlavního mikrokontroleru na desce, ale sundáním dvou propojek konektoru označených potiskem ST-LINK/DISCOVERY jej lze odpojit a za použití propojek spojit země a signály SWDCLK a SWDIO s externím mikrokontrolerem. Debugování firmware usnadnil software STM Studio [33], což je další nástroj z portfolia firmy STM. Nástroj umožňuje zobrazení vybraných globálních proměnných v reálném čase jako hodnotu v tabulce, sloupcový nebo spojnicový graf.

7 Testování

Během testování byla nejprve zkoušena schopnost robota rozpoznat a sledovat obličej postavy. Při zvoleném nastavení klasifikátoru trvalo každý snímek zpracovat přibližně 200 ms, ale bylo to vyváženo úspěšností správného vyhodnocení více než 95 %, což bylo ověřeno ze snímků uložených při testování za běhu programu. Pokud osoba před robotem couvala nebo šla k němu rychlostí nižší než cca 2,5 m/s, robot neměl problém udržovat nastavenou vzdálenost. Detekce obličeje s minimální výškou 20 pixelů odpovídala maximální vzdálenosti osoby 3 - 3,3 m. Pokud se v okolí nacházelo více osob, robot se střídavě zaměřoval na tu nejbližší.

Rozpoznávání hlasových pokynů při jízdě robota se ukázalo být největší slabinou, protože hlas ze vzdálenosti 2-3 m byl rušen hlukem převodovaných motorů do té míry, že jediným správně přiřazovaným pokynem byl povel *stop*. Nepomohlo ani zvednutí mikrofonu do výšky 20 cm. Vzhledem k tomu, že povely je potřeba snímat ve všech směrech rovnoměrně a hluk motorů má charakter čtyř bodových zářičů, není možné použít k potlačení hluku pouze druhého směrového mikrofonu, jako je to řešeno například v mobilních telefonech.

Nabízejí se dvě řešení. Jedním je navržení mikrofonního pole a na základě časového zpoždění signálu v každém mikrofonu oddělit hlasový signál od hluku a zároveň detekovat směr přicházejícího signálu[36]. Druhým řešením je při zachování jediného mikrofonu aplikace neuronové sítě nastavené tak, aby při detekci používala informace z časových trajektorií[29].

Testování probíhalo v hale s dostatečně velkým prostorem, protože robot nevyužívá žádné další senzory, a v členitějším terénu by bylo riziko poškození.

8 Závěr

Podářilo se splnit zadání v celém rozsahu. Na základě porovnání dostupných kitů a stavebnic byla zvolena stavba podvozku podle vlastního návrhu. Byly navrženy, osazeny oživeny dvě DPS - deska řízení a napájení a deska mikrofonního předzesilovače.

Pro další zlepšení a rozšíření schopností robota by bylo vhodné připojit druhou kameru, což by umožnilo stereoskopické snímání obrazu a detekci hloubky v prostoru.

Mikrofon by bylo vhodné nahradit mikrofonním polem složeným z alespoň pěti mikrofonů. Velkou výhodou by byla možnost odfiltrovat většinu hluku způsobeného motory pohonu a jejich převody. Dále by bylo zajímavé na základě vypočítaného směru přicházejícího zvuku vybírat na základě údajů z kamery nejpravděpodobnějšího řečníka.

Dále by bylo vhodné robota doplnit o sonar nebo alespoň IR sensory aby se snížilo riziko naražení do stěn a podobných překážek.

Během testování robot prokázal schopnost autonomního pohybu na volné rovné ploše a po přidání dalších senzorů může být dále testován i pro pohyb ve venkovním prostředí. Díky modulární konstrukci bude možné jednotlivé části vhodně modifikovat na základě chování robota při plně autonomním nasazení.

Největším úskalím pro mě byl nedostatek zkušeností s používáním linuxového systému pro embedded aplikace. Pokud bych se měl znovu rozhodnout pro vhodnou počítačovou platformu, zvolil bych pravděpodobně moderní RaspberryPi s větší podporou a sběrnicemi vyvedenými přímo na desce. Ovládání OpenCV pomocí příkazů v jazyce Python by mohlo být zajímavou variantou pro rychlé prototypování.

Největší přínos byl pro mě samotného, protože jsem měl možnost vyzkoušet si implementovat značně komplexní zařízení. Přestože má výsledný robot velké rezervy, získal jsem cenné zkušenosti jak přistupovat k podobnému projektu v budoucnu.

Literatura

- [1] Hardkernel co., Ltd. *ODROID-U2* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<https://https://www.hardkernel.com/shop/odroid-u2/>>.
- [2] LEOPARD IMAGING INC. *LI-OV5640-USB-72 Data Sheet* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<https://https://https://www.leopardimaging.com/uploads/LEOPARD-IMAGING-USB-72-DATA-SHEET.pdf>>.
- [3] STMicroelectronics. *STM32F042F6 Mainstream ARM Cortex-M0 USB line MCU with 32 Kbytes Flash, 48 MHz CPU, USB, CAN and CEC functions* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f042f6.html>>.
- [4] Pololu Corporation. *120:1 Mini Plastic Gearmotor, 90° 3mm D-Shaft Output* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<https://www.pololu.com/product/1124>>.
- [5] Holtek Semiconductor Inc. *HT71XX High Voltage Regulator* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.330-167.1.pdf>>.
- [6] Pololu Corporation. *DRV8835 Dual Motor Driver Carrier* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<https://www.pololu.com/product/2135>>.
- [7] Texas Instruments Incorporated. *DRV8835 Dual Low-Voltage H-Bridge IC* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8835.pdf>>.
- [8] Texas Instruments Incorporated. CALDWELL JOHN: *TI Designs – Precision: Verified Design Single-Supply, Electret Microphone Pre-Amplifier Reference Design* [online]. Poslední aktualizace 1.1.2015 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8835.pdf>>.
- [9] Panasonic Corporation. *Omnidirectional Back Electret Condenser Microphone Cartridge* [online]. Poslední aktualizace 1.2.2013 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z URL:
<<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Panasonic%20Electronic%20Components/WM-61A.pdf>>.

- [10] STMicroelectronics. *STM32CubeMX: STM32Cube initialization code generator* [online]. Poslední aktualizace 1. 2. 2013 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>.
- [11] Traco Electronic AG. *TSR 1 Series* [online]. Poslední aktualizace 2019 [cit. 5. 12. 2019]. Dostupné z URL: <https://assets.tracopower.com/20190510131645/TSR1/documents/tsr1-datasheet.pdf>.
- [12] Arm Limited (or its affiliates). *μVision® IDE* [online]. Poslední aktualizace 1. 2. 2013 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <http://www2.keil.com/mdk5/uvision/>.
- [13] Cornell University ECE4760. *UART serial PIC32MX250F128B* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2013 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/PIC32/index_UART.html.
- [14] Snail Instruments. *Podvozek Robrouk, stavebnice* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2013 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <http://www.snailshop.cz/kolove/867-robrouk.html>.
- [15] Snail Instruments. *Tankový podvozek TANK-04* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2013 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <http://www.snailshop.cz/pasove/2190-tankovy-podvozek-tank-04.html>.
- [16] HackARobot. *Hackabot Nano: Compact Plug and Play Robot Kit* [online]. Poslední aktualizace 28. 6. 2016 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.kickstarter.com/projects/hackarobot/hackabot-nano-compact-plug-and-play-arduino-robot/description>.
- [17] OpenCV team. *OpenCV (Open Source Computer Vision Library)* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2018 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <https://opencv.org>.
- [18] Amazon.com, Inc. *Amazon Prime Air* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2018 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>.

- [19] Honda Motor Company, Ltd. *MIIMO Robotic Lawnmower* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2018 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.honda.co.uk/lawn-and-garden/products/miimo/overview.html>.
- [20] National Aeronautics and Space Administration (NASA). *Opportunity (rover)* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2018 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity_\(rover\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity_(rover)).
- [21] Swiss Transit Lab. *Swiss Transit Lab The Vision* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2018 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.swisstransitlab.com/en/>.
- [22] PopisTesla Inc. *Full Self-Driving Hardware on All Cars* [online]. Poslední aktualizace 20. 11. 2018 [cit. 10. 12. 2018]. Dostupné z URL: https://www.tesla.com/en_GB/autopilot?redirect=no.
- [23] C. Papageorgiou, M. Oren, and T. Poggio. A general framework for object detection. In International Conference on Computer Vision, 1998.
- [24] Yoav Freund and Robert E. Schapire. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. In Computational Learning Theory: Eurocolt '95, pages 23–37. Springer-Verlag, 1995.
- [25] PSUTKA, Josef. Mluvíme s počítačem česky. Praha: Academia, 2006. Česká matice technická (Academia). ISBN isbn80-200-1309-1.
- [26] Viola, Paul and Jones, Michael. (2001). Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. IEEE Conf Comput Vis Pattern Recognit. 1. I-511. 10.1109/CVPR.2001.990517.
- [27] Doroftei, I.; Grosu, V.; Spinu, V.: Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation. Zář 2007, [Online; navštíveno 9.5.2019]. URL: https://www.intechopen.com/books/bioinspiration_and_robotics_walking_and_climbing_robots/omnidirectional_mobile_robot_-_design_and_implementation.
- [28] H. Sakoe and S. Chiba, "Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition," in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 26, no. 1, pp. 43-49, February 1978. doi: 10.1109/TASSP.1978.1163055, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1163055&isnumber=26130>.

- [29] DŽBÁNEK, Lukáš a Pavel MATĚJKA. Fyziologicky a daty řízené metody pro robustní parametrizaci řeč. *Elektrorevue* [online]. 2003, 19.12.2003, (51) [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03051/index.html>>.
- [30] Haar, A. *Math. Ann.* (1910) 69: 331. Dostupné z: <<https://doi.org/10.1007/BF01456326>>.
- [31] W. T. Freeman and E. H. Adelson, "The design and use of steerable filters," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 9, pp. 891-906, Sept. 1991. doi: 10.1109/34.93808, Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=93808&isnumber=3067>>.
- [32] STM32F072BDISCOVERY: Discovery kit for STM32F072xx microcontrollers [online]. © 2014 STMicroelectronics – All rights reserved, 2014 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/data_brief/32f072bdiscovery.pdf>.
- [33] STM-STUDIO-STM8: STM Studio run-time variables monitoring and visualization tool for STM8 microcontrollers [online]. © 2014 STMicroelectronics – All rights reserved, 2014 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <<https://www.st.com/en/development-tools/stm-studio-stm8.html>>.
- [34] Audacity Team (2012) Audacity®. Version 2.0.0. Audio editor and recorder. [cit. 26/04/2019] Dostupné z: <<http://audacityteam.org/>>.
- [35] GTK+ UVC Viewer, 2008 - Paulo Assis. [cit. 26/04/2019]. Dostupné z: <<http://gucvview.sourceforge.net>>.
- [36] DOSTÁLEK, Petr, Jan DOLINAY a Vladimír VAŠEK. Embedded system for audio source localization based on beamforming. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing* [online]. 2012, vol. 6, iss. 6, s. 367-375. [cit. 2019-05-15]. ISSN 1998-4464. Dostupné z: <<http://www.naun.org/multimedia/NAUN/circuitssystemsignal/16-618.pdf>>.

Seznam symbolů, veličin a zkratk

CPU	centrální procesorová jednotka – Central Processing Unit
DC	stejnoseměrný proud – Direct Current
DIP	vývodové pouzdro integrovaných obvodů pro montáž do děr – Dual In-line Package
DPS	Deska Plošných Spojů
FLASH	nevolatilní elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem
GPU	grafický procesor – Graphic Processor Unit
HDMI	High Definition Multimedia Interface –multimediální rozhraní
LED	dioda emitující světlo – Light Emitting Diode
LDO	lineární DC regulátor napětí – Low Dropout regulator
MSB	nejvýznamnější bit – Most Significant Bit
PWM	pulzně šířková modulace – Pulse Width Modulation
SD	flash paměťová karta – Secure Digital
SRAM	statická paměť s náhodným přístupem – - Static Random Access Memory
UART	synchronní/asynchronní sériové rozhraní USART – Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	univerzální sériová sběrnice – Universal Serial Bus
MFCC	melovský spektrální koeficient – Mel Frequency Cepstral Coefficient
DTW	dynamické borcení času – Dynamic Time Warping

A Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje ve složce zdrojové kódy programu běžícího na ODROID U2. Podložky AudioFile a WaveFunction obsahují soubory převzatých knihoven. Ve složce Firmware jsou zdrojové soubory programu běžícího na STM32F042. Složka PCB_Schematic obsahuje schémata a návrhy DPS předzesilovače a řídicí desky vytvořené v programu KICAD 6. ROBOT.step je soubor 3D sestavy celého robota.

/	kořenový adresář přiloženého CD
├── Software	
│ ├── main.cpp	
│ ├── Vector_control.h	
│ ├── includes.h	
│ ├── AudioFile	https://github.com/adamstark/AudioFile
│ │ ├── AudioFile.cpp	
│ │ └── AudioFile.h	
│ ├── WaveFunction	https://github.com/Linzecong/MFCC-DTW
│ │ ├── WaveFunction.cpp	
│ │ ├── WaveFunction.h	
│ │ └── Wavestructure.h	
├── Firmware	
│ ├── Inc	
│ │ ├── main.h	
│ │ ├── stm32f0xx_hal_conf.h	
│ │ └── stm32f0xx_it.h	
│ ├── Src	
│ │ ├── main.c	
│ │ ├── stm32f0xx_hal_msp.c	
│ │ ├── stm32f0xx_it.c	
│ │ └── system_stm32f0xx.c	
├── PCB_Schematic	návrhy DPS v KiCAD
│ ├── 5V_preamp	
│ │ ├── 5V preamp.kicad_pcb	
│ │ ├── 5V preamp.pro	
│ │ └── 5V preamp.sch	
│ ├── Control_board	
│ │ ├── Control board.kicad_pcb	
│ │ ├── Control board.pro	
│ │ └── Control board.sch	
└── ROBOT.step	3D model