

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

LOKALIZAČNÍ JEDNOTKA MOBILNÍHO ROBOTY

Tomáš Mezera

Bakalářská práce

2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Mezera**
Osobní číslo: **I18084**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Téma práce: **Lokalizační jednotka mobilního robota**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a realizace elektronické navigační jednotky tzv. Lidaru. Navigační jednotka bude umožňovat monitorování prostoru v celém rozsahu pohybu sensorové hlavičky, to je 360°. Činnost jednotky bude řízena vybraným typem jednočipového mikropočítače. Konstrukce Lidaru bude navržena s ohledem na možnost využití technologie 3D tisku. Jako hlavní snímač jednotky bude zvolen snímač pracující na ultrazvukovém, nebo optickém principu. Výběr snímače bude proveden na základě výsledků testování vybraných typů snímačů. Výsledky tohoto testování budou součástí práce. Data navigační jednotky budou k dispozici například ve formě záznamu na vestavěnou paměťovou SD kartu a výstupního signálu, komunikačního protokolu, vysílaného pomocí univerzální sériové linky mikropočítače. Komunikace s nadřazeným systémem, osobním počítačem, bude realizována ve formě obslužného programu. Obslužný program osobního počítače bude realizován ve zvoleném programovacím jazyce (např. C#). K realizaci hardware jednotky lze použít standardní vývojové moduly s mikropočítačem (např. modul Arduino, vývojový kit EVB 5.1, vývojový kit ESP atp.). Součástí práce bude řešerše na zadané téma, podrobná výrobní dokumentace, uživatelský manuál realizované konstrukce a zdrojové kódy firmware mikropočítače a řídicího software osobního počítače.

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4

ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4

MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **27. listopadu 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2021**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16.12.2021

Tomáš Mezera

Poděkování

V první řadě děkuji své rodině za psychickou i finanční podporu po celou dobu mého studia, dále děkuji panu Ing. Hellebrandovi ze SPŠE V Úžlabině, Praha 10 za zapůjčení průmyslového senzoru. Dále děkuji našemu obecnímu sklenáři panu Šetkovi za bezúplatnou výrobu zrcátka přesně na míru mým potřebám. A v neposlední řadě děkuji panu Ing. Havlíčkovi, Ph.D. za věcné připomínky při vedení mé práce.

V Pardubicích dne 16.12.2021

Tomáš Mezera

ANOTACE

Tato bakalářská práce je věnovaná problematice měření vzdáleností a lokalizace robota v prostoru. Je vypracován funkční model zařízení s obslužným vizualizačním programem. Záznam dat je ukládán na SD kartu. Funkčnost daného modelu je ověřena praktickým měřením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lidar, lokalizační jednotka, ToF, vzdálenost, měření vzdálenosti

TITLE

LOCATION UNIT OF MOBILE ROBOT

ANNOTATION

This Bachelor thesis is oriented to the issue of measuring distances and robot localization in the room. A functional model of the device with a utility visualization program was developed. The data recorded is stored on the SD card. The functionality of the model is verified by practical measurements.

KEYWORDS

Lidar, Location unit, ToF, Proximity, Distance measure, Range

OBSAH

Seznam zkratek a značek	9
Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí	10
Seznam ilustrací	11
Úvod	12
1 Obecná část	15
1.1 Sonar	15
1.2 Radar	17
1.3 Lidar	18
2 Druhy senzorů pro měření vzdálenosti	19
2.1 Taktilní	19
2.2 Ultrazvukové	19
2.2.1 HC-SR04	20
2.3 Optické	22
2.3.1 Sharp GP2Y0A02YK0F	22
2.4 Laserové	23
2.4.1 IFM 01D100	24
3 Pohon pro otáčení měřicí hlavy	25
3.1 Krokový motor	25
3.1.1 NEMA 17 17HS4401-S	27
4 Měření úhlu natočení	28
4.1 Potenciometr	28
4.2 Rotační enkoder	29
4.3 Odměrování času	30
4.4 Krokový motor	31
5 Přenos dat a rozvod napájení	32
5.1 Kartáčkový	32
5.1.1 PWM	33
5.2 Indukční	33
5.3 Infračervený	34
5.4 Rádiový	35

6	Praktická část práce	36
6.1	Mechanická konstrukce	36
6.2	Pohon a převod	37
6.3	Výběr senzoru	37
6.3.1	Ultrazvukový senzor HC-SR04	37
6.3.2	Laserový senzor IFM 01D100	38
6.4	Výběr způsobu přenosu dat a rozvodu napájení	39
6.5	Komunikační rozhraní	40
6.5.1	USB	40
6.5.2	SD	40
6.6	HMI	41
6.7	Schéma zapojení	42
6.8	Vývojový diagram sw mikroprocesoru	43
6.9	Vývojový diagram programu processing	45
6.10	Program	46
6.10.1	Přepočít rychlosti otáčení na pauzu mezi přerušeními	46
6.11	Vizualizace a analýza dat	47
6.11.1	Transformace polárních souřadnic do kartézských	47
6.12	Praktické měření	48
6.12.1	Měřicí stanoviště	48
6.12.2	Laserový senzor	49
6.12.3	Optický senzor	50
6.12.4	Ultrazvukový senzor	51
6.12.5	Zhodnocení měření	51
7	Závěr	52
	Použitá literatura	53
	Přílohy	55

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

A / D	Analog / Digital converter – Analogově digitální převodník
GPS	Global Positioning System
IDE	Integrated Development Environment – vývojové prostředí
IP	stupeň krytí
IR	infrared – infračervený
Lidar	Light Detection and Ranging
PSD	position sensitive detector – polohově citlivý detektor
PWM	Pulse wide modulation – pulzně šířková modulace
Radar	Radio Detection and Ranging
SD	Secure Digital
Sonar	Sound Navigation And Ranging – zvuková navigace a zaměřování
ToF	Time of Flight – doba letu
USB	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

f	frekvence, Hz
I	elektrický proud, A
L, r	vzdálenost, m
R	elektrický odpor, Ω
T, t	čas, s
U	elektrické napětí, V
v	rychlost, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
λ	vlnová délka, m
φ	úhel, rad

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Sonar (Punter, 2011)	16
Obr. 1.2 – Radar (Kusala, 2008a)	17
Obr. 1.3 – Hobby YDLIDAR X4	18
Obr. 2.1 – Ultrazvukový senzor HC-SR04	20
Obr. 2.2 – Princip měření ultrazvukovým senzorem	21
Obr. 2.3 – SHARP 2Y0A02	22
Obr. 2.4 – Princip měření (Makerguides, nedatováno)	23
Obr. 2.5 – Laserový senzor IFM 01D100	24
Obr. 3.1 – Zapojení cívek bipolárních a unipolárních krokových motorů (TME, 2020)	26
Obr. 3.2 – Režimy buzení krokových motorů (hteck)	26
Obr. 4.1 – Schéma zapojení potenciometrického snímače polohy	28
Obr. 4.2 – Optický rotační enkodér	29
Obr. 4.3 – Princip inkrementálního enkodéru	30
Obr. 4.4 – Princip absolutního enkodéru (NEWBEDEV, 2021)	30
Obr. 4.5 – Krokový motor	31
Obr. 5.1 – Průřez kartáčkového převodu (AIMINGBHUTANTOURS)	32
Obr. 5.2 – Kartáčkový převod	32
Obr. 5.3 – PWM signál 70 %	33
Obr. 5.4 – Schéma induktivního přenosu, Qi standart, (Wu, 2015)	34
Obr. 5.5 – Infračervený Transciever (RS COMPONENTS, nedatováno)	35
Obr. 5.6 – Rádiový modul 433 MHz, HC-12	35
Obr. 6.1 – Celá konstrukce modelu	36
Obr. 6.2 – Mechanická konstrukce	37
Obr. 6.3 – Testovací kartáčkový převod s uhlíky	39
Obr. 6.4 – Čtečka microSD karty	40
Obr. 6.5 – Displej Nextion s HMI aplikací	41
Obr. 6.6 – Schéma zapojení desky laserového senzoru	42
Obr. 6.7 – Schéma zapojení hlavní desky	42
Obr. 6.8 – Vývojový diagram sw mikroprocesoru, 1. část	43
Obr. 6.9 – Vývojový diagram sw mikroprocesoru, 2. část	44
Obr. 6.10 – Vývojový diagram programu Processing	45
Obr. 6.11 – Měřicí stanoviště	49

Obr. 6.12 - Laserový senzor IFM, vizualizace z Processing	49
Obr. 6.13 – Optický IR senzor SHARP, vizualizace z Processing	50
Obr. 6.14 – Ultrazvukový senzor HC-SR04, vizualizace z Excel	51

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 – Technické parametry HC-SR04	21
Tab. 2.2 – Technické parametry Sharp GP2Y0A02YK0F	23
Tab. 2.3 – Technické parametry O1D100	24
Tab. 3.1 – Technické parametry NEMA 17 17HS4401	27

ÚVOD

Cílem práce bylo uchopit problematiku měření vzdálenosti v úhlu 360° kolem měřicího zařízení. Dále navrhnout a sestavit toto zařízení od mechanické, strojní části přes elektrickou až po naprogramování procesoru a obslužného programu. Součástí práce je řešení jednotlivých typů senzorů, otestování některých jejich vlastností, jejich porovnání a výběr nejvhodnějšího.

Tato práce by mohla být využita jako součást lokalizačního systému robota jako detektor překážek. S potřebným SW vybavením by bylo možno mapovat prostor uvnitř budov nebo jeskyní. Zařízení by mohlo být doplňkem nebo náhradou k GPS ve vnitřních prostorech.

1 OBECNÁ ČÁST

Jak už název práce napovídá, jedná se o zařízení pro lokalizaci robota v prostoru. V dnešní době již existuje nepřehledné množství přístupů k lokalizaci. Už v minulosti bylo potřeba lokalizovat různé objekty ať už vůči sobě, nebo vůči stabilnímu bodu na zemi. Jako první příklad bych uvedl námořní navigaci. Poloha lodi se určovala ve dne podle Slunce a v noci podle Polárky, dále si mořeplavci zapisovali směr a rychlost lodi a podle toho dopočítávali svou přibližnou polohu v mapě (Sobotka, 2015).

Ponorky využívají sonar (zkratka z anglického Sound Navigation and Ranging), je to akustický zaměřovač, který slouží pro zmapování prostoru a zjišťování polohy.

S vývojem techniky a nástupem nových dopravních prostředků, zejména dopravních a vojenských letadel vznikl požadavek na bezpečnost. Ať už pro bezpečné létání při zhoršené viditelnosti, nebo jako ochranu státu před narušitelem jiné mocnosti. Za účelem lokalizace letadel vznikl radar (zkratka z anglického Radio Detection and Ranging).

Jako další z významných technologií lokalizace je měření vzdálenosti pomocí světla neboli lidar (zkratka z anglického Light Detection and Ranging). Tu využívají například geodeti k zaměřování polohy a rozměrů budov. Stejnou technologii využívá i lokalizační jednotka robotického vysavače, která je předmětem této práce.

Jako poslední a nejmodernější z významných technologií lokalizace je GPS (zkratka z anglického Global Positioning System), která postupně pronikla do všech odvětví techniky. Od automobilů, letadel, lodí až ke geodezii. Velká nevýhoda GPS je, že ji lze provozovat jen ve venkovních prostorech.

1.1 SONAR

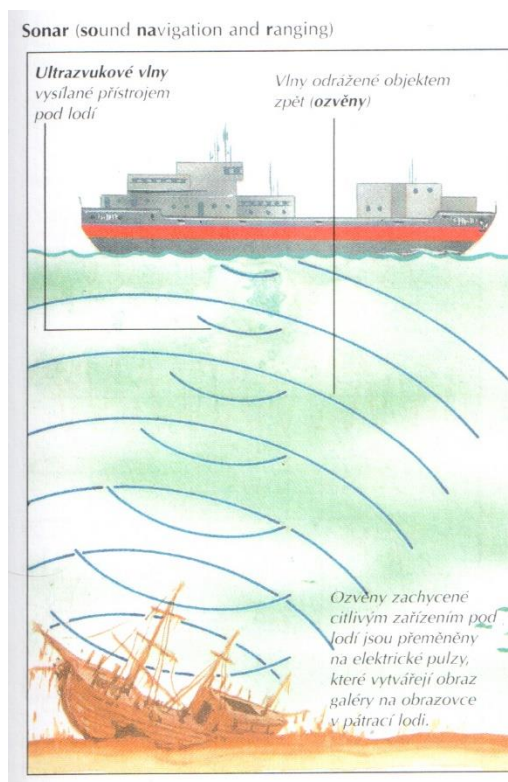
Sonar funguje na principu echolokace. Echolokace je v jednoduchosti vyslání vysokofrekvenčního zvuku o dané frekvenci a intenzitě a následným příjmem totožného zvuku o stejné frekvenci, ale snížené intenzitě z důvodu odrazu od překážek a propustnosti prostředí. Porovnáním času vyslání a příjmu pulzu můžeme vypočítat vzdálenost v daném směru.

Tento způsob měření vzdálenosti, jako i spoustu jiných dovedností, jsme odpozorovali a převzali z přírody, respektive od zvířat. Používají ho někteří savci (kytovci a netopýři). Ti se dokáží orientovat v prostoru jeskynní i v naprosté tmě a díky echolokaci mají přehled, kde se nachází a mohou tak snadno lovit potravu (Katz, 2020). Netopýři používají frekvenci ultrazvuku 30 kHz až 130 kHz. Zvuk se ve vzduchu šíří rychlostí asi $330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $346 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Podobný echolokační systém mají i kytovci. Ti ale na rozdíl od netopýřů

využívají mnohem vyšších frekvencí ultrazvuku až 300 kHz. Zvuk se ve vodě šíří rychlostí asi $1440 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Znamená to $3\times$ až $4\times$ vyšší propustnost než na vzduchu.

Zvukové vlnění dělíme na tři oblasti vymezené spektrem slyšitelnosti člověka, které je 16 Hz až 20 kHz. Zvukové vlnění o nižších frekvencích než 16 Hz se nazývá infrazvuk, naopak vlnění o frekvenci nad 20 kHz nazýváme ultrazvukem (Wikiskripta, 2021). Čím je vysílací frekvence nižší, tím je vlnová délka větší. Má-li se zvuková vlna od nějakého předmětu odrazit, musí být její vlnová délka menší než tento předmět. Snižováním frekvence sice dosáhnete vyšší propustnosti prostředím, to znamená, že vlna dorazí dál s menším útlumem, ale nízké frekvence mají větší vlnovou délku. Malé předměty a živočichové, například ryby se mezi tyto vlny dokáží schovat a jsou tak pro delfína neviditelné. Nízké frekvence jsou tedy dobré pro velké a vzdálené objekty.

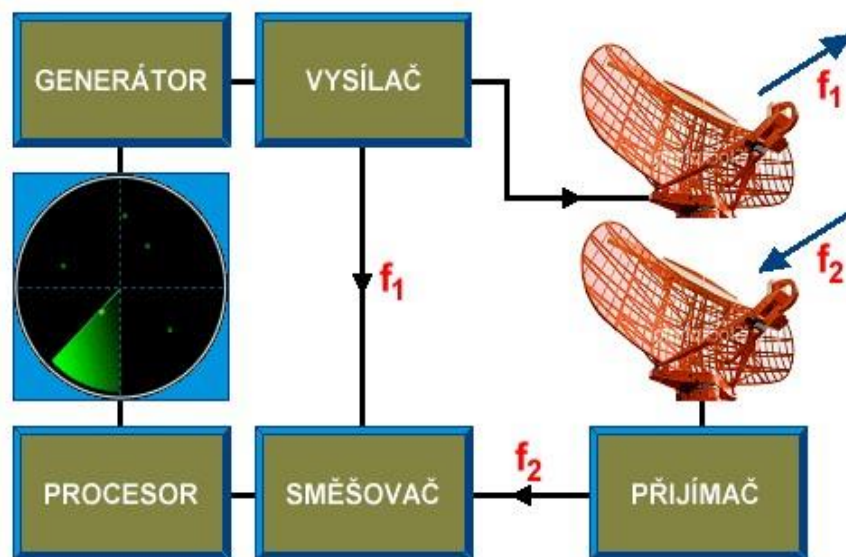
Naopak zvyšováním frekvence se obraz zpřesňuje a je možné echolokací detekovat i mnohem menší předměty. Pokud bychom ale vysokou frekvenci poslali na dlouhou vzdálenost, tak se signál průchodem prostředím natolik utlumí, že po odrazu nezachytíme nic.



Obr. 1.1 – Sonar (Punter, 2011)

1.2 RADAR

Radar na rozdíl od sonaru využívá namísto zvuku elektromagnetické vlnění. Princip radaru spočívá ve vysílání a odrazu mikrovln od různých objektů. Generátor vygeneruje velmi krátký modulovaný pulz o délce 1 ms, vysílač jej zesílí, pulz projde přes přepínač do antény. Anténa musí být natočena směrem, kterým chceme měřit. Z antény se pulz šíří jako elektromagnetické vlnění rychlostí $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ směrem k měřenému objektu. To je asi milionkrát rychleji než rychlost šíření zvuku ve vzduchu. Signál se od měřeného objektu odrazí všemi směry. Od plochy, která byla kolmo k anténě, se signál odrazí zpět do antény. V tu chvíli je radar už přepnut na příjem. Signál zachytí anténa s fázovým posunem doby letu k objektu a zpět. Přijímač tento signál zpracuje a vykreslí na obrazovku. V minulosti se využíval jako zobrazovač osciloskop. Z něho se dala poměrně jednoduše určit vzdálenost od objektu, ale už nic neříkal o směru, ze kterého signál přišel. K tomu bylo třeba znát aktuální natočení antény. Pro některé aplikace, používané například v letectví, bylo vhodnější zobrazovat na stejné obrazovce nejen vzdálenost, ale také směr, ve kterém objekt leží. Při konstantní rychlosti otáčení antény na obrazovce jsou vidět známé radarové kruhové a nejčastěji zelené body, které jsou známé z leteckých a námořních televizních seriálů (Kusala, 2008b). Radary se dále využívají v meteorologii, geodézii, v kosmickém výzkumu a pro měření rychlosti vozidel (Kusala, 2008c).



Obr. 1.2 – Radar (Kusala, 2008a)

1.3 LIDAR

Lidar pro své měření využívá pulzy světla generované laserem nebo LED. Na základě velmi přesného měření času za pomoci technologie zvané ToF (zkratka z anglického Time of Flight) neboli "doba letu", dokáže systém rozpoznat vzdálenost od překážky a její tvar. Přímé senzory ToF generují krátké pulzy světla a měří čas, za který se pulz vrátí zpět do senzoru a tímto měří vzdálenost. Nepřímé ToF senzory vysílají nepřetržitou modulovanou vlnu světla a fotodioda snímá danou vlnu a vnitřní elektronika měří kontinuálně fázový posun.

Na principu ToF pracují i ultrazvukové senzory. Profesionální lidary jsou určeny pro měření kratších vzdáleností do 50 m. Existují lidary, které dokáží skenovat prostor ve 3D, ale pro většinu aplikací postačuje použití 2D lidar. Lidary se používají v mnoha odvětvích od samoříditelných aut, přes vytváření leteckých snímků povrchu Země ve vysokém rozlišení, k měření hladiny oceánů, i k navádění při dokování kosmických lodí a v neposlední řadě přispívají k většímu bezpečí v průmyslových výrobcích (Schweber, 2019a).

Lidary na svém výstupu vysílají obrovský proud dat, který se dá interpretovat ve zpracujícím programu jako mračno bodů. Pro zpracování dat v reálném čase je potřeba velké množství výpočetního výkonu. V některých případech se k tomu využívá specializovaný HW. Data se pak dále musí třídit a filtrovat v závislosti na ostatních bodech. Problémy mohou nastat se správnou detekcí různých materiálů, matných, skleněných a hrubých povrchů, nebo i vzájemné rušení s jiným lidarem (Schweber, 2019b).

Existují různé konstrukce lidarů. Nejstarší a nejpoužívanější jsou mechanické rotační, ty sice vyžadují zvýšenou údržbu, ale mohou být 360° a navíc jsou cenově dostupné. Novinkou na trhu jsou polovodičové mikromechanické zrcadlové skenery na vyrobené technologii MEMS. Ty jsou sice mnohem menší a téměř bezúdržbové, ale jejich cena je vysoká a jeden senzor nedokáže obsáhnout celých 360° (Schweber, 2019c).



Obr. 1.3 – Hobby YDLIDAR X4

2 DRUHY SENZORŮ PRO MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI

2.1 TAKTILNÍ

Tyto senzory jsou zástupci kontaktního měření vzdálenosti. Mají velkou výhodu v tom, že jsou levné a detekují překážku z téměř jakéhokoliv materiálu. Jejich hlavní nevýhoda je, že mají pouze nespojitý výstup a měřicí vzdálenost se musí nastavit předem. Dá se říct, že jsou tedy používány hlavně jako senzory přítomnosti objektu v určité předem dané vzdálenosti. Kontaktní měření přináší ale i další nevýhody, například: dřívější opotřebení, zanesení, ulomení měřicího hrotu a další. Tyto senzory se hodí spíše jako úchopové senzory pro robotické aplikace, proto se o nich v praktické části již nebudu dále zmiňovat.

2.2 ULTRAZVUKOVÉ

Ultrazvukové senzory, také nazývané ultrasonické, pracují v neslyšitelném ultrazvukovém pásmu obvykle v rozsahu od 40 kHz do 70 kHz. Fungují na jednoduchém principu. Mikroprocesor vygeneruje krátký pulz a měří čas, za jak dlouho se jím vygenerovaný pulz, odražený od překážky vrátí. Odborně se tomuto principu říká ToF (neboli doba letu). Pro generování těchto vln se používá piezoelektrický reproduktor. Ultrazvukové senzory mají širokou škálu využití od detekování přítomnosti, přiblížení, přes detekci „mrtvého úhlu“ v automobilovém průmyslu až po robotické vysavače. Tyto senzory jsou velmi levné a dokáží měřit vzdálenost do 5 m, bohužel ale dosahují nízkých obnovovacích frekvencí. Hodně záleží na velikosti a odrazivosti detekovaného objektu. Také je důležité určit co nejpřesněji rychlost šíření zvuku v daném okamžiku. Toto je ovlivňováno mnoha faktory, jako jsou atmosférický tlak, vlhkost a teplota. Zvuk se ve vzduchu šíří rychlostí asi $330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $346 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Frezel, 2018).

Teoretický příklad: Při suchém vzduchu a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ je rychlost zvuku $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, perioda mezi odeslaným a přijatým pulzem je 10 ms. Vzdálenost detekovaného objektu získám výpočtem

$$L = \frac{v \cdot T}{2} = 340 \cdot 0,01 = 1,7 \text{ m}, \quad (2.1)$$

kde v – rychlost zvuku, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

L – vzdálenost, m,

T – perioda mezi odeslaným a přijatým pulzem, s.

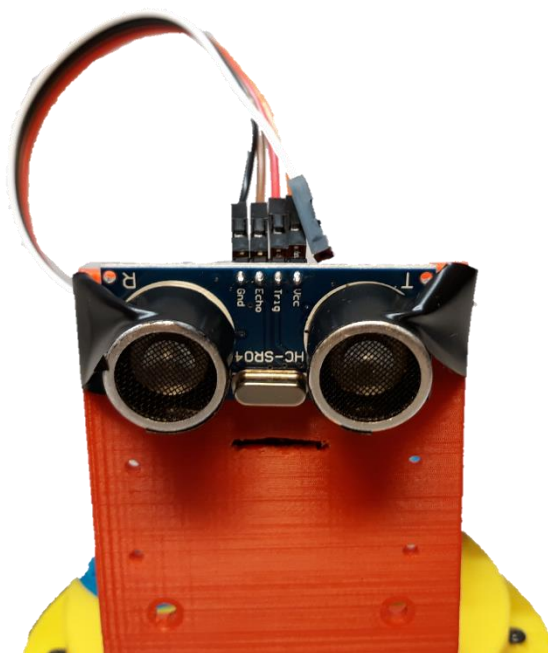
Výsledek dělím dvěma, protože v periodě je započítán součet cest k objektu a od něj (Scherz, Monk, 2016).

Je třeba si vybrat správnou vysílací frekvenci. Při 58 kHz dokážeme detekovat předměty větší než 1 cm, s dosahem asi 11 m. Naopak při 300 kHz detekujeme předměty o velikosti 1 mm, ale pouze do vzdálenosti kolem 30 cm (Frezel, 2018).

2.2.1 HC-SR04

Toto je první z uvažovaných senzorů měření vzdálenosti. Dokáže měřit v rozsahu od 2 cm do 4 m s přesností na 3 mm. Tento modul obsahuje ultrazvukový piezoelektrický vysílač, přijímač a řídicí elektroniku, která generuje pulz o frekvenci 40 kHz. Nevýhodou tohoto senzoru je, že má 30° měřicí úhel. Tato vlastnost při našem využití dost zkresluje výsledný obraz. Všechny parametry jsou přehledně popsány v tab. 2.1.

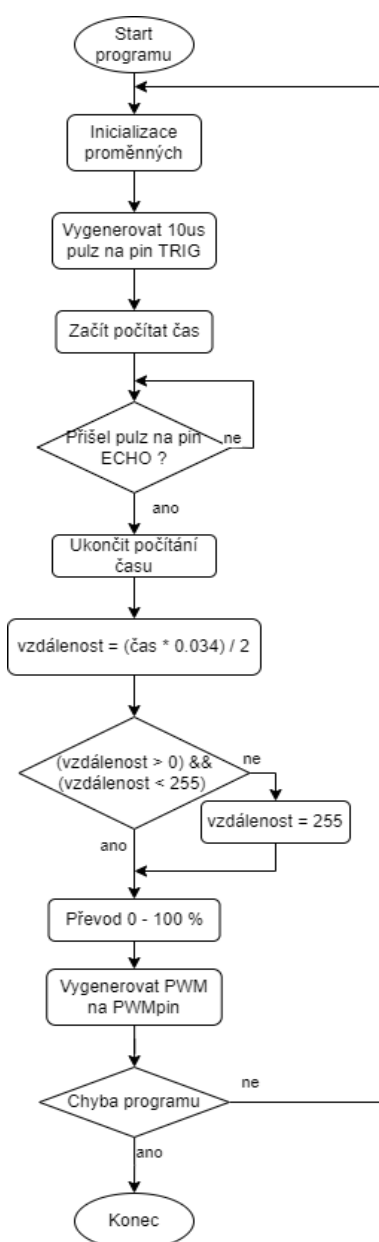
Měření začíná kladným pulzem od mikroprocesoru na pin Trig o délce nejméně 10 μ s, a zároveň v mikroprocesoru spustíme stopky. Modul po příchodu pulzu na pin Trig vygeneruje signál o osmi krátkých pulzech na frekvenci 40 kHz. Sepne výstup Echo a jakmile se vrátí odražený signál do přijímače, Echo klesne na logickou 0, mikroprocesor vypne stopky, změří čas a ten podle vzorce, popsaného výše, převede na vzdálenost. Pokud je Echo pulz delší než 30 ms, předpokládá se, že se pulz ztratil, v čekání na něj se nepokračuje a spouští se nové měření.



Obr. 2.1 – Ultrazvukový senzor HC-SR04

Tab. 2.1 – Technické parametry HC-SR04

Měřicí rozsah	2 – 400 cm
Rozlišení	± 0,3 cm
Měřicí úhel	30°
Pracovní frekvence	až 40 kHz
Provozní napětí	5 V _{ss}
Pracovní proud	15 mA
Výstup	z řídicího mikroprocesoru 0 až 100 % PWM
Rozměry	45 × 20 × 15 mm



Obr. 2.2 – Princip měření ultrazvukovým senzorem

2.3 OPTICKÉ

Optické senzory jsou vhodné pro měření kratších vzdáleností než senzory ultrazvukové, ale měřicí princip je u obou podobný. Tyto senzory většinou získávají naměřenou vzdálenost pomocí velikosti napětí na výstupním pinu senzoru. Měření u optických senzorů spočívá ve vyslání modulovaného signálu infračervenou LED, odrazem světla od překážky a příjmem světla fotocitlivým detektorem. Optické senzory jsou obvykle časově stabilnější i teplotně nezávislé.



Obr. 2.3 – SHARP 2Y0A02

2.3.1 Sharp GP2Y0A02YK0F

Měří vzdálenost v rozsahu od 20 do 150 cm, má analogový výstup, jehož velikost napětí odpovídá aktuálně změřené vzdálenosti. Pracuje na principu triangulace. IR LED vysílá neviditelný modulovaný světelný signál o vlnové délce $\lambda = (850 \pm 70)$ nm. Odražený paprsek přijímá speciální PSD (polohově citlivý detektor) (SHARP, 2006). Tyto a další parametry naleznete popsány v tab. 2.2.

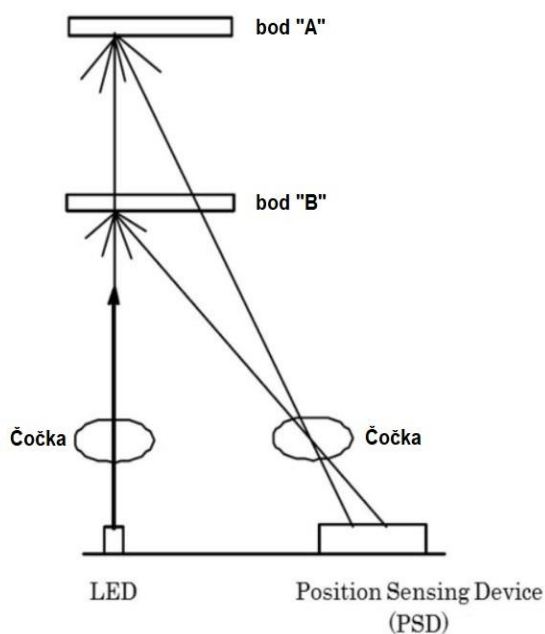
PSD je fotodetektor, který dokáže ve velké rychlosti měřit polohu světelného bodu v jednom, nebo dvou směrech (v našem případě jen v jednom směru)¹ (Dorsch, 1994a).

¹ Podobné, ale mnohem kvalitnější obrazové CCD snímače máme v našich fotoaparátech.

Triangulace je metoda měření vzdálenosti fungující na principu odrazu a lomu světla. Vysílač, společně s měřeným objektem tvoří jakýsi trojúhelník. Úhel dopadu na fotodetektor dokáže za pomoci Pythagorovy věty určit vzdálenost senzoru od měřeného objektu (Dorsch, 1994b).

Tab. 2.2 – Technické parametry Sharp GP2Y0A02YK0F

Měřicí rozsah	20 – 150 cm
Rozlišení	
Měřicí úhel	asi 5°
Pracovní frekvence	26 Hz
Provozní napětí	5 V _{ss}
Pracovní proud	33 mA
Výstup	napěťový 0 – 4,5 V
Rozměry	29,5 × 13 × 21,6 mm



Obr. 2.4 – Princip měření (Makerguides, nedatováno)

2.4 LASEROVÉ

Laserové senzory se používají hlavně pro detekci malých předmětů a přesné zaměření ostrých i velmi tupých úhlů rozhraní dvou překážek. Laser využívá velmi úzké pásmo vlnových délek, proto dokáže mít vysokou intenzitu záření zaostřenou do velmi malého průměru (IFM, 2011).

2.4.1 IFM 01D100

Průmyslový senzor 01D100 od německé firmy IFM Electronic má velmi dobré měřicí vlastnosti, dosah až 10 m, velký rozsah napájecího napětí od 18 V do 30 V. Je určen převážně pro stacionární použití. Měřicí frekvence je nastavitelná od 1 Hz do 50 Hz.



Obr. 2.5 – Laserový senzor IFM 01D100

Na povrchu má čitelný LED segmentový display pro zobrazení měřené vzdálenosti, konfiguračních a dalších údajů. Ze senzoru vedou 2 výstupy. Jeden digitální, s vnitřním komparátorem a nastavenou vzdáleností pro spínání, druhý analogový, nastavitelný buď jako proudový výstup 0 až 20 mA, nebo jako napěťový výstup 0 až 10 V, lineárně závislý na aktuálně měřené vzdálenosti. Vysílaný laserový pulz o vlnové délce $\lambda = 650 \text{ nm}$ má vysílací dobu 1,3 ns. Výkon laseru je menší než 4 mW, takže by ani při náhodném krátkodobém střetu s lidským okem neměl způsobit trvalé následky (IFM, 2011). Tyto a další informace o senzoru naleznete v tab. 2.3.

Tab. 2.3 – Technické parametry 01D100

Měřicí rozsah	20 – 1 000 cm
Rozlišení	$\pm 1,6 \text{ cm}$
Měřicí úhel	$0,086^\circ$
Pracovní frekvence	až 50 Hz
Výkon laseru	až 4 mW
Vlnová délka	650 nm
Délka pulzu	0,1 ns
Provozní napětí	18 – 30 V _{ss}
Pracovní proud	max. 150 mA
Výstup	napěťový 0 – 10 V
Rozměry	59 × 42 × 52 mm

3 POHON PRO OTÁČENÍ MĚŘICÍ HLAVY

3.1 KROKOVÝ MOTOR

Krokový motor je bezkartáčový stejnosměrný motor, má konstrukcí přesně daný počet kroků na otáčku, nejčastěji 200 kroků. Pro roztočení krokového motoru je třeba speciální řadič, driver, který generuje pulzy do cívek ve statoru a tím pohybuje s rotorem. V moderních driverech najdeme nejčastěji mikroprocesor, ale pro základní řízení nám stačí i pár klopných obvodů (TME, 2020).

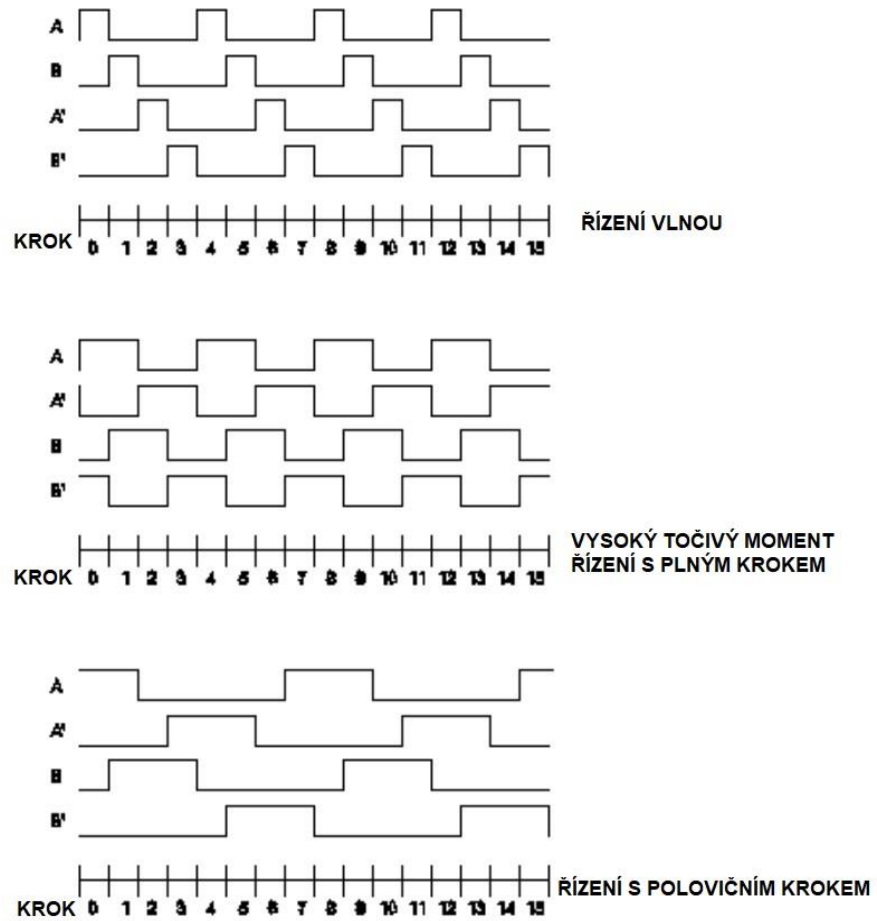
Krokový motor se skládá ze statoru a rotoru. Stator je složen z kostry a z mnoha cívek. Pokud na tuto cívku přivedeme napětí, vznikne elektromagnet. Tento elektromagnet se přitahuje k jednomu z magnetů, který je součástí rotoru. Po vynulování offsetu mezi úhlem statoru a rotoru tuto cívku odpojíme a připojíme další cívku v pořadí. Tím se rotor pootočí o další krok. Pokud tyto pulzy budeme generovat v pravidelných intervalech za sebou, můžeme frekvencí řídit rychlost otáčení tohoto motoru. Při překročení určité mezní frekvence může dojít ke ztrátě kroku a poté se motor zastaví a generuje charakteristický brum. V tuto chvíli je třeba nějakým způsobem detekovat, že se motor zastavil a snížit frekvenci. Při nižší frekvenci se dokáže rotor znovu sesynchronizovat a roztočit se danou rychlostí (TME, 2020).

Detekovat zastavení motoru lze různými způsoby. V mém případě je to řešeno pomocí algoritmu, Hallova snímače a počítání doby jedné otočky. Pokud aktuální doba otočky překročí stanovenou dobu pro jednu otočku, algoritmus to vyhodnotí jako zastavený motor a sníží generovanou frekvenci driveru na 0.

Krokové motory lze řídit v různých režimech. První a nejjednodušší z nich je takzvaná vlna, kdy v jednu chvíli je sepnuta právě jedna cívka. V dalším režimu je řízení s plným krokem, kdy se generují pulzy vzájemně v negaci a proti druhé cívce fázově posunuté. Tento režim se vyznačuje vyšším točivým momentem, toto podporuje většina driverů. Některé z nich navíc dokáží velikost kroku dělit na takzvané mikrokroky. Tímto lze dosáhnout snížení mechanického hluku a hladšího běhu motoru. To přispívá i k snížení pravděpodobnosti ztráty kroku a tím nechtěnému zastavení motoru (Robodoupě, 2016).

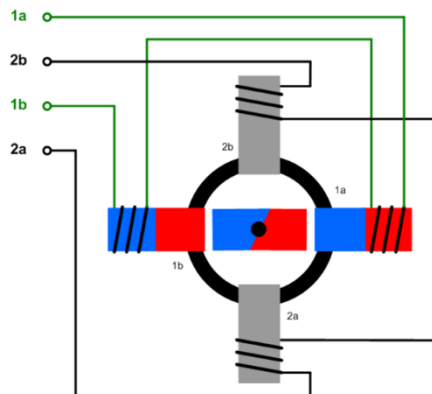
Krokové motory se dělí na unipolární a bipolární. Hlavní rozdíl je v tom, že unipolární motor pracuje pouze s jednou polaritou proudu, kdežto bipolární motor pracuje s oběma polaritami, to znamená, že směr průchodu proudu cívkou je obousměrný, tedy střídavý. Aby bylo možné použití napětí jedné polarity, musí být možné připojovat nezávisle k oběma koncům kladné napětí nebo zem. Toto zajistí běžně známé můstkové zapojení s tranzistory. Unipolární motor má navíc vyveden vodič z obou středů cívek a ten je přiveden na zem. Díky

tomu není třeba měnit polarita cívek. Ušetříme tím polovinu tranzistorů ve spínacím můstku, ale nevýhodou je, že v jednu chvíli může pracovat pouze polovina vinutí. Unipolární motor tak vytváří menší točivý moment než motor bipolární (TME, 2020).

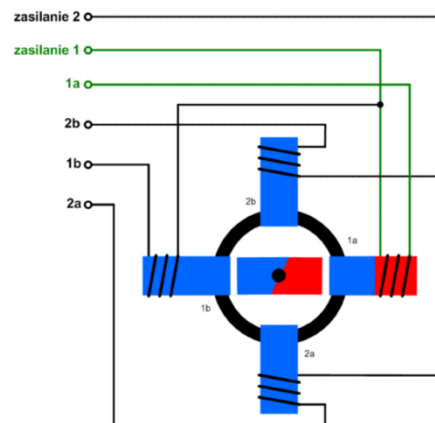


Obr. 3.2 – Režimy buzení krokových motorů (hteck)

Bipolární motor



Unipolární motor



Obr. 3.1 – Zapojení cívek bipolárních a unipolárních krokových motorů (TME, 2020)

3.1.1 NEMA 17 17HS4401-S

Tento krokový motor nabízí bipolární i unipolární zapojení. Záleží na připojeném kabelu s daným konektorem a počtu vodičů. Já jsem využil používanější bipolární zapojení. Nejdůležitější vlastnosti jsem uvedl v tab. 3.1.

Tab. 3.1 – Technické parametry NEMA 17 17HS4401

Měřicí rozsah	20 – 150 cm
Počet kroků na otáčku	200
Úhel jednoho kroku	1,8°
Jmenovitý proud	1,7 A
Odpor cívky	1,5 Ω
Indukčnost cívky	2,8 mH
Moment síly	40 N·cm
Hmotnost	280 g

4 MĚŘENÍ ÚHLU NATOČENÍ

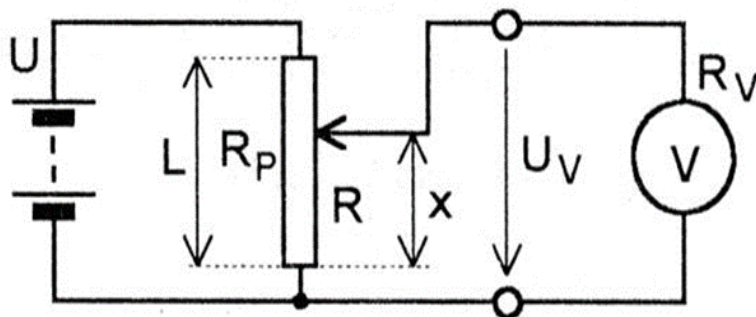
Pro zajištění informace o aktuálním úhlu natočení senzoru oproti stojící základně musíme vybrat jeden z následujících případů. Máme na výběr z inkrementálních i absolutních měření. Inkrementální neboli přírůstkové měření pouze přičítá a odčítá pulzy od posledního stavu, kdežto absolutní snímač přesně ukazuje, kde se v danou chvíli nachází.

4.1 POTENCIOMETR

Odporová dráha potenciometru je vyrobena z uhlíku a má od výroby daný elektrický odpor rovnoměrně (lineárně, exponenciálně nebo logaritmičsky rozložen po celé délce dráhy). Pro naše využití by byla nejlepší dráha prstencového tvaru. Při klouzání jezdce (pevně spojeného s měřicí hlavou senzoru) po odporové dráze dostáváme různé hodnoty odporu mezi jedním koncem dráhy a jezdce. Pokud mezi konce odporové dráhy přivedeme stálé neměnné stejnosměrné napětí, získáme mezi jezdce a jedním koncem dráhy napětí snižené v poměru konců dráhy. Z toho snadno přepočteme hodnotu napětí na úhel natočení měřicí hlavy senzoru. Nevýhoda tohoto řešení spočívá v rychlém opotřebování povrchu dráhy už při nízkém počtu, řádově desítek otoček. Je to zástupce absolutního snímání. Výstupní napětí získáme ze vztahu

$$U_V = U \cdot \frac{R}{R_P} = U \cdot \frac{x}{L} \quad (4.1)$$

kde U_V – výstupní elektrické napětí, V,
 U – napájecí elektrické napětí, V,
 R – elektrický odpor mezi jezdce a společnou zemí, Ω ,
 R_P – elektrický odpor mezi konci drah, Ω ,
 x – vzdálenost jezdce od spodního konce dráhy,
 L – vzdálenost mezi konci drah.



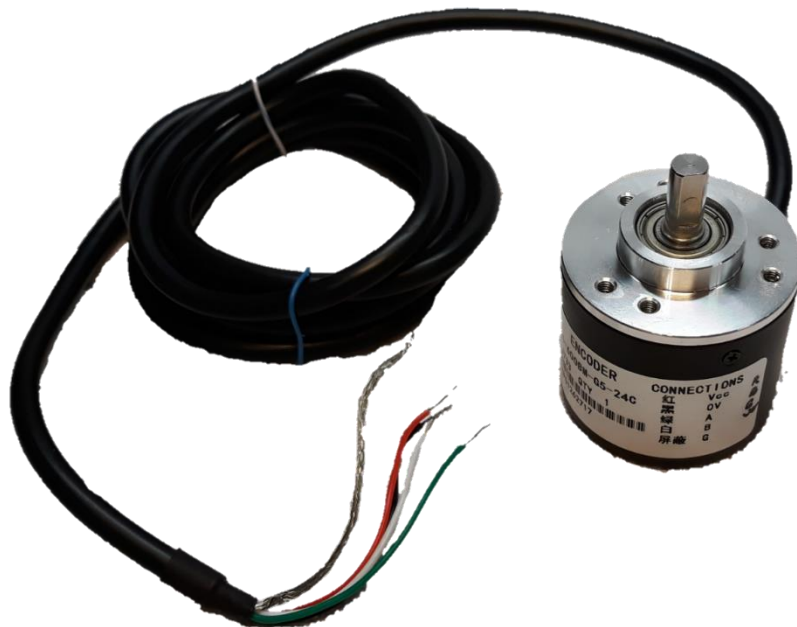
Obr. 4.1 – Schéma zapojení potenciometrického snímače polohy

4.2 ROTAČNÍ ENKODER

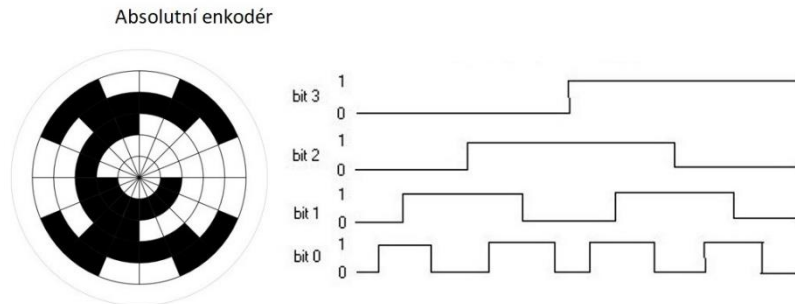
Dokáže snadno měřit úhlovou rychlost, směr a úhel natočení. Existují různé konstrukce enkodéru:

- mechanický,
- optický,
- magnetický,
- kapacitní.

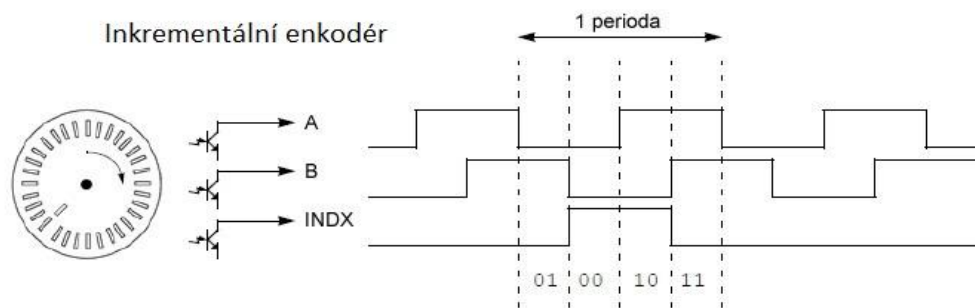
Pro naše využití je nejvhodnější optický typ enkodéru. Je bezdotykový a tím pádem téměř bezporuchový. Funguje na principu zatemňování fotobran. Dále se dělí na dvě skupiny inkrementální a absolutní. Absolutní typ má obrovskou výhodu – daný úhel natočení má jasně danou kombinaci výstupů. To znamená, že procesor nemůže ztratit krok a rozkalibrovat svou polohu. Nevýhodou je – čím větší je rozlišení, tím větší je počet datových vodičů. Inkrementální typ má jen dva, respektive tři datové vodiče a napájení. Dva kanály A a B generují obdélníkové pulzy navzájem fázově posunuté a jeden referenční pulz nulového stupně úhlu na třetím datovém vodiči. Nevýhodou je, že pokud nemá procesor spolehlivě nastavená přerušení, může ztratit krok a do konce otočky by ukazoval nesprávný úhel. Referenčním pulzem se vynulují čítače a tím zkalibruje úhel.



Obr. 4.2 – Optický rotační enkodér



Obr. 4.4 – Princip absolutního enkodéru (NEWBEDEV, 2021)



Obr. 4.3 – Princip inkrementálního enkodéru

4.3 ODMĚŘOVÁNÍ ČASU

Další možností, jak měřit úhel a úhlovou rychlost, je pomocí náběžné hrany nulového referenčního bodu (úhlu) a stopek (časovače). Na nulové pozici je vytvořena nepravidelnost od jinak pravidelného obvodu rotační hlavy. Ta může být například výstupek, nebo kousek magnetu. Jako snímač nulové pozice je využita podle zvoleného výstupku například laserová závora, nebo mechanický spínač, popřípadě Hallova sonda, která zaznamená, kdy došlo k průchodu nulou. Od této chvíle je spuštěn časovač a měřena doba otáčení až do chvíle, kdy zaznamenáme další náběžnou hranu od snímače. V tuto chvíli je zaznamenán čas jedné otočky, vynulován časovač a znovu spuštěn. Z tohoto už snadno spočítám, ve kterou chvíli se snímač nacházel, na jakém úhlu, k tomu dosadím naměřené vzdálenosti a vše je zakresleno do mapy.

Snímač nulové pozice musí mít ostrý úhel náběhu, aby bylo možné vždy jasně určit, kdy došlo k protnutí s nulovým bodem.

Je nutno zajistit, aby se poháněcí motor rotační hlavy otáčel stále stejnou konstantní úhlovou rychlostí. Kdyby docházelo ke zpomalování (zadržávání pohybu) na stále stejném

místě, nebylo by možné tuto chybu programově odhalit, ani nijak ošetřit a tím by se měření zkreslovalo od skutečnosti.

Pokud by z nějakého důvodu docházelo dlouhodobě ke změně konstantní rychlosti, je možno tuto skutečnost odhalit. Poté se zprůměruje momentální doba otočky, s několika předchozími dobami a tím i za těchto okolností je možno měřit reálné úhly natočení.

4.4 KROKOVÝ MOTOR

Pokud by bylo možné zajistit, že motor neproklouzne a neztratí kroky, lze uvažovat i o použití krokového motoru. Ten nám vytvoří pohon a zároveň jasně určí aktuální úhel



Obr. 4.5 – Krokový motor

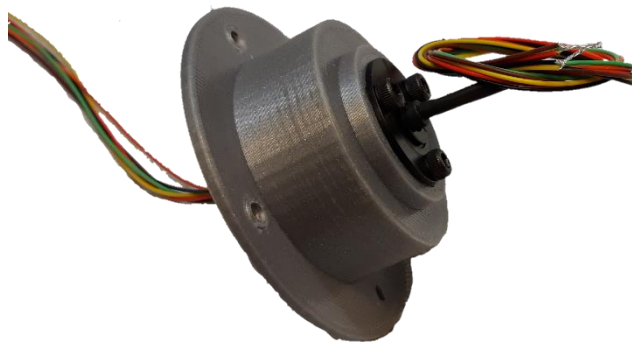
natočení rotační hlavy. Pro zajištění optimálního rozjezdu mikroprocesorem generují rozběhové a doběhové rampy. Některé z driverů krokových motorů dokáží přepínat různé úrovně mikro-krokování a tím dosáhnout ještě hladšího rozjezdu. V aplikaci nepředpokládám náhlé změny rychlosti, směru, ani skokový nárůst zatížení motoru. Proto, když se načasují rozjezdové sekvence, s velkou pravděpodobností nedojde k proklouznutí motoru. Tento typ snímání musí být v kombinaci s některým z výše uvedených snímačů. Při prvním otočení je třeba nalézt referenční nulovou pozici, smazat si čítač pulzů motoru. Od tohoto okamžiku je zkalibrováno a měření úhlu je připraveno k provozu.

5 PŘENOS DAT A ROZVOD NAPÁJENÍ

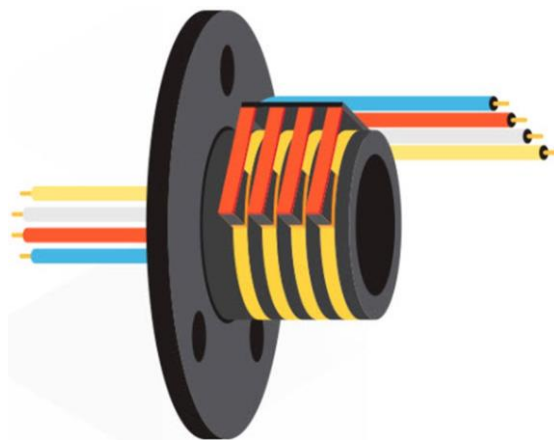
Existuje několik způsobů přenosu napájení a dat mezi rotační hlavou se senzory a stojící základnou.

5.1 KARTÁČKOVÝ

Kartáčekový přenos energie – kroužkostroj, funguje na jednoduchém principu několika sběracích kroužků vedle sebe a nad nimi několika kartáčky v jednotlivých drahách. Tomuto spojení se říká kluzný kontakt. Jedná se o kontaktní přenos dat, má proto i několik nevýhod, jako například možné opotřebování kontaktu, maximální rychlost otáčení, šum a jiskření mezi kontakty. Na podobném principu pracují i komutátorové motory. Místo kartáčků se zde často využívají uhlíky vyrobené z grafitu a dráhy jednotlivých vinutí jsou kolmo k těmto uhlíkům (Chmelík, 2007).



Obr. 5.2 – Kartáčekový převod



Obr. 5.1 – Průřez kartáčekového převodu (AIMINGBHUTANTOURS)

5.1.1 PWM

PWM, neboli pulzně šířková modulace, má od objevu polovodičové spínané techniky široké využití převážně v oblasti regulace otáček motoru. Do té doby se regulovalo připojením odporu do napájecího přívodu motoru. Tím sice bylo dosaženo snížení otáček, ale za cenu maření nespoteřovaného výkonu na tomto odporu. Hodnota dvoustavového přenášeného signálu se zamoduluje do přenosu jako poměr doby mezi stavem zapnuto a vypnuto. Tomuto poměru se říká střída. Hodnota PWM signálu se nejčastěji vyjadřuje od 0 % do 100 %. Přičemž 0 % je minimální přenášená hodnota a 100 % je maximální přenášená hodnota. Perioda je součtem doby mezi zapnuto a vypnuto (Vidim, 2014). PWM signál je velmi těžko zarušitelný, proto jsem ho využil pro přenos dat skrze kartáčkový převod.

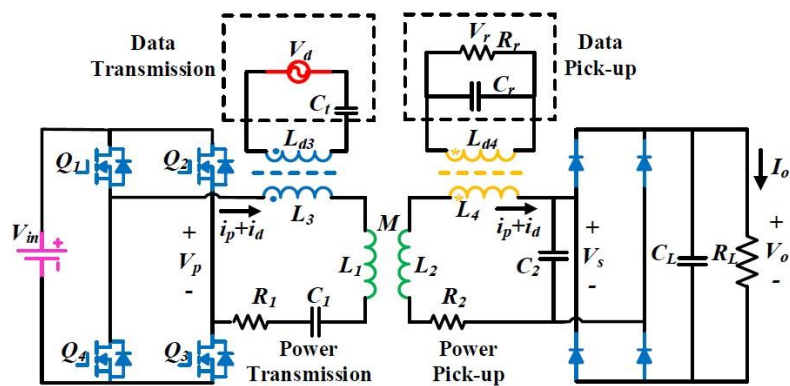


Obr. 5.3 – PWM signál 70 %

5.2 INDUKČNÍ

Jedná se o bezdrátový přenos energie. Funguje na principu dvou cívek. Vysílací cívka budí proměnné magnetické pole, které indukuje napětí na indukčně vázané přijímací cívce. Pro maximalizování přenosu je vhodné cívky naladit na rezonanční frekvenci. Tato technologie je často využívána v nabíjení mobilních telefonů, nově i chytrých elektrických kartáčků. Elektronika díky tomu nepotřebuje žádný fyzický konektor a tím se může zásadně zvýšit IP přístroje, neboli odolnost vůči vodě a prachu. V poslední době začalo mnoho firem vyrábět své

vlastní bezdrátové nabíječky s různými elektrickými vlastnostmi, účinnostmi i přenosovými protokoly. Navzájem tato zařízení byla naprosto nekompatibilní. V rámci udržitelnosti a sjednocení byl sepsán standard Qi, ten definuje princip přenosu, požadavky na zařízení a komunikační protokoly. Vysílač a přijímač spolu komunikují skrze samotné přenosové magnetické pole. Přijímač mění svou vlastní impedanci v čase a tím mění amplitudu pole. Tyto změny snadno zachytí vysílací cívka a převede je na užitečnou informaci. Naopak vysílač mění frekvenci vysílaného signálu, tím se odchýlí od rezonanční frekvence, což dovede přijímač také bezpečně zachytit a změny převést na užitečnou informaci. Takto lze oboustranně komunikovat mezi přijímačem a vysílačem (Chlupatý, 2019).



Obr. 5.4 – Schéma induktivního přenosu, Qi standart, (Wu, 2015)

5.3 INFRAČERVENÝ

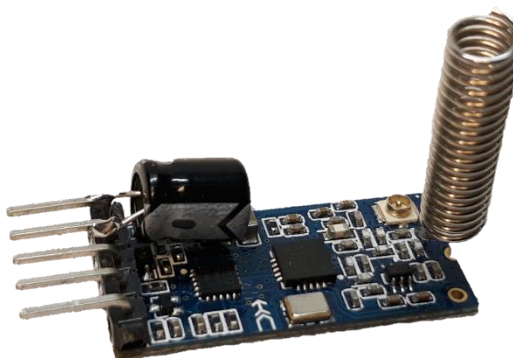
Infračervený port zažíval svůj největší rozkvět na přelomu tisíciletí. V té době ho měl téměř každý telefon, PDA, dokonce i některé notebooky. Zatímco z těchto zařízení tento port již dávno vymizel, má tento způsob komunikace stále své uplatnění. Používá se například jako optické oddělení dvou komunikačních linek, jako dálkové ovládání Hi-Fi věži nebo televizí. Infračervená dioda vysílá elektromagnetické záření s vlnovou délkou 875 nm. Toto záření není možné lidským okem spatřit. Pro komunikaci je třeba přímá viditelnost komunikujících zařízení. Do vzdálenosti jednoho metru dokáže komunikovat maximální přenosovou rychlostí až $16 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ (Zámečník, 2001). Pro naše potřeby je to vhodný kandidát. Tímto způsobem lze ale posílat pouze data. Pro napájení senzoru by to ani zdaleka nestačilo. Proto bych musel tuto technologii zkombinovat s nějakou z předchozích.



Obr. 5.5 – Infračervený Transciever (RS COMPONENTS, nedatováno)

5.4 RÁDIOVÝ

Dalším způsobem komunikace je rádiový přenos dat. Jako příklad jsem vybral malý rádiový modul HC-12 pracující v bezlicenčním přenosovém pásmu 433 MHz. Tento modul dokáže propojit dvě a více zařízení komunikující po sériové lince UART. Při použití všesměrové antény moduly bezchybně komunikují i v rotaci. Aby bylo možné zůstat v mezích zákona, je nutné dodržet maximální vysílací výkon 10 mW a zároveň nepřekročit klíčovací poměr 10 % za 1 hodinu (ČTU, 2019). To znamená, že je možno plně vysílat pouze 6 min z jedné hodiny. V mém případě je vysílán téměř nepřetržitý proud dat. Takže legálním řešením by bylo používat zařízení pouze po krátkou dobu, anebo zvýšit komunikační rychlost a tím pádem propustnost celého datového toku a šetřit čas mezi odesílanými daty. Tímto způsobem je možné zvýšit dobu aktivního vysílání až trojnásobně při zachování stejného počtu vzorků dat.

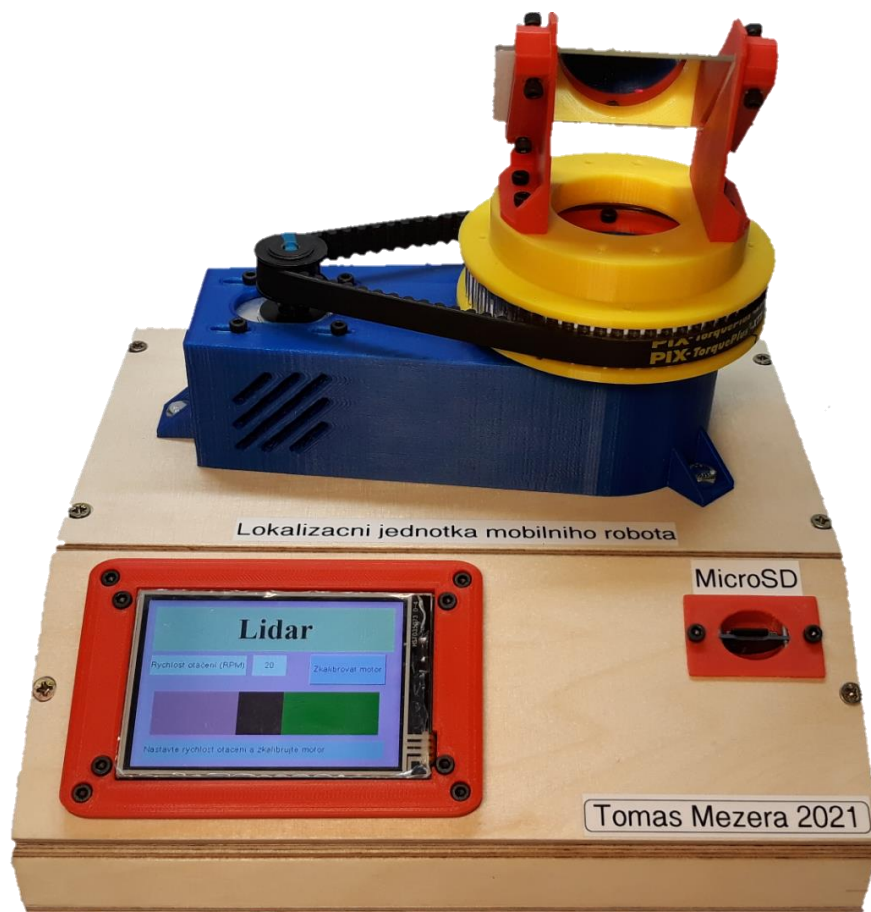


Obr. 5.6 – Rádiový modul 433 MHz, HC-12

6 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

6.1 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

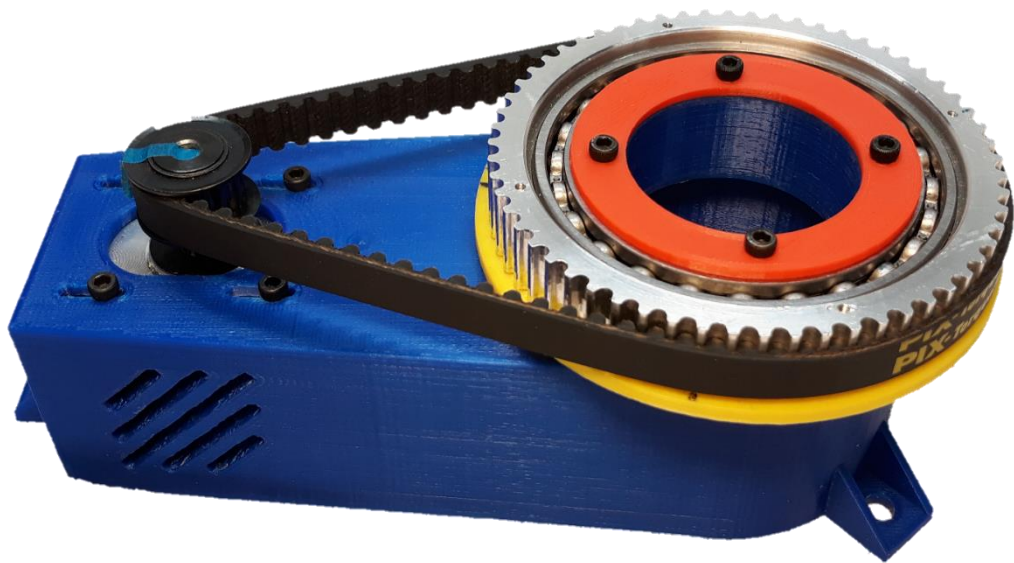
Konstrukce je mechanicky odolná, vysoce variabilní, skládá se z více jak 14 tištěných dílů. Převážná většina dílů je vyrobena technologií 3D tisku z biologicky odbouratelného materiálu PLA. Všechny 3D modely pro tiskárnu jsem připravoval v online CAD software ThinkerCAD od společnosti Autodesk. 3D modely jsou dostupné na přiloženém CD. Pro spojování jednotlivých dílů jsem využil šrouby M3 s imbusovou hlavou a vroubkované zatavovací matice do plastových dílů. Tato metoda se mi osvědčila, protože spojení je pevné a zároveň snadno rozebíratelné. Pomocí několika šroubů lze během pár minut zaměnit jeden druh senzoru za jiný, nebo třeba otestovat úplně jiný druh komunikace mezi otočnou platformou a stojící základnou.



Obr. 6.1 – Celá konstrukce modelu

6.2 POHON A PŘEVOD

Jako pohon jsem zvolil krokový motor 17HS4401, odpadla mi tak potřeba měřit úhel natočení dalším zařízením, jak je popsáno v kapitole 4.4. Samotný krokový motor má konstrukci daných 200 kroků na otáčku. Pro větší počet kroků na otáčku jsem navrhl převod mezi pohonnou jednotkou a otočnou platformou 1:5. Nyní již je na otočné platformě 1000 kroků na otáčku. Pro tišší a hladší rozjezd motoru jsem zvolil driver a4988 s mikro-krokováním nastaveným na osminu kroku. Nakonec jsem se dostal na 8000 kroků na otáčku. Znamená to, že jeden krok je $0,045^\circ$. Synchronní převod bez dopravního zpoždění mezi pohonem a platformou zajišťuje ozubený řemen M5 se 400 zuby. Malá řemenice s 12 zuby je pevně spojena s hřídelí krokového motoru. Velká řemenice s 60 zuby je pevně spojena s měřicí otočnou platformou. Do této řemenice jsem vložil kuličkové ložisko s rozměry $60 \times 78 \times 10$ a vnitřním otvorem nasadil na pevnou základnu. Řemen je možné napnout pomocí oválných děr pro uchycení motoru.



Obr. 6.2 – Mechanická konstrukce

6.3 VÝBĚR SENZORU

6.3.1 Ultrazvukový senzor HC-SR04

Práce s tímto senzorem je o něco komplikovanější, protože sám neobsahuje vyhodnocovací jednotku. Pro vyhodnocení dat z tohoto senzoru jsem využil samostatný procesor ATtiny88. Jednoduchý obslužný program měří vzdálenost podle algoritmu, který je popsán v kapitole 2.2 a převádí naměřenou hodnotu na modulovaný PWM signál. Napájení

mikroprocesoru a senzoru je přivedené ze základny pomocí kartáčkového převodu a zpět je pomocí jiné dráhy kartáčkového převodu vyslán modulovaný PWM signál. Tento signál je převodníkem PWM na napětí zpracován a přiveden na měřicí vstup A / D převodníku Arduina.

6.3.2 Laserový senzor IFM 01D100

Tento senzor je poněkud rozměrný, má hmotnost přibližně 303 g, navíc průměrný odebíraný proud se pohybuje kolem 100 mA, což by při napájecím napětí 20 V znamenalo, že napájecí vodiče musí dokázat přenést výkon alespoň 2 W a to je daleko nad možnosti kartáčkového převodu. Proto jsem se rozhodl neumístit senzor nahoru na otočnou měřicí plošinu, ale pod ní do těla spodní platformy, otočený měřicí stranou nahoru. Na otočnou plošinu jsem umístil zrcátko v přesném sklonu 45° od senzoru. Výsledná měřená vzdálenost, vyjádřená formou napětí, je součet délky od senzoru k zrcátku a délky od zrcátka k měřenému objektu. Pomocí korekční rovnice vložené do programu mikroprocesoru si snadno odečtu hodnotu napětí vzdálenosti od senzoru k zrcátku. K této hodnotě je třeba ještě přičíst napětí 100 mV, což je stálá odchylka objevená experimentálním měřením.

Analogový vstup Arduina dokáže měřit napětí jen od 0 V do 5 V s přesností na 4,8 mV, proto musím výstupní napětí ze senzoru nejdříve napět'ově přizpůsobit pro vstup do mikroprocesoru. První varianta by byla využít pouze polovinu, tedy max 5 V, a co by bylo nad, tak oříznout Zenerovou diodou. Ovšem potenciál senzoru bych využil jen z poloviny, tedy 0 až 5 m. Proto jsem se rozhodl, že využiji celý rozsah senzoru i za cenu snížení přesnosti, vložením prostého napět'ového děliče mezi výstup senzoru a vstup A / D převodníku. Tím jsem dosáhl plného potenciálu senzoru, ale za cenu snížení přesnosti z 4,88 mm na 9,7 mm. A / D převodník Arduina má 10bitovou rozlišovací schopnost.

Výpočet napět'ového děliče

Proud děličem zvolím $I = 5 \text{ mA}$, což je bez problémů v možnostech napět'ového analogového výstupu průmyslového senzoru. Oba rezistory musí mít stejnou hodnotu, protože napětí dělím na polovinu.

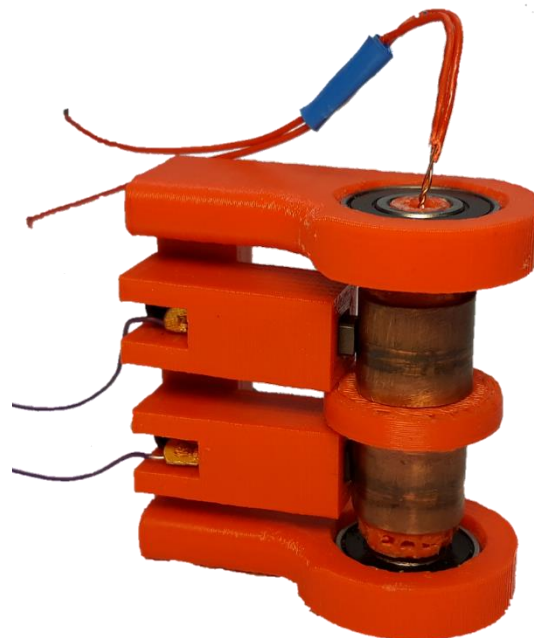
$$U_{R1} = U_{IN} - U_{OUT} = 10 - 5 = 5 \text{ V}, \quad (6.1)$$

$$U_{R2} = U_{OUT} - U_{GND} = 5 - 0 = 5 \text{ V}, \quad (6.2)$$

$$R_1, R_2 = \frac{I}{U} = \frac{0,005}{5} = 1 \text{ 000 } \Omega. \quad (6.3)$$

6.4 VÝBĚR ZPŮSOBU PŘENOSU DAT A ROZVODU NAPÁJENÍ

Pro jednoduchost a dostupnost jsem zvolil kartáčkový přenos pro přenos dat i napájení. Po marném pokusu vyrobit si vlastní kartáčkový převod jsem zvolil komerční hobby řešení od čínské společnosti Chinagoco. Tento kartáčkový převod má 6 vodičů na každé straně, což je 8 kartáčkových linek, to je více než postačující pro mé použití. K nepohyblivé základně (stacionární části) jsou připojeny jednotlivé sběrací kroužky. K pohyblivé straně (měřicí platformě) jsou naopak přivedeny kartáčky. Celé toto ústrojí je vloženo v rámečku do středu kuličkového ložiska a zafixováno proti nechtěnému vychýlení z osy. Při měření na osciloskopu jsem s údivem zjistil, že tento převod je velmi dobře mechanicky i elektricky zpracován a že



Obr. 6.3 – Testovací kartáčkový převod s uhlíky

nedochází k téměř žádným výpadkům signálu ani napěťovým špičkám. Kvůli zajištění kvalitnějšího přenosu přenáším každý kontakt po dvou vodičích. Napájení přivádím z nepohyblivé základny. Po jednom páru přenáším plusový kontakt 5 V, po druhém páru přenáším společnou zem a po třetím páru posílám naopak z měřicí platformy hodnotu z ultrazvukového senzoru HC-SR04, nebo z optického senzoru Sharp určující naměřenou vzdálenost zakódovanou do PWM signálu.

6.5 KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ

6.5.1 USB

Pro komunikaci mikroprocesoru s osobním počítačem skrze USB je potřeba FTDI převodník. Vývojová deska Arduino Mega 2560 PRO mini již tento převodník obsahuje. Jako sériovou UART sběrnici pro komunikaci s počítačem jsem zvolil první volnou a zároveň defaultní Serial0, tato sběrnice je zároveň využívána zavaděčem pro programování procesoru, to ale ničemu nevádí. Data odesílám v jednoduchém telegramu a to "úhel;vzdálenost" + konec řádku.

Vykreslovací program osobního počítače nedokázal v reálném čase zpracovávat a zobrazovat takové množství dat, jaké mu měřicí zařízení bylo schopno dodávat. Výsledkem byly trhané kusy obrazu a problémy se stabilitou programu v osobním počítači. Řešením je snížit množství dat zaslaných do počítače. Pauzu mezi odeslanými vzorky jsem experimentálně nastavil na 5 ms. Po této úpravě již s vykreslováním nebyly problémy.

6.5.2 SD

Všechny naměřené vzorky se budou ukládat na SD kartu. Nejvyšší naměřená vzorkovací frekvence závisí na zatížení procesoru a nezávisí na rychlosti otáčení je až 200 vzorků za sekundu. Průměrně bývá kolem 195 vzorků za sekundu. Pro ovládání modulu SD karty používám knihovnu "SD.h" a knihovnu "SPI.h" pro komunikaci s periférií SD karty. Data jsou ukládána v jednoduchém formátu "úhel;vzdálenost" + konec řádku.



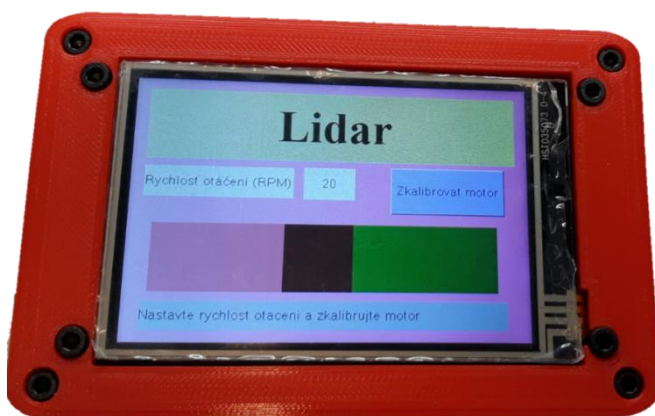
Obr. 6.4 – Čtečka mikroSD karty

6.6 HMI

Zkratka HMI (z anglického Human machine interface) rozhraní člověk stroj, jsem vyřešil pomocí interaktivního formuláře na 3,5" dotykové obrazovce. Ovládání je intuitivní a formulář uživatele provede celým procesem od nastavení požadované rychlosti otáčení, přes kalibraci displeje, výběr režimu zobrazení dat v počítači a načtení SD karty pro ukládání dat, až po samotné měření. Součástí dotykového displeje Nextion NX4832T035 je procesor STM32F030 od výrobce STMicroelectronics, který zajišťuje překreslování obrazovky, reaguje na povely od dotykové vrstvy a zároveň provádí sériovou komunikaci s nadřazeným mikroprocesorem Arduino MEGA (ATmega2560). Jako sériovou UART sběrnici pro komunikaci s Arduinem jsem zvolil druhou volnou Serial1.

Dotyková vrstva je realizována starší odporovou technologií. Má jasné nevýhody oproti kapacitní variantě, musí dojít ke kontaktu dvou vodivých fólií, je nutná častější výměna. Naopak mezi výhody patří dostupná cena, snadné vyhodnocení pozice dotyku a možnost ovládat obrazovku i v rukavicích.

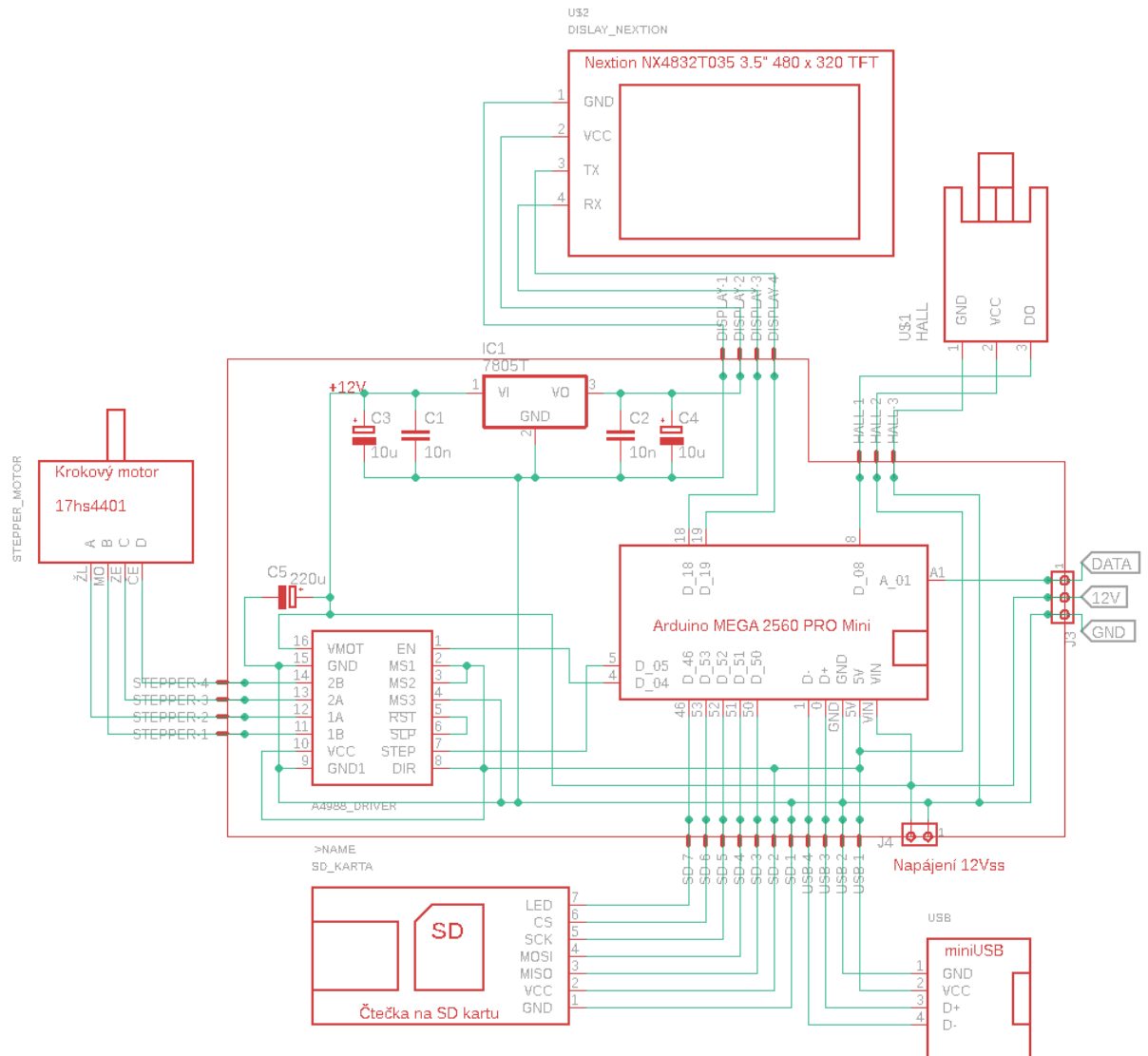
Programování displeje se provádí pomocí vlastního IDE (zkratka z anglického Integrated Development Environment) vývojového prostředí, ve kterém lze snadno naprogramovat žádanou aplikaci. Všechny prvky na obrazovce jsou objekty, těm je možno měnit jejich vlastnosti a pomocí krátkých příkazů v událostech objektů (např.: stisku tlačítka) měnit vzhled stránky, vlastnosti jiných objektů i komunikovat s nadřazeným procesorem po komunikační sběrnici UART. Nadřazený procesor zprávu přijme a podle jeho vlastního programu se patřičně zachová. V některých případech sám nadřazený procesor pošle zprávu do displeje a ten podle obsahu zprávy změní stránku, nebo vlastnost některého z objektů.



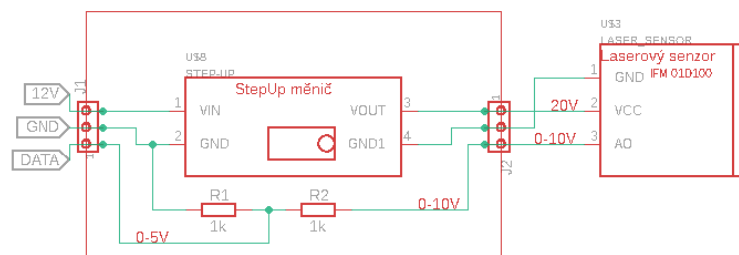
Obr. 6.5 – Displej Nextion s HMI aplikací

6.7 SCHÉMA ZAPOJENÍ

Pro návrh schématu jsem použil program EAGLE, celé zapojení se převážně skládá z již hotových samostatných modulů, proto schéma obsahuje minimum diskrétních součástek.

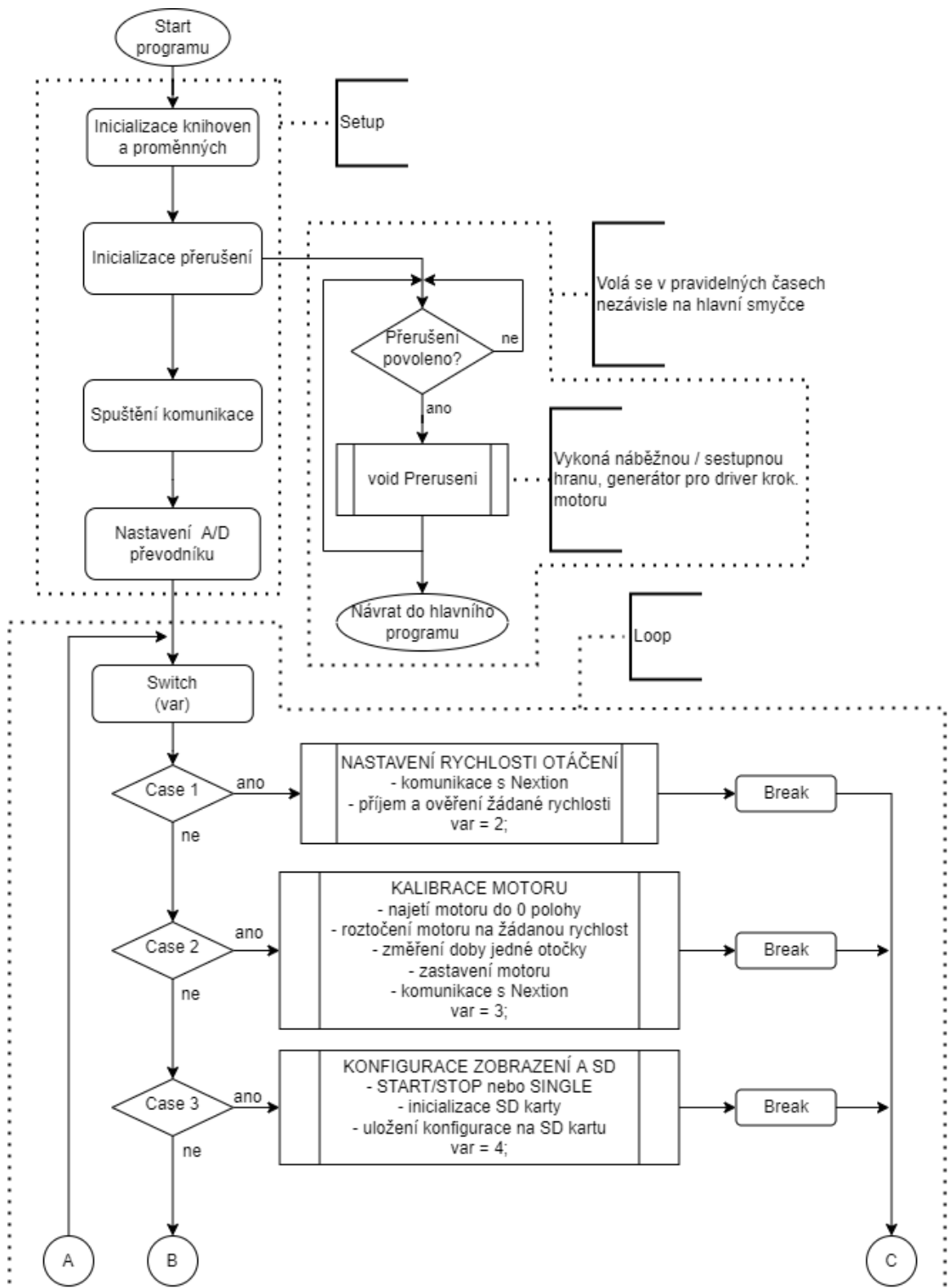


Obr. 6.7 – Schéma zapojení hlavní desky

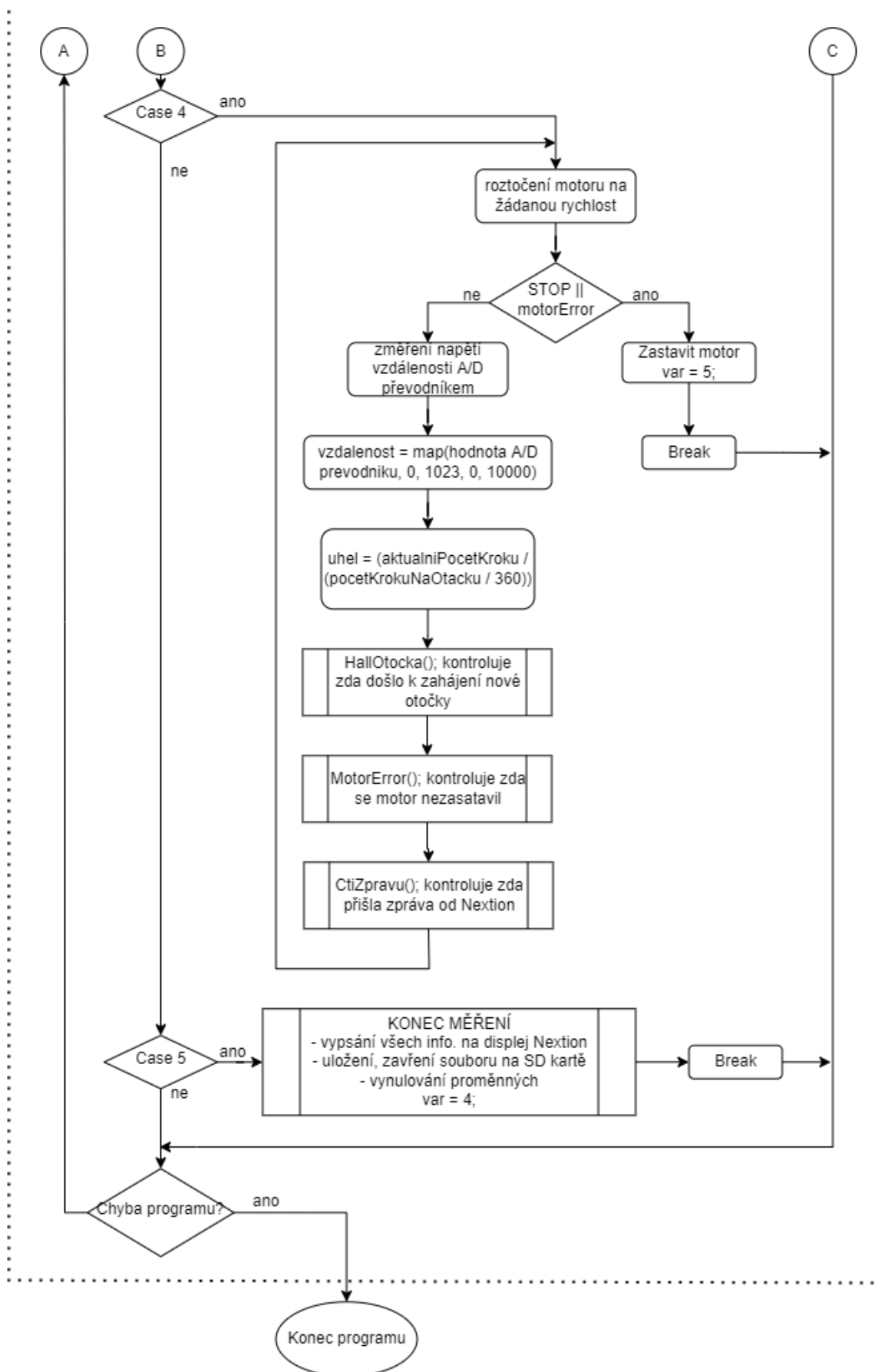


Obr. 6.6 – Schéma zapojení desky laserového senzoru

6.8 VÝVOJOVÝ DIAGRAM SW MIKROPROCESORU

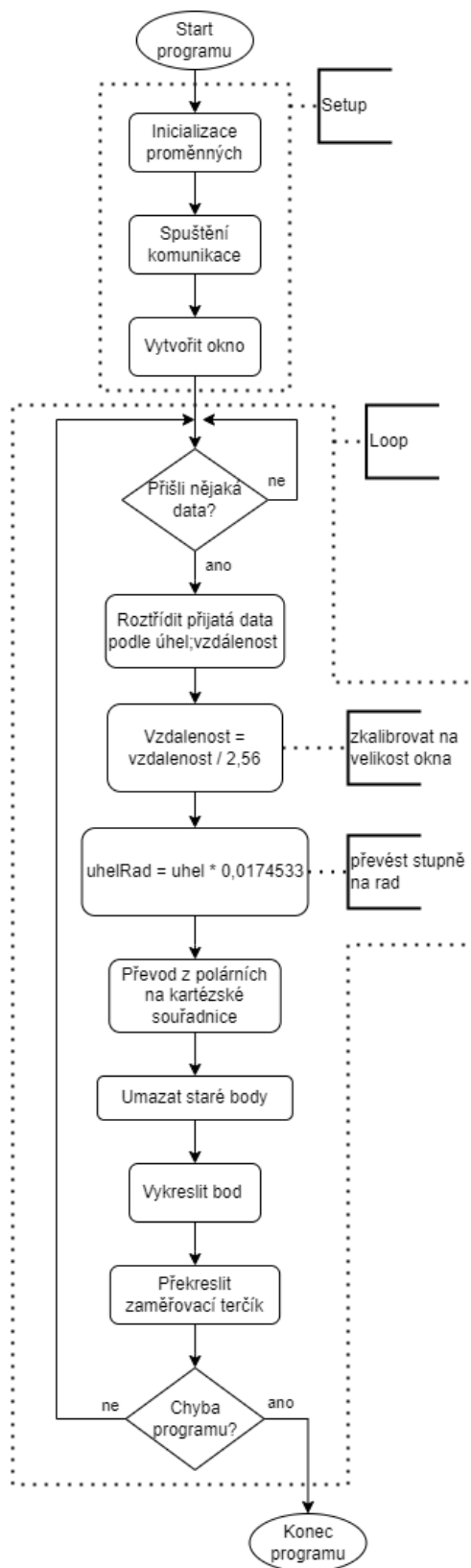


Obr. 6.8 – Vývojový diagram sw mikroprocesoru, 1. část



Obr. 6.9 – Vývojový diagram sw mikroprocesoru, 2. část

6.9 VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU PROCESSING



Obr. 6.10 – Vývojový diagram programu Processing

6.10 PROGRAM

6.10.1 Přepočít rychlosti otáčení na pauzu mezi přerušeními

Rychlost otáčení je vhodné zadávat v jednotkách člověku blízkých, například v otáčkách za minutu RPM, ale mikroprocesor, potažmo knihovna <TimerThree.h>, která v přerušení generuje pulzy pro driver krokového motoru, potřebuje odlišnou veličinu, kterou je pauza mezi přerušeními.

Experimentálním řešením se dá dojít k poměrně přesným výsledkům. Roztočím motor na konstantní pauzu mezi přerušeními 300 μ s. Pomocí detekce magnetu Hallovým senzorem a čítače mikroprocesoru změřím, jak dlouho trvala jedna otáčka. Naměřil jsem asi 4,8 s. To bude $\frac{60}{4,8} = 12,5$ otáček / minutu neboli RPM. Nyní zkusím k tomuto výsledku dojít analytickou metodou.

Při vytváření rovnice vycházím z daných hodnot. 1 otáčka motoru má 200 kroků, převod pomocí ozubeného řemene na velkou řemenici s měřicí platformou je 1:5, to znamená $200 \cdot 5 = 1\,000$. Driver motoru má nastaveno mikro-krokování na osminu, což je $1\,000 \cdot 8 = 8\,000$. Výsledek je 8000 kroků / otáčka. Počet přerušení je dvojnásobný, protože na každý krok je 2krát změna stavu, náběžná hrana a sestupná hrana. To znamená 16000 přerušení / otáčka. Pro získání doby jedné otáčky vynásobím výsledek pauzou mezi přerušeními. $300 \cdot 16\,000 = 4\,800\,000 \mu\text{s} = 4,8 \text{ s}$. Jedna otáčka trvá 4,8 s. Výpočtem zjistím, kolik motor udělá otáček za minutu $\frac{60}{4,8} = 12,5$ RPM. V odstavci s experimentálním řešením jsem snadnou matematikou a přímou úměrností dosáhl stejného výsledku. Nyní už stačí tento postup obrátit, zapsat do vzorce a mám univerzální řešení pro převod mezi počtem otáček za minutu a pauzou mezi přerušeními.

Výpočet pauzy mezi přerušeními

$$t = 1000 \cdot \frac{60000}{x \cdot 2 \cdot 8000}, \quad (6.4)$$

Zjednodušeně:

$$t = \frac{60000}{x \cdot 16}, \quad (6.5)$$

kde t – pauza mezi přerušeními, μ s,
 x – vzdálenost, RPM otáčky, $\cdot \text{min}^{-1}$.

Pro zajímavost si ještě vypočítám, s jakou frekvencí se volá přerušení. Například při rychlosti 30 RPM je to $30 \cdot 60 = 1,8$ kHz.

Komunikační rychlost sběrnic

Standardní komunikační rychlost 9 600 baudů je sice prověřená a dostatečně spolehlivá, ale v případě potřeby častého volání přerušení, tato pomalá komunikační rychlost nestačí ani pro vysílání, ani pro příjem. Často se mi stávalo, že při komunikaci sebou motor cukal, nebo naopak docházelo k odesílání a přijímání pouze kusů zpráv a algoritmus si s tímto nevěděl rady. Proto jsem se rozhodl zvýšit komunikační rychlost na 115 200 baudů, jak u komunikace s počítačem, tak u komunikace s displejem Nextion. Naštěstí změnu komunikační rychlosti všechna zařízení podporovala. Od té doby bylo po problému. Odesílání a příjem celé zprávy se vešel mezi dvě přerušení. Motor přestal cukat a zprávy přicházely pohromadě.

6.11 VIZUALIZACE A ANALÝZA DAT

Data je možné vykreslovat živě v předem připravené aplikaci ve vývojovém prostředí Processing a zároveň se všechna data ukládají na SD kartu pro pozdější analýzu. Měřicí přístroj dokáže pracovat s jedním, druhým, nebo s oběma způsoby ukládání dat současně.

Data z měřicího přístroje přichází v surovém stavu ve formě polárních souřadnic a to přesně v dobu, kdy byla naměřena v podobě úhel; vzdálenost. Pro jejich vykreslení je zapotřebí znát x a y souřadnice. Ty vypočítám pomocí vzorců pro transformaci polárních souřadnic do kartézských.

6.11.1 Transformace polárních souřadnic do kartézských

V matematice se tato transformace využívá k mnoha účelům. Pro její aplikaci je třeba znát základy trigonometrie a Pythagorovu větu. Počátky obou souřadnic musí začínat ve stejném bodě a polární osa je totožná s kladnou polopřímkou osy x .

Zjednodušený výpočet souřadnic

$$x = \sin(\varphi) \cdot r \tag{6.6}$$

$$y = \cos(\varphi) \cdot r \tag{6.7}$$

kde φ – úhel, rad,
 r – vzdálenost, m,

x, y – souřadnice bodu v kartézské soustavě.
(Rak, 2019)

Před samotným převodem je nutné převést úhel z přijaté zprávy ze stupňů na radiány. To je možno spočítat jednoduchým vzorcem.

Příklad převodu:

$$15^\circ = 15 \cdot \frac{\pi}{180}, rad.$$

Pro lepší zpracovatelnost v kódu, je vhodné udělat z $\frac{\pi}{180}$ číselnou konstantu

$$\frac{\pi}{180} = 0,017\ 453\ 3.$$

Poté už snadněji

$$15^\circ = 15 \cdot 0,0174\ 533,$$

$$\varphi = 0,261\ 799\ 5,$$

(MATWEB, nedatováno).

Tato transformace se provádí před každým vykreslením bodu, jak v programu Processing, tak pro vyhodnocování dat z SD karty v programu Excel.

6.12 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Důležitou částí této práce je i výběr správného senzoru pro měření vzdálenosti. Pro toto měření jsem zvolil senzory ze tří hlavních kategorií a to laserové, optické infračervené a ultrazvukové. Teorii k nim jsem psal v kapitole 2. Druhy senzorů pro měření vzdálenosti. Zde otestuji jejich reálné vlastnosti.

6.12.1 Měřicí stanoviště

Pro nasimulování co nejvíce situací, při kterých by měl senzor obstát, jsem zvolil následující detekované materiály: Polystyren, sklo, plovoucí podlahu, koberec, zdroj tepla, polypropylenovou desku, rohožku, bublinkovou fólii a dřevěné prkno, rozmístěné stejně jako na obr. 6.11.

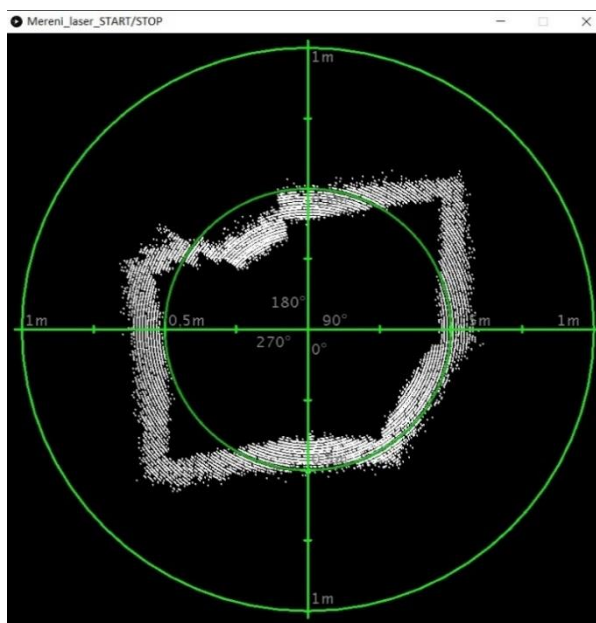
Velikost měřicího stanoviště jsem zvolil s ohledem na měřitelný dosah všech typů senzorů a to asi 1,2 m na šířku a 1 m na délku. Měřicí platforma je umístěna přibližně do středu měřicího stanoviště. Rychlost otáčení jsem nastavil na 7 RPM. Měření probíhalo kontinuálně v režimu Start/Stop, po dobu asi 20 kol.



Obr. 6.11 – Měřicí stanoviště

6.12.2 Laserový senzor

Jako zástupce laserového měření jsem použil senzor IFM 01D100. Tento senzor je jeden z nejkvalitnějších a nejdražších, které jsem v této práci použil. Přesto není úplně vhodný pro tuto aplikaci. Má vzorkovací frekvenci maximálně asi 50 Hz, což není zas až tak moc. Vzorkovací frekvence senzorů u hobby lidarů se pohybuje běžně kolem 1 kHz.

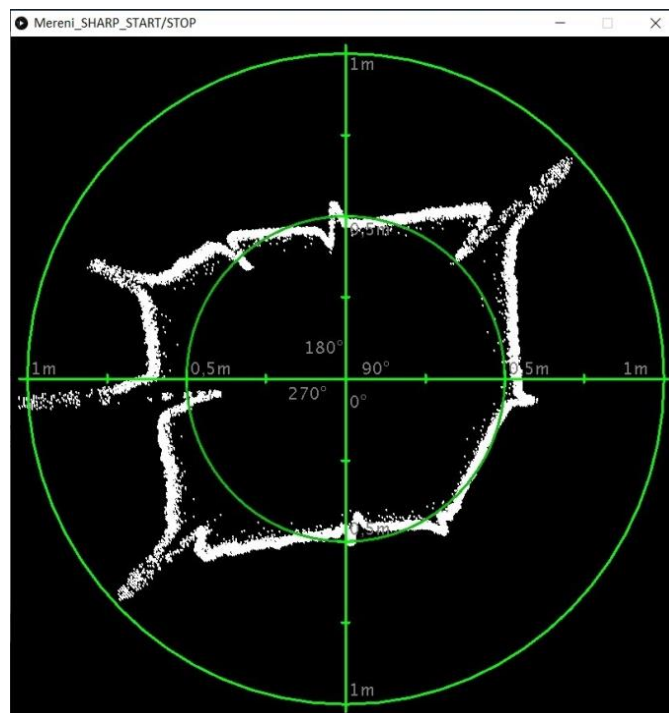


Obr. 6.12 - Laserový senzor IFM, vizualizace z Processing

Tento průmyslový senzor je určen spíše pro statické měření vzdálenosti, detekce přítomnosti, nebo výšky nějakého předmětu. Se senzorem lze měřit vzdálenosti až 10 m. Pro toto měřicí stanoviště je to zbytečně mnoho, navíc se na výstupu objevil šum, proto je vidět, že stěny jsou silné. Na tento jev by nejspíš pomohlo nějaké průměrování, zjištění rozptylu, případně jiné statistické metody, které už jsou nad rámec této bakalářské práce. Při tomto měření nebylo detekováno sklo, paprsek skrz něj zaznamenal roh stanoviště. Toto by mohl být velký problém při využití v samořiditelných vozidlech v případě detekce skleněných vitrín obchodů. Na náhlou změnu teploty prostředí je senzor nezávislý.

6.12.3 Optický senzor

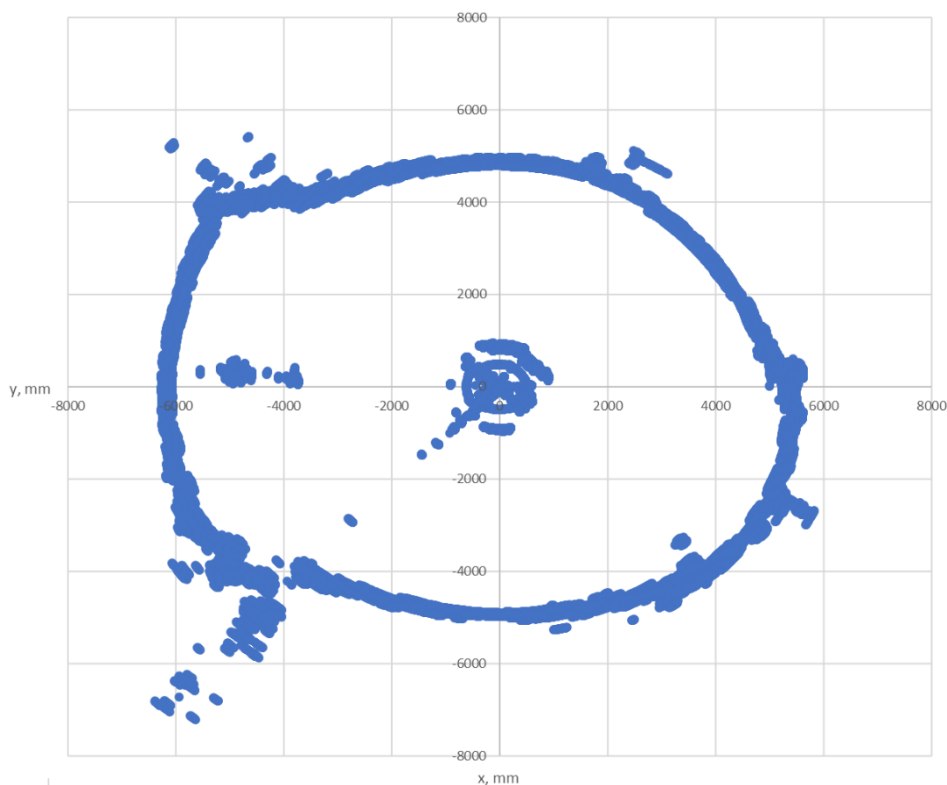
Druhým senzorem je SHARP 2Y0A02. Tento senzor je levný, velmi rozšířený, ale pro tuto aplikaci poněkud nevhodný. Pozorováním jsem dospěl k tomu, že má poměrně široký rozptyl detekce asi 15° , na rozdíl od laserového senzoru, který detekuje stále jeden bod. Na vizualizaci je vidět, že při přechodu mezi materiály a při ostré změně úhlu dochází k jasně viditelnému zákmitu. Toto si myslím, že je způsobeno právě širokým rozptylem měření senzoru. Na výraznou změnu teploty okolí nereaguje, stejně jako laserový senzor a sklo také nedetekuje. Senzor detekuje až roh stanoviště za ním. Oproti laserovému má tento senzor menší šum.



Obr. 6.13 – Optický IR senzor SHARP, vizualizace z Processing

6.12.4 Ultrazvukový senzor

Posledním ze zvolených je poměrně známý ultrazvukový senzor HC-SR04. Při tomto měření došlo k problémům s převodníkem PWM / napětí. Modul převodníku měl nejnižší možnou frekvenci PWM 1 kHz, ovšem ATtiny85 dokázalo generovat PWM s maximální rychlostí 50 Hz. Proto jsem zaimprovizoval a jako převodník jsem použil Arduino, které měřilo délku pulzu PWM signálu. Hodnotu PWM signálu jsem na konec po sériové lince poslal do hlavního mikroprocesoru. Tato cesta byla ovšem moc pomalá a zařízení nedostávalo dostatečně často nový údaj o vzdálenosti. Proto toto měření nelze považovat za platné.



Obr. 6.14 – Ultrazvukový senzor HC-SR04, vizualizace z Excel

6.12.5 Zhodnocení měření

Laserový senzor je vhodný pro měření větších vzdáleností. IR optický senzor není vhodný pro pohyblivé měření z důvodu širokého rozsahu snímání, je vhodnější spíše do čidla přítomnosti ve stacionárních úlohách. Ultrazvukový senzor nemohu hodnotit z důvodu špatně navrženého převodníku a zpracování signálu.

7 ZÁVĚR

Měření vzdálenosti a polohy objektů jsou v dnešní době v robotice velmi aktuální témata. Tyto senzorové technologie umožňují robotům vidět a reagovat na okolní prostředí. V kombinaci s kamerami a správně navrženým řídicím SW se stávají nedílnou součástí každého moderního průmyslového i hobby robota.

Vypracování této bakalářské práce mělo za úkol porovnat dostupné druhy senzorů, ověřit schopnost napodobit profesionální stroje v domácích podmínkách. To si myslím, že se díky 3D tisku a cenově dostupným modulům z velké části podařilo a bakalářská práce tak splnila veškeré podmínky ze zadání.

Po HW stránce by bylo možné rozšířit soustavu o další osu, a skenovat tak okolí ve 3D. Případně celý model přimontovat k podvozku a zvýšit tak využitelnost zařízení. Po SW stránce je toho mnohem více. Například data zpracovávat, filtrovat a průměrovat s využitím statistických metod, nebo implementovat algoritmus na detekci významných rohů a hran a podle toho zjišťovat, jak je model aktuálně natočen v místnosti. To už by bylo spíše tématem nějaké z dalších závěrečných prací.

POUŽITÁ LITERATURA

- AIMINGBHUTANTOURS. "slip ring technology". [online]. [cit. 21-12-11]. Dostupné z: www.aimingbhutantours.com/slip-ring-technology.
- ČTU. 2019. "všeobecné oprávnění č. VO-R/10/12.2019-9 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu". [online]. [cit. 21-12-02]. Dostupné z: www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/12.2019-9/obrazky/vo-r10-122019-9.pdf
- DORSCH, HÄUSLER, HERRMANN. 1994a. "Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement". [online]. [cit. 21-11-24]. Dostupné z: www.rp-photonics.com/position_sensitive_detectors.html.
- DORSCH, HÄUSLER, HERRMANN.; 1994b. "Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement,". [online]. [cit. 21-11-24]. Dostupné z: www.rp-photonics.com/triangulation.html.
- FREZEL, L. 2018. "Ultrasonic Sensors". [online]. [cit. 21-11-17]. Dostupné z: www.electronicdesign.com/industrial-automation/article/21806202/ultrasonic-sensors-a-smart-choice-for-shorterrange-applications.
- HTECK. "Finding stepper motors wiring". [online]. [cit. 21-12-11]. Dostupné z: www.hteck.ca/motor/s-motor_wire/stepper-motor.html.
- CHLUPATÝ, V. 2019. Bakalářská práce "Induktivní bezdrátový přenos energie". [online] ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromagnetického pole.[cit. 21-12-01]. Dostupné z: dspace.cvut.cz/handle/10467/82503.
- CHMELÍM, K, VESELKA F.; 2007 "Kluzný kontakt v elektrických strojích"; KEY Publishing s.r.o., ISBN 978-80-87071-59-5.
- IFM. 2011. Datasheet "OID100" [online]. [cit. 21-11-25]. Dostupné z: www.ifm.com/cz/cs/product/OID100.
- KATZ, L. 2020. "Blind as a Bat?". [online]. [cit. 21-11-17]. Dostupné z: academic.oup.com/gbe/article/12/1/3738/5716421.
- KUSALA, J. 2008a. "Rozdělení radarů". [online]. [cit. 21-12-12]. Dostupné z: www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k31.htm#z.
- KUSALA, J. 2008b. "RADARY Princip radaru". [online]. [cit. 21-12-02]. Dostupné z: www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k23.htm.
- KUSALA, J. 2008c. "APLIKACE RADARŮ Hlavní oblasti aplikací". [online]. [cit. 21-12-02]. Dostupné z: www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k32.htm.
- MATWEB. "Oblouková míra úhlu". [online]. [cit. 21-12-03]. Dostupné z: www.matweb.cz/radian/.
- MAKERGUIDES. "SHARP GP2Y0A21YK0F". [online]. [cit. 21-12-06]. Dostupné z: www.makerguides.com/sharp-gp2y0a21yk0f-ir-distance-sensor-arduino-tutorial/.
- NEWBEDEV. "Weird servo mechanism". [online]. [cit. 21-12-11]. Dostupné z: newbedev.com/weird-servo-mechanism.
- PUNTER, R. 2011 "Velká encyklopedie vědy". KEY Fragment, ISBN 978-80-7200-809-4
- RAK, J. 2019. "Zobrazování v souřadných systémech". Přednášky Fakulta elektrotechniky a informatiky. Univerzita Pardubice: Osobní sdělení.

- RS COMPONENTS. "TFDU4101-TT3 Vishay, Infrared Transceiver". [online]. [cit. 21-12-11]. Dostupné z: hken.rs-online.com/web/p/ir-transceivers/0404695.
- ROBODOUPĚ. 2016. "Mikrokrokování: sny a skutečnost". [online]. [cit. 21-12-11]. Dostupné z: robodoupe.cz/2016/mikrokrokovani-sny-a-skutecnost/.
- SHARP. 2006 Datasheet "GP2Y0A02YK0F". [online]. cit.21-11-24. Dostupné z www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk_e.pdf.
- SCHERZ, MONK. 2016. *Practical Electronics for Invertors Fourth Edition*, McGraw-Hill Professional. ISBN 978-1-25-958754-2.
- SOBOTKA P. 2015 "Jak poznám, kde jsem na moři". [online]. [cit. 21-11-17]. Dostupné z: dvojka.rozhlas.cz/jak-poznam-kde-jsem-na-mori-s-uhlomerem-hodinkami-a-tabulkami-7532450.
- SCHWEBER B. 2019a. "LIDAR and Time of Flight, Part 1: Introduction".; [online]. [cit. 21-12-03]. Dostupné z: www.microcontrollertips.com/lidar-and-time-of-flight-part-1-introduction-faq/.
- SCHWEBER B. 2019b. "LIDAR and Time of Flight, Part 2: Operation".; [online]. [cit. 21-12-03]. Dostupné z: www.microcontrollertips.com/lidar-and-time-of-flight-part-2-operation/.
- SCHWEBER B. 2019c. "LIDAR and Time of Flight, Part 3: Emitters, sensors, and scanners".; [online]. [cit. 21-12-03]. Dostupné z: www.microcontrollertips.com/lidar-and-time-of-flight-part-3-emitters-sensors-and-scanners/.
- TME. 2020 "KROKOVÝ MOTOR – druhy a příklady aplikací krokových motorů". [online]. [cit. 21-12-11]. Dostupné z: www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/41861/krokovy-motor-druhy-a-priklady-aplikaci-krokovych-motoru/.
- VIDIM, J. 2014 "PWM signál a práce s ním". [online]. [cit. 21-11-26]. Dostupné z: vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/11990-pwm-signal-a-prace-s-nim.
- Wu, J. Zhao, C. 2015. "Wireless Power and Data Transfer via a Common Inductive Link Using Frequency Division Multiplexing" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 12, pp. 7810-7820. [online]. [cit. 21-11-26]. Dostupné z: core.ac.uk/download/pdf/78897614.pdf.
- WIKISKRIPTA. 2021 "Vlastnosti zvuku". [online]. [cit. 21-12-12]. Dostupné z: www.wikiskripta.eu/index.php?title=Vlastnosti_zvuku&oldid=451036.
- ZÁMEČNÍK, M. 2001 "Infračervený port: vše, co jste kdy chtěli vědět" [online]. [cit. 21-12-01]. Dostupné z: mobilmania.zive.cz/clanky/infracerveny-port-vse-co-jste-kdy-chteli-vedet/sc-3-a-1002692.

PŘÍLOHY

A – CD

B – Uživatelská příručka programu

C – Výrobní dokumentace

Příloha k bakalářské práci

Lokalizační jednotka mobilního robota

Tomáš Mezera

CD

OBSAH

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF.
- 2 Firmware zařízení
- 3 Vizualizační program ve vývojovém SW Processing
- 4 Sešit se měřeními v tabulkovém procesoru Excel
- 5 3D modely tisknutelných dílů
- 6 Schémata zapojení

Příloha k bakalářské práci

Lokalizační jednotka mobilního robota

Tomáš Mezera

**UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA PROGRAMU
OVLÁDACÍ APLIKACE DOTYKOVÉHO DISPLEJE**

OBSAH

Seznam ilustrací	B – 2
Úvod	B – 3
1 Požadavky na hw	B – 4
2 Požadavky na sw	B – 4
3 Oživení měřící jednotky	B – 4
4 Vyhodnocení dat	B – 8
5 Ochrana zdraví a zařízení	B – 8
Závěr	B – 9

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 3.1 – Nalezení přiděleného COM portu	B – 4
Obr. 3.2 – Processing, zde je nutné přepsat přidělené číslo COM portu	B – 5
Obr. 3.3 – Nextion, nastavení rychlosti	B – 5
Obr. 3.4 – Nextion, kalibrace motoru	B – 6
Obr. 3.5 – Nextion, výběr režimu	B – 6
Obr. 3.6 – Nextion, měření	B – 7
Obr. 3.7 – Nextion, konec měření	B – 7
Obr. 5.1 – Nextion, motor error	B – 9

ÚVOD

V dnešní době je u zařízení kladen důraz hlavně na přenositelnost. Naopak od čeho se trochu upouští, je místní ovládání. Často už ani zařízení neobsahují display, vše se nastavuje buď pomocí aplikace v mobilním telefonu, anebo někde v cloudu. Já jsem při svém návrhu vsadil na použití v polních podmínkách, to znamená na robustní konstrukci, na snadnou přenositelnost a zároveň offline místní ovládání pomocí dotykového displeje. Data se ukládají na SD kartu, takže měření je naprosto nezávislé na připojení k síti, nebo na dalším HW. Napájení je řešeno pomocí 12V akumulátoru. Pro jednoduché ovládání jsem navrhl interaktivní formulář, který nás snadno provede celým nastavením a přehledně nám zobrazí všechny potřebné informace.

Pro plné využití lidarové techniky je třeba data dále vyhodnocovat. Ty jsou buď online vykreslené v programu Processing při připojeném zařízení k počítači, nebo se mohou zpracovávat jako běžná data v programu Excel. Všechna tato řešení podrobně přiblížím v této dokumentaci.

1 POŽADAVKY NA HW

Pro vlastní měření postačí měřicí jednotka, mikro SD karta zformátovaná na souborový systém FAT a 12 V akumulátor, nebo jiný zdroj 12 V, 2 A.

Jednotka se skládá z laserového senzoru vzdálenosti IFM 01D100, jeho dosah je 10 m s rozlišením na 0,9 mm, krokového motoru, řemenového převodu, řídicí elektroniky a 3,5" dotykové obrazovky. Celé toto zařízení je zabudované v pevné lakované překližkové krabici.

Pro vyhodnocení dat bude třeba osobní počítač s patřičným nainstalovaným sw a USB kabel s lehce zastaralým, ale robustním konektorem miniUSB.

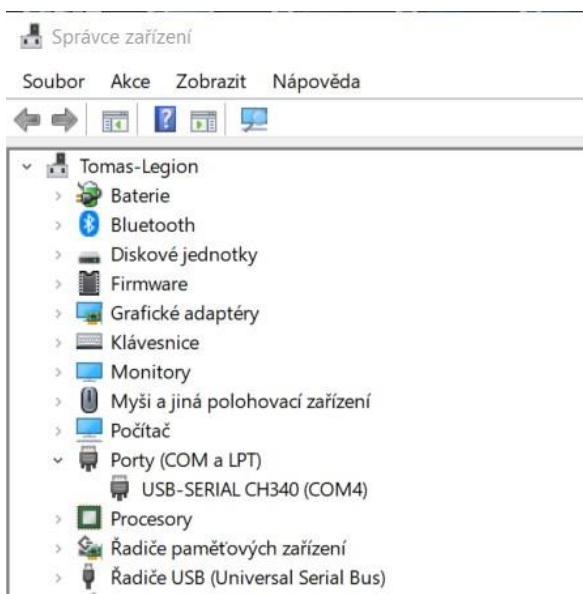
2 POŽADAVKY NA SW

Pro online vykreslení dat bude třeba vývojový SW Processing. Ten je možno stáhnout a nainstalovat zdarma z webových stránek processing.org. Pro offline vyhodnocení bude stačit program Excel, který je běžnou součástí balíčku MS office.

3 OŽIVENÍ MĚŘICÍ JEDNOTKY

Pokud se zařízení bude využívat pouze v offline režimu, je možné přeskočit následující odstavec.

Když bude zařízení pracovat v online režimu, je třeba nejprve spustit v počítači program Processing, otevřít v něm projekt s názvem "LidarVizualizaceProcessing_1m" pro měření do



Obr. 3.1 – Nalezení přiděleného COM portu

1 metru, případně "LidarVizualizaceProcessing_10m" pro měření do 10 metrů, který je uložen na přiloženém CD. Nyní stačí propojit měřicí jednotku s PC pomocí USB kabelu, připojit napájecí napětí 12 V a přepnout spínač do polohy zapnuto. V tuto chvíli se propojí jednotka s PC. Počítač přidělí jednotce jeden z volných COM portů. Přidělené číslo portu se objeví ve Správci zařízení počítače pod záložkou Porty (COM a LPT). Na obr. 3.1 je vidět, že v mém případě se zařízení zobrazuje na portu COM4.

V kódu programu Processing je nutné přepsat parametr čísla portu na počítačem přidělený port a kliknout na RUN.

```
12 void setup() {  
13  
14   myPort = new Serial(this, "COM4", 115200);  
15
```

Obr. 3.2 – Processing, zde je nutné přepsat přidělené číslo COM portu



Obr. 3.3 – Nextion, nastavení rychlosti

Vše je připraveno a může se přejít k nastavení samotné jednotky. Na dotykové obrazovce, na první stránce (obr 3.3), se pomocí posuvníku nastaví rychlost otáčení a klikne se na tlačítko "Zkalibrovat motor".

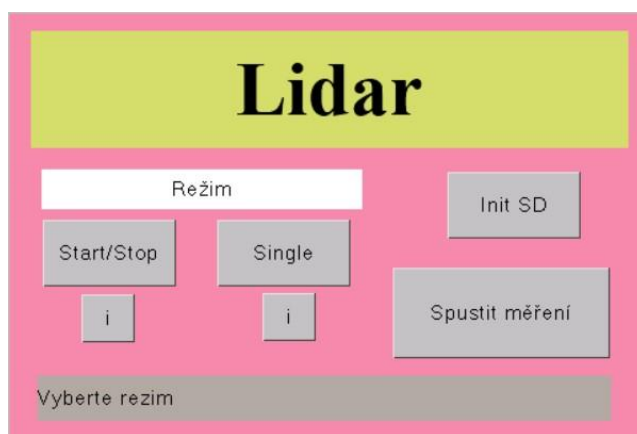
Nyní se motor roztočí a začne provádět svou kalibrační sekvenci, při které si naměří dobu jedné otáčky a další parametry. (obr 3.4)



Obr. 3.4 – Nextion, kalibrace motoru

Po ukončení kalibrace se displej sám přepne na další stránku. (obr 3.5) Zde formulář nabídne výběr ze dvou režimů. Buď "Start/Stop", nebo "Single". Režim "Start/Stop" je vhodný pro vykreslování stabilního okolí, všechny body v grafu zůstávají a přes ně se překreslují a doplňují body nové. Režim "Single" je vhodný pro proměnné okolí. Obraz se každou otáčkou smaže a body z nové otáčky se vykreslují zas do čistého grafu. Informace o vybraném režimu se odesílá, jak do programu Processing, tak se uchovává na SD kartě. Po výběru režimu se zviditelní tlačítko "Spustit měření". Před tím je však ještě vhodné vložit mikro SD kartu do čtečky na předním panelu a stisknout tlačítko "Init SD". Tímto se jednotka zkusí spojit s SD kartou, vyčte názvy souborů z předchozích měření, najde ten poslední a za ním přichystá nový soubor, do kterého se budou ukládat data z tohoto měření. Formát názvu souboru je "DataLog1.txt", místo 1 bude vloženo první neobsazené číslo. Výsledek se zobrazí v textovém okně dolní části obrazovky.

Těsně nad čtečkou SD karty se nachází malá LED. Ta upozorňuje na práci s SD kartou, v tuto chvíli není vhodné SD kartu vyjímat, protože by mohlo dojít ke ztrátě dat!! Nyní je vše připraveno a je možno spustit měření.



Obr. 3.5 – Nextion, výběr režimu

Motor se roztočí a po chvíli je v programu Processing vidět první naměřená data.

Na displeji (obr 3.6) se zobrazuje aktuální rychlost otáčení v otáčkách za minutu, počet naměřených kol (otáček) a vybraný režim. Pro ukončení měření se stiskne tlačítko "Zastavit měření".



Obr. 3.6 – Nextion, měření

V tuto chvíli dojde k dokončení měření jednoho kola, následně zastavení motoru a zobrazení poslední strany formuláře (obr 3.7). Data se automaticky uloží na SD kartu, zavře se soubor a zhasne varovná LED nad čtečkou SD karty. Nyní je možno bezpečně vyjmout SD kartu. Z této poslední strany buď lze připravit nové měření, nebo ukončit práci a odpojit od napájení.



Obr. 3.7 – Nextion, konec měření

4 VYHODNOCENÍ DAT

Program Processing nedokáže ukládat zobrazovaná data v jakémkoli formátu. Jediná možnost uchování je screenshot obrazovky. Pro lepší analýzu naměřených dat je vhodné použít tabulkový procesor Excel. Na přiloženém CD je uložen sešit s názvem ZpracovaniDat.xlsx. V něm je příklad, jak reprezentovat a vizualizovat uložená data z SD karty. Data na SD kartě jsou ve formátu „úhel;vzdálenost“, což přesně odpovídá informaci v polárních souřadnicích. V odstavci "Transformace polárních souřadnic do kartézských" je podrobně popsáno, jak tuto operaci provést.

Kdyby se obraz místnosti nevykresloval přímo kolmo v grafu, ale trochu šikmo, je možné tato data dodatečně opravit přičtením, nebo odečtením nějakého malého čísla u sloupce se stupni, ještě před transformací. Tím se celý obraz pootočí buď po směru hodinových ručiček, nebo proti. Pro zkalibrování této hodnoty ještě před měřením slouží magnet ze spodní strany rotační hlavy. Jeho posunutím je možno jemně dokalibrovat základní pozici tak, aby nulový stupeň měření byl vždy na kolmo v generovaném grafu.

5 OCHRANA ZDRAVÍ A ZAŘÍZENÍ

Toto zařízení pracuje s nízkým bezpečným napětím do 20 V. Nehrozí tedy žádné nebezpečí úrazu elektrickým proudem.

Zařízení pro své měření využívá laser, proto je nutno se vyvarovat přímému kontaktu s okem. Při dlouhodobém vystavení oka laserovému záření by mohlo dojít k poškození zraku.

Zařízení obsahuje odkryté točivé části. Dlouhé vlasy je nutno stáhnout gumičkou do copu. Při náhodném dotyku s řemenem by nemělo dojít k poranění. Motor není tak silný, aby dokázal způsobit poranění, nebo namotání končetin do řemenice.

Motor má proudové omezení, navíc má preventivní kontrolní smyčku programu, která sleduje, zda nedošlo k zastavení motoru. Kdyby byl motor zablokován, nebo ztrácel kroky, tak to algoritmus pozná a v nejbližší možné chvíli motor zastaví a uvolní. Na displeji se zobrazí varovná hláška MotorError a měření se ukončí. (obr. 5.1)



Obr. 5.1 – Nextion, motor error

ZÁVĚR

Navržené ovládání je intuitivní a snadno a rychle zapamatovatelné. Bylo tak tedy dosaženo zadaného cíle. V této příloze byl podrobně popsán návod pro obsluhu měřicího přístroje a dalších obslužných a vyhodnocovacích programů.

Příloha k bakalářské práci

Lokalizační jednotka mobilního robota

Tomáš Mezera

VÝROBNÍ DOKUMENTACE

CELKOVÁ KONSTRUKCE MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ

Obsah

Seznam ilustrací	C – 2
Úvod	C – 3
1 Konstrukce lidaru	C – 4
2 Konstrukce elektroniky	C – 5
3 Konstrukce krabičky	C – 6
Závěr	C – 7

SEZNAM ILUSTRACÍ

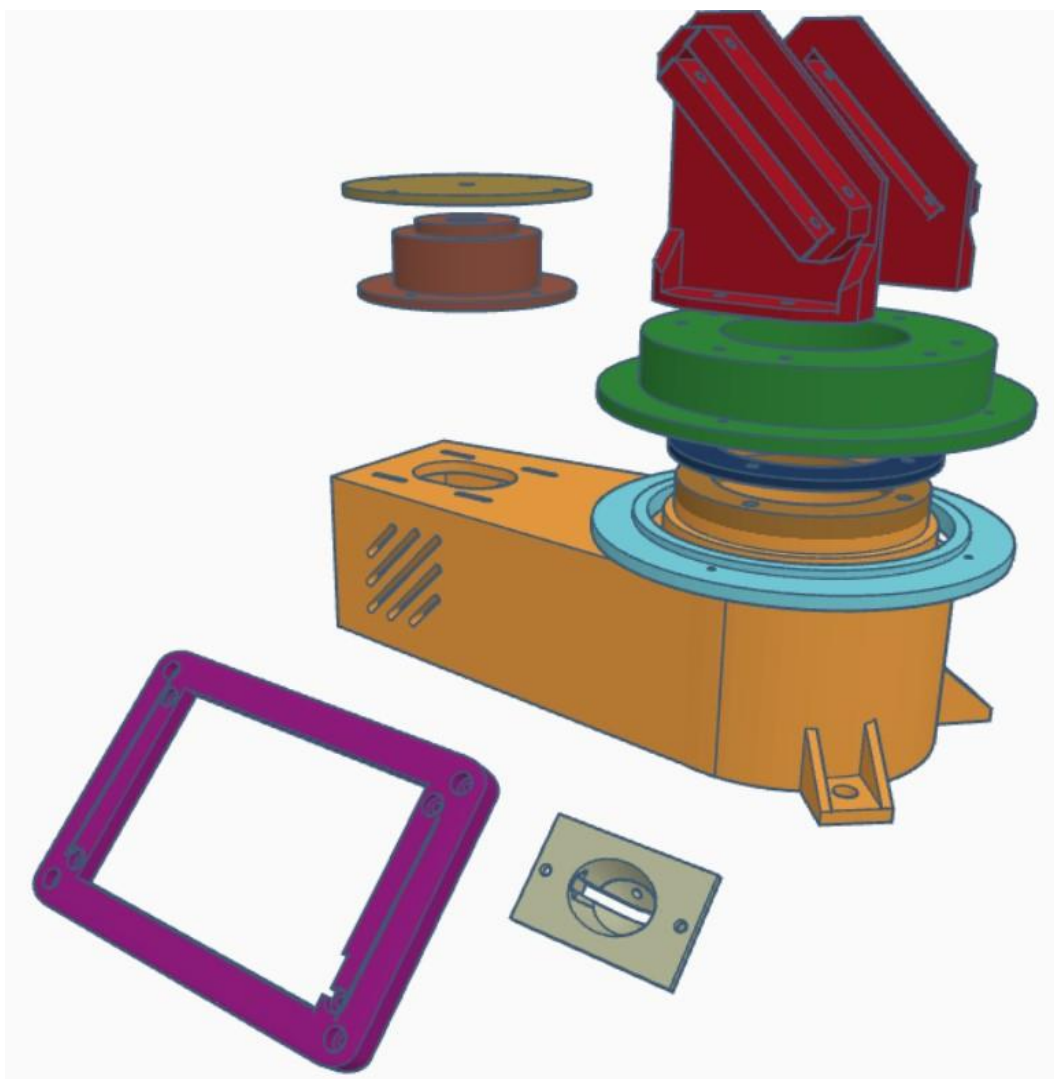
Obr. 1.1 - Montážní sestava 3D modelů	C – 4
Obr. 2.1 - Náhled na vnitřní uspořádání elektroniky	C – 5

ÚVOD

Součástí bakalářské práce je sestavení funkčního měřicího zařízení, které v praxi ověří nasbírané informace z teoretické části. Konstrukce měřicího lidarů byla vytvořena s ohledem na dostupnost materiálů a zpracovatelnost v domácích podmínkách. Mechanickou konstrukci měřicího zařízení jsem vyrobil pomocí 3D tisku. Při ožívování jsem elektronické moduly propojoval pomocí nepájivých polí. Ve finálním zpracování jsem moduly přiletoval k prototypovým plošným deskám. Nakonec jsem celou elektroniku zabudoval do pevné lakované překližkové krabice a měřicí zařízení přišrouboval k jeho vrchu. Tímto se stal celý model velmi bytelným, schopným odolávat i nepříznivým venkovním podmínkám, takže se není třeba obávat o jeho poškození při jakémkoli převozu.

1 KONSTRUKCE LIDARU

Velkou část konstrukce jsem navrhl jako 3D modely v online návrhovém CAD SW Thingiverse. Ty jsem vyexportoval ve formátu *.STL. Poté jsem je rozřezal ve specializovaném programu Cura a nechal vytisknout. Tento model obsahuje i dvojici hliníkových ozubených řemenic, řemen a ložisko. Celá konstrukce je spojena pomocí šroubů M3 s imbusovou hlavou a zatavovacích matic do plastu. Všechny 3D modely je možno nalézt na přiloženém CD.

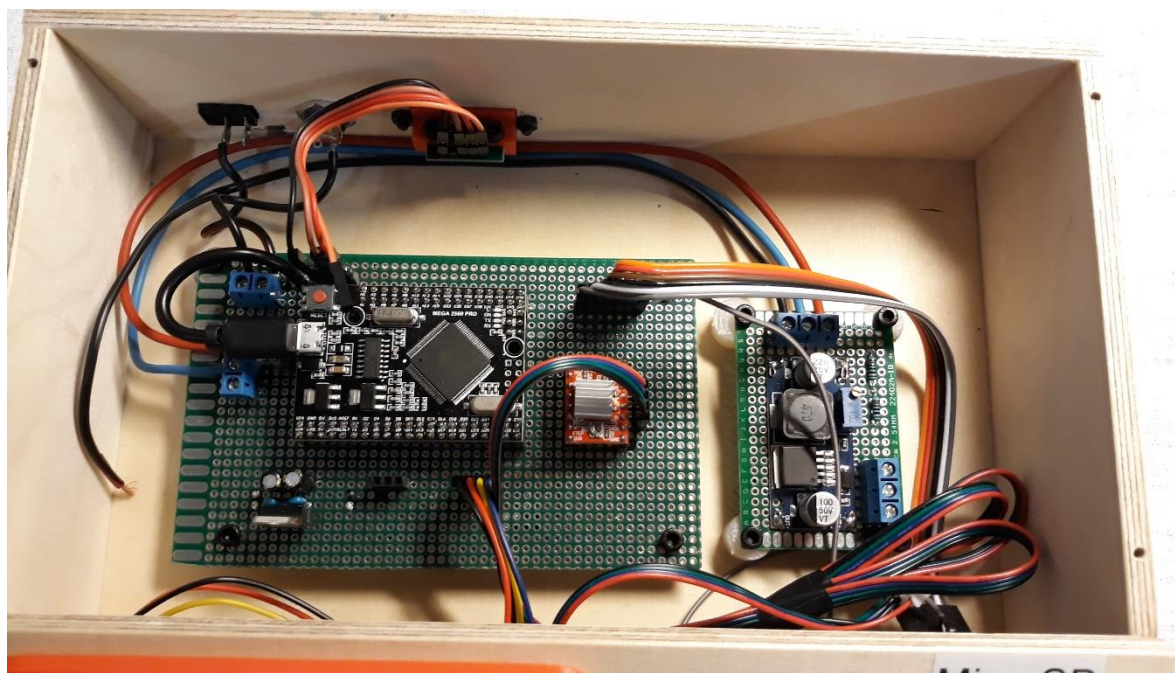


Obr. 1.1 - Montážní sestava 3D modelů

2 KONSTRUKCE ELEKTRONIKY

Celá práce se skládá ve velké míře z vývojových modulů. Na hlavní prototypové desce byl umístěn vývojový modul Arduino MEGA PRO Mini a modul driveru pro krokový motor. Na plošný spoj jsem předem přiletoval dutinkové lišty, aby bylo umožněno pohodlné vyjmutí modulů z prototypové desky. Dále se na desce nachází externí výkonový stabilizátor 7805 pro displej. Tento stabilizátor byl přiletován dodatečně, po zjištění, že integrovaný stabilizátor neunesl takové proudové zatížení a neúměrně se zahříval. Navíc se na desce nachází pár vyhlazovacích kondenzátorů. Pro připojení ostatních vývojových modulů jsem využil dutinkových lišt a kabelů s kolíkovými konektory. Tímto způsobem jsem propojil s hlavní deskou čtečku SD karty, miniUSB konektor v zadním panelu, poháněcí krokový motor, Hallův snímač a dotykový displej.

Dále jsem vytvořil desku s napěťovým přizpůsobením pro laserový senzor IFM. Deska obsahuje STEP-UP měnič pro zvýšení napětí na 20 V a odporový dělič, který upraví napětí pro A / D převodník Arduina. Tato prototypová deska obsahuje navíc šroubové svorky. S jejich pomocí je spojena s vodiči laserového senzoru a s hlavní deskou.



Obr. 2.1 – Náhled na vnitřní uspořádání elektroniky

3 KONSTRUKCE KRABÍČKY

Celé zařízení bylo umístěno do překližkové lakované krabíčky. Prototypové desky plošných spojů jsou vymezeny distančními podložkami a pevně spojeny šrouby se spodní deskou krabíčky. Do zadní strany byly vyřezány otvory pro umístění miniUSB konektoru, Jack konektoru pro napájení modelu a přepínač pro zapnutí napájení. Na klopené přední straně je umístěn dotykový displej s patřičným rámečkem a čtečka na SD kartu. Tato deska je stejně jako horní deska odnímatelná. Pro snazší instalaci elektroniky byly přišroubovány vruty. Ostatní desky jsou spojené napevno. Horní deska nese celou konstrukci lidaru, má v sobě otvor pro prostup kabelů pro laser, krokový motor a Hallův senzor.

ZÁVĚR

V této příloze byly představeny použité materiály při stavbě tohoto modelu. Veškerá další dokumentace a materiály jsou obsahem příloženého CD.