



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH A REALIZACE ZAŘÍZENÍ PRO SNÍMÁNÍ VNITŘNÍCH POVRCHŮ DUTIN

DESIGN AND REALIZATION OF EQUIPMENT FOR SCANNING THE INTERNAL SURFACE OF CAVITIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Zatloukal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Tomáš Zatloukal**
Studijní program: Mechatronika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a realizace zařízení pro snímání vnitřních povrchů dutin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na návrh zařízení, který bude schopno digitalizovat vnitřní povrch dutých válcových těles. Toto měření může být následně využito k 3D rekonstrukci zkoumaného tělesa a odhalování vad a nerovností na daném povrchu. Práce bude obsahovat výběr vhodné metody snímání povrchu, návrh nutných mechanických a elektronických prvků pro zařízení a softwarové vybavení měřicího zařízení. Funkčnost zařízení bude odzkoušena na prototypu.

Cíle diplomové práce:

1. Řešení v oblasti digitalizace geometrie povrchu.
2. Výběr měřicí metody a návrh řešení.
3. Návrh mechanické a elektrické části měřicího zařízení.
4. Vytvoření řídicího softwaru pro zařízení, včetně zpracování měřených dat.
5. Ověření funkčnosti navržené koncepce.

Seznam doporučené literatury:

- [1] McClelland A., Mankin M.: Optical Measurements for Scientists and Engineers, Cambridge University Press, 2018, ISBN 9781316779613
- [2] MILÁČEK S., Měření a vyhodnocování mechanických veličin. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02417-2.
- [3] FIGLIOLA R., Beasley D.: Theory and Design for Mechanical Measurements, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1995.
- [4] VALÁŠEK M. a kol.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT Praha, 1995.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této práce je návrh, sestavení a otestování koncepce zařízení pro zkoumání vnitřních povrchů dutin. Práci předcházela důsledná rešerše existujících zařízení schopných digitalizovat povrchy těles a metod, které jsou k tomu využívány. Na základě těchto nabytých znalostí byl vybrán senzor, kterým bude přístroj snímat povrch. Následoval výběr a návrh všech elektronických i mechanických částí, které budou u sestavení zařízení použity. Stěžejní částí je také vytvoření uživatelského rozhraní pro ovládání zařízení, zobrazení naměřených dat a jejich uložení pro další účely. Závěrem práce je provedení testů na určení funkčnosti navrženého zařízení.

Summary

Goals of this thesis are design, assembly and testing of equipment for scanning the internal surface of cavities. Designing was preceded by thorough research of existing devices that are able to digitize surfaces of bodies and methods, that are used in such devices. Sensor for scanning surfaces was chosen based on this acquired knowledge. Selection and desing of all electrical and mechanical parts, that will be used during assembly followed. Crucial part is also a creation of user interface for controlling the device, visualization of measured data and their export for other purposes. Last part of is undertaking testing to determine functionality of developed device.

Klíčová slova

Digitalizace povrchu, 3D sken, LASER, Time-Of-Flight, fázový posun, Arduino, Arduino IDE, Autodesk Inventor, Matlab App Designer

Keywords

Digitalization of surface, 3D scan, LASER, Time-Of-Flight, phase shift, Arduino, Arduino IDE, Autodesk Inventor, Matlab App Designer

Bibliografická Citace

ZATLOUKAL, Tomáš. *Návrh a realizace zařízení pro snímání vnitřních povrchů dutin*. Online, diplomová práce. Petr KREJČÍ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166149>.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téme *Návrh a realizace zařízení pro snímání vnitřních povrchů dutin* zpracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Krejčího, Ph.D. s využitím zdrojů uvedených v seznamu.

Bc. Tomáš Zatloukal

Brno

.

Rád bych poděkoval svojí rodině za podporu během vysokoškolského studia. Další poděkování patří mým přátelům a kolegům za veškerou pomoc během studia i psaní této práce. V neposlední řadě také děkuji vedoucímu práce, Ing. Petrovi Krejčímu, Ph.D., bez kterého by tato práce nemohla vzniknout.

Bc. Tomáš Zatloukal

Obsah

1	Úvod	9
2	Formulace cílů	10
3	Metody digitalizace povrchu	11
3.1	Kontaktní metody	12
3.1.1	CMM	12
3.1.2	Kloubová měřicí ramena	13
3.2	Optické metody	13
3.2.1	LIDAR	13
3.2.2	Time of Flight snímače	15
3.2.3	Snímače fázového posunu	15
3.2.4	Skener využívající strukturovaného světla	16
3.2.5	Fotogrammetrie	17
3.3	Magnetické metody	18
3.4	Transmisivní metody	18
4	Výběr snímače	19
4.1	Moduly se senzorem VL53L0X	20
4.2	Návrh vlastního senzoru	20
4.3	Využití elektroniky laserového metru	22
4.4	Modul laserového měřiče vzdálenosti	26
5	Použitá elektronika	27
5.1	Mikrokontrolér	27
5.2	Měřicí senzor	28
5.3	Logický převodník	29
5.4	Motory	30
5.5	Drivery	30
5.6	Napájení	32
5.7	DPS	32
6	Konstrukce zařízení	35
6.1	Pojezd sondy	35
6.2	Měřicí sonda	36
6.3	Stojan	37
6.4	Obal na elektroniku	38

6.5	Testovací těleso	39
7	Softwarové vybavení zařízení	40
7.1	Arduino IDE	40
7.1.1	Setup	40
7.1.2	Hlavní smyčka	41
7.2	Matlab	43
7.2.1	GUI	43
7.2.2	Připojení měřicího zařízení	45
7.2.3	Zapnutí/Vypnutí Laseru	45
7.2.4	Spuštění měřicího cyklu	45
7.2.5	Nastavení polohy	46
7.2.6	Výsledky měření	48
8	Testování funkčnosti	49
8.1	Rozsah měření	49
8.2	Měření testovacího vzorku	50
8.2.1	Měření přesnosti vzdálenosti	50
8.2.2	Zjišťování obvodového rozlišení	52
8.2.3	Zjišťování vertikálního rozlišení	54
8.3	Zhodnocení funkčnosti	55
9	Závěr	57
	Seznam použitých zkratk	59
	Seznam obrázků	60
	Seznam tabulek	62
	Zdroje a použitá literatura	63
	Seznam příloh	67

1 Úvod

V dnešní době je kladen důraz na kvalitu výroby a dodržování norem a předpisů. Moderní procesní postupy, procesy, výrobní metody a materiály nám dovolují vyrábět přesnější a kvalitnější výrobky než kdy dříve. Bohužel proti těmto faktorům v průmyslu působí i síly opačného směru, a to požadavky na co nejrychlejší a nejpočetnější výrobu, díky které lze generovat co nejvyšší ekonomický zisk. Naprosto nezbytná součást výrobního procesu je proto kontrola kvality, která zaručuje bezchybný stav výrobků.

Dalším trendem dnešní doby je řešení porouchaných či jinak nefunkčních výrobků a spotřebičů výměnou za nový. To je způsobeno komplexností dnešních technologií, kdy jen diagnostika zařízení může mít menší finanční smysl než pořízení zbrusu nového výrobku. Bohužel větší ekologický smysl dává klást nároky na opravitelnost výrobků, čehož si je vědoma i Evropská unie, která v roce 2024 vydala směrnici, která zaručuje u nových výrobků tzv. právo na opravu.[1]

U výstupní kontroly kvality i u oprav produktů je prvním krokem zjištění stavu výrobku, ať už z pohledu mechanického či elektronického. K tomu jsou často třeba specializované měřicí nástroje, kterými je prováděno vyhodnocování stavu. U jednoduchých kontrolních a diagnostických úkonů si často vystačíme s měřidly, jako je multimetr a posuvné měřítko, pro specifické či automatizované úkony je však potřeba drahé vybavení.

Přesně na tuto problematiku je zaměřena tato práce. Jejím cílem je návrh a realizace zařízení pro snímání povrchů dutin pomocí optických metod. Toto zařízení bude sloužit jako ověření konceptu, jeho přesnosti a praktické využitelnosti a že tohoto cíle lze dosáhnout bez nutnosti obrovských pořizovacích nákladů a investic.

2 Formulace cílů

Hlavní cíle této práce známe z úvodu a ze zadání diplomové práce. Nyní si však projdeme přípravu, která vedla k řešení jednotlivých dílčích částí a zadefinujeme si přesně, jaké výsledky očekáváme. Důležité je zmínit, že celá práce a zařízení z ní vycházející byla koncipována pouze jako experiment k ověření konceptu. Cílem tedy bylo vytvořit prototyp zařízení, na kterém lze vyzkoušet, jaké přesnosti a rychlosti měření lze dosáhnout, a to s co nejmenšími náklady na pořízení.

Rešeršní část slouží jako seznámení s problematikou digitalizace povrchu. Touto kapitolou si lze rozšířit znalosti hlavně o metodách, které se dnes ve strojírenství používají ke skenování těles a součástí, jakým způsobem toho dosahují a jaké jsou jejich výhody či nevýhody.

Znalosti z kapitoly zabývající se rešerší poté lze uplatnit při výběru správné metody měření a elektroniky potřebné k její realizaci. Při výběru metody je třeba brát zřetel na cenu a schopnost realizace metody s omezeným vybavením. Zároveň bylo potřeba předběžně navrhnout umístění senzoru a princip měření.

Tato přípravná fáze se pohybovala převážně v teoretické rovině. Ovšem zadání požaduje, aby byla teorie nějakým způsobem převedena do praxe. Bude tedy potřeba vybrat konkrétní senzor, měřící pomocí vybrané metody, podpůrnou elektroniku včetně řídicí jednotky a následně i provést návrh konstrukce, která umožní upevnění všech elektronických i mechanických součástí do jednoho celku a zaručí proveditelnost měření.

Ovšem sestavený a zapojený měřicí systém je nepoužitelný, pokud ho nebude možné ovládat. Dalším krokem tedy bude vytvoření softwarové výbavy měřícího zařízení. Předpokládá se, že tento cíl bude mít dvě části. První část bude blíže hardwaru, kdy bude potřeba naprogramovat řízení elektroniky, ve druhé bude potřeba vytvořit skript či aplikaci, díky které bude moci uživatel interagovat se zařízením a zobrazovat si naměřená data.

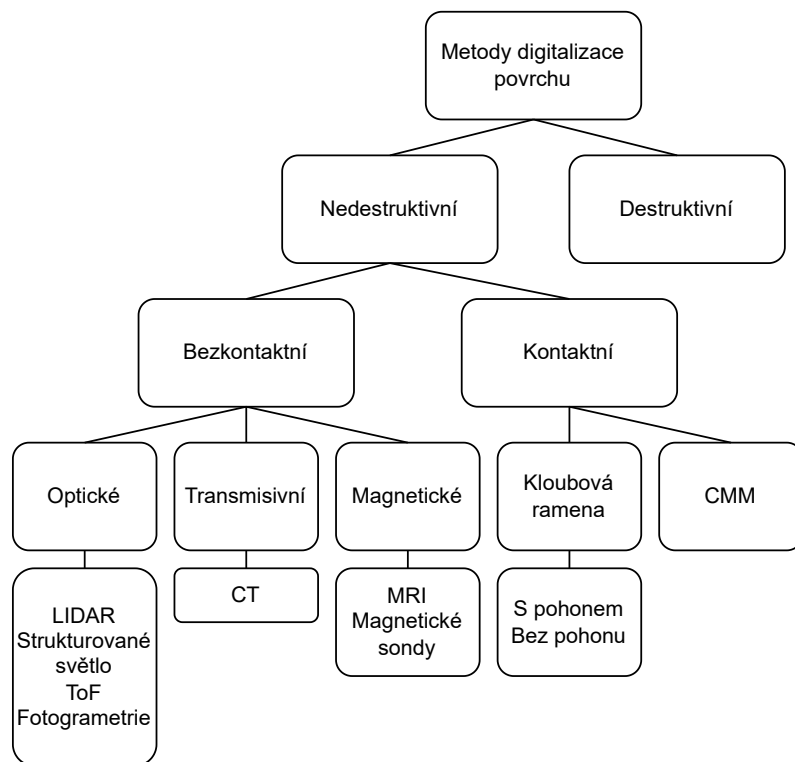
Po splnění všech těchto dílů budeme mít komplexní zařízení, které bude obsahovat všechny mechatronické prvky. Bude však potřeba provést testování zařízení, zhodnotit jeho dobré i špatné vlastnosti a tyto závěry sepsat do závěrečného zhodnocení výsledků.

3 Metody digitalizace povrchu

Tato kapitola seznámí čtenáře s tématem metod digitalizace povrchu. Dva hlavní typy skenerů jsou destruktivní a nedestruktivní. Pro tuto práci jsou zásadní nedestruktivní způsoby převedení geometrie součástí do digitální podoby, následující text se tedy bude věnovat pouze těmto metodám.

Rešerší na téma 3D skenerů a metod digitalizace povrchu již bylo vytvořeno několik. V této práci ovšem nalezneme lehce odlišný systém pro rozdělení a klasifikaci těchto metod, než je tomu u jiných bakalářských a diplomových prací na podobná témata.

Co se týče metod nedestruktivních, ty lze rozdělit na další dvě hlavní větve. První obsahuje metody bezkontaktní, druhá zase metody kontaktní. Bezkontaktní metody využívají fyzikálních principů (magnetismus, elektromagnetické záření) ke zkoumání povrchů i vnitřních struktur součástí a těles a pomocí nich rekonstruují změřená data do digitální podoby. Metody kontaktní zase využívají dotykové sondy k určení své polohy a vytvoření mračna bodů, které reprezentuje tvar zkoumaného objektu ve 3D prostoru.[2]



Obrázek 3.1: Dělení metod digitalizace povrchu

3.1 Kontaktní metody

3.1.1 CMM

CMM (coordinate-measuring machine), v českém překladu souřadnicový měřicí stroj, je zařízení, které měří geometrii těles. Toho je docíleno zaznamenáváním souřadnic jednotlivých bodů zjištěných sondou. Poloha sondy, a tedy zkoumaného bodu, je popsána jako posun od referenční polohy ve třídimenzionálním kartézském prostoru.

Poprvé se CMM objevily v roce 1959 a ačkoliv již v této době byly CMM stroje revolucí v měření strojních částí a v 60. letech se jejich vývojem i výrobou zabývalo velké množství západních firem, největší rozmach této technologie zapříčinilo vynalezení dotykové sondy na začátku 70. let minulého století.[3, 4]

Konstrukce CMM zařízení se velice podobá ostatním tříosým strojům využívaným ve strojírenském průmyslu. Stroj se skládá ze svařovaného rámu, pracovní desky pro upevnění měřené součásti a měřicího mechanismu, na kterém je upevněna sonda. Sonden jsou nejčastěji kontaktní.

Tyto zařízení se skvěle hodí pro zautomatizované procesy díky moderním CNC technologiím. Další velkou výhodou je přesnost měření. Ovšem CMM mají omezené použití při zkoumání vnitřních povrchů. Jejich konstrukce vyžaduje manipulační prostor v okolí sondy, která musí pro správné měření přijít do fyzického kontaktu pouze s požadovaným bodem povrchu.



Obrázek 3.2: Souřadnicový měřicí stroj firmy ZEISS, převzato z [5]

3.1.2 Kloubová měřící ramena

Kloubová měřící ramena (anglicky Articulated Measure Arm) jsou ze své podstaty odnoží CMM. Měření geometrie je téměř shodné, na konci ramene je umístěna sonda, která při kontaktu s měřeným tělesem dává příkaz k zaznamenání aktuální polohy v prostoru. Rozdíl je však v konstrukci měřícího mechanismu. Ramena mohou být s pohonem či bez pohonu. První případ je řízen numericky z počítače a pohybuje se sám pomocí aktuátorů v kloubech. Ramena bez pohonu jsou ovládána člověkem, který vždy sondu přiloží na požadované místo, ve kterém dojde k zaznamenání souřadnic.

Historie kloubových měřících zařízení se začala psát v roce 1974, kdy bylo sestrojeno první zařízení pro měření externích rozměrů trubek.[6]

Kloubové rameno, je víceosé zařízení (šest až sedm os), jehož konstrukce a chování vychází z anatomie lidské paže. Stroj se obvykle skládá ze dvou segmentů spojených mobilními klouby a je zakončen segmentem pro upevnění měřící sondy. Díky této konstrukci jsou značně kompaktnější než standardní CMM, díky tomu se někdy také nazývají mobilní CMM. Ovšem zjištění a zaznamenání polohy koncového bodu ramena je výpočetně a matematicky náročnější než u tříosých zařízení.[7]

Výhodou této mobility je, že jsou vhodné ke zkoumání geometrií součástí, se kterými nelze hýbat. Můžeme tedy měřící rameno donést k součásti a provést měření téměř kdekoli. Nevýhodou je stále nutnost manipulačního prostoru okolo ramena a sondy, komplexní vnitřní prostory mohou být výzvou.



Obrázek 3.3: Měřící kloubové rameno firmy Trimos, převzato z [7]

3.2 Optické metody

3.2.1 LIDAR

Slovo LIDAR původně vzniklo jako kombinace slov light (světlo) a radar, odkazující na funkci systému, dnes je však používáno jako akronym pro Light Detection and Ranging, v doslovném překladu světelná detekce a měření rozsahu. Jedná se o metodu měření vzdálenosti. Metoda spočívá ve vyzařování laserového paprsku a měření doby jeho návratu

od měřeného objektu zpět k senzoru. Senzor se skládá z laserového emitoru, senzoru záření s optikou a elektroniky, která řídí a vyhodnocuje měření senzoru.

Ačkoliv první využití odraženého světla k pozorování atmosféry proběhlo v roce 1930, za vznik LIDAR systémů je považován rok 1961, tedy jen rok po sestavení prvního laseru. Tento první senzor odraženého laserového záření byl původně využíván ke zkoumání povrchu Měsíce a o necelou dekádu později sloužil na palubě misí Apollo k prozkoumávání a mapování povrchu Měsíce.[8]

Princip funkce je velice podobný standardnímu radaru. Senzor do okolí vysílá laserové záření, to se následně odrazí od sledovaného objektu, tento odraz je detekován a podle času, který uplynul mezi vysláním a přijetím signálu, je určena vzdálenost objektu. Senzor může být statický, sledující pouze prostor před sebou, či může být pohyblivý, skenující prostor v určitém úhlu.

Vlnová délka skenovacího paprsku může být téměř libovolná, od ultrafialového, přes viditelné, až po infračervené záření. Přesná hodnota je vždy zvolena podle aplikace senzoru. Podle vlnové délky laseru je vybrán i fotocitlivý prvek, který v senzoru funguje jako detektor navracejícího se záření. Standardně se jedná o fotodiody. Nejzásadnější je ovšem řídicí elektronika, obsluhující celý proces měření. Jelikož se vyzařovaný paprsek pohybuje rychlostí světla, musí být elektronika dostatečně rychlá, aby bylo dosaženo požadované přesnosti měření.

Jak již bylo zmíněno, této pokročilé technologie bylo zpočátku využíváno primárně ve výzkumu vesmíru. S technologickým rozvojem si ovšem našla cestu i do méně pokročilých systémů. LIDAR systémy jsou pořád hojně využívány v aerospace technologiích, nejčastěji jako senzory družic, které zkoumají naši planetu, složení atmosféry, srážky nebo rychlosti větrů. Kromě meteorologie jsou LIDAR zařízení využívána ve výzkumných odvětvích, jako je archeologie či ekologie. LIDAR systémy jsou však i součástí zařízení, která využíváme na denní bázi. Typicky se jedná například o bezpečnostní systémy v automobilech (ACC, nouzové brždění, autonomní řízení) nebo detekci překážek a navigaci v prostoru některých domácích robotických vysavačů. Také jsou součástí kamerových systémů některých chytrých telefonů. V neposlední řadě jsou LIDAR senzory používány ve 3D skenerech, využívaných ve stavebnictví i strojírenství, které spolehlivě převádějí reálné objekty a tělesa do digitální podoby, kterou poté lze využít například při CAD modelování či replikaci těles pomocí rapid prototypingu.[9, 10, 11]



Obrázek 3.4: 3D LIDAR skener Artec, převzato z [11]

3.2.2 Time of Flight snímače

Time of Flight (ToF) snímače jsou obdobou LIDAR snímačů. Pracují na stejném principu, tedy že měří čas od vyzaření paprsku do jeho návratu po odražení od měřeného tělesa, rozdíl je však ve vypouštění záření. ToF senzory obvykle nedisponují laserovým zdrojem světelného záření, ten je nejčastěji nahrazen LED diodou. Dále tyto snímače obvykle pracují s infračerveným zářením, tedy mimo viditelné spektrum světla, díky čemuž jsou daleko vhodnější pro použití v prostorech, kde by mohlo dojít k poškození zraku.[12]

Mezi hlavní dva principy fungování ToF senzorů patří Direct ToF (dToF) a Indirect ToF (iToF). Senzor dToF funguje tak, jak již bylo popsáno v předchozí sekci 3.2.1. Elektronika senzoru zaznamená časový okamžik opuštění fotonu záření, poté zaznamená dobu jeho návratu a z uplynulého času mezi těmito dvěma událostmi vypočítá vzdálenost uraženou tímto fotonem. Princip funkce iToF spočívá v detekci fázového posunu odraženého vlnění oproti vlnění původnímu. Díky těmto rozdílným principům detekce příchozího světla se dToF senzory hodí spíše pro měření na delší vzdálenosti, kdežto iToF poskytují dobrou rychlost měření s vysokým rozlišením.[13]

ToF senzory jsou dnes velmi dostupné a levné řešení pro 3D mapování okolí. Lze je nalézt v chytrých telefonech, automobilovém průmyslu či robotice. Lze je využít pro širokou řadu úloh jako detekce překážek, rozeznávání gest nebo měření výšky vodní hladiny. Jedním z nejrozšířenějších příkladů využití ToF technologie pro právě rozeznávání gest a sledování objektů je Kinect od společnosti Microsoft.[14]

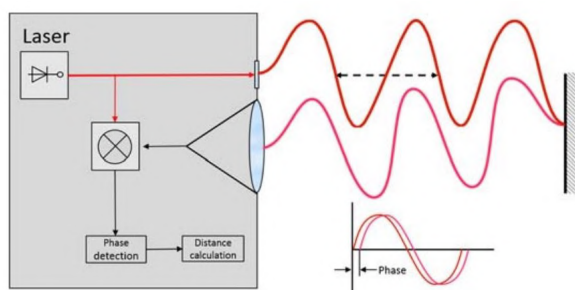


Obrázek 3.5: Modul Time-of-Flight snímače, převzato z [15]

3.2.3 Snímače fázového posunu

Snímače fázového posunu jsou podobné iToF snímačům. Lze je najít v mnoha odvětvích a výrobcích, zabudovány jsou například v ručních laserových dálkoměrech anebo 3D skenerech. Snímač se skládá z jedné či dvou laserových diod. Na začátku měření je vyslán laserový paprsek, který se odrazí od zkoumaného povrchu a je zaznamenán snímačem. Zde dojde k porovnání fáze odraženého záření s fází záření původního nebo záření referenčního. Na základě tohoto fázového rozdílu je poté vypočítána vzdálenost, kterou paprsek urazil. Tyto snímače mají řadu výhod oproti jiným optickým zařízením pro měření vzdálenosti.

Jsou to jedny z nejpřesnějších senzorů, přesnost špičkových zařízení se pohybuje v řádech mikrometrů. Další obrovskou výhodou je schopnost rychlého opakování měření. Jelikož celý měřicí cyklus měření a výpočtu vzdálenosti je velmi rychlý, lze provádět kontinuální měření.[16]



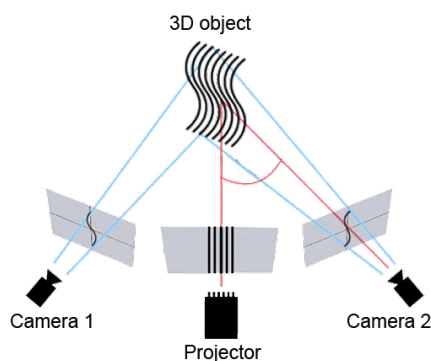
Obrázek 3.6: Princip snímačů fázového posunu, převzato z [17]

3.2.4 Skener využívající strukturovaného světla

Pro převedení zkoumaného objektu do 3D digitální podoby využívá tento druh skeneru několika kamer, které pozorují zkoumaný objekt. Těleso je navíc osvětlováno strukturovaným světlem, což je světlo s námi předem známým vzorem. Může se například jednat o mřížky či čáry, a to jak horizontální, tak vertikální.

Na povrchu objektu osvětleném strukturovaným světlem vznikají linie osvětlení. Jelikož bodový projektor strukturovaného světla promítá například vodorovné čáry jen v rovině, která je rovnoběžná s rovinou projekční, dochází na prostorově zakřiveném tělese k deformaci těchto strukturovaných čar. Tyto deformované vzory jsou zachyceny nejméně dvojicí kamer. Díky tomu lze modulované vzory digitálně porovnat s originálním vzorem a pomocí vhodného algoritmu lze každému bodu přiřadit jeho trojrozměrnou reprezentaci v 3D modelu.

3D skenery využívající strukturovaného světla jsou velice přesné a rychlé senzory pro převedení reálných těles do digitální podoby. Vyznačují se také výborným rozlišením a jsou technologicky nenáročné. Jednotka se skládá ze zdroje strukturovaného světla, což je nejčastěji videoprojektor, zařízení pro vizuální záznam, což mohou být klasické CCD nebo CMOS kamery a zařízení pro vyhodnocení dat. Díky tomu našly uplatnění ve strojírenství, kontrole kvality, medicíně a zábavním průmyslu.[18]



Obrázek 3.7: Prinip skenerů využívajících strukturovaného světla, převzato z [19]

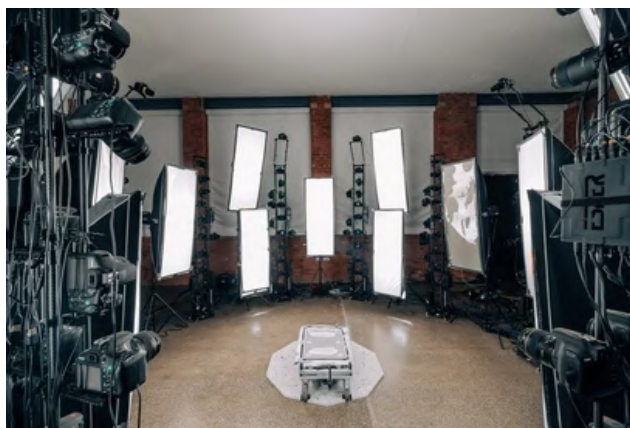
3.2.5 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je metoda získávání trojrozměrných údajů o tělese z dvojrozměrných fotografií. Jedná se o rychlé a snadné zaznamenání fyzických objektů a jejich převod do digitální podoby.

Základní principy používané u fotogrammetrie lze vystopovat až k Leonardu da Vinci, který jako první začal pracovat s perspektivou a projektivní geometrií. Na těchto znalostech se poté v polovině 19. století začal stavět obor fotogrammetrie, který byl prvně využíván k architektonickým průzkumům. Nedlouho poté se začala využívat letecká fotogrammetrie ke zkoumání topografie využívající fotoaparátů umístěných na dracích a balónech.[20]

Metoda rekonstrukce trojrozměrné podoby vyfotografovaného tělesa spočívá v pořízení velkého množství fotografií daného tělesa z co nejvíce možných pozic. Toho je možno docílit využitím mnoha statických kamer vhodně rozmístěných v okolí fotografovaného předmětu a pořízení vícero fotografií z různých úhlů najednou nebo pořízení více fotografií jedním fotoaparátem, který však při pořízení každého snímku mění svou polohu v prostoru. Poté je potřeba pořízené fotografie nahrát do vhodného softwaru, který je určen pro vytváření modelů za pomoci fotogrammetrie. Dnešní softwary již dokážou sami porovnávat pixely z jednotlivých snímků, najít mezi nimi shody a sestavit tak 3D reprezentaci fotografovaného tělesa.[21]

Díky své nenáročnosti na technické vybavení a výkonu dnešních PC má fotogrammetrie své místo v mnoha odvětvích vědy, výzkumu i umění. Ze snímků pořízených z výšky, například z letadel či družic, lze rekonstruovat reliéf povrchu Země a jiných planet. Stejně tak je možné vytvářet 3D modely měst, budov a architektonických památek. Fotogrammetrie se též využívá při podmořském a archeologickém průzkumu k zaznamenání a uchování významných nálezů. Pomocí fotografování zblízka lze detailně skenovat i malé předměty, čehož lze využít ve strojírenství pro tvorbu modelů pro 3D tisk, kontrolu kvality či získávání dat pro další vývoj.[22, 23]



Obrázek 3.8: Fotogrammetrický setup firmy Canon, převzato z [21]

3.3 Magnetické metody

Do této strože zastoupené skupiny 3D skenerů využívaných v průmyslu a strojírenství lze zařadit dva typy zařízení, a to skener s magnetickou sondou a skenery využívající magnetické rezonance.[18]

Skenery s magnetickou sondou lze využít pouze na materiály s vlastním magnetickým polem. Výhodou MRI skenerů je, že dokáží zobrazovat různé chemické sloučeniny, skvěle se proto hodí nejen k zjišťování vnitřních a vnějších tvarů těles, ale i ke sledování procesů probíhajících uvnitř zařízení či ke sledování chování kapalin a plynů v inženýrských procesech.[24]

3.4 Transmisivní metody

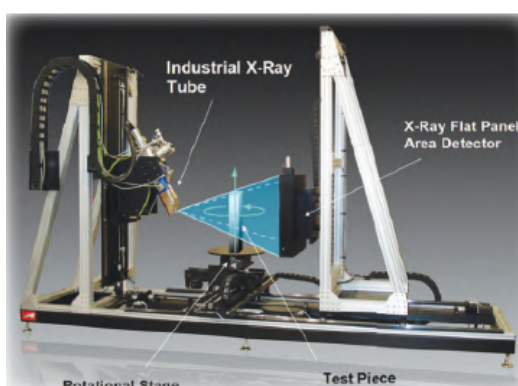
V průmyslu lze najít též 3D skenery využívající rentgenové záření. Tyto skenery funkcí i konstrukcí podobné medicínským zařízením pro zobrazování s využitím výpočetní tomografie (CT) se skvěle hodí pro zobrazování vnitřních struktur a tvarů součástí.

Princip zobrazovací metody je naprosto totožný s medicínskou CT. Zkoumaný vzorek je upevněn do skeneru mezi zářič a senzor rentgenového záření. Následuje ozáření vzorku a měření energie a intenzity dopadajícího záření po průchodu tělesem. Každý materiál a látka vstřebává rentgenové záření jinak, lze proto podle úbytku záření určit, jaký materiál o jaké tloušťce stál záření v cestě. Tímto procesem vznikne jeden řez tělesa, následuje tedy provedení několika dalších řezů tělesem v rovnoběžných rovinách, poté dojde ke změně úhlu řezů a proces se opakuje. Finální výsledné 3D zobrazení tedy vzniká výpočetním seskládáním mnoha 2D řezů tělesa do sebe.[25]

Zkoumání výrobků pomocí průmyslové CT metody má řadu výhod. Jedná se o jednu z mála nedestruktivních metod zjišťování vnitřních povrchů a struktur a například oproti MRI se jedná o metodu levnější a rozšířenější. Zobrazení má též výbornou přesnost s rozlišením v řádech mikrometrů a lze jím zkoumat téměř jakýkoliv materiál i výrobek.[26]



(a) Snímek pořízený CT, převzato z [26]



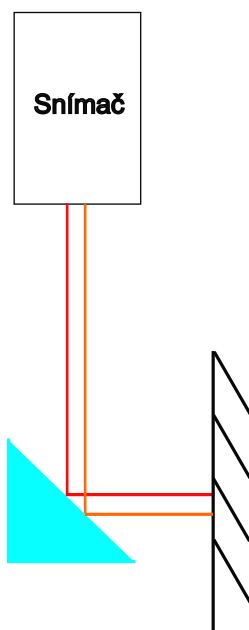
(b) Průmyslové CT, převzato z [27]

Obrázek 3.9: Transmisivní zobrazovací metoda

4 Výběr snímače

Naprostu stěžejní pro celou práci bylo určení metody skenování a měření povrchu děr. Jak již známe z kapitoly 3, dvě hlavní metody skenování povrchů jsou kontaktní a bezkontaktní. Motivací této práce bylo vytvoření bezkontaktního zařízení, bylo tedy potřeba najít vyhovující snímač. Jasnou volbou proto byly optické snímače.

Těch je ovšem mnoho druhů. Kvůli požadavku na co nejmenší velikost sondy se jako logické řešení jeví senzory, které vysílají a následně zpracovávají laserový paprsek. Za předpokladu využití právě takových senzorů byla navržena koncepce využití odrazu paprsku, jak je vyobrazeno na obrázku 4.1. Tato konstrukce umožní umístění senzoru mimo měřenou dutinu, nebudeme tedy omezeni jeho velikostí. Byly tedy otestovány dva druhy snímačů vzdálenosti, a to ToF senzory a senzory fázového posunu.



Obrázek 4.1: Koncepce měření

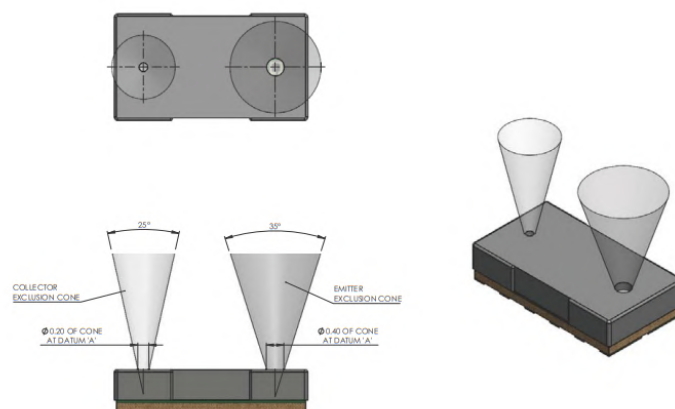
4.1 Moduly se senzorem VL53L0X

Testování započalo ToF moduly. Ty se na první pohled zdály jako nejjednodušší a nejlevnější cesta k dosažení požadovaných výsledků. Cena těchto modulů se pohybuje mezi 60 a 260 korunami.

Modul se skládá ze snímače, elektroniky umožňující ovládání a komunikaci se senzorem a piny pro připojení ke kontroleru. Moduly obsahují nejčastěji senzor VL53L0X od STMicroelectronics. Dle slov výrobce se jedná o nejmenší ToF senzor na trhu. Samotný senzor má sice pouze 4,4 mm na šířku, 2,4 mm na délku a je 1 mm vysoký, ovšem s nezbytnou elektronikou mají celé desky modulů velikost několika centimetrů.

Z datasheetu lze dále zjistit, že senzor dokáže zaznamenat objekty vzdálené až 2 metry, s tím že přesnost je udávána jako procentuální část z naměřené hodnoty. Přesnost senzoru je závislá na mnoha faktorech, jako je materiál zkoumaného tělesa, jeho barva, vnější osvětlení, vzdálenost mezi senzorem a tělesem a měřicí mód. Problém s tímto senzorem nastal ovšem při měření přes odraz. Při opakovaných měřeních senzor buďto změřil vzdálenost od odrazivé plochy, či nezaznamenal vůbec nic. Tento neúspěch je připisován dvěma vlastnostem senzoru VL53L0X. Zaprvé, laserový paprsek senzoru má vlnovou délku 940 nm, jedná se tedy o infračervené záření. Toto záření je klasickým leštěným materiálem daleko hůře odrazitelné než záření ve viditelném spektru. Druhým důvodem je malá koherentnost vysílaného záření. Na obrázku 4.2 je patrné, že kužel emitoru má úhel 35° , je tedy obtížné nasměrovat ho do jednoho bodu, který potřebujeme změřit.[28]

Ačkoliv tedy ToF modul je velice jednoduché a přesné měřidlo vzdálenosti pro hodně aplikací, bylo rozhodnuto jej v této práci nevyužít.



Obrázek 4.2: Senzor VL53L0X, převzato z [28]

4.2 Návrh vlastního senzoru

Dalším krokem byl pokus o navržení vlastního ToF snímače. Princip těchto snímačů je velmi jednoduchý, jedná se pouze o emitor, detektor a řídicí obvod, hlídající časové údaje odeslání a přijetí paprsku.

Jak již bylo v této kapitole řečeno, návrh počítá s využitím odrazu paprsku při měření vzdálenosti. Z tohoto důvodu by tedy bylo nejvhodnější využít laserové záření ve viditelném spektru, jednak kvůli odrazivým vlastnostem standardních materiálů, ale i kvůli vizuálnímu potvrzení zaměření požadovaného místa. Na trhu je mnoho laserových emitorů, často se jedná o velmi levné součástky s cenami v řádech desítek korun. Největší zastoupení mají červené lasery s vlnovou délkou 650 nm a výkonem okolo 5 mW.

Druhou základní součástí je detektor příchozího paprsku. Jedná se o fotocitlivé součástky mnoha druhů, jako jsou fotodiody, fotorezistory a fototranzistory. Každá z těchto součástek reaguje na dopadající intenzitu světla, u každé však dochází k rozdílným projevům této citlivosti. Každá z těchto součástek tedy potřebuje specifické zapojení pro vyhodnocování dopadajícího světla, společně však mají to, že nejcitlivější jsou právě na viditelné spektrum záření a že jejich spolehlivost klesá se vrůstající hodnotou osvětlení okolí.

Sestavit snímač, který je schopný vyslat laserový paprsek a zaznamenat jeho přijetí, není v dnešní době žádný problém. Komplikace nastávají při řešení časování těchto dvou událostí. Všeobecně známá konstanta rychlosti světla je $c = 299\,792\,458$ m/s. Předpokládejme, že budeme požadovat milimetrovou přesnost snímače. Pak by doba uplynulá mezi odesláním a přijetím paprsku byla:

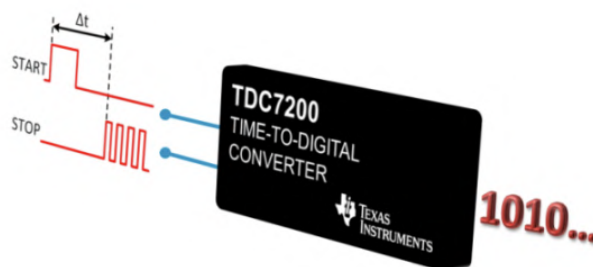
$$t = \frac{s}{c} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{299792458} = 6,671 \cdot 10^{-12} \text{ s} \quad (4.1)$$

Kde,

- s je délka uražená paprskem znamenající 1 mm
- c je rychlost světla

$$F = \frac{1}{t} = \frac{1}{6,671 \cdot 10^{-12}} \doteq 150 \text{ GHz} \quad (4.2)$$

To po převedení na frekvenci, jak lze vidět v rovnici 4.2 znamená, že pro zaznamenání 1 mm by byla potřeba řídicí elektronika s rychlostí alespoň 150 GHz. Je tedy jasné, že takové přesnosti s běžně dostupnou elektronikou dnes není možné dosáhnout. Byla prozkoumána i možnost zajištění časování pomocí čipu TDC7200. Jedná se o time to digital převodník, který měří dobu, která uplyne mezi dvěma signály. I přes to, že se jedná o součástku vyvinutou přímo proToF aplikace a jeho vzorkovací frekvence 18,18 GHz je nadstandardní, kombinace vysoké pořizovací ceny se zaručením přesnosti okolo 20 mm byly dostatečné argumenty pro hledání jiné cesty řešení práce.[29]



Obrázek 4.3: TDC převodník, převzato z [29]

4.3 Využití elektroniky laserového metru

Po neúspěších s ToF senzory započala fáze hledání jiných použitelných optických měřících senzorů. Myšlenka využití odrazu paprsku byla prvotně testována pomocí stavebního laserového dálkoměru, logickou další volbou byly právě senzory používané v komerčních dálkoměrech.

Z technických dokumentací nepřehledného množství těchto zařízení na trhu víme, že mají přesnost v řádech milimetrů, vyzařují paprsek ve viditelném spektru, což splňuje naše požadavky. Dále víme, že cena dálkoměrů začíná pod hranicí 1000 korun, pořizovací cena jednotlivých komponent tedy musí být řádově nižší, což jen rozšiřuje seznam argumentů pro zvážení těchto senzorů.

Byl proto pořízen laserový dálkoměr RETLUX RHT 100, který byl následně rozebrán a podroben analýze. Z konstrukce senzoru bylo usouzeno, že se jedná o součástku využívající měření fázového posunu mezi dvěma lasery. Bohužel původní hledání takového senzoru k zakoupení bylo neúspěšné. Bylo tedy vyzkoušeno využít elektroniku dálkoměru.

Identifikovat senzor nebylo složité, jedná se o suverénně největší součástku na celé desce plošných spojů dálkoměru (4.4b). Na první pohled se také dá určit, že do měřícího procesu zasahují dva lasery. První vyzařuje paprsek, který letí k měřenému objektu, odráží se a poté je zachycen čočkou, která se nachází hned vedle výstupu tohoto laseru. Druhý laserový emitor se nachází v základně měřícího aparátu a září kolmo k směru prvního laseru. Oba lasery jsou připojeny k DPS třemi piny. Po jejich proměření víme, že jeden funguje jako napájení 3,3 V, druhý jako uzemnění a poslední jako řídicí pin, přes který je emitor zapínán. Poslední významnou částí modulu senzoru je modrá DPS v základně přijímače, která je k hlavní desce také připájena třemi piny, které byly jako u laserů identifikovány jako napájecí, zemnicí a analogový výstupní pin. Rozdíl oproti laserům je však v úrovni napájecího napětí, které bylo naměřeno jako 60 V. Identifikace výstupního pinu proběhla pomocí osciloskopu, bylo zjištěno, že je aktivní pouze na konci měřícího cyklu. Bohužel kvůli neexistující dokumentaci a neúspěchu identifikovat model či výrobce senzoru byly i snahy o pochopení a dekodování tohoto výstupního signálu neúspěšné.



(a) DPS ze strany konektorů



(b) DPS ze strany snímače



(c) LCD displej

Obrázek 4.4: Dálkoměr RETLUX RHT 100

Následně padla pozornost na LCD displej dálkoměru. Jelikož se nepodařilo získat data o změřené vzdálenosti na výstupu snímače, odchycení těchto dat na vstupu či výstupu mikroprocesoru nepřipadalo v úvahu, další šance bylo využití vstupu do LCD displeje. Ten byl k DPS připojen pomocí FFC kabelu a deseti pinového konektoru (4.4a). Bylo tedy potřeba zjistit, co dělají jednotlivé piny a určit protokol, po kterém komunikuje displej.

Nejprve bylo potřeba jednotlivé piny připojit k měřícím zařízením. V prvním kole k multimetru a v druhém k osciloskopu, aby bylo možné identifikovat jejich funkce. V tabulce 4.1 tyto funkce jednotlivých pinů nalezneme.

Pin 1	Napájení podsvícení
Pin 2	Nepřipojen k LCD
Pin 3	Nepřipojen k LCD
Pin 4	3,3 V
Pin 5	SCLK
Pin 6	MOSI
Pin7	GND
Pin 8	CS
Pin 9	3,3 V
Pin9	5 V

Tabulka 4.1: Piny LCD displeje

Již vizuálně šlo na FFC kabelu vedoucím do displeje vidět, že dva piny nejsou vůbec připojeny a dva jsou vyvedeny do jiného místa v rámu displeje než zbylé kabely. Ty byly poté určeny jako kabely zodpovědné za podsvícení displeje. Piny se stálou hodnotou napětí bylo možné určit pomocí proměření multimetrem. Po těchto eliminacích zbyly tři piny, které byly připojeny k osciloskopu a změřeny. Zaznamenání těchto signálů lze vidět na obrázku 4.5. Počet a průběh těchto signálů vedl k domněnce, že komunikace probíhá pomocí rozhraní SPI. Signál, jehož stav se měnil pravidelně se stejnou frekvencí, byl určen jako CLK signál (modrý signál na obrázku 4.5b). Další signál, který byl též periodický, ovšem s menší frekvencí byl identifikován jako CS signál (červený signál na obrázku 4.5b). Poslední neidentifikovaný pin byl tedy pravděpodobně pin přenášející data.

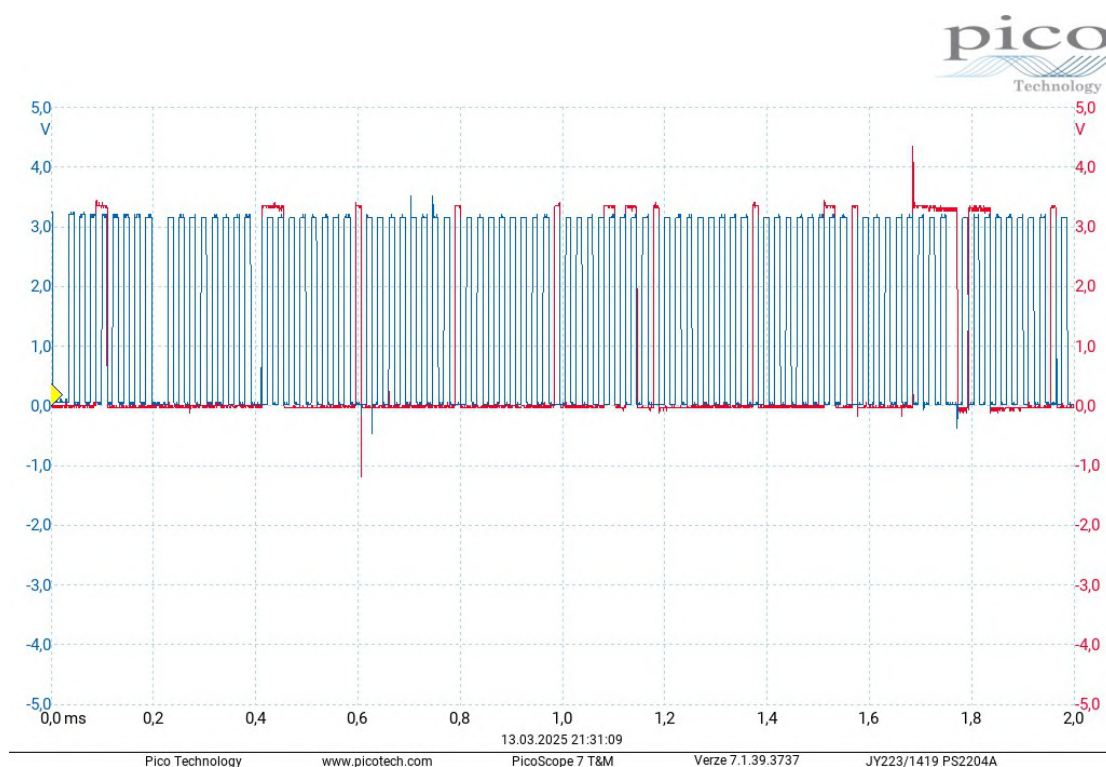
Následovalo dekodování těchto dat. I když identifikace probíhala na softwaru PicoScope 7, který disponuje vestavěnou funkcí na dekodování sériových komunikací, s těmito daty si poradit nedokázal. Následovalo tedy připojení sběrnice LCD displeje k pinům vývojové desky Arduino UNO určených pro sériové komunikace. Arduino má vestavěné knihovny a funkce pro přímé dekodování příchozí komunikace, ani tento postup ovšem nepřinesl toužené výsledky. Poslední možností bylo připojení GPIO pinů Arduina a zaznamenání binárních hodnot přenášejících informace.

Použitý LCD displej, který lze vidět na obrázku 4.4c je segmentový. Číselné hodnoty naměřených vzdáleností jsou zobrazovány ve čtyřech řádcích, spodní řádek nám udává poslední změřenou hodnotu, na dalších řádcích jsou pak uchovávány předchozí hodnoty. Dále se na displeji zobrazují jednotky a další nastavení měřidla. K zachycení dat bylo provedeno měření vzdálenosti, hodnota se zobrazila na displeji, Arduino zaznamenalo komunikaci, která byla následně zpracována v Matlabu. Po prohledání dat bylo zjištěno, že každá zpráva pro displej se skládá ze 4 paketů, který každý obsahoval 17 bitů. Myšlenka

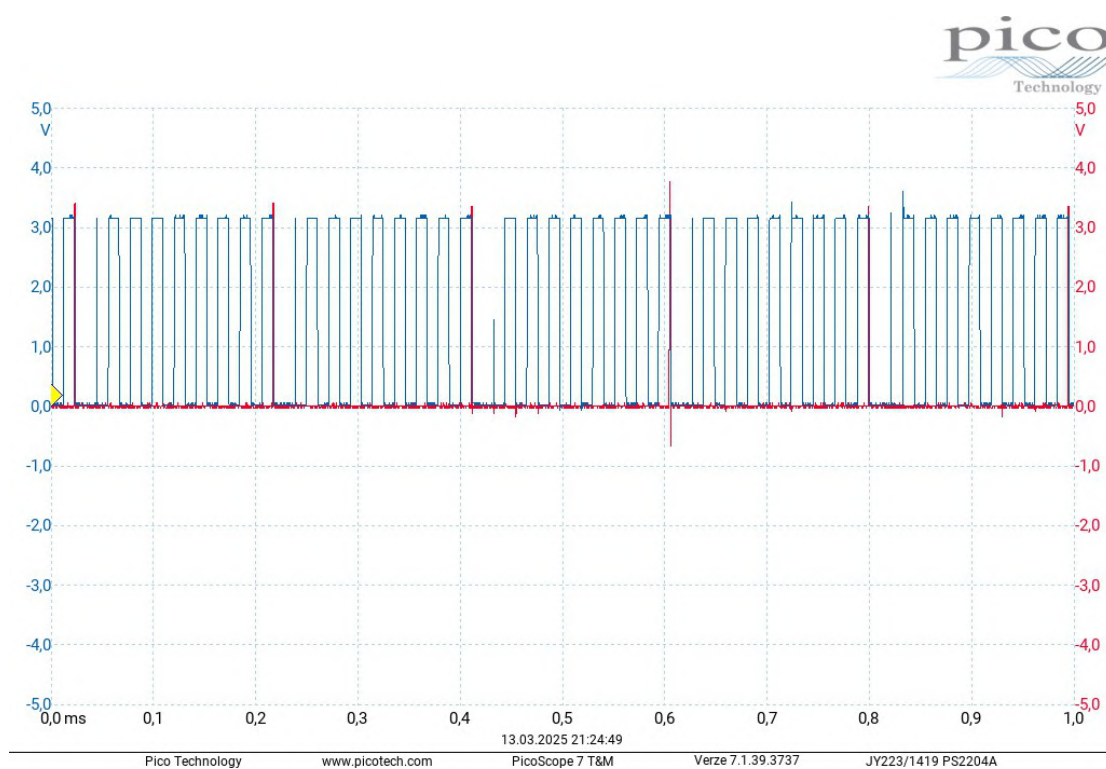
pro rozluštění byla taková, že se provede několik měření vzdálenosti a vyobrazené číslo na displeji se zaznamená jako soubor binárních dat. Poté by bylo možné tyto měření porovnat mezi sebou a identifikovat, které bity jsou zodpovědné za reprezentaci aktuální měřené hodnoty. Tato myšlenka byla správná, opravdu bylo jednoznačně možné určit, že aktuální naměřená hodnota se skládá ze dvou bitů v každém opakování, celkově tedy ze čtyř dvojic bitů. Bohužel i po náročném a zdlouhavém měření různých hodnot se nepodařilo přijít na systém kódování zobrazených číslic, co hůř, několik různých čísel mělo stejnou bitovou reprezentaci. Po tomto neúspěchu bylo experimentování s využitím elektroniky laserového dálkoměru opuštěno.

1000	1000	1000	1000
0	0	1	1
1100000	1100000	1100000	1100000
10000000	10000000	10000000	10000000
10000000	10000000	10000000	10000000
10000101	10000011	10000001	10000000
10000000	10000000	10000000	10000000
10000001	10000001	10000001	10100001
10000000	10000000	11100000	10000000
10000000	10000000	10000000	10000000
10000011	10000010	11100010	10000011
11111000	10101000	10110000	11110000
10000000	10000000	10000000	10110000
10000000	10000000	10000000	10000000
10000000	10000000	10100000	10000011
10000000	10000000	10000000	10000000
10000000	10000000	10000000	10000000

Tabulka 4.2: Ukázka zaznamenaných hodnoty na vstupu do displeje při zobrazení čísla 1,000



(a) CLK a DATA pin



(b) CS a CLK pin

Obrázek 4.5: Výstupy sběrnice LCD displeje

4.4 Modul laserového měřiče vzdálenosti

Po otestování všech zmíněných senzorů a součástek bylo jasné, jaké vlastnosti by senzor měl mít. Požadavky byly následující:

- Vyzařované záření ve viditelném spektru
- Jasná dokumentace
- Optická metoda měření délky
- Nízká pořizovací cena
- Velikost v řádech centimetrů

Po předchozím nezdaru následovalo náročné hledání takového senzoru. Toto hledání se však podařilo a byl vybrán a pořízen modul LRF20M3PS.

Tento modul určený přímo pro měření vzdálenosti pomocí laserového paprsku od firmy IADIY, která se zabývá výrobou a návrhem laserů, optických soustav, kamer a elektroniky spojené s těmito výrobky, se jevil jako ideální pro použití v této práci. Jedná se o senzor měřící vzdálenost pomocí principu fázového posunu. Pro komunikaci s počítačem je využívána TTL sériová komunikace, přesněji se jedná o sériový port UART. Výrobce garantuje měření na milimetry s přesností ± 2 mm. Tedy díky pořizovací ceně \$ 25, osazenému laseru s vlnovou délkou 650 nm, odpovídající červené barvě a velikosti $21 \times 11 \times 26$ mm, bylo rozhodnuto o konstrukci měřicího zařízení využívajícího tento senzor.[30]



Obrázek 4.6: Senzor LRF20M3PS převzato z [31]

5 Použitá elektronika

V této kapitole nalezneme popsané jednotlivé elektronické součásti, využitě při realizaci této práce. Přiblížíme si zde roli jednotlivých periférií a jejich zapojení.

5.1 Mikrokontrolér

Jádrem celé této práce je samozřejmě řídicí jednotka v podobě mikrokontroléru. Ten má na starost jak funkčnost celého zařízení, tím že ovládá jednotlivá připojená zařízení, tak komunikaci s počítačem, ať už se jedná o přijímání příkazů či naopak zasílání naměřených dat řídicímu softwaru.

Téměř od začátku tohoto tisíciletí jsou mikrokontroléry velmi dobře dostupné a levné, což zapříčinilo jejich rozšíření z průmyslových aplikací i k lajkům a kutilům. Díky tomu je dnes na trhu obrovské množství jednodeskových mikrokontrolerů, disponujících všemi potřebnými perifériemi a vlastnostmi pro zakomponování téměř do jakéhokoliv domácího projektu. Jedním z nejznámějších zástupců těchto jednotek je Arduino, které se vyrábí v několika provedeních.

Požadavky na výkon integrovaného obvodu pro obsluhu této práce jsou velmi nízké, obzvláště k technologickým možnostem dnešní doby. Adepti pro použití v zařízení tedy nebyli hodnoceni podle výkonu či paměti. Místo toho byl zřetel brán primárně na počet GPIO pinů, možnost zabudování celé jednotky do DPS a také nízkou pořizovací cenu.

Všechny tyto požadavky splňuje jednodeskový počítač Arduino Nano, případně jeho klon, s pořizovací cenou pod 200 Kč. Arduino disponuje 8-bitovým mikrokontrolérem ATmega328P, čtrnácti I/O digitálními piny pro připojení potřebných periférií, i napájecími piny s hladinami napětí 3,3 V a 5 V. Deska má integrovaný miniUSB-B konektor a programátor pro snadné připojení a programování přes PC. Další skvělou vlastností je způsob vyvedení všech pinů, díky čemuž lze celé zařízení jednoduše umístit na desku plošných spojů a připájet jej. Jedná se tedy o opravdu ideální kontrolér pro využití v tomto projektu.



Obrázek 5.1: Arduino NANO, převzato z [32]

5.2 Měřicí senzor

V pořadí druhou nejzásadnější elektronickou součástí je již zmíněný měřicí senzor. Proces jeho výběru a základní vlastnosti jsme si již přiblížili v kapitole 4, nyní se tedy zaměříme na detailnější popis tohoto zařízení.

Laserový měřič vzdálenosti LRF20M3PS je laserový dálkoměr ze série PS od výrobce IADAY. Zkratka PS značí Precise Standard, jedná se tedy o dálkoměry, které jsou díky technologii fázového posunu schopny poskytnout uživateli milimetrovou přesnost. Tyto výrobky nejsou doporučeny k používání ve venkovních podmínkách. Námi zvolený senzor je schopen měřit v rozmezí 4,5 cm až 20 m, s garantovanou přesností ± 2 mm do vzdálenosti 10 m. Laser využitý k měření vzdálenosti má červenou barvu s vlnovou délkou 650 nm. Velikost dálkoměru je $21 \times 11 \times 26$ mm, váha je pouhých 6 g.

Celý modul komunikuje pomocí sběrnice UART s 3 V TTL logikou. Připojení k řídicímu počítači je umožněno čtveřicí pinů (Tx a Rx pro komunikaci a dvěma napájecími piny), či pomocí USB redukce. Modul je napájen 3,3 V a odebírá si proud 150 mA. Modul nabízí 2 měřicí módy, jednotlivé měření a kontinuální měření o 100 vzorcích. Dále je možné podle libosti zapínat či vypínat laser.

Ovládání senzoru je možno dvěma způsoby. Prvním je stažení aplikace přímo od výrobce, kde lze vybrat model dálkoměru a komunikační port, ke kterému je připojen. Aplikace má přívětivé a snadno pochopitelné grafické rozhraní, kde jde jednoduše provádět měření i sledovat naměřené hodnoty.

Druhý způsob je pro nás daleko zajímavější. Jedná se o přímé zasílání a přijímání ASCII příkazů pomocí UART sběrnice. Každý blok komunikace se skládá z hlavičky, délky zprávy, příkazu, dat, kontrolního součtu a terminátoru. Příkazy, které můžeme odeslat senzoru, máme čtyři a to:

Příkaz	Funkce
21	Jednotlivé měření
24	Provedení 100 měření
26	Zapnutí/vypnutí laseru
33	Test komunikace

Tabulka 5.1: Tabulka příkazů senzoru LRF20M3PS

Po přijetí příkazu k provedení měření a jeho úspěšném vykonání zasílá dálkoměr dva bloky komunikace. První je vždy konstantní, jedná se o kód odpovědi. Následný blok již obsahuje hodnotu naměřené vzdálenosti v milimetrech. Začátek i konec zprávy je určen příslušnými znaky. Příchozí zpráva může vypadat například takto:

\$00023335&\$0006210000043061&.

Symbol \$ je hlavička, což znamená, že je vždy prvním znakem v komunikaci. Znak & je zase terminátor, který nám oznamuje, že došlo k ukončení přenosu. Je tedy vidět, že přijatá zpráva se skládá ze dvou částí. Ta první, tedy \$00023335& je kód odpovědi, pro nás je podstatnější druhá část, která obsahuje naměřené údaje. Jednotlivé dílčí části jsou vysvětleny v tabulce 5.2.

5.4 Motory

Abychom dokázali naskenovat celou rotační plochu, je potřeba se pohybovat alespoň ve dvou osách, jak je tomu například u klasických soustruhů. Jedna osa pohybu směřuje v ose rotace a umožňuje pohyb do a z tělesa. Druhá osa je rotační, která zaručuje přístup k celému obvodu tělesa.

Víme tedy, že pro tyto dva pohyby budeme potřebovat nejméně dva motory. Dále známe požadavky na tyto motory. Nebude vyžadován dlouhý kontinuální pohyb ani vysoká rychlost otáček. Daleko větší důraz je kladen na přesnost, polohové řízení a případně moment motoru. Díky těmto požadavkům můžeme náš výběr zúžit na krokové motory a servomotory, které nabízejí právě požadované vlastnosti.

V zařízení jsou použity dva krokové motory NEMA 17 17HS3401. Vybrány byly na základě dobré dostupnosti, rozumné pořizovací ceně, snadné obsluhy a řízení a hodnoty momentu. Motory typu NEMA 17 jsou často používány a montovány do mnoha CNC zařízení, jako jsou 3D tiskárny či frézky, což jen potvrzuje jejich vhodnost do této práce. Model 17HS3401 nabízí moment 0.28 Nm, který je dostatečný pro posun měřicí sondy i pro rotaci měřených těles. Jedná se o bipolární krokový motor s rozlišením 200 kroků na otáčku, tedy s krokem o velikosti $1,8^\circ$. Jmenovitý proud motoru je 1,3 A a napájecí napětí může být v rozmezí 12 – 24 V.



Obrázek 5.3: NEMA 17, převzato z [34]

5.5 Drivery

Krokové motory nelze řídit napřímo z mikrokontrolerů, vždy je potřeba použít odpovídající driver. K ovládání krokových motorů NEMA 17 je často používán driver A4988 nebo jeho klony. Tento driver byl tedy použit i v této práci.

Jedná se o velice levný a dostupný čip, který se těší velké oblibě hlavně mezi domácími kutily. Driver je mezistupeň mezi mikrokontrolérem a motorem, přijímá pokyny od řídicí elektroniky a na základě nich vysílá signály do vinutí motoru. Zároveň je schopný regulovat napětí a proud vstupující do motoru.

Driver A4988 má celkem 16 pinů, jak je vyobrazeno na obrázku 5.4b. Na jedné straně najdeme napájecí piny řídicích obvodů, využívajících standardní hladiny 3.3 V a napájecí piny pro samotný motor. Ty jsou dimenzovány na napětí 8 – 35 V. Zbývající čtyři piny slouží pro připojení obou vinutí bipolárního motoru. Na druhé straně modulu nalezneme řídicí piny, přes které driver získává příkazy od mikrokontroleru. Pin ENABLE uvádí

motor do provozu. Na pinech MS1, MS2 a MS3 lze nastavit tzv. microstepping, tedy rozdělení jednoho kroku motoru na menší dílky. Nastavením jednotlivých hodnot na těchto pinech lze docílit full-stepu a 1/2, 1/4, 1/8, a 1/16 kroku. To znamená, že driver dokáže zvýšit rozlišení motoru NEMA 17 na 3200 kroků za otáčku, tedy otočit hřídel motoru při jednom kroku o 0,1125°. Piny SLEEP a RESET slouží k obsluze vnitřních obvodů driveru. První zmíněný vypíná či zapíná čip a jeho periferie, druhý zase vrací vše do původního nastavení. Poslední dva piny poté slouží přímo k ovládání motoru. Signál zaslaný do pinu DIR nastavuje směr otáčení. A příkazy o vykonání otáčky jsou zase přijímány pinem STEP.

Na obrázku 5.4a lze vidět ve spodní části driveru šroubek sloužící k nastavení výstupního proudu, který je dodáván motoru. Aby se motor dokázal správně pohybovat a měl požadovaný moment, potřebuje mít ve vinutích dostatečný proud. Naopak, pokud bude proud příliš velký, bude docházet k přehřívání vinutí, díky čemuž se může motor rychleji opotřebovávat či se úplně spálit. Nastavení výstupního proudu je možno pomocí referenčního napětí, přivedeného právě na tento šroub. Otáčením šroubu na jednu či druhou stranu lze referenční napětí snižovat či zvětšovat. Referenční napětí se řídí touto rovnicí:

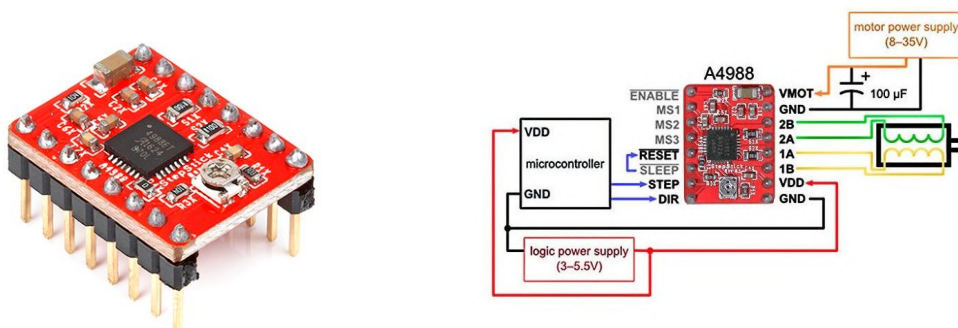
$$U_{ref} = I_{max} \cdot 8 \cdot R_s. \quad (5.2)$$

Kde,

- U_{ref} je napětí naměřené na šroubu
- I_{max} je maximální výstupní proud
- R_s je odpor bočníku [35]

V našem případě je odpor bočníku $R_s = 0.1 \Omega$ a požadovaná hodnota proudu je $I_{max} = 1 \text{ A}$. Po dosazení do rovnice nám tedy vychází, že napětí změřené na šroubku musí být:

$$U_{ref} = 1 \cdot 8 \cdot 0,1 = 0.8 \text{ V}. \quad (5.3)$$



(a) Modul driveru

(b) Pinout driveru

Obrázek 5.4: Driver A4988, převzato z [36]

5.6 Napájení

Měřicí zařízení je samozřejmě potřeba napájet. Nacházejí se zde jak logické obvody, tak zařízení s vyšším výkonem. Je tedy nutné uvědomit si rozdílné požadavky těchto periférií a brát zřetel na správné úrovně napětí.

Napájení řídicí a logické části je vyřešeno velmi jednoduše. Jelikož k obsluze zařízení je nutné mít jej připojené k PC či notebooku přes USB port, můžeme k napájení těchto částí zařízení využít právě USB. Arduino je primárně uzpůsobeno pro napájení tímto způsobem a má zároveň výstupní piny s napájecí hladinou 3,3 i 5 V, které umožňují zapojení senzoru, driverů i převodníku. Ani jedna z těchto součástí není nikterak energeticky náročná, proto stačí jejich napájecí piny připojit ke správným pinům mikrokontroléru a budou správně fungovat.

Zbývá problém s napájením motorů. Víme, že každý z motorů musí mít proud alespoň 1 A a že vstup driveru A4988 si poradí s napětím v hodnotách 8 – 35 V. U zařízení není předpokládáno, že by bylo používáno mimo vnitřní prostory nebo prostory bez přístupu k elektrické síti. Proto byl zvolen síťový napájecí adaptér 12V/3A. Jedná se o univerzální adaptér s ochranou proti přetížení, zkratu i vysokému napětí. Konektor adaptéru je center-positive s rozměry 5,5 × 2,1 mm.

5.7 DPS

Veškerou elektroniku, kterou jsme si právě popsali, je však potřeba správně pozapojovat. U všech jednotlivých dílů je potřeba zajistit správné napájení i připojení logických pinů pro správnou funkci všech periférií. Při návrhu a prototypování práce si vystačíme například pouze s nepáživým polem a propojovacími kabely, finální výrobek si však žádá trvalejší řešení, které bude daleko přehlednější a méně náchylné k poškození při neopatrné manipulaci.

Zde přichází na řadu deska plošných spojů. Jak je již naznačeno, deska bude sloužit jako adaptér pro připojení všech součástí do jednoho funkčního celku. Deska je navržena tak, aby bylo možné připájet na ni mikrokontrolér, logický převodník, drivery, napájecí adaptér i konektory pro připojení motorů a senzoru.

První se podíváme na jádro celé desky i vlastně zařízení samotného, a to na jednodeskový mikrokontroler Arduino Nano. Ten se nachází uprostřed celé desky a je natočen tak, aby bylo možné jednoduše připojit miniUSB kabel. Z celkových jedenácti I/O digitálních pinů je jich pro připojení periférií využito osm. Tři jsou použity pro obsluhu prvního driveru A4988, další tři pro druhý driver a poslední 2 umožňují komunikaci s logickým převodníkem ST1167. Dále jsou využity obě hladiny napájení, kterými kontroler disponuje, každá má vlastní pin. Nižší hladina, tedy 3,3 V slouží k napájení senzoru a jedné strany převodníku logických hodnot. Druhá napájecí hladina s 5 V zase poskytuje napájení pro oba drivery a druhou stranu převodníku ST1167. Posledním připojeným pinem je samozřejmě uzemnění.

Význam	Hodnota
PIN 2	DIRECTION 1
PIN 3	STEP 1
PIN 4	ENABLE 1
PIN 5	ENABLE 2
PIN 6	STEP 2
PIN 7	DIRECTION 2
PIN 8	Rx
PIN 9	Tx

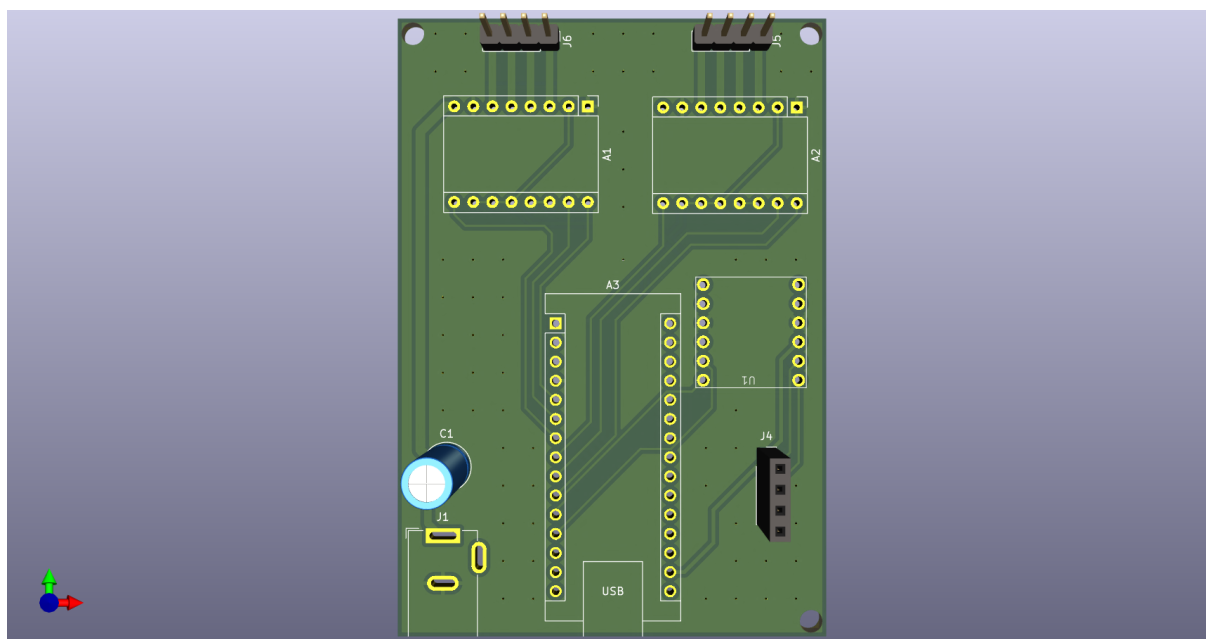
Tabulka 5.3: Zapojení GPIO pinů Arduino Nano

Napravo od desky Arduino se nachází převodník ST1167 a výstupní konektor pro připojení senzoru LRF20M3PS. Strana převodníku s 5 V TTL logikou je připojena ke dvěma pinům Arduina, které fungují jako Tx a Rx piny. Na této straně je také připojen GND a napájecí pin. Z druhé strany je převodník zapojen ve své podstatě stejně. Napájecí a GND piny jsou připojeny, jak je tomu na druhé straně, a výstup a vstup převodníku je spojen s konektorem pro připojení laserového dálkoměru. Ten má celkem čtyři piny, dva již zmíněné Tx a Rx sloužící pro přijímání a odesílání dat, jeden pro připojení senzoru k zemi a jeden pro napájení pomocí 3,3 V. Napájecí pin je spojen jak s Arduinem, tak s převodníkem.

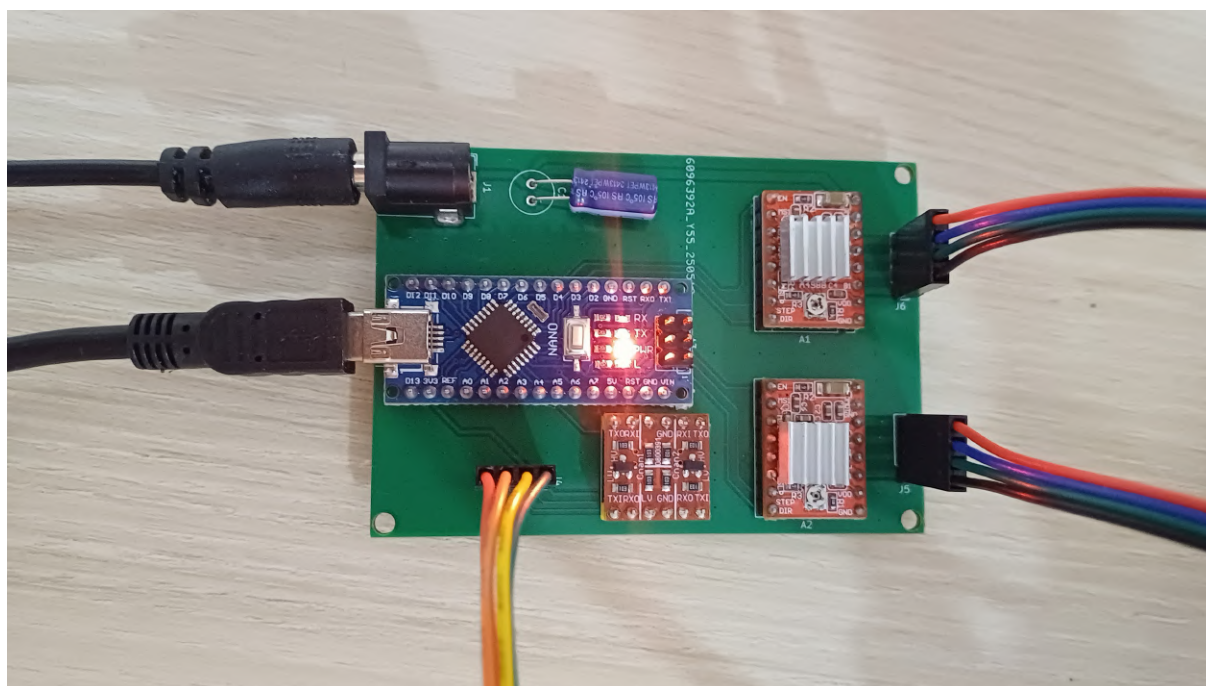
Přesuneme se k hornímu okraji desky. Zde jsou umístěny oba drivery A4988. Zapojení jednotlivých řídicích pinů lze vyčíst v tabulce 5.3. Piny RESET a SLEEP jsou propojeny mezi sebou, jak je tomu vidět i na schématu 5.4b. Stejně tak jsou vzájemně připojeny piny MS1, MS2, MS3 a VDD. Ty jsou ovšem ještě připojeny i k hladině napájení 5 V. Díky tomu má driver přístup k elektrické energii a může tedy fungovat a piny zodpovědné za microstepping jsou nastaveny na nejmenší možný krok. V rozích poté nalezneme piny pro napájení motorů samotných, ty jsou samozřejmě připojeny ke konektoru pro 12 V zdroj. Země výkonové i logické elektroniky jsou vzájemně propojeny. Zbývající 4 piny na každém driveru jsou vyvedeny do konektorů, ke kterým lze pomocí kabelu připojit motory NEMA 17.

Na levém okraji vedle mikrokontroleru nalezneme konektor pro připojení 12 V zdroje pro napájení motorů. Hned u něj se nachází filtrační kondenzátor pro vyhlazení šumu napětí a vyfiltrování případných napěťových špiček.

Celá DPS je navržena se dvěma vrstvami mědi. Naprostá většina stop je ve vrchní vrstvě, spodní slouží hlavně k rozvedení 5 V napájení a připojení jednoho driveru krokového motoru k 12 V. V obou vrstvách jsou dále rozlity velké plochy, připojené ke všem zemním pinům. Tyto vrstvy jsou navzájem propojeny mnoha propojovacími otvory, které zabraňují, aby se tyto vodivé desky chovaly jako velký kondenzátor.



Obrázek 5.5: Návrh propojovací DPS



Obrázek 5.6: Zapojená deska plošných spojů

6 Konstrukce zařízení

Všechny již zmíněné komponenty, které byly vybrány pro realizaci této práce, je potřeba i seskládat do jednoho zařízení. Z minulé kapitoly víme, že máme vyřešené mechanické pospojování řídicí elektroniky pomocí navržené DPS. Zbývá tedy dořešit zejména umístění motorů a navržení mechanismu pro pohyb sondy a konstrukci pro uchycení senzoru i zrcadla. Nutno podotknout, že cílem této práce je pouze vytvoření zařízení pro potvrzení funkčnosti konceptu, u celé konstrukce se tedy počítalo s výrobou dílů pomocí 3D tisku doplněných o běžně dostupné díly a spojovací materiály. Díly byly vymodelovány v programu Autodesk Inventor.

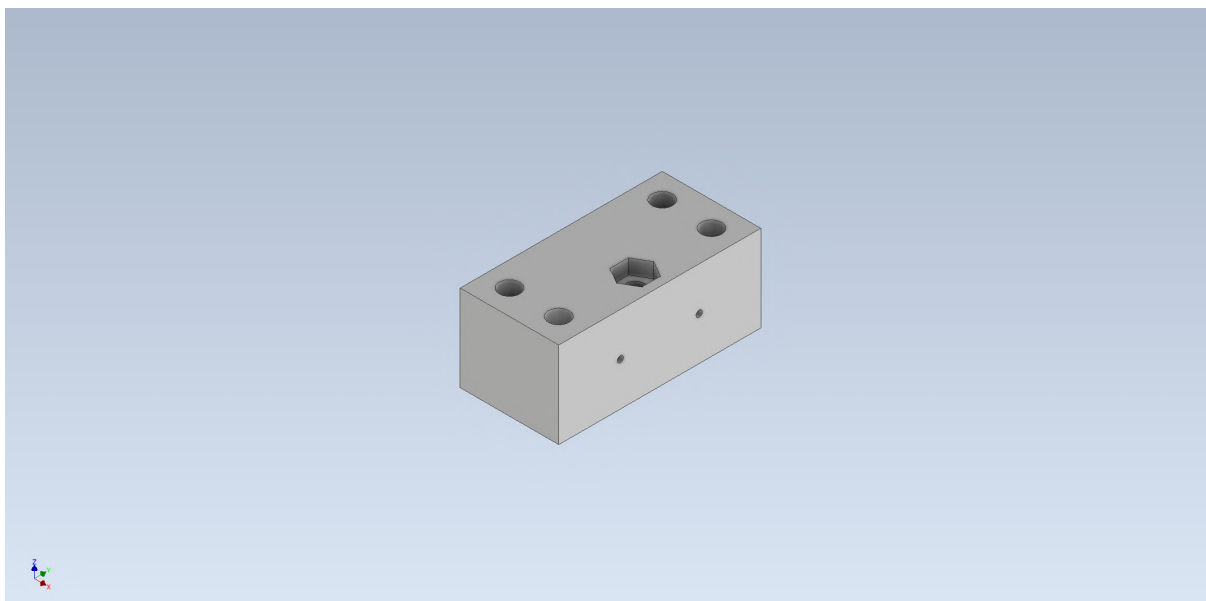
6.1 Pojezd sondy

Pravděpodobně nejnáročnějším konstrukčním úkolem bylo navržení systému pro pohyb mezi jednotlivými vrstvami skenování. Cílem tedy bylo převedení rotačního pohybu krokového motoru na pohyb lineární. Tento pohyb pak může vykonávat buď sonda, nebo celé zkoumané těleso. Tak jako tak by došlo k relativnímu pohybu mezi skenovacím zařízením a skenovaným tělesem, díky čemuž by bylo možné po kružnicích naskenovat celý jeho povrch.

Nakonec byla vybrána varianta, která počítá s pohybem sondy. Toto řešení se jeví jako jednodušší na provedení. Pokud by vertikální pohyb mělo provádět měřené těleso, bylo by nutné sestavit mechanismus, který by kombinoval tento pohyb s pohybem rotačním. Rotace nám umožní naskenovat celý obvod povrchu otvoru. Tento rotační pohyb bude vykonávat skenované těleso, jedná se totiž o jednodušší konstrukční řešení, než navrhovat způsob, jakým umožnit rotaci sondy zařízení.

Finální mechanismus využívá k převedení rotace hřídele motoru na vertikální pohyb měřící sondy závitové tyče, vodících tyčí a vozíčku. Vozíček má tvar kváдру s rozměry $82 \times 35 \times 40$ mm. Skrz celý objem tělesa prochází pět děr. Čtyři blíže ke krajům mají průměr 8 mm a procházejí jimi vodící hliníkové tyče. Ty zabráňují rotaci celého vozíčku při otáčení závitové tyče a stabilizují celý mechanismus. Prostřední dírou, také s průměrem 8 mm, prochází tyč závitová, ovšem s rozdílem, že na spodní straně vozíčku je šestihranný otvor, do kterého je nasazena matice M8 s límcem. Do jejího závitu je našroubována závitová tyč M8, při otáčení této tyče tak dochází díky vedení závitu k lineárnímu posunu vozíčku.

K dodatečnému zvýšení tuhosti celého pojezdového systému, zejména proti deformaci krutem při otáčení závitové tyče, je ještě ke všem čtyřem vodícím tyčím připevněn na horním konci spojovací díl. Ten svým tvarem i rozložením v podstatě odpovídá pojezdu, s rozdílem, že pouze otvor pro závitovou tyč je průchozí. Ostatní čtyři díry jsou hluboké 20 mm, jejich dna slouží k uchycení spojovacího dílu na svém místě.



Obrázek 6.1: Vozíček

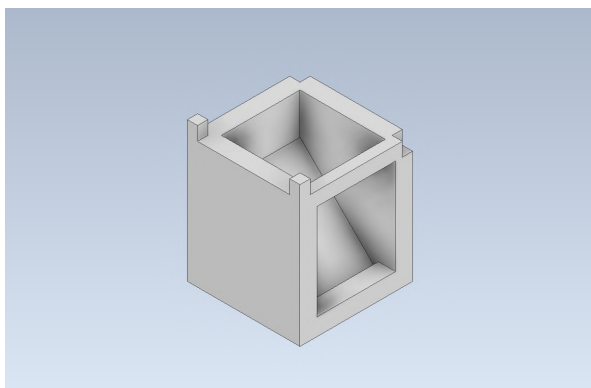
6.2 Měřicí sonda

Nyní je potřeba vytvořit jak sondu samotnou, tak i způsob, kterým bude uchycena k vozíčku umožňující její pohyb. Toho je docíleno pomocí tří separátních dílů, které po seskládání lze připojit k pojízdnému mechanismu.

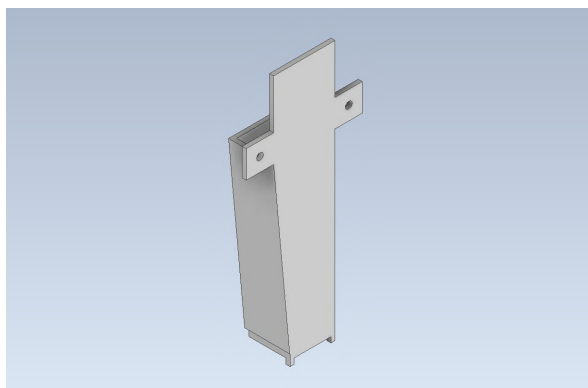
Začneme dílem, kterým je sonda spojena s pojezdem. Jak lze vidět na obrázku 6.3, jedná se o jakousi hřídel s obdélníkovým průřezem s místem pro uchycení měřícího senzoru na jedné straně a s úchyty pro šrouby na straně druhé. Celá sestava sondy je uchycena k pojízdnému vozíčku pomocí dvojice šroubů M3. K uchycení laserového dálkoměru do sestavy je využito jeho tvaru a konstrukce. Na obou bočních stranách modulu jsou výstupky s výškou 1 mm. V bocích adaptéru jsou proto vytvořeny lišty o stejných rozměrech, jakých jsou tyto výstupky. Lze tedy pohodlně senzor do součásti zasunout a zamezit pohybu ve dvou osách. Proti uvolnění ve směru poslední osy 3D prostoru slouží další díl. K jeho uchycení jsou použity opět dva šrouby M3.

Druhý díl slouží jednak k zabezpečení senzoru proti pohybu, ale hlavně slouží jako uchycení zrcátka, které odráží laserový paprsek a umožňuje nám tedy celé měření. Délka této součásti určuje, jak hluboké otvory lze zařízením měřit. V našem případě je díl navržen na délku 67 mm s lehce se zužujícím profilem. Na jeho konci je pak připevněn poslední díl, který lze jednoduše připevnit. Mechanismus propojení spočívá ve dvou výčnělcích a dvou zářezech umístěných na obou tělesech, které do sebe pasují.

Poslední díl slouží jako držák zrcadla. Použité zrcadlo je klasické, stříbrné 3 mm tlusté, které bylo nařezáno na čtverce s hranou cca 1 cm. Držák má tvar kváдру se čtvercovou podstavou. Místo z jedné ze stěn je otvor, kterým je laser odrážen ven. K nasměrování a umístění zrcadla slouží plocha, která s vodorovnou hladinou svírá úhel 45° .

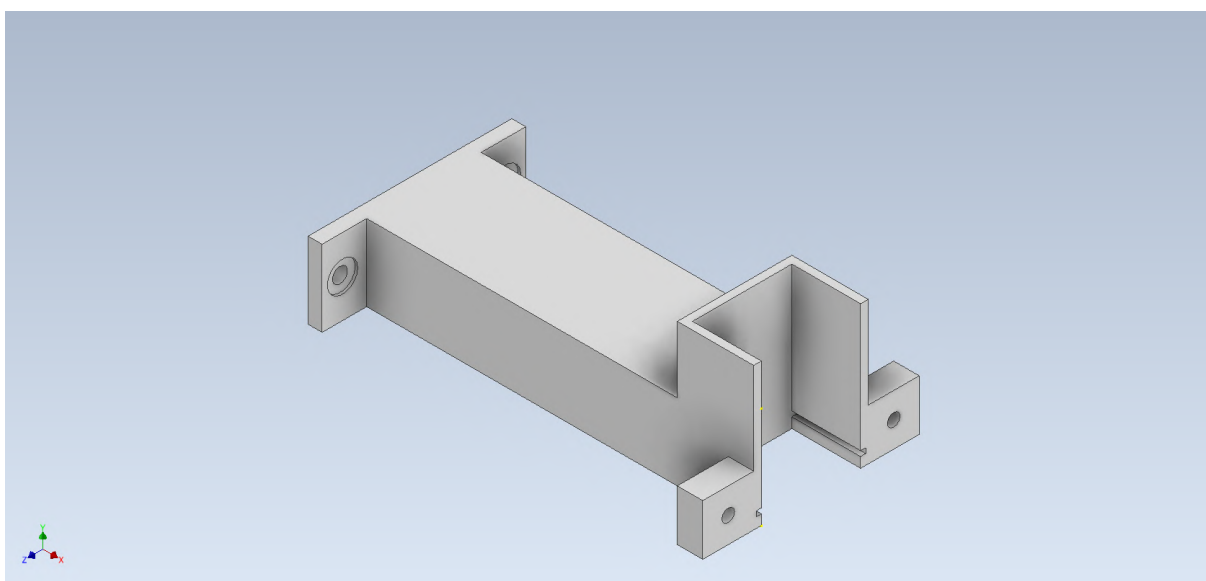


(a) Držák zrcátka



(b) Spojovací díl

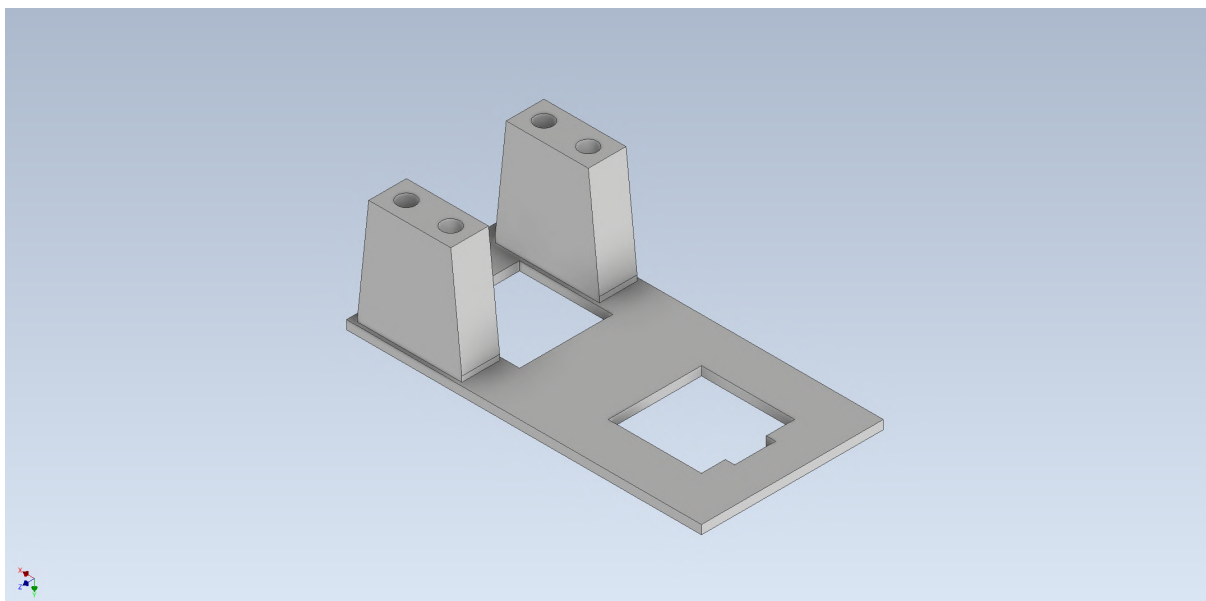
Obrázek 6.2: Sestava měřicí sondy



Obrázek 6.3: Součást pro uchycení senzoru k vozíčku

6.3 Stojan

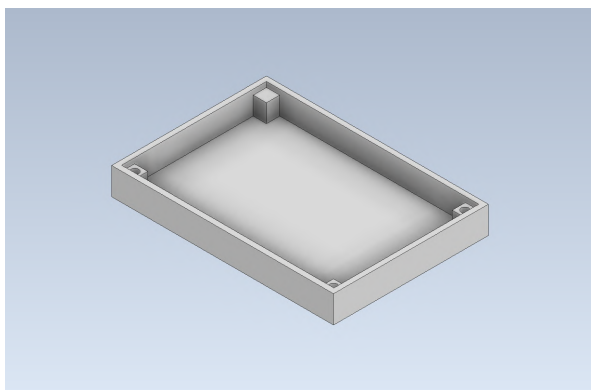
Celý měřicí mechanismus, tedy lineární pojezd a k němu připevněnou sondu, je ovšem potřeba také nějak upevnit k dílu, který zajistí stabilitu celého zařízení. Pro tento účel byl navržen stojan. Jedná se o desku tlustou 4 mm, na které se nacházejí otvory pro umístění obou použitých krokových motorů NEMA 17. Po stranách jednoho z těchto otvorů se nacházejí dva komolé čtyřboké jehlany. Tyto jehlany mají podstavy ve tvaru obdélníků, jsou vysoké 5 cm a slouží jako uchycení vodících tyčí pro mechanismus vertikálního posuvu měřicí sondy. Proto jimi procházejí díry o průměru 8 mm tak, aby do nich bylo možné zasunout použité hliníkové tyče.



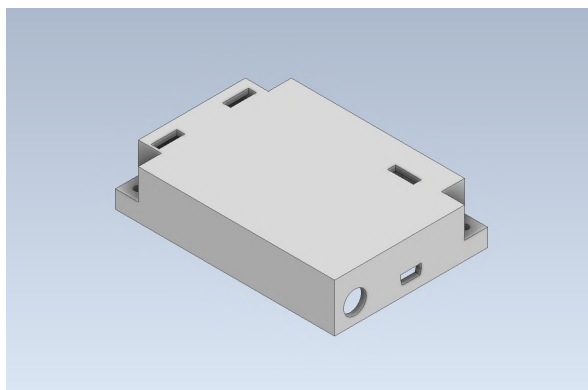
Obrázek 6.4: Stojan zařízení

6.4 Obal na elektroniku

Aby se zamezilo poškození elektroniky zařízení neopatrnou manipulací či vnějšími vlivy, byl vytvořen jednoduchý obal na desku plošných spojů. Obal se skládá ze dvou částí, DPS je usazena ve spodním díle a je přiklopena dílem horním. Vzájemné spojení obou dílů i desky s elektronikou zajišťují tři šrouby M3. Vrchní díl obalu má vývody pro kabely obou motorů i měřicího senzoru a otvory pro připojení napájení a USB kabelu.



(a) Spodní část



(b) Vrchní část

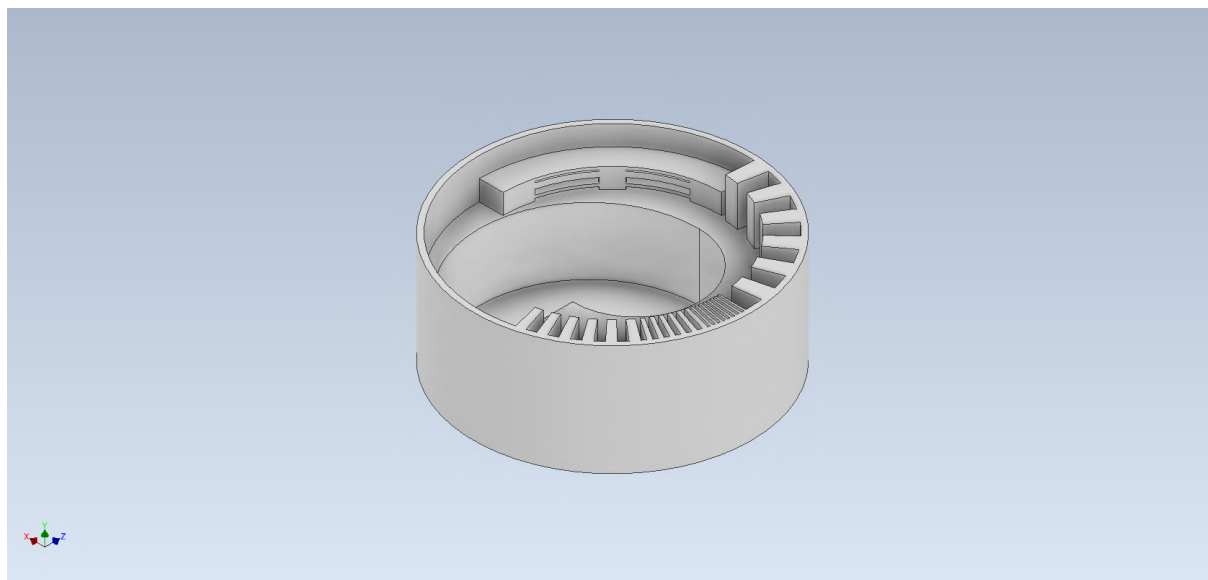
Obrázek 6.5: Obal pro DPS

6.5 Testovací těleso

Testovací těleso slouží ke zjištění celkové funkčnosti měřícího zařízení, jak je požadováno v zadání práce. Jedná se o kruhové těleso s vnějším průměrem 104 mm. Vnitřní tvar tělesa by se dal rozdělit do dvou pater.

První, tedy to nižší, je navrženo, aby otestovalo celkový rozsah měření vzdálenosti a jeho rozlišení. Vnitřní tvar dutiny má tvar ulity, při rotaci se tak plynule mění vzdálenost od středu otáčení v rozsahu od 15 mm do 50 mm.

Povrch druhé části testovacího tělesa je zase zamýšlen pro určení obvodového i vertikálního rozlišení měřícího stroje. Na polovině obvodu se nacházejí žebra o různých tloušťkách. Stejně tak se mění rozměry mezer, které tyto žebra od sebe oddělují. Šířka nejmenšího žebra i mezery odpovídají rozlišení půlky standardního kroku motoru NEMA 17, tedy $0,9^\circ$, největší žebro i mezera zase čtyřnásobku základního kroku motoru. K otestování vertikálního rozlišení je zase vytvořen čtvrtkruhový segment, ve kterém se nachází horizontální obdélníkové otvory s výškami 0,5 mm, 1 mm a 2 mm.



Obrázek 6.6: Testovací těleso

7 Softwarové vybavení zařízení

Softwarové vybavení je důležitou součástí této práce. Právě díky němu dokážeme ovládat jednotlivé části zařízení. Software napasný pro tuto práci by se dal rozdělit do dvou hlavních kategorií. První si představíme kód napsaný pro Arduino v rozhraní Arduino IDE, které vychází z jazyka C++. Následovat bude představení části vytvořené v Matlabu, která zde slouží jako ovládací rozhraní a ke zpracování a uložení naměřených hodnot.

7.1 Arduino IDE

Arduino IDE, neboli Arduino Integrated Development Enviroment, je open-source programovací prostředí umožňující snadné programování desek Arduino. Celé prostředí je uživatelsky přívětivé, disponuje kompilátorem a uploaderem kódu pro mikrokontroler. Velkou výhodou je existence velkého množství knihoven, které zjednodušují práci s různými periferiemi a zařízeními, která lze k desce připojit. Knihovny jsou často též open-source, takže je lze dle libosti do prostředí doinstalovávat.

Nyní se zaměříme na detailní rozbor kódu, který je nahrán v mikrokontroleru Arduino Nano. Tento kód má za úkol přijímat příkazy od uživatele, správně je interpretovat a zasílat uživateli naměřená data. Tento kód je také zodpovědný za správný chod motorů a laserového dálkoměru.

7.1.1 Setup

Před hlavním tělem programu je vždy potřeba provést správné nastavení. Je nutné zavolat použité knihovny, deklarovat proměnné a správně nastavit sériové komunikace.

V našem případě je použita pouze jedna knihovna `AltSoftSerial.h`, která umožňuje použít Pin 8 a pin 9 jako Rx a Tx piny pro UART komunikaci. Arduino Nano má sice přímo deklarované Rx a Tx piny, ty jsou však spojeny s USB konektorem, po kterém Arduino komunikuje s připojeným počítačem. Tuto komunikaci budeme samozřejmě využívat pro řízení celého projektu, je proto nutno vytvořit i druhý kanál pro komunikaci s laserovým senzorem.

Následuje definování pinů pro ovládání funkcí driveru A4988. Funkce jednotlivých pinů je zobrazena v tabulce 5.3. Poté následuje deklarace všech použitých proměnných. Není jich mnoho, nalezneme zde několik proměnných datového typu `string`, `integer`, `char` a `long`.

Poté už následuje blok programu `void setup ()`, ve kterém je potřeba nastavit baud-rate komunikace jak mezi počítačem a Arduinem, tak mezi Arduinem a senzorem LRF20M3PS. Obě hodnoty jsou identické a to 115200 Bd. Závěrem setupu nastavíme všechny piny pro obsluhu driverů krokových motorů jako výstupní.

7.1.2 Hlavní smyčka

V bloku `void loop ()` je zapsán hlavní řídicí kód měřicího zařízení. Ihned po inicializaci programu jsou oba motory uvedeny do vypnutého stavu. Poté následuje hlavní `while` cyklus, který se spouští v momentě, kdy program zaznamená příchozí data v sériové komunikaci mezi mikrokontrolérem a PC. Uživatel může řídicí jednotce zaslat jeden z pěti příkazů, které nalezneme v tabulce 7.1.

Příkaz	Vysvětlení
M1:Rev	Počet kroků pro motor 1
M2:Rev	Počet kroků pro motor 2
S1	Provedení měření
S2	Zapnutí laseru
S3	Vypnutí laseru

Tabulka 7.1: Tabulka příkazů

V textovém příkazu potřebujeme programu předat informaci o tom, které připojené zařízení je potřeba spustit (motor, senzor), a v jakém režimu má pracovat. U motoru potřebujeme znát počet kroků a směr otáčení, u senzoru zase měřicí mód. Zpracování příchozí zprávy je provedeno po jednotlivých znacích. Zároveň dochází ke kontrole příchozích znaků. Dokud program nenarazí na znak dvojtečky (':'), která funguje jako oddělovač dvou částí příkazů, skládá příchozí znaky do jedné proměnné `String Device`. Pokud dojde k přijetí dvojtečky, následující část zprávy je uložena do proměnné `String StepStr`. Ta je ihned převedena do datového typu `integer`, jelikož obsahuje numerický údaj o počtu kroků, které má daný motor vykonat. Směr otáčení je reprezentován znaménkem.

Následující příkazy `if()...else if()` podle proměnné `Device` spouští bloky kódu pro příslušné zařízení. U motorů první dochází k jejich aktivaci pomocí pinu `ENABLE`. Poté je podle znaménka uloženého v `Step` nastaven `DIR` pin a následně je vykonán požadovaný počet kroků motoru.

U měřicího senzoru můžeme požadovat jeden ze tří módů a to zapnutí či vypnutí laseru a provedení měření. Podle přijatého příkazu od počítače posílá kontroler textový řetězec obsahující příkaz pro senzor. Podobu této zprávy známe z kapitoly 5. Po odeslání příkazu je třeba chvíli vyčkat, aby mohlo proběhnout celé měření. Následuje příjem zprávy od senzoru, který je taktéž přijímán po jednotlivých znacích. I zde dochází ke kontrole příchozích znaků, tentokrát však hledáme znak '&', který funguje jako terminátor. Díky němu víme, kdy je ukončeno vysílání celé zprávy, kterou tedy můžeme uložit do proměnné `Distance` a zaslat ji do počítače.

Listing 7.1: Otáčení krokovým motorem

```

if (Device == "M1"){
    digitalWrite(ENBL_PIN1, LOW);          //Enable motor
    if (Step>0){
        digitalWrite(DIR_PIN1, HIGH);}    // Set direction

    else if (Step<0){
        digitalWrite(DIR_PIN1, LOW);      // Set direction
        Step = Step*-1;}

    for (int i = 0; i < Step; i++) {      // 3200 steps = 1 full
                                          //revolution

        digitalWrite(STEP_PIN1, HIGH);
        delayMicroseconds(500);
        digitalWrite(STEP_PIN1, LOW);
        delayMicroseconds(500);}
}

```

Listing 7.2: Provedení měření

```

else if(Device == "S1") {
    LaserSerial.print("$00022123&");      //Measure command
    unsigned long startTime = millis();    //Timing response
    String Distance = "";

    while (millis() - startTime < 1000){

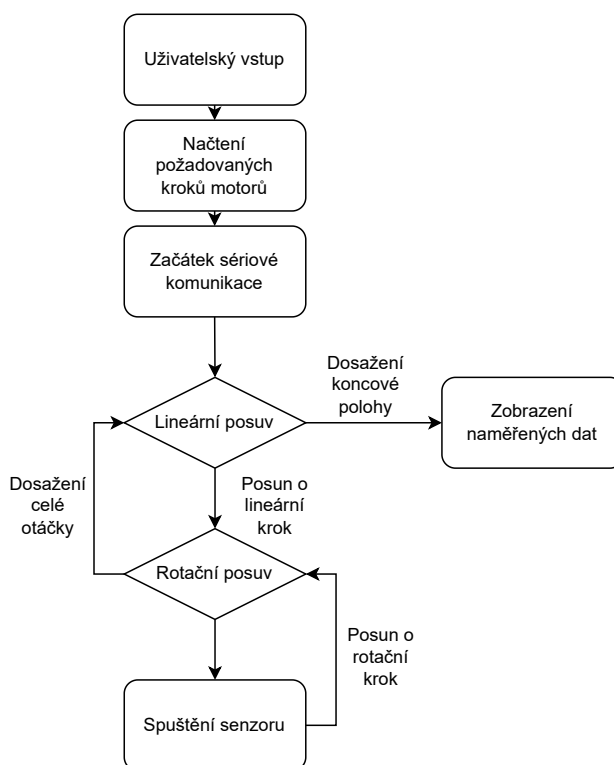
        while(LaserSerial.available()) {    //Reading incoming chars
            c = LaserSerial.read();
            Distance += c;

            if (c == '&') {                  //Find terminator
                Serial.println(Distance);    //Print each part on its
                delay(10);                  //own line
                Distance = ""; }            //Reset buffer
        }
    }
}

```

7.2 Matlab

Jedním ze zadání této práce je vytvoření softwaru pro řízení měřícího zařízení a interpretaci naměřených hodnot. Pro tento úkol byl vybrán Matlab, zejména kvůli zpracování hodnot získaných z dálkoměru LRF20M3PS. Matlab je programovací prostředí, které je zaměřeno právě na řízení a zpracování dat a díky obrovskému množství knihoven a aplikací, ať již z dílen Mathwork či externích vývojářů, lze tento skriptovací jazyk využít téměř k jakémukoliv projektu. První verze programu byla napsána jako samostatný Matlab skript. Po jeho odzkoušení a vyladění následoval návrh GUI ve formě aplikace pomocí MATLAB App Designer, do které byl skript implementován.



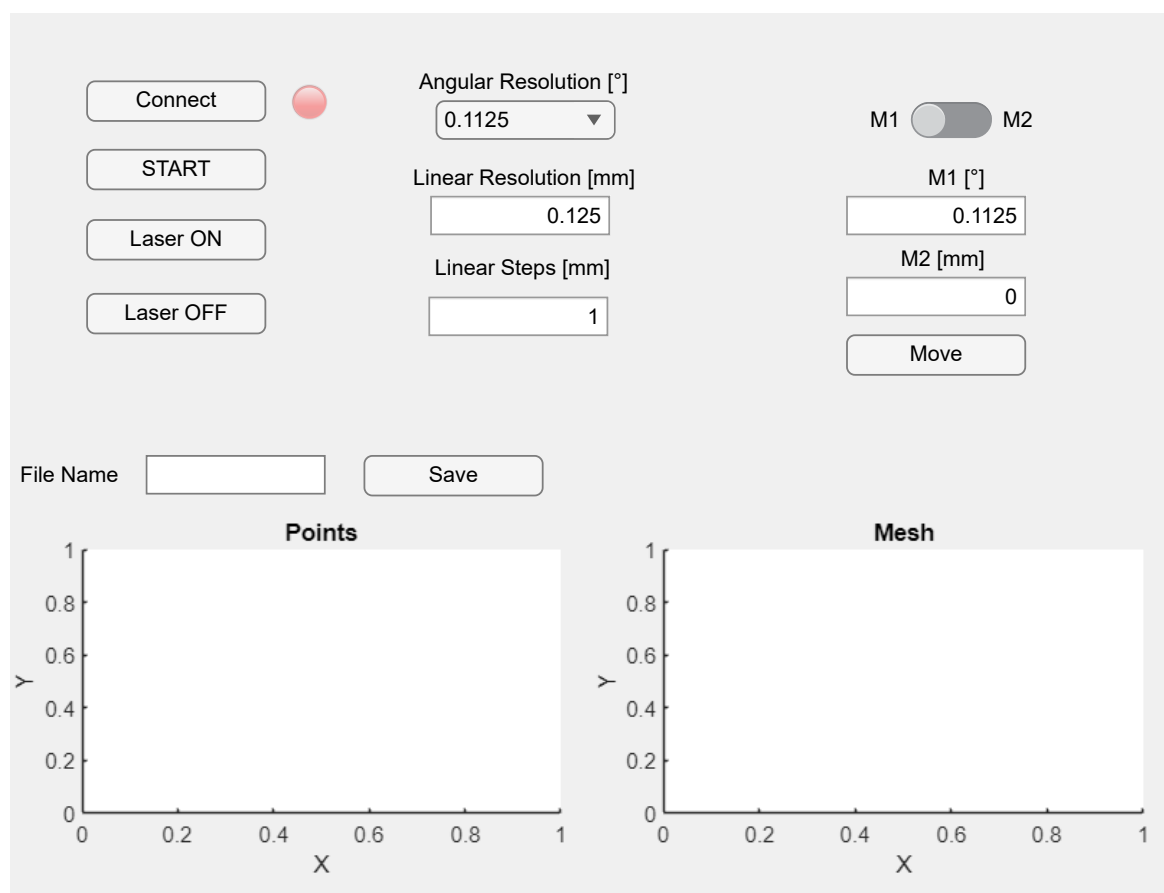
Obrázek 7.1: Vývojový diagram

7.2.1 GUI

Celý návrh grafického rozhraní probíhal v již zmíněném rozšíření Matlabu App Designer. Jak je u Mathworks zvykem, celá nadstavba je intuitivní, přehledná a disponuje rozsáhlou dokumentací, takže práce v ní je možná i pro úplné nováčky. Návrh grafického rozložení probíhá v pohledu *Design View*. Jednotlivé komponenty jsou umísťovány z knihovny komponentů pomocí myši, jak je tomu například v prostředí Simulink. Komponenty lze podle potřeb skládat na pracovní plochu, různě měnit jejich velikost, proporce, označení atd.

Po umístění a pojmenování komponentu vzniká v seznamu jeho handle, který je poté možné použít při programování celé aplikace. U interaktivních komponent lze také přidat callback funkce, které můžou reagovat například na změnu obsahu či stisknutí. Pro samotné programování je potřeba přepnout do pohledu *Code View*. Zde nalezneme předgenerovaný kód aplikace, který není návrhář schopen upravovat. Vlastní text lze vkládat pouze do určitých bloků, jakými jsou například přidání callback funkce. Nutné je zmínit, že každá callback funkce je čistě lokální proces. Proto pokud je potřeba předávat informace mezi funkcemi jednotlivých tlačítek, je třeba tyto proměnné či objekty zadeklarovat jako vlastnosti (properties) celé aplikace.

Finální aplikace by se dala rozdělit na 4 části. V levé horní části najdeme tlačítka umožňující připojení k zařízení, ovládání senzoru a spouštění měřicího procesu. Vedle se nacházejí dvě textová pole a jeden rozbalovací seznam, jejichž prostřednictvím uživatel zadá nutné údaje, jako je velikost jednoho kroku rotace měřeného objektu ve stupních, velikost jednoho kroku vertikálního posunu v milimetrech a požadovaný počet těchto kroků. Vrchní část okna aplikace uzavírá manuální ovládání posuvů zařízení. Přepínačem lze vybrat, který motor chceme ovládat, do textového pole poté zadáme chtěnou hodnotu posuvu. Po potvrzení výběru tlačítkem zařízení vykoná zadaný pohyb. Ve spodní části už se nachází výstup naměřených dat. Po doměření dochází v levém grafu k vykreslení jednotlivých bodů do 3D grafu. V pravém grafu je zase vygenerována síť z těchto bodů, pro lepší přehlednost a vizualizaci měřeného tělesa. Naměřená data lze také uložit. K tomu slouží textové pole, do kterého je zadán název i s příponou souboru a ukládací tlačítko. Nyní si jednotlivé funkce probereme detailně.



Obrázek 7.2: Zobrazení aplikace

7.2.2 Připojení měřicího zařízení

Tlačítko **Connect** slouží k navázání komunikace mezi počítačem a Arduinem. Po jeho stisknutí dochází k vytvoření globálního objektu **Arduino** pomocí funkce `serialport()`, které musíme zadat správný COM port, který je přiřazen Arduino a také baudrate. Pokud je spojení úspěšné, rozsvítí se zelená kontrolka, která je umístěna hned vedle tlačítka. Při neúspěchu se zase rozsvítí kontrolka červená. Následující popsané funkce aplikace pracují pouze, pokud je mezi počítačem a mikrokontrolerem navázaná sériová komunikace.

Listing 7.3: Sériová komunikace

```
function ConnectButtonPushed(app, event)
    try
        app.Arduino = serialport("COM10", 115200); %Create serial
        pause(2);
        app.ConnectedLamp.Color = 'g';
        app.ConnectedLamp.Enable = 'on';
    catch
        app.ConnectedLamp.Color = 'r';
        app.ConnectedLamp.Enable = 'on';
    end
end
```

7.2.3 Zapnutí/Vypnutí Laseru

Laser, kterým senzor měří vzdálenost, se dá zapnout a vypnout dvojicí tlačítek **Laser ON** a **Laser OFF**. Toho lze využít například pro kontrolu pozice laseru při nastavování počáteční polohy měření.

7.2.4 Spuštění měřicího cyklu

Spouštěcí tlačítko celého měřicího zařízení je tlačítko **START**. Před jeho stiskem je však potřeba zadat programu požadované hodnoty měření. K tomu slouží dvě textová pole a jedno menu umístěné vedle tohoto tlačítka. Menu s názvem *Angular Resolution* [°] umožňuje uživateli vybrat hodnotu úhlu, o jaký bude těleso orotováno mezi každým měřením. Uživatel má na výběr z 24 hodnot. Každou z těchto hodnot lze vydělit číslem 360 beze zbytku a zároveň jsou násobkem čísla 0,1125. Díky tomu lze docílit toho, že počáteční měřený bod v každé vrstvě bude na stejné poloze a že číslo reprezentující počet kroků motoru při jednom posunu bude vždy číslem celé. Pole *Linear Resolution* [mm] funguje naprosto stejným způsobem. Hodnota pole udává, o kolik milimetrů je po dokončení měření celého obvodu tělesa posunuta sonda. Softwarově je nejmenší možný krok nastaven na 0,625 mm. Zadaná hodnota je opět zaokrouhlena tak, aby bylo možné předat motoru celý počet kroků. Do posledního textového pole *Linear Steps* uživatel zadává, kolik vrstev tělesa má být naskenováno.

Pokud jsou údaje zadány, lze spustit skenování tělesa. Prvním krokem je vymazání všech předešlých údajů, které mohou být v Arduinu uloženy například po předchozím měření. Dále dojde k načtení údajů z textových polí, přepočítání úhlů či lineárních posuvů na kroky a vytvoření textových příkazů pro jednotlivé motory. Posledním krokem inicializace měření je prelokace globálních matic, do kterých jsou ukládána naměřená data.

Samotné měření probíhá pomocí jednoho `while` cyklu, tří `for` cyklů a jedné funkce `try`. Délka prvního `for` cyklu je určena počtem měřených vrstev, délka druhého závisí na počtu měření v každé vrstvě. Poslední vnořený `for` cyklus má za úkol průměrování několika měření stejného bodu, aby se zamezilo velkým odchylkám. `While` cyklus je zase vykonáván do té doby, dokud není flag *Check* přepsán z hodnoty *NaN* na jakoukoliv číselnou hodnotu větší než 0. V těle cyklu je první poslán požadavek na provedení jednoho měření laserovému dálkoměru. Poté je vložena pauza, během které bezpečně dorazí naměřená data zpět. Program nahrán v Arduinu zaručuje, že nám zpráva dojde už rozložena na dvě části, načítáme je tedy obě, ale první část dále ignorujeme. Druhou část zprávy dekodujeme a ukládáme na příslušnou pozici v matici. Pokud bylo přijetí úspěšné a software dokázal z dat přečíst číselnou hodnotu, je z cyklu vyskočeno a kód pokračuje dál. Pokud ne, měření se opakuje. Funkce `catch` slouží jako ochrana proti případnému výpadku komunikace. Při neobdržení zprávy ze senzoru dojde k překročení povoleného timeoutu a celý cyklus měření započne znova.

V dalším kroku je vypočítán průměr naměřené hodnoty a z ní následně pomocí goniometrických funkcí vypočítána složka x a složka y pro pozdější vykreslení. Vnější a prostřední `for` cykly jsou ukončeny posláním příkazu k otočení krokového motoru a krátkou pauzou. Ta je proměnná, závisí na velikosti pootočení a zaručuje, že další měření neproběhne, dokud není pohyb motoru dokončen.

7.2.5 Nastavení polohy

Pro případné polohování sondy i měřeného tělesa je v aplikaci umístěno tlačítko **Move**. Na to je navázán dvoupolohový přepínač, kterým se volí, zda chceme pohybovat s prvním nebo druhým motorem. Požadovaný posuv je poté načítán z textových polí, která jsou obdobou textových polí zmíněných v předchozí části. Jediným rozdílem je, že do těchto polí je možné zadat jak kladná, tak i záporná čísla, čímž uživatel volí směr rotace motorů. Po výběru jednoho z motorů a zadání velikosti i směru pohybu může uživatel stisknout příslušné tlačítko, čímž se odešle textový příkaz pro daný motor se směrem otáčení i počtem kroků.

Listing 7.4: Měřicí cyklus

```

for i=1:Depth_steps
    flush(app.Arduino);
    pause(0.2);
    for j=1:Ang_steps
        for m=1:Average
            Check = NaN;
            while isnan(Check) || Check < 0                %Start measurement
                writeline(app.Arduino, "S1");              %Send command
                pause(0.2);
                try
                    InData=readline(app.Arduino);           %Read
                    InData2=readline(app.Arduino);
                    S_DataRaw(i,j) = InData2;
                    InChar = convertStringsToChars(InData2); %Convert and check
                    MessStart = find(InChar == '$');
                    MeasDist = str2double(InChar((MessStart+7):(end-4)))...
                        -Calibration;
                    Check = MeasDist;
                catch
                    InData2 = NaN;
                    warning('TIMEOUT - Measuring again')
                end
            end
            app.S_Data(i,j) = app.S_Data(i,j) + MeasDist;
        end
        app.S_Data(i,j) = app.S_Data(i,j)/Average;
        app.Data_x(i,j) = cos(Angles(j))*app.S_Data(i,j); %x component
        app.Data_y(i,j) = sin(Angles(j))*app.S_Data(i,j); %y component
        writeline(app.Arduino, Command1);                 %Move motor 1
        pause(0.002*MotRes1)
    end
    writeline(app.Arduino, Command2);                     %Move motor 2
    pause(0.002*MotRes2)
end

```

7.2.6 Výsledky měření

Naměřená data je potřeba nějakým způsobem interpretovat. K tomu nám poslouží dva grafy, které jsou umístěny v GUI. Abychom mohli naměřené vzdálenosti vykreslit jako 3D graf reprezentující tvar povrchu zkoumaného tělesa, je nejprve potřeba udělat několik úprav dat. První musíme vzít v potaz vzdálenost mezi sondou a senzorem, neboli středem otvoru a laserovým dálkoměrem. Následně musíme této vzdálenosti přiřadit souřadnice z kartézského souřadného systému. Následně můžeme do prvního grafu vykreslit jednotlivé body ve 3D podobě funkcí `plot3` jako černé tečky. Druhý graf zase obsahuje síť, která je z tentýž bodů generována pomocí funkce `surf`. Plocha obrazce má nastavenou modrou barvu, alfa kanál má hodnotu 0,5. Užitečnou funkcí je též ukládání matice naměřených hodnot, kterou lze později využít pro detailnější analýzu naskenovaného tělesa. Tato funkce je ovládána skrz tlačítko **Save**. Nejprve je však potřeba aplikaci zadat název souboru a jeho typ. K tomu slouží textové pole s názvem *File Name*. Do tohoto pole uživatel vloží název souboru i s příponou souboru, do kterého chce soubor uložit. Podporované formáty jsou `.txt`, `.csv`, `.dat`, a `.xls`. Soubor je uložen do stejné složky, v jaké se nachází aplikace.

Listing 7.5: Vykreslení dat

```
xlabel(app.UIAxes, 'X [mm]');
ylabel(app.UIAxes, 'Y [mm]');
zlabel(app.UIAxes, 'Z [mm]');
xlabel(app.Image3D, 'X [mm]');
ylabel(app.Image3D, 'Y [mm]');
zlabel(app.Image3D, 'Z [mm]');

%% Points
for k = 1:Depth_steps
    Layer(k, :) = (k-1) * Lin_res;
end

for l=1:Depth_steps
    plot3(app.UIAxes, app.Data_x(l, :), app.Data_y(l, :), Layer(l, :), '.k')
    hold(app.UIAxes, 'on')
end

%% MESH
Data_xM = [app.Data_x, app.Data_x(:,1)];           %First and last point
Data_yM = [app.Data_y, app.Data_y(:,1)];           %must be the same
LayerM   = [Layer, Layer(:,1)];
surf(app.Image3D, Data_xM, Data_yM, LayerM, 'FaceColor', "blue", ...
"FaceAlpha", 0.5);
```

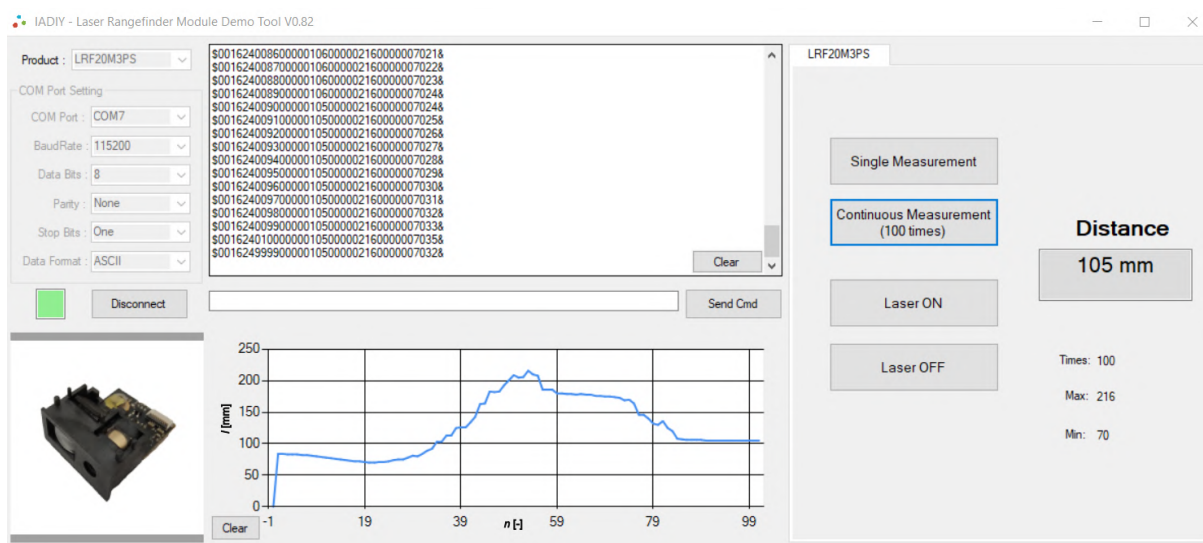
8 Testování funkčnosti

Předposlední kapitola je věnována testování a vyhodnocování navrženého zařízení a samotným měřením, která byla pomocí zařízení provedena. Bude zde zhodnocena jeho funkčnost, přesnost a užitečnost. Stejně tak zde nalezneme výsledné parametry zařízení.

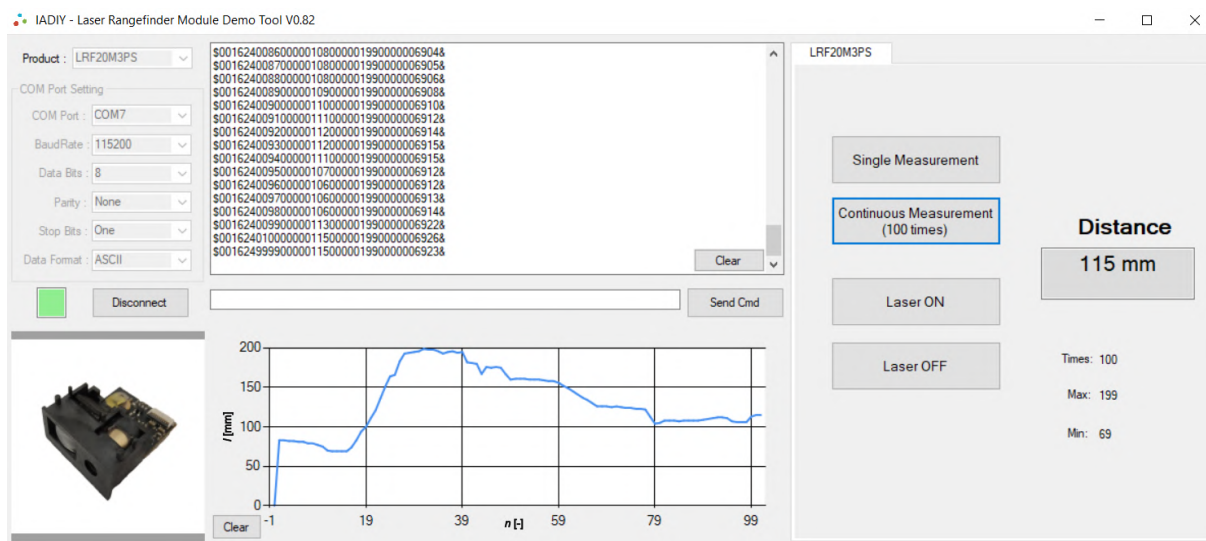
8.1 Rozsah měření

První test spočíval v ověření, že po sestavení a zapojení lze přístrojem měřit vzdálenost. Tento test byl vcelku triviální, spočíval pouze v postupném přibližování objektu k hraně sondy. Počáteční vzdálenost byla okolo 100 cm od sondy. Test se opakoval dvakrát, jednou za plného osvětlení, podruhé v potměšle místnosti. Tím byl i zaznamenán vliv okolního osvětlení na schopnosti měřicího přístroje.

Aby bylo možné vyloučit případné hardwarové či softwarové chyby, bylo k měření použito USB adaptéru, který byl k senzoru dodán výrobcem, a i originální software pro práci se senzorem. Naměřené vzdálenosti nalezneme na grafech 8.1 a 8.2



Obrázek 8.1: Měření odezvy za světla



Obrázek 8.2: Měření odezvy za tmy

Z grafů je jasně vidět, že senzor má horní mez rozsahu, měl by tedy problém se zkoumáním vzorků, jejichž povrch by byl od sondy vzdálen o více než 120 mm. Ovšem vzorky s průměrem větším jak 110 mm by při aktuální konstrukci nebylo možné do přístroje uchytnit, jedná se tedy o nepodstatnou vadu. Rozsah měření je velmi podobný za obou světelných podmínek, z grafů lze vyčíst, že největší zaznamenaná délka se pohybuje okolo 20 cm. Jedná se však o vzdálenost od hrany senzoru, pro reálné měření by bylo potřeba od měřených údajů ještě odečíst vzdálenost mezi zrcadlem a senzorem.

Tak jako tak tyto měření dokazují, že navržené a sestavené zařízení je schopné odraženým laserovým paprskem měřit vzdálenost.

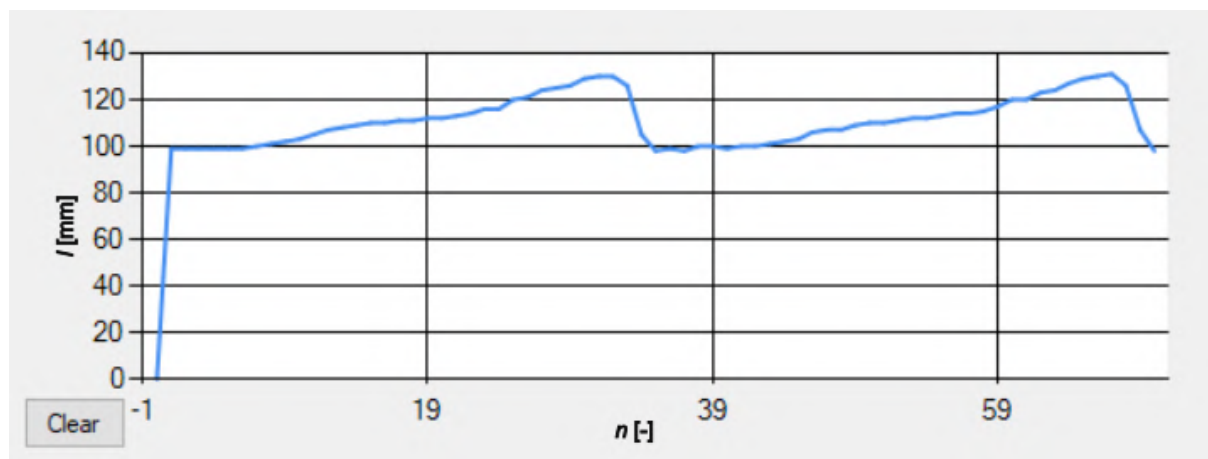
8.2 Měření testovacího vzorku

Další z testů už byl zaměřen na rozlišovací schopnosti laserového senzoru. Cílem bylo ověřit výrobcem slibovanou milimetrovou přesnost a zjistit, jak velkou plochu povrchu otvoru laser skenuje. Díky tomu budeme schopni určit, jakého rozlišení po obvodu měření stroj dosahuje. K tomu nám poslouží vytvořený testovací vzorek, který má dvě části. První je navržena tak, aby při rotaci postupně měnila svou vzdálenost od sondy, druhá má zase zářezy o různých šířkách a poslouží k určení obvodového rozlišení.

8.2.1 Měření přesnosti vzdálenosti

K tomuto testu byla využita část testovacího tělesa se spirálovitým tvarem. Původní 3D model je nakreslen tak, že spirála začíná ve vzdálenosti 15 mm od středu tělesa a končí ve vzdálenosti 50 mm od středu tělesa.

Podobně jako u prvního zkušebního měření bylo první využito aplikace od výrobce senzoru. Senzor byl tak přes USB redukci a příslušný COM port připojen k PC. Zbylá elektronika byla k počítači připojena též, jelikož k otáčení vzorku bylo využito funkce manuálního posuvu, kterými vytvořená aplikace disponuje. Na obrázku 8.3 vidíme výsledek tohoto měření. Byly celkem vykonány 2 otáčky vzorku, mezi každým měřením vykonal motor otočení o 10, 8°.

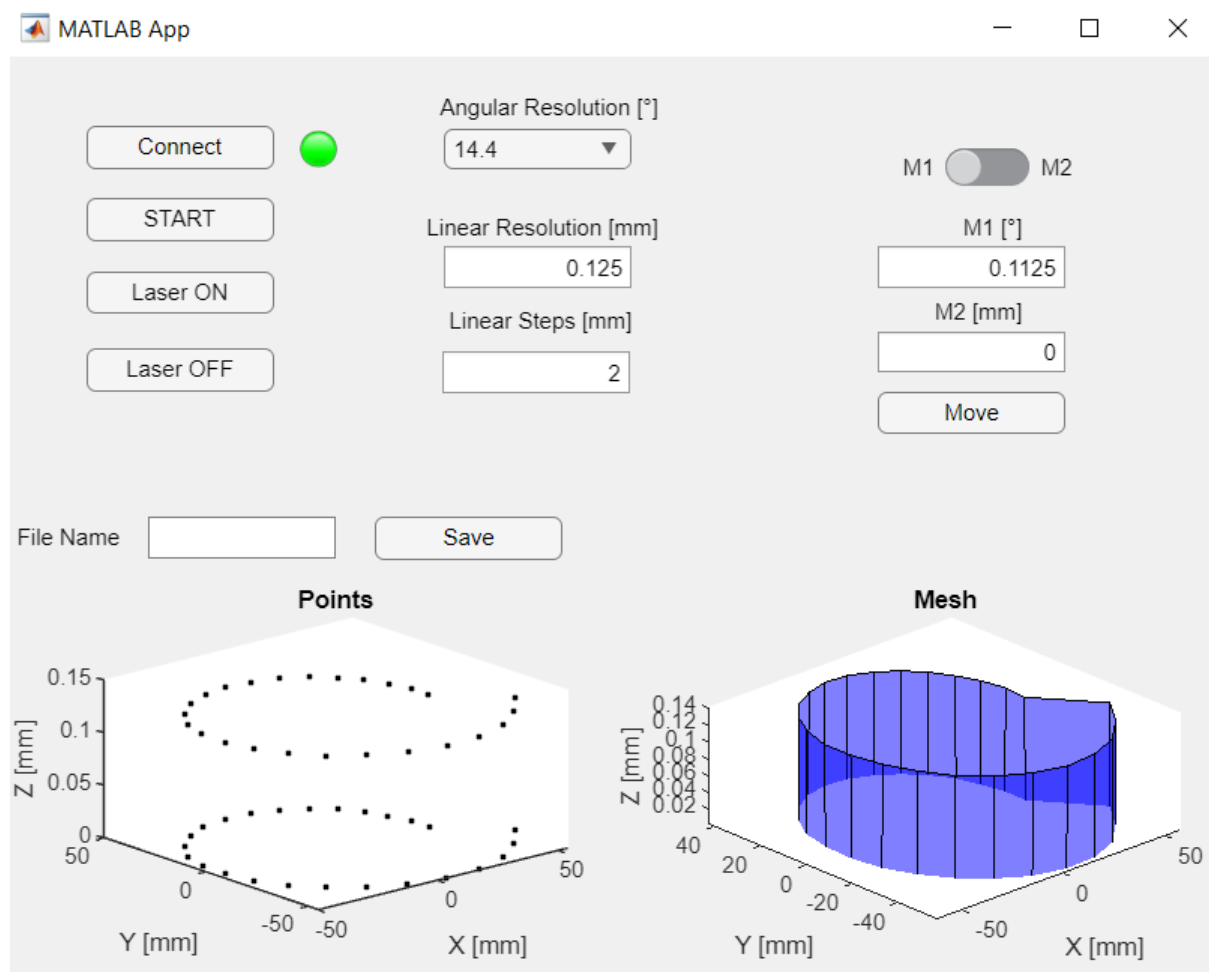


Obrázek 8.3: První testovací měření

Jak lze z obrázku vidět, graf který aplikace vytváří, má řadu nedostatků. V aplikaci graf například vůbec nemá popsané osy, osa zobrazující počet měření začíná v -1 a nulté měření je vždy vyobrazeno jako 0. I přes tyto značné nedostatky má toto zobrazení svoji hodnotu. Lze zde pozorovat, že při postupné rotaci se změřená vzdálenost postupně zvětšuje, poté se téměř skokově změní na hodnotu nižší, načež znova hodnoty rostou. Toto měření tedy přesně kopíruje křivku, kterou bychom čekali při měření postupně zvětšující se dutiny se skokovou změnou průměru. Víme, že vzdálenost stěny testovacího tělesa se celkově zvětší o 35 mm. Nejmenší změřená hodnota byla 98 mm, největší zase 131 mm. Rozdíl těchto dvou čísel je 33 mm, lze tedy považovat tento pokus za úspěšný.

Ačkoliv relativní měření se zdá správné, absolutně je toto měření nepřesné. V této aplikaci totiž nelze nastavit korekci ve formě vzdálenosti mezi senzorem a zrcadlem. Před začátkem testu bylo vyňato ze sondy zrcátko a provedeno měření vzdálenosti právě mezi senzorem a místem, ve kterém dochází k odrazu. Tato hodnota byla stanovena jako 75 mm a byla uložena do kódu aplikace provádějící měření. Bude tedy od každého měření odečtena, čímž by nám následně zobrazení naměřených hodnot mělo ukazovat reálné rozměry tělesa.

Na obrázku 8.4 už můžeme vidět výstup z vytvořené řídicí aplikace. Na obou vytvořených obrázcích lze zcela jasně pozorovat spirálovitý tvar skenovaného tělesa. Vyčítání rozměrů z těchto bodů je náročnější, můžeme však vidět, že maximální rozměr je uveden přibližně jako 50 mm, což odpovídá skutečným rozměrům měřeného tělesa. Lze tedy považovat měření za správné a zařízení i aplikaci za funkční.



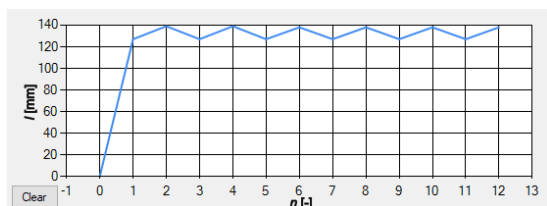
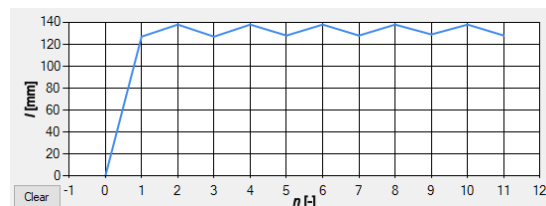
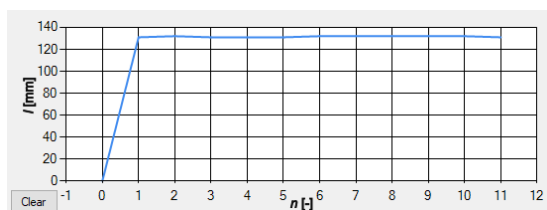
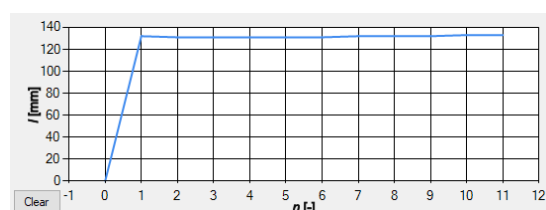
Obrázek 8.4: První testovací měření ve vytvořené aplikaci

8.2.2 Zjišťování obvodového rozlišení

Následující dva testy byly provedeny na druhé části testovacího tělesa. Tato část má po obvodu umístěna různě široká žebra a různě vysoké dutiny, které nám pomohou určit vlastnosti navrženého měřícího zařízení.

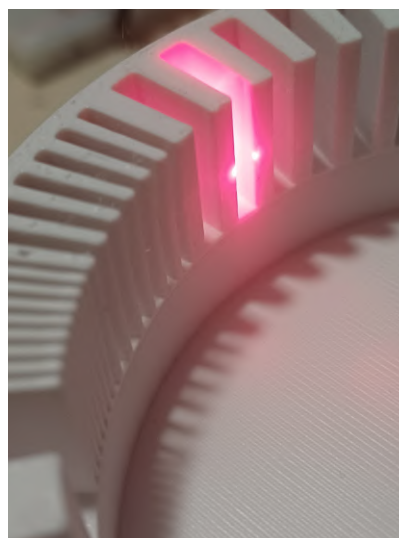
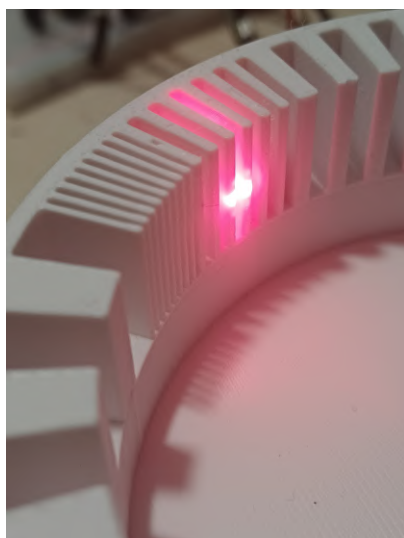
Jako u minulého testu bylo nejprve použito k měření aplikace od výrobce IADIY. Senzor byl připojen přes USB sběrnici a byl ovládán touto aplikací, motor s upevněným testovacím tělesem byl zase ovládán pomocí vytvořené Matlab aplikace a manuálních posuvů. Měření bylo provedeno čtyřikrát, pro každou skupinu žebíků zvlášť. Laser senzoru byl zapnut, těleso bylo umístěno do polohy tak, aby střed laseru byl umístěn ve středu měřeného žebíku, a tento bod byl následně změřen a vykreslen do grafu. Poté byl motoru dán pokyn o otočení tělesem o úhel, odpovídající šířce žebíku. Tím byl střed laseru posunut doprostřed mezery mezi jednotlivými žebíky.

Jak lze vidět na obrázcích 8.5a a 8.5b, měřící zařízení nemělo problém s digitalizací reliéfu o těchto rozměrech. Hloubka žebíků je 10 mm, rozdíly mezi jednotlivými minimy a maximy na grafu se pohybují od 11 do 12 mm. Tyto hodnoty jsou tedy v toleranci garantované dodavatelem senzoru a můžeme je považovat za správné.

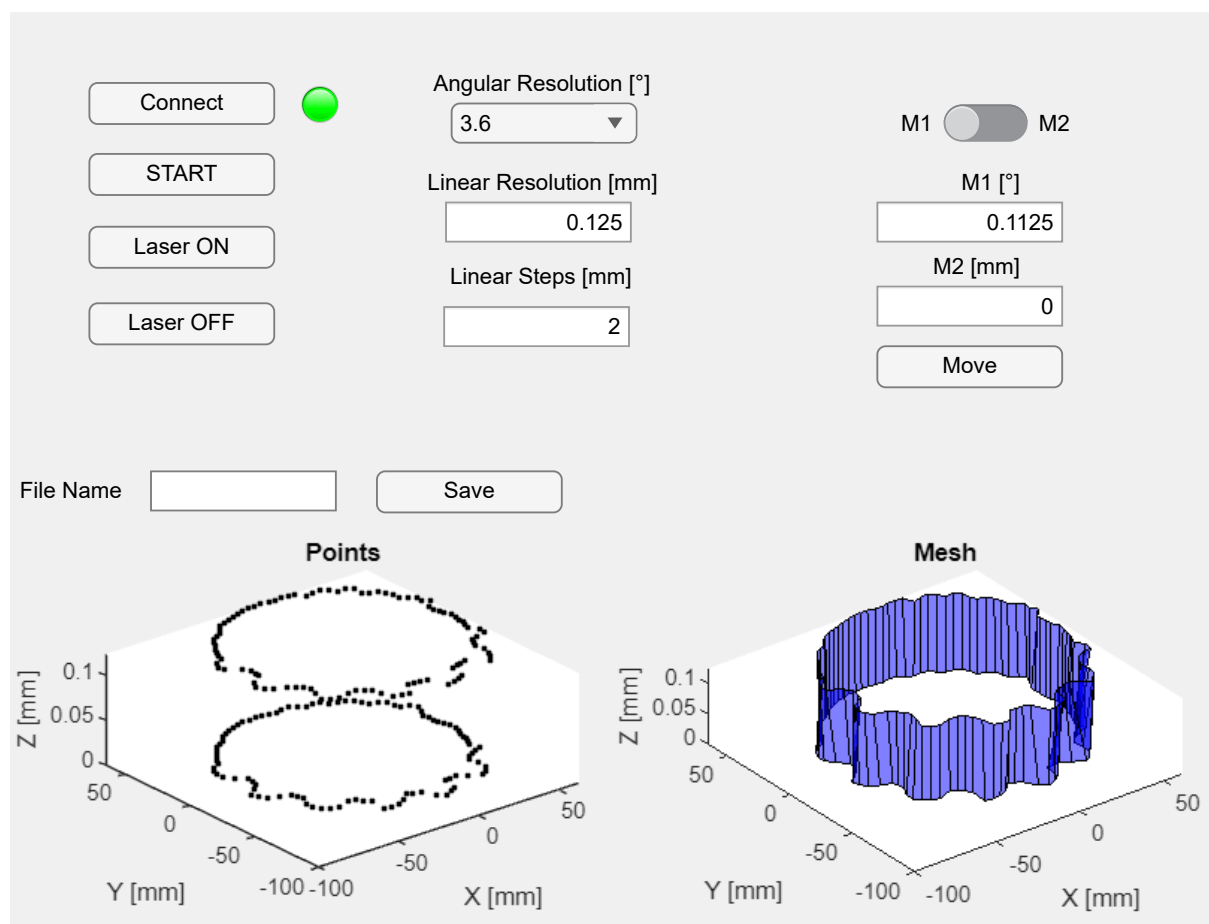
(a) Žebro široké $7,2^\circ$ (b) Žebro široké $3,6^\circ$ (c) Žebro široké $1,8^\circ$ (d) Žebro široké $0,9^\circ$

Obrázek 8.5: Výsledky měření obvodového rozlišení

Problém nastal u měření žebrov s menší velikostí a menšími rozestupy. Zde již z grafů nelze vyčíst žádné smysluplné hodnoty a naměřená absolutní vzdálenost se zdá být aritmetickým průměrem očekávaných hodnot maxim a minim. Tento jev by se dal pravděpodobně vysvětlit fyzickou velikostí paprsku. Ačkoliv víme, že laser je koherentní zdroj záření, nelze jej zaměřit do limitně malého prostoru. Senzor tedy dokáže spolehlivě změřit pouze plochu, která je o stejných či velmi podobných rozměrech, jako je dopadající paprsek. Tento jev lze pozorovat na obrázku 8.6, přičemž na prvním obrázku je jasně vidět, že i když je střed paprsku umístěn do mezery mezi žebry, tak ozařuje i skoro celé vedlejší žebra.



Obrázek 8.6: Velikost dopadajícího laserového paprsku



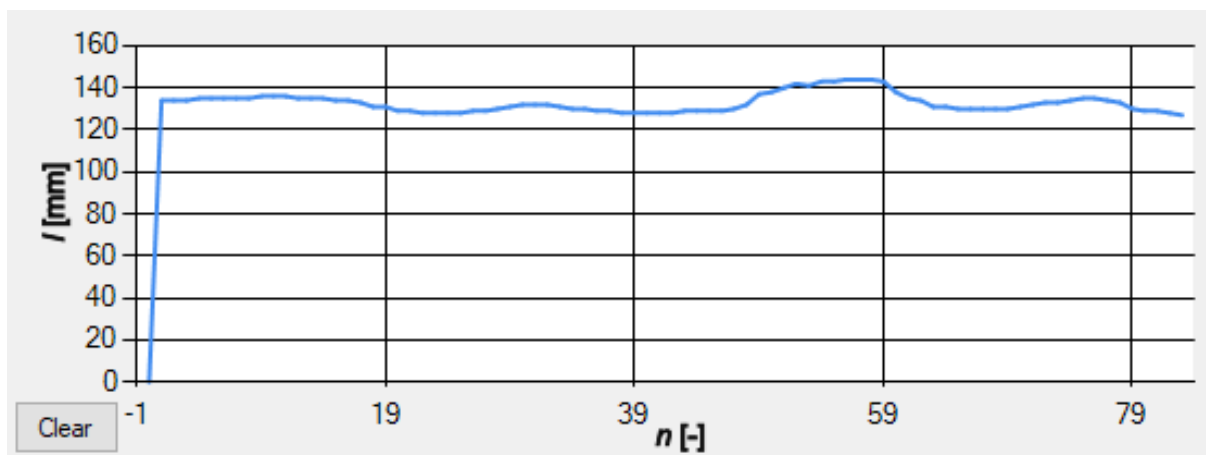
Obrázek 8.7: Měření členitého povrchu

Z obrázku 8.7 je zřetelné, že skener má problémy s naskenováním tvaru testovacího tělesa. Ačkoliv největší žebra lze na obrázku pozorovat, přechod mezi žebrem a mezerou není skokový, nýbrž spojitý. Na vině bude nejspíše opět ozáření žebra i mezery laserovým paprskem zaráz, senzor tedy nedokáže jednoznačně určit, z jaké vzdálenosti se paprsek vrací. Jemnější žebrování se při zvoleném kroku $3,6^\circ$ z 3D modelu téměř úplně vytratilo.

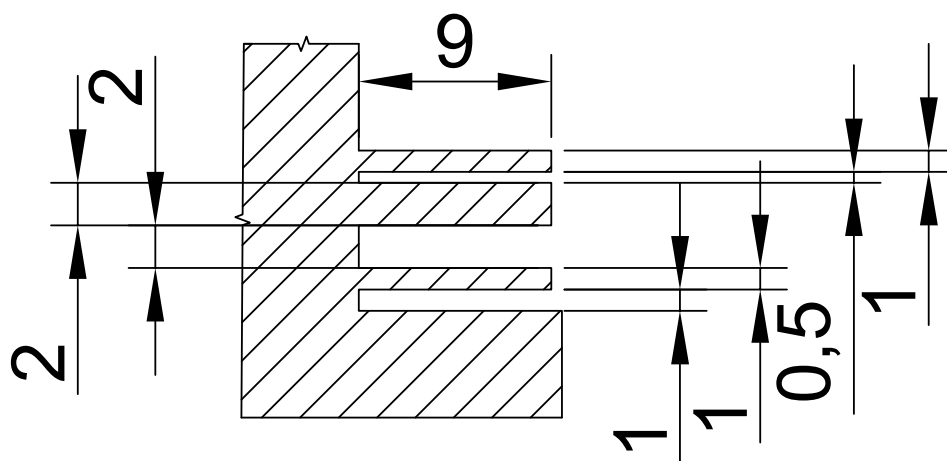
8.2.3 Zjišťování vertikálního rozlišení

Poslední testovací měření probíhalo obdobným způsobem jako měření předchozí. Tentokrát bylo však těleso natočeno tak, aby při vertikálním pohybu sondy její skenovací laser prošel skrze část s dutinami o různých šířkách. Měření započalo nad touto částí testovacího tělesa a bylo prováděno směrem dolů s krokem 0,125 mm.

Řez měřeným povrchem je vyobrazen na obrázku 8.9. Při jeho porovnání s grafem z obrázku 8.8 vidíme, že zařízení nemělo problém se zaznamenáním dutiny o výšce 2 mm, kdežto dutina o výšce 0,5 mm na grafu není vykreslena téměř vůbec. Dutinu s prostřední velikostí na grafu sice rozpoznat lze, její hloubka ovšem není správná. Oba tyto negativní jevy lze stejně jako při předchozím měření vysvětlit velikostí dopadajícího paprsku a odrazem laseru od více povrchů.



Obrázek 8.8: Zkoumání vertikálního rozlišení



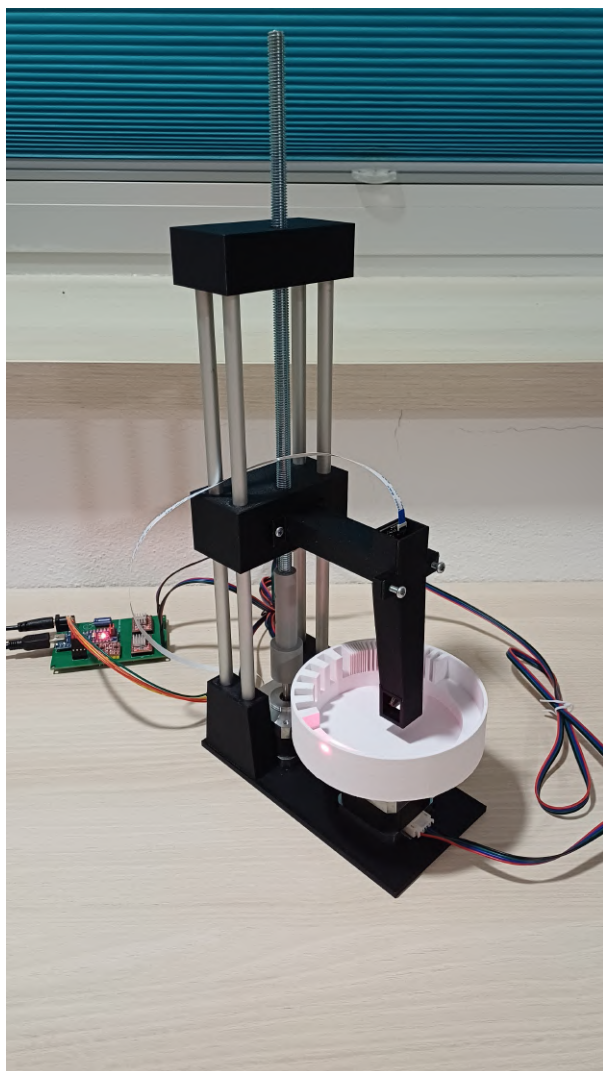
Obrázek 8.9: Řez měřeného povrchu

8.3 Zhodnocení funkčnosti

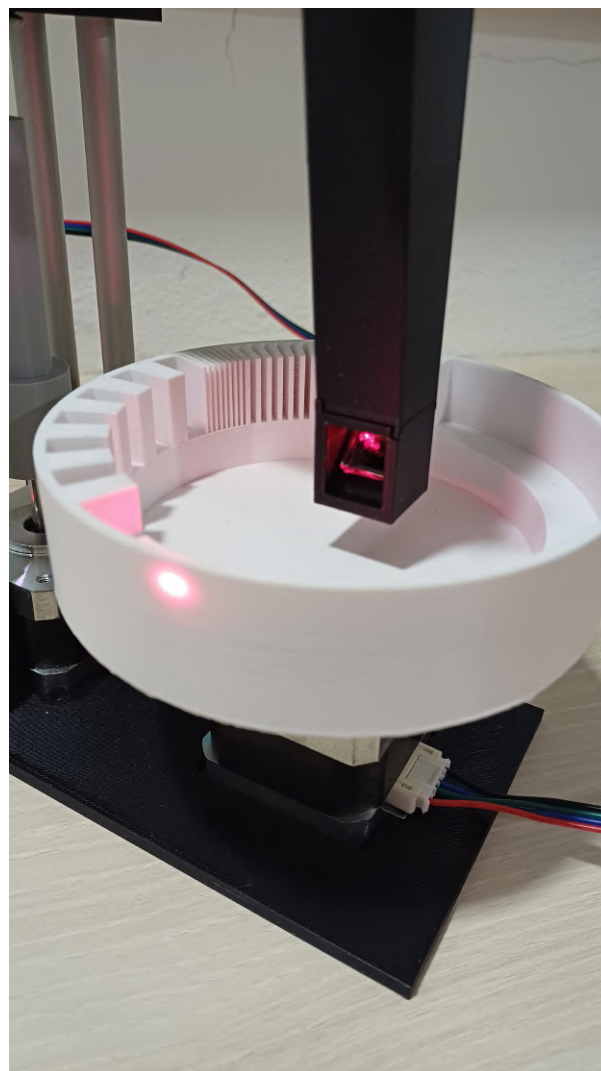
Cílem této kapitoly bylo ověření, že koncepce měření vzdálenosti pomocí odrazu zrcadlem je v praxi opravdu možná. Série provedených testů prokázala, že navržené měřicí zařízení dokáže převést povrchy dutin do digitalizované podoby. Díky pokusným měřením jsme zjistili maximální velikost, kterou dokáže zařízení teoreticky zaznamenat. Stejně tak byly zjištěny rozlišovací schopnosti měřicího zařízení v obou osách jeho pohybu.

Mezi zjištěné nedostatky zařízení určitě patří rychlost měření, senzor je schopen měřit s frekvencí pouze 1 Hz, a jeho neschopnost rozlišit malé útvary a nepřesnosti při digitalizaci zvláště složitých reliéfů na povrchu. Oba tyto neduhy skeneru jsou zapříčiněny použitým laserovým senzorem LRF20M3PS. Dopadající laserový paprsek ozařuje útvar o rozměrech 4×1 mm, proto útvary, které jsou menší než tato plocha, nelze jednoznačně senzorem změřit. Co se týče velikosti a rozměrů těles, které je možno skenovat, zakázková výroba miniaturního zrcadla pro použití v sondě by umožnila její celkové zmenšení a tedy možnost skenování menších průměrů. Naopak zvětšení celkové konstrukce zařízení a případné použití silnějšího motoru by umožnilo do zařízení upevnit i větší tělesa.

Zajímavým zjištěním bylo, že zařízení je velmi citlivé na materiál, ze kterého je skenované těleso vyrobeno. Měření na tělese vyrobeném z černého PETG filamentu bylo téměř nemožné. Všechny následující testy tedy proběhly na tělese vytištěném pomocí bílého filamentu. Naopak očekávaná závislost přesnosti měření na intenzitě okolního osvětlení nebyla nikterak výrazná.



(a) Zkompletované zařízení



(b) Detail vytvořené měřicí sondy

Obrázek 8.10: Zařízení pro snímání vnitřních povrchů dutin

9 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na návrh, sestavení a odzkoušení zařízení pro snímání vnitřních povrchů dutin. Primárním cílem bylo ověřit, zda k tomuto účelu lze využít optických měřicích metod a zda je takto koncipované zařízení realizovatelné bez využití drahých či specializovaných dílů. Návrh zařízení spočíval ve výběru principu měření a senzoru, návrhu konstrukce stroje, výběru a sestavení elektroniky a vytvoření ovládacího softwaru se zpracováním naměřených dat.

Praktické části práce předcházela důkladná rešerše dostupných zařízení pro digitalizaci povrchu a metod, které k těmto účelům slouží. Tyto informace byly zužitkovány při výběru senzoru pro použití v navrhovaném zařízení. Celkově procesem testování senzorů prošli čtyři adepti. Nejzásadnějším kritériem byla schopnost senzoru měřit vzdálenost pomocí odrazu paprsku. Tato metoda nám totiž dovolí značně zmenšit část sondy, která vniká do měřených dutin. Dále byla porovnávána cena, přesnost, rozlišení a náročnost zpracování dat ze senzoru.

Po úspěšném otestování byl vybrán senzor IADIY LRF20M3PS. Ten byl doplněn o dva krokové motory a jejich drivery, převodník logických úrovní, Arduino Nano, kondenzátor a potřebné konektory, čímž byl úspěšně proveden výběr a návrh elektroniky. V další fázi byla navržena deska plošných spojů, která zaručuje správné propojení periférií s mikrokontrolerem. Navrženy byly taky jednotlivé díly konstrukce zařízení. Součásti byly vy-modelovány v programu Inventor, vyexportovány a následně vyrobeny pomocí 3D tisku. Vytisknuté díly byly doplněny o dostupné spojovací materiály.

Nedílnou součástí práce je i vytvořený software. Kód pro Arduino Nano byl naprogramován pomocí prostředí Arduino IDE a slouží k umožnění komunikace zařízení s počítačem. Arduino dále vytváří sériovou komunikaci pro získávání dat ze senzoru a odesílá příkazy driverům krokových motorů. Ovládací program s možností zobrazení a uložení naměřených dat byl vytvořen pomocí Matlab App Designer. Aplikace má jednoduché a přehledné grafické rozhraní, které umožňuje uživateli práci s měřicím zařízením. Největší výzvou bylo vytvoření komunikačního kanálu mezi Matlabem, Arduinem a senzorem, aniž by docházelo ke ztrátě dat či příkazů.

Po vyrobení či dodání všech potřebných komponent měřicího zařízení přišla na řadu jeho kompletace. Závitovou tyč spolu s hliníkovými tyčemi bylo potřeba zkrátit na požadované délky a následně byl celý stroj sestaven dohromady. Po sestavení pohyblivé konstrukce k ní byla připevněna měřicí sonda s laserovým dálkoměrem, zatím však bez zrcátka zaručujícího odraz paprsku k měřenému povrchu. Dálkoměr byl zapnut, aby bylo ověřeno, že laserový paprsek dopadá na správné místo na šikmé ploše držáku zrcátka. Po ověření už bylo možné do držáku přilepit zrcátko. Závěrem sestavování zařízení bylo umístění elektronických dílů na DPS a jejich připojení k desce.

9 ZÁVĚR

Nyní jsme mohli přistoupit k ověření funkčnosti. Testy nám dokázaly, že vybraná metoda měření s využitím odrazu funguje nezávisle na vnějším osvětlení a že veškerá elektronika i software fungují tak, jak bylo plánováno. Během testování bylo naskenováno testovací těleso, jehož rozbor určil vlastnosti zařízení. Výsledky dokázaly, že zařízení dokáže měřit vzdálenost s přesností na milimetry a dokáže data nejen ukládat, ale i interpretovat jako 3D obrazec skenovaného tělesa. Bohužel byly zjištěny i negativní vlastnosti zařízení. První je rychlost měření, kvůli vlastnostem zakoupeného senzoru a časování komunikací mezi jednotlivými částmi zařízení trvá jedno měření až 1,5 vteřiny. Pokud chceme předejít nepřesnostem, je dobré každý bod změřit vícekrát, což celkové měření ještě prodlouží. Dalším nedostatkem zařízení je zjištění nepřesnosti měření při skenování okrajů útvarů. Správnost měření lze zaručit jen pokud je celý dopadající laserový paprsek na stejné ploše. Pokud je například na zlomu nějakého útvaru, tak že půlka paprsku je blíže k sondě a druhá půlka dále, dojde k zprůměrování těchto vzdáleností.

Celkově však lze práci pokládat za úspěšnou, všechny body zadání byly splněny. Zařízení bylo úspěšně navrženo a vyrobeno, jeho vlastnosti byly otestovány na sérii měření a testů. Nabízí se však možná vylepšení tohoto zařízení. Praktičnost a použitelnost by vylepšil zejména rychlejší a přesnější senzor, vyrobení menšího zrcátka by zase vedlo ke zmenšení sondy. Stejně tak vytvořená řídicí aplikace nabízí prostor ke zlepšení, například přidáním manuálního nastavení COM portu pro připojení zařízení nebo požadavku na opakované měření každého bodu a jejich zprůměrování.

Seznam použitých zkratek

CAD	Computer aided design
CMM	Coordinate-measuring machine
CNC	Computer numerical control
LIDAR	Light detection and ranging
ACC	Adaptive cruise control
ToF	Time of flight
LED	Light-emitting diode
CCD	Charged-coupled device
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
PC	Personal computer
MRI	Magnetic resonance imaging
CT	Computed tomography
TDC	Time to digital converter
LCD	Liquid-crystal display
TTL	Transistor-transistor logic
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
DPS	Deska plošných spojů
FFC	Flat flexible cable
SCLK	Serial clock
MOSI	Master out - Slave in
GND	Ground
CS	Chip select
GPIO	General-purpose input/output
I/O	Input/output

Seznam obrázků

3.1	Dělení metod digitalizace povrchu	11
3.2	Souřadnicový měřicí stroj firmy ZEISS, převzato z [5]	12
3.3	Měřicí kloubové rameno firmy Trimos, převzato z [7]	13
3.4	3D LIDAR skener Artec, převzato z [11]	14
3.5	Modul Time-of-Flight snímače, převzato z [15]	15
3.6	Prinicip snímačů fázového posunu, převzato z [17]	16
3.7	Prinip skenerů využívajících strukturovaného světla, převzato z [19]	16
3.8	Fotogrammetrický setup firmy Canon, převzato z [21]	17
3.9	Transmisivní zobrazovací metoda	18
4.1	Koncepce měření	19
4.2	Senzor VL53L0X, převzato z [28]	20
4.3	TDC převodník, převzato z [29]	21
4.4	Dálkoměr RETLUX RHT 100	22
4.5	Výstupy sběrnice LCD displeje	25
4.6	Senzor LRF20M3PS převzato z [31]	26
5.1	Arduino NANO, převzato z [32]	27
5.2	ST1167, převzato z [33]	29
5.3	NEMA 17, převzato z [34]	30
5.4	Driver A4988, převzato z [36]	31
5.5	Návrh propojovací DPS	34
5.6	Zapojená deska plošných spojů	34
6.1	Vozíček	36
6.2	Sestava měřicí sondy	37
6.3	Součást pro uchycení senzoru k vozíčku	37
6.4	Stojan zařízení	38
6.5	Obal pro DPS	38
6.6	Testovací těleso	39
7.1	Vývojový diagram	43
7.2	Zobrazení aplikace	44
8.1	Měření odezvy za světla	49
8.2	Měření odezvy za tmy	50
8.3	První testovací měření	51
8.4	První testovací měření ve vytvořené aplikaci	52
8.5	Výsledky měření obvodového rozlišení	53
8.6	Velikost dopadajícího laserového paprsku	53

8.7	Měření členitého povrchu	54
8.8	Zkoumání vertikálního rozlišení	55
8.9	Řez měřeného povrchu	55
8.10	Zařízení pro snímání vnitřních povrchů dutin	56

Seznam tabulek

4.1	Piny LCD displeje	23
4.2	Ukázka zaznamenaných hodnoty na vstupu do displeje při zobrazení čísla 1,000	24
5.1	Tabulka příkazů senzoru LRF20M3PS	28
5.2	Přijatá odpověď	29
5.3	Zapojení GPIO pinů Arduino Nano	33
7.1	Tabulka příkazů	41

Zdroje a použitá literatura

- [1] EVROPSKÉ UNIE L-, Úřad pro publikace; LUCEMBURSKO, Lucemburk. Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2024/1799 ze dne 13. června 2024 o společných pravidlech na podporu oprav zboží a o změně nařízení (EU) 2017/2394 a směrnic (EU) 2019/771 a (EU) 2020/1828Text s významem pro EHP. [B.r.]. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>.
- [2] PAPRSEK, Adam. *Konstrukce 3D skeneru pro výukové účely*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018.
- [3] *The History of Coordinate Measuring Machines / CMMXYZ*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.cmmxyz.com/blog/the-history-of-coordinate-measuring-machines-cmmxyz/>. [cit-2025-03-01].
- [4] *Brief History Of CMM Technology / Status Metrology Solutions*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://status-cmm.co.uk/a-brief-history-of-cmm-technology/>. [cit-2025-02-24].
- [5] *CONTURA CMM: Your Quality Assurance Solution / ZEISS*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/cmms/bridge-type-cmms/contura.html>. [cit-2025-03-01].
- [6] *The origins of the portable measuring arm / Hexagon*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://hexagon.com/resources/resource-library/origins-articulated-arm-cmm>. [cit-2025-02-24].
- [7] *What is a measuring arm ?* [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.trimos.com/products/portable-measuring-arms/what-is-a-measuring-arm/>. [cit-2025-03-01].
- [8] *The Evolution of LiDAR / FlyGuys*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://flyguys.com/the-evolution-of-lidar/>. [cit-2025-02-24].

- [9] *Lidar – NASA Langley Research Center Science Directorate*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://science.larc.nasa.gov/lidar/>. [cit-2025-02-24].
- [10] *Valeo's LiDAR technology in Mercedes-Benz L3 system*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.valeo.com/en/valeos-lidar-technology-the-key-to-conditionally-automated-driving-part-of-the-mercedes-benz-drive-pilot-sae-level-3-system/>. [cit-2025-03-01].
- [11] *What is LiDAR? / Professional 3D scanning solutions / Artec 3D*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.artec3d.com/learning-center/what-is-lidar>. [cit-2025-02-25].
- [12] *Is LiDAR the same as ToF? –TOFSENSORS.COM– Tofensors*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://tofensors.com/blogs/news/is-lidar-the-same-as-tof>. [cit-2025-02-25].
- [13] *ToF (Time of Flight) Technology Industrial Use / Image Sensor for Industrial Use / Technology / Sony Semiconductor Solutions Group*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.sony-semicon.com/en/technology/industry/tof.html>. [cit-2025-02-25].
- [14] *Time of Flight (ToF) Sensors - FlightSense - STMicroelectronics*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/time-of-flight-sensors.html>. [cit-2025-02-25].
- [15] *Laserový ToF senzor vzdálenosti VL53L0X / dratek.cz*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://dratek.cz/arduino/34677-laserovy-tof-senzor-vzdalenosti-vl53l0x.html>. [cit-2025-03-01].
- [16] *How Do Phase Laser Sensors Work? / Accuracy Measurement Tech - Meskernel*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://meskernel.net/phase-laser-sensors/>. [cit-2025-04-01].
- [17] *How Do Phase Laser Sensors Work? / Accuracy Measurement Tech - Meskernel*. [B.r.]. Dostupné také z: [Silo%20Level%20Measurement%20Technologies%20%7C%20Laser-View%20Technologies](https://meskernel.net/phase-laser-sensors/). [cit-2025-04-01].
- [18] ČERMÁK, Jan. *Metody 3D skenování objektů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.

- [19] *Structured-light 3D scanner – Open Source Imaging*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.opensourceimaging.org/project/structured-light-3d-scanner/>. [cit-2025-03-01].
- [20] *History of Photogrammetry*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://teach.dariah.eu/mod/hvp/view.php?id=860>. [cit-2025-02-27].
- [21] *3D fotogrammetrie - Canon Czech Republic*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.canon.cz/business/imaging-solutions/3d-photogrammetry/>. [cit-2025-02-27].
- [22] *Exploration Tools: Photogrammetry: NOAA Office of Ocean Exploration and Research*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/photogrammetry/photogrammetry.html>. [cit-2025-03-01].
- [23] *Photogrammetry Software / Photos to 3D Scans / Autodesk*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.autodesk.com/solutions/photogrammetry-software>. [cit-2025-02-27].
- [24] *MRI for engineering - LEMTA*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://lemta.univ-lorraine.fr/en/mri-for-engineering/#>. [cit-2025-03-01].
- [25] *CT Scan Parts - Applied Technical Services*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://atslab.com/calibration/computed-tomography/ct-scan-parts/>. [cit-2025-02-25].
- [26] *Material analyses in one go with Industrial CT Scanning*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.rx-solutions.com/en/ct-applications/material-analyses-1205>. [cit-2025-03-01].
- [27] *Industrial CT scanner / Download Scientific Diagram*. [B.r.]. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/figure/Industrial-CT-scanner_fig1_265811375. [cit-2025-03-01].
- [28] VL53L0X - World smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor. 2016. ISBN 608251:2014. Dostupné také z: www.st.com.
- [29] TDC7200 TDC7200 Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Applications in LIDAR, Magnetostrictive and Flow Meters. 2015. Dostupné také z: www.ti.com.

- [30] 2 20m High Precision Compact Laser Distance Sensor Module ver. 2.1. [B.r.]. ISBN 608251:2014.
- [31] *20m Economical Laser Distance Sensor Module - IADIY Photonics*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.iadiy.com/Economical-Laser-Distance-Sensor-Module>. [cit-2025-03-31].
- [32] *Arduino Nano R3, ATmega328 Clone, Unsoldered pins / LaskaKit*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.laskakit.cz/en/arduino-nano-r3--atmega328p-klon--nepripajene-piny/?variantId=17648>. [cit-2025-04-10].
- [33] *Převodník logické úrovně 3,3 V / 5 V - UART - Iduino ST1167*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://botland.cz/menice-napeti/14271-prevodnik-logicke-urovne-33-v-5-v-uart-iduino-st1167-5903351242387.html>. [cit-2025-03-01].
- [34] *Stepper motor NEMA 17 17HS3401 0.28Nm / LaskaKit*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.laskakit.cz/en/krokovy-motor-nema-17-17hs3401-0-28nm/?>. [cit-2025-03-01].
- [35] A4988 - DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection. [B.r.]. Dostupné také z: www.allegromicro.com.
- [36] *Motor driver A4988 Pro Reprap 3D Tiskárny - červený / dratek.cz*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://dratek.cz/arduino/122957-motor-driver-a4988-pro-reprap-3d-tiskarny-cervený.html?>. [cit-2025-03-01].

Seznam příloh

- **Prototyp_Models:** Složka obsahující vymodelované tělesa v programu Autodesk Inventor
- **DPS_DP:** Složka se soubory DPS vytvořenými v programu KiCad 9.0
- **IDE_codes:** Složka s kódem pro mikrokontroler Arduino Nano
- **App:** Aplikace vytvořená v prostředí Matlab App Designer sloužící k ovládání zařízení