

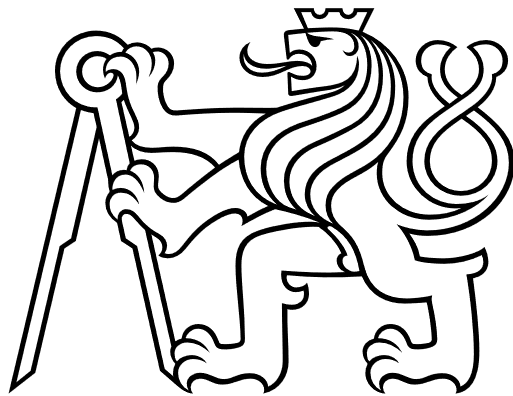
**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

U12105

Ústav mechaniky,

biomechaniky a mechatroniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Digitalizační zařízení malých
3D objektů

Scanner for small 3D objects

Vypracoval: Michal Černý

*Vedoucí
práce:* Ing. Jan Zavřel, Ph.D.

Rok: 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Zavřela, s použitím literatury uvedené na konci bakalářské práce v seznamu použité literatury

V Praze

dne:

.....

Michal ČERNÝ

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Janu Zavřelovi, za jeho cenné rady, lidský přístup a ochotu mi věnovat čas. Dále bych chtěl poděkovat mým rodičům za velkou podporu během studia a celému kolektivu, který jsem měl možnost během celého studia poznat za přátelskou atmosféru a možnost se na kohokoliv kdykoliv obrátit s prosbou o radu.

Michal ČERNÝ

Anotační list

Název práce: Digitalizační zařízení malých 3D objektů

Autor: Michal Černý

Ústav: U12105 - Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Druh Práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Zavřel, Ph.D.

Klíčová slova: 3D Skenner, Skenování, STL, Modul, Arduino

Title: Scanner for small 3D objects

Author: Michal Černý

Key words: 3D Scanner, Scanning, STL, Module, Arduino

Počet stran: 38

Počet obrázků: 31

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, sestavením a zprovozněním 3D skeneru. Teoretická část se bude zabývat návrhem konstrukce 3D skeneru a následného převodu dat do běžně používaného 3D formátu. Praktická část se bude zabývat výrobou jednotlivých dílů, následného sestavení a zprovoznění celé sestavy. Na konci bude proveden experiment, kdy bude otestována jak funkčnost, tak přesnost skeneru.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design, construction and operation of a 3D scanner. The theoretical part will deal with the design of the 3D scanner construction and subsequent data conversion into a commonly used 3D format. The practical part will deal with the production of individual parts, the subsequent assembly and commissioning of the entire assembly. At the end, an experiment will be conducted where both the functionality and the accuracy of the scanner will be tested.



Obsah

1	Úvod	7
2	3D skenery	8
2.1	Rozdělení 3D skenerů	8
2.1.1	Kontaktní	9
2.1.2	Bezkontaktní	10
3	Teoretická část	14
3.1.1	Sensor	14
3.2	Pohon	16
3.2.1	Servomotor	16
3.2.2	Krokový motor	16
3.3	Pojezdy	19
3.4	Mikroprocesor	19
3.5	Uživatelské rozhraní	20
3.6	Ukládání dat	21
3.7	Zpracování dat	21
3.7.1	Formát STL	22
4	Praktická část	23
4.1	Tvorba základny 3D modelu	23
4.2	Osa Y	24
4.3	Osy X a Z	25
4.3.1	Kinematický systém Core XY	26
4.4	Elektronika	28
4.4.1	Návrh plošného spoje	28
4.4.2	Kód pro mikroprocesor	29
4.4.3	Ukládání a zpracování dat	29
4.5	Finální návrh v programu Inventor	30
4.6	Sestavený skener	31
4.7	Experiment	32
5	Závěr	34
6	Citovaná literatura	35
7	Seznam použitého SW	37
8	Seznam obrázků	38



1 Úvod

Skenování je proces, při kterém skener (dále jen přístroj) zaznamenává pozice jednotlivých bodů. Při skenování ve 2D, například skenování papíru, přístroj zaznamenává dvě souřadnice a jedná se o rovinu. Při skenování ve 3D se jedná o polohy bodů v prostoru. V dnešní době se s 3D skenováním můžeme setkat v různých oborech, jako jsou například strojírenství, architektura, archeologie nebo lékařství. Zásadně to ulehčuje práci při reverzním inženýrství, neboli tvorbě 3D modelu součásti, která by se v jiném případě musela kreslit. Velké využití nyní nastává v oboru lékařství, kde se nemusí tvořit fyzické otisky pacienta. To má výhodu jak z hlediska jednoduchosti, tak z hlediska nulového použití materiálu nutného pro otisk. V archeologii je možnost naskenovat dokonce celé budovy, či historická místa, které pak zůstávají zachovány v podobě 3D modelu.

V této práci nejdříve provedu rešerši 3D skenerů a následně navrhnu a vyrobím vlastní jednoduchý 3D skener. Poté využiji program Matlab, který bude zpracovávat data a zobrazí naskenovaný model ve formátu STL. Na závěr porovnáím výsledný model z vyrobeného skeneru s běžně dostupným průmyslovým skenerem.

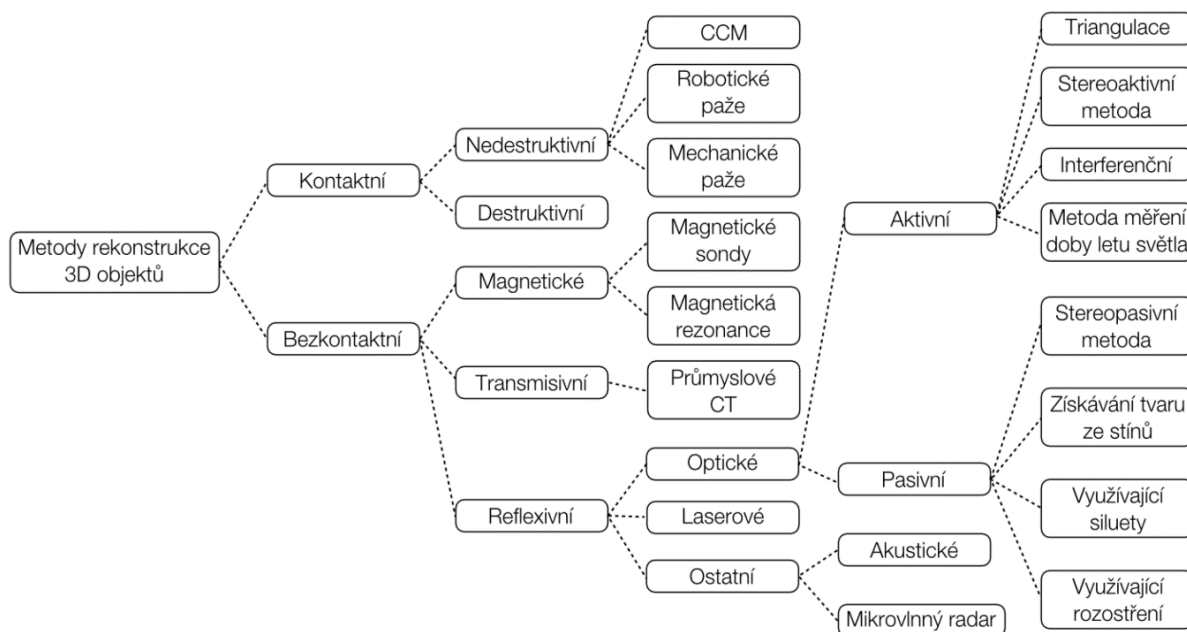
2 3D skenery

3D skenery jsou zařízení, které zachytávají pozici, nebo i barvu povrchu skenovaného objektu. Tvoří tedy síť bodů. Pro získání této sítě bodů se využívá mnoho různých technologií, jako jsou například laserové, rentgenové, magnetické, ultrazvukové či mechanické. V dnešní době se nejčastěji setkáme s nedestruktivními metodami, která jak již název napovídá, danou součást nezničí. Ovšem každá metoda má své výhody a nevýhody, a proto se s destruktivním skenováním stále setkáme.

Dalším způsobem získání 3D modelu je fotogrammetrie, která využívá sadu fotek zachycených z různých úhlů, které se následně pomocí softwaru a složitějších algoritmů převedou na 3D model. U tohoto typu tvorby modelu je však hlavní nevýhodou přesnost, která bude vždy nižší než u výše zmíněných typů 3D skenerů. Avšak její velkou výhodou je, že v dnešní době ji může díky chytrému telefonu a internetu využít prakticky každý a kdekoliv. [3]

2.1 Rozdělení 3D skenerů

Hlavní rozdělení 3D skenerů je na kontaktní a bezkontaktní. Dnes se v průmyslu nejčastěji setkáme se skenery bezkontaktními, přesněji se skenery, které spadají do kategorie reflexních. Tyto skenery jsou převážně jednodušší k používání, jsou přesné a rychlé. V medicíně se pak můžeme setkat se skenery magnetickými, neboli MRI a transitivitymi, zkratka CT. Na Obr. 1 je znázorněno širší rozdělení skenerů rozdělení skenerů. [1]



Obrázek 1-Rozdělení 3D skenerů [1]

2.1.1 Kontaktní

2.1.1.1 Nedestruktivní

Mezi kontaktní nedestruktivní 3D skenery můžeme prakticky započítat všechny sondy, které snímají povrch součásti. Tyto sondy se používají převážně u CNC strojů, a to jak ke kontrole rozměrů součásti, tak k naskenování polotovaru a najetí do určité pozice. Na Obr. 2 je sonda od firmy Heidenhain používaná u CNC strojů. Kovové tělo se po spojení s vřetenem stroje stává pevnou součástí. V oblasti kde končí kovové tělo a pokračuje pouze hrot, se nachází kloub, který umožňuje malé výchylky hrotu. Je to forma odpružení, která brání destrukci sondy a zároveň sepnutí kontaktu pro detekci dotyku. Na konci hrotu se nachází keramická koule. [3]

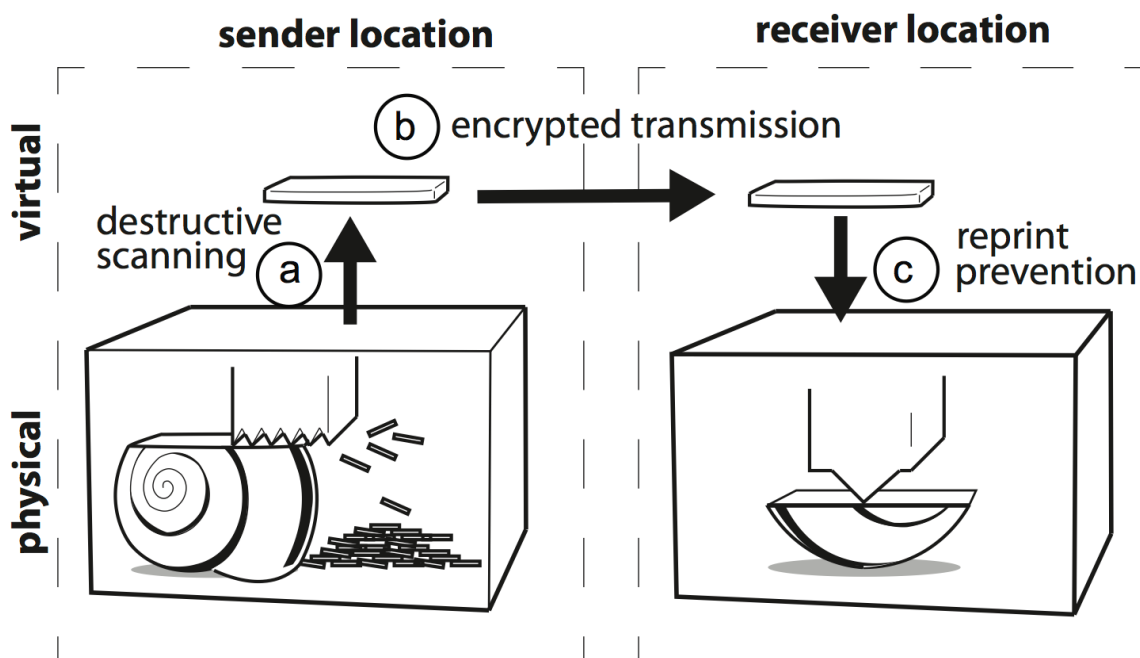


Obrázek 2-Sonda Heidenhain TS 750 [2]

2.1.1.2 Destruktivní

Výše popsaná metoda je metoda nedestruktivní, druhým odvětvím v kontaktním 3D skenování je metoda destruktivní. Ta by se dala přirovnat k obrácenému procesu 3D tisku. Součást se zalije do materiálu s odlišnou barvou než je barva obrobku, který po určité době nabude pevného skupenství. Blok se poté vloží do frézky a po tenkých vrstvách se odfrézovávají tenké vrstvy konstantní tloušťky. U každé vrstvy se následně zachytí snímek z určité vzdálenosti od povrchu snímaného povrchu. Ze snímků se vytvoří bitmapa s body v souřadnicích XY.

Vznikne tedy sada 2D map, ke které se poté přidá vzdálenost Z snímače obrazu a vznikne 3D mapa skenované součásti. Velikou výhodou tohoto typu skenování je možnost snímání dutin, které pomocí reflexních skenerů nejsme většinou schopni zachytit. Proces skenování a následného 3D tisku stejné součásti je znázorněn na Obr. 3. [3]



Obrázek 3-Znázornění procesu destruktivního skenování a následného 3D tisku [4]

2.1.2 Bezkontaktní

Bezkontaktní 3D skenování využívá ve většině případů elektromagnetické částice nazývané se fotony. Tyto skenery můžeme obecně zařadit mezi reflexní skenery, jelikož se zde využívá odrazu vyslaných částic od povrchu součásti a následné zachycení jejich návratu zpět k senzoru. Při zachytávání se většinou snímá jak doba letu paprsku, tak množství odraženého paprsku. Můžeme sem také zařadit skenery ultrazvukové, které fungují na principu měření délky letu zvukových vln z reproduktoru k povrchu a zpět do mikrofonu.

2.1.2.1 Optické

Reflexní Time of flight (ToF)

ToF sensory měří dobu, která zabere buď paprsku či vlně k překonání vzdálenosti od zdroje ke snímanému povrchu a zpět k senzoru. Mezi tuto metodu můžeme zařadit ultrazvuková sensory a LIDARy, kdy ultrazvukový používá rychlost zvuku a LIDAR rychlost světla. Jelikož je rychlost světla mnohonásobně větší, můžeme říci, že je rychlost snímání LIDARu větší než ultrazvukového sensoru. [5]

Ultrazvukový sensor

Mezi hlavní výhodu tohoto sensoru je jednoduchost, jelikož je celý sensor složený pouze z reproduktoru a mikrofону. Ultrazvuk jsou vlny o frekvenci vyšší než 20 kHz. Člověk dokáže v průměru zachytit zvuk v rozmezí 20-20000 Hz, jedná se tedy o zvuk, který lidské ucho nedokáže zachytit. Nejpřesnější ultrazvukové sensory mají přesnost až 0,1%, běžné se pak nachází v rozmezí 3-5%, Nejedná se tedy o přesný typ měření a využívá se například u robotických vysavačů. V dnešní době už se ale většinou nahrazuje LIDARem. Na Obr. 4 je běžně dostupný modul ultrazvukového sensoru vzdálenosti HC-SR04. [6]



Obrázek 4-Ultrazvukový snímač vzdálenosti HC-SR04 [7]

LIDAR (Laser distance sensor)

LIDAR využívá úzkého laserového paprsku, kdy paprsek nejdříve vypustí a poté snímá dobu letu paprsku ke snímanému povrchu a zpět do sensoru. Jedná se tedy o stejný princip jako u ultrazvukového sensoru, s rozdílem ve vysílaném signálu. V dnešní době se s tímto typem můžeme setkat například při skenování zemského povrchu, snímání vzdálenosti obrobku v automatizačních linkách, při geodézii, či u robotických vysavačů, sekaček a dalších robotických přístrojů. Běžně dostupné LIDARové sensory mají přesnost 1 mm, je tedy přesnější než ultrazvukový sensor. V průmyslovém odvětví se pak můžeme setkat se sensory s přesností v řádech setin milimetru. Na Obr. 5 je běžně dostupný LIDAR sensor SEN0259. [8]



Obrázek 5-LIDAR sensor SEN0259 [9]

Infračervený sensor (IR)

Infračervený sensor vzdálenosti na rozdíl od ToF sensorů neměří dobu letu paprsku či vlny, ale množství odraženého paprsku. Záleží tedy na povrchu materiálu více než u jiných sensorů. Na Obr. 6 je běžně dostupný IR sensor vzdálenosti od firmy SHARP s označením GP2Y0A21YK0F. [10]



Obrázek 6-IR sensor GP2Y0A21YK0F [11]

Structured light

Mezi další optické bezkontaktní metody skenování se řadí způsob zvaný „structured light“. U této metody se na plochu skenovaného objektu promítne pravidelný vzor. Ve většině případů je tímto vzorem pravidelná mřížka a k projekci se nejčastěji používají lasery. Na skeneru je pak umístěna jedna nebo více kamer, která snímá zakřivení mřížky a je tak schopna zaznamenávat pozici více bodů najednou. Součástí skeneru je také snímač vzdálenosti referenčního bodu, například středu užitého vzoru. Od tohoto bodu se nadále dopočítávají další body. Jedná se tedy o velice rychlou metodu skenování. [12]

U této metody také zmíním skener Creaform HandyScan 307, který později použiji při testování, kdy budu porovnávat model právě z tohoto přístroje s modelem, který naskenoval mnou navržený skener. Na Obr. 7 je vidět skener od firmy Creaform s označením HandyScan 307.



Obrázek 7-Creaform HandyScan 307 [13]

2.1.2.2 Magnetické (MRI)

S tímto typem skenování se potkáme především ve zdravotnictví, kde se tímto typem skenují lidské orgány. Princip skenování je podobný jako u destruktivního skenování, které bylo zmíněno v kapitole 2.1.1.2. Tvoří se tedy několik 2D snímků, ze kterých se následně po přidání třetí souřadnice utvoří 3D model. [14]

3 Teoretická část

3.1.1 Sensor

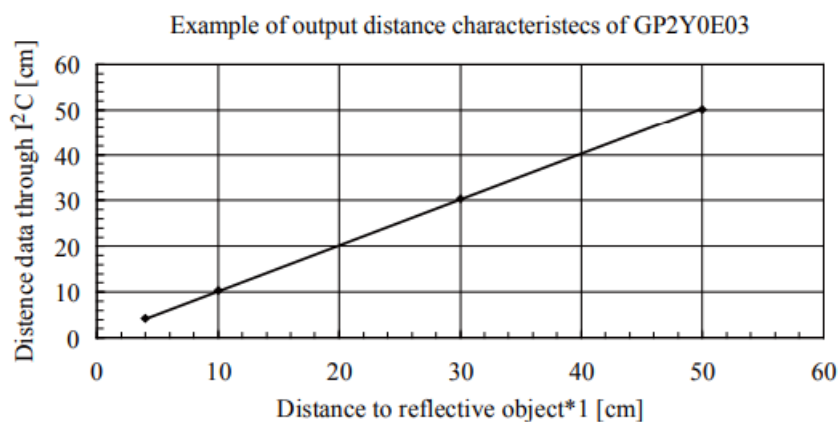
U běžného reflexního 3D skeneru je hlavní komponentou sensor, který měří buď dobu letu paprsku či vlny k povrchu a zpět, intenzitu paprsku, či fázové posunutí přijatého signálu. Já na svém skeneru použiji infračervený snímač od firmy SHARP s označením GPY3, který je z hlediska dostupnosti, finanční stránky a přesnosti pro tuto práci vhodný.

Ke snímání jsem nakonec zvolil IR snímač od firmy SHARP s označením GP2Y0E03, který je dostatečně přesný a finančně dostupný. Jeho cena se pohybuje okolo 600 Kč.

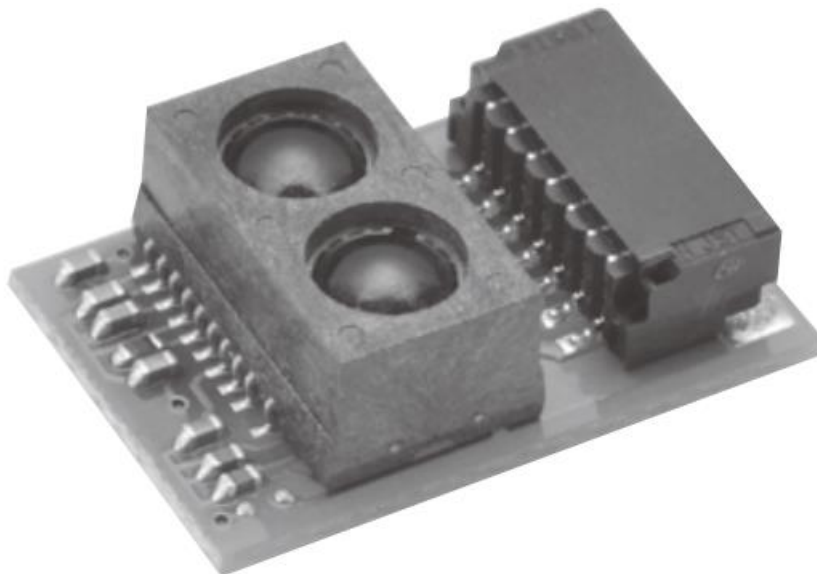
3.1.1.1 GP2Y0E03

Sensor dokáže měřit v rozsahu 40–500 mm. Data ze sensoru se dají získávat buď analogickým signálem nebo přes komunikační rozhraní I2C. Při získávání dat analogovým signálem je potřeba mít mikroprocesor s vysokou přesností analogového vstupu. Sensor má 12ti bitové rozlišení. Já jsem pro svůj skener zvolil mikroprocesor s rozlišením na analogovém vstupu 10 bitů. Pokud bych tedy zvolil komunikaci přes analogové rozhraní, nedostával bych tak přesné hodnoty, které sensor dokáže naměřit. Tento problém by se dal vyřešit použitím mikroprocesoru s vyšším rozlišením, například Arduino Due, které má na analogovém vstupu rozlišení 12 bitů, to je ovšem finančně náročnější, proto jsem zvolil cestu, kdy sensor bude posílat data přes rozhraní I2C.

Výstupní charakteristika naměřené vzdálenosti je lineární, tudíž bude možné použít pro přepočítání hodnot pouze jednoduchou lineární rovnici. Závislost výstupních dat ze sensoru na vzdálenosti je znázorněn na Obr. 8. Na Obr. 9 je sensor osazen na desce plošného spoje, který umožňuje komunikaci přes I2C. [15]



Obrázek 8–Závislost výstupních dat na skutečné vzdálenosti GP2Y0E03 [15]



Obrázek 9-Osazení GP2Y0E03 na desce [15]

Technická data sensoru:

Zdroj světla: infračervená LED dioda

Rozsah měření: 40-500 mm

Provozní napětí: 5V

Rozměr součásti: 16,7 x 11 x 5,2 mm

Komunikace: I2C/Analogový výstup

[15]

3.2 Pohon

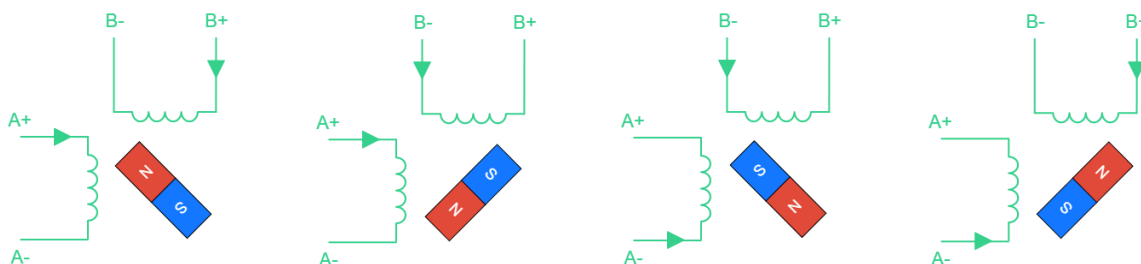
Jelikož jsem se rozhodl pro sestavení automatického skeneru, bude potřeba elektrický pohon, který bude měnit pozici skenovaného objektu a sensoru. Mezi nerozšířenější typy v průmyslové oblasti se řadí servomotory a krokové motory. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma pohony je nutnost zpětné vazby.

3.2.1 Servomotor

Servomotor je jednoduše řečeno zpřevodovaný elektromotor s enkodérem. V dnešní době je to nejčastěji elektromotor asynchronní. Přesnost pohonu pak závisí na rozlišení enkodéru, to se může pohybovat od stovky poloh na otáčku do několika set tisíc poloh na otáčku. Velkou výhodou oproti krokovému motoru je rychlost pohybu a stálost krouticího momentu. K mému projektu ale využiji krokových motorů, jelikož se jedná o levnější řešení při srovnání pohonů o stejném rozlišení.

3.2.2 Krokový motor

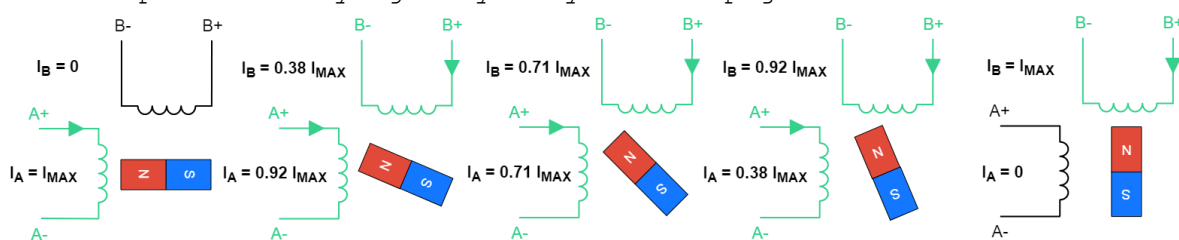
Krokový motor je prakticky stejný jako asynchronní motor, s tím rozdílem, že má na jednu otáčku mnohem více poloh. Stator je tvořen převážně dvěma cívkami a rotor dvojicemi magnetů. Standardní rozlišení krokových motorů je 200 poloh na otáčku. Polohu rotoru tedy budeme uchovávat v paměti mikroprocesoru a při každém dalším kroku přičteme danou jednotku. Rozlišení se dá zvýšit takzvaným mikrokrokováním a získat místo klasických 200 poloh na otáčku až 51 200 poloh na otáčku. Maximální rychlost motoru je limitována řídicí elektronikou. Velikou nevýhodou krokových motorů je ztráta krouticího momentu při vyšších rychlostech. Polohy rotoru při standardním chodu bez mikrokrokování jsou znázorněny na Obr. 10.



Obrázek 10–Znázornění poloh při standardním chodu motoru bez mikrokrokování [16]

3.2.2.1 Mikrokokování

Mikrokokování je pojem, který u krokových motorů označuje rozdělení plného kroku na více menších kroků. Plným krokem se rozumí stav, při kterém je na obou cívkách stejná hodnota proudu, a to $0,71 I_{\max}$. K výpočtu proudu na cívkách použijeme Pythagorovu větu, kdy odmocnina součtu druhých mocnin na cívkách musí dát celé číslo jedna, které reprezentuje hodnotu maximálního proudu I_{\max} . Při mikrokokování dochází k nerovnoměrnému rozdělení proudů do cívek, ale stále musí být dodrženo pravidlo Pythagorovy věty. Princip je znázorněn na Obr. 11.



Obrázek 11-Znázornění chodu motoru při mikrokokování [16]

Rozlišení mikrokokování záleží na řídicí jednotce motoru. Tato jednotka se nazývá driver krokového motoru. Více v následující kapitole.

3.2.2.2 Drivery krokových motorů

Driver krokového motoru je logický obvod, který do jednotlivých cívek motoru pouští daný proud v daném čase. Drivery krokových motorů si za poslední dekádu prošly obrovským zlepšením a to z důvodu použití krokových motorů v oblasti 3D tisku, který neustále zvyšuje svou popularitu.

Nejběžnějším driverem byl až do nedávna driver s označením A4988, který umožňoval mikrokokování s rozlišením 2, 4, 8, 16 a 32. Při maximálním rozlišení mohl mít tedy motor 6 400 poloh na otáčku. Tyto drivery v dnešní době začínají nahrazovat drivery od německé firmy TMC, která vytvořila dle mého názoru až průlomové funkce driverů, které posunuly pohon pomocí krokových motorů na jinou úroveň. Mezi hlavní funkce patří snímání takzvané ztráty kroků zvané StallGuard, kdy driver pozná, že motor neučinil daný krok, když měl a rotor zůstal na místě, neboli proklouzl. Tento jev se vyskytuje převážně při vysoké zátěži motoru, kdy není magnetické pole cívek dostatečně silné. Této funkce driverů můžeme použít nejen k zjišťování ztráty kroků, ale také k najetí do nulové pozice, kdy není potřeba koncový snímač. Motor jede, dokud nenarazí na pevnou překážku. Při nárazu driver pozná, že dochází k prokluzu a motor zastaví.

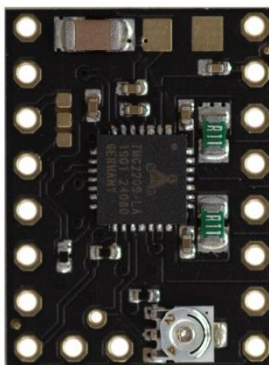


Funkce CoolStep, jak firma TMC tuto funkci nazývá, využívá již zmíněné technologie StallGuard po celou dobu pohybu a upravuje proud tekoucí do cívek statoru v závislosti na zatížení. Pokud do motoru teče menší proud, šetří se tím jak energie, tak krokový motor samotný, jelikož se tolik nezahřívá.

Dalším zlepšením driverů od firmy TMC je hlučnost pohybu motorů. Běžné drivery měly obdélníkový průběh proudu na cívkách, kdy byl pohyb trhaný, a bylo možné slyšet klasický vrčivý zvuk. TMC drivery posílají do motoru proud v sinusových signálech. Pohyb je tedy plynulý a pohyb motoru je prakticky neslyšitelný. [17]

Firma TMC a jejich krokové drivery mají mnohem více funkcí, já jsem vybral dle mého názoru pouze nejdůležitější.

Pro skener jsem vybral drivery s označením TMC2009. Zvolil jsem tento typ z důvodu zkušeností práce s těmito drivery a jednoduchostí připojení a nastavení, jelikož jsou pro ovládání napsané knihovny. Celkem použiji 3 drivery, na desce však budou drivery 4 a to z toho důvodu, pokud bych chtěl do budoucna přidat další osu, například naklápění sensoru. Na Obr. 12 je osazen čip TMC2009 na desce plošného spoje.



Obrázek 12-TMC2009 osazené na desce plošného spoje [17]

Technická data driveru:

Provozní napětí: 5V

Rozsah spínaného napětí: 4,75-29V

Maximální mikrokrokování: 256

Proud na fázi: 1,7 A

Rozměry desky: 15,32 x 20,32 mm

Speciální funkce: MicroPlyer, CoolStep, SpreadCycle, StealthChop2, StallGuard4, Stall detection, Short detection

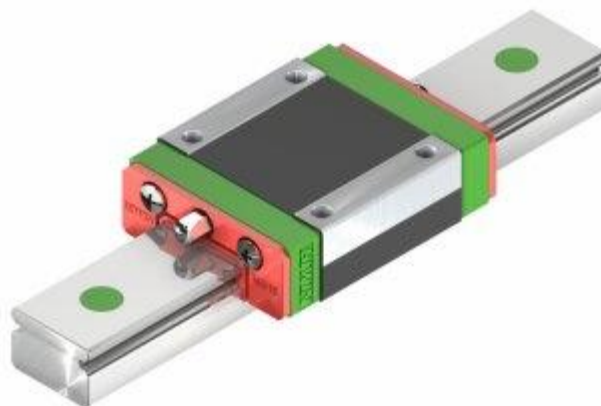
[17]

3.3 Pojezdy

K vedení jednotlivých os se často používají vodící tyče s lineárními ložisky. Tento typ odebírá pouze čtyři stupně volnosti a k dosažení pouze jednoho stupně volnosti, je nutné použití dvojice vodících tyčí.

System lineárních pojezdů s označením MGN odebírá 5 stupňů volnosti a je tedy možné použít pouze jednu kolejnici a jeden vozík. Samozřejmě jsou zde vůle, ale nejsou tak velké, aby to zásadně ovlivnilo přesnost skeneru.

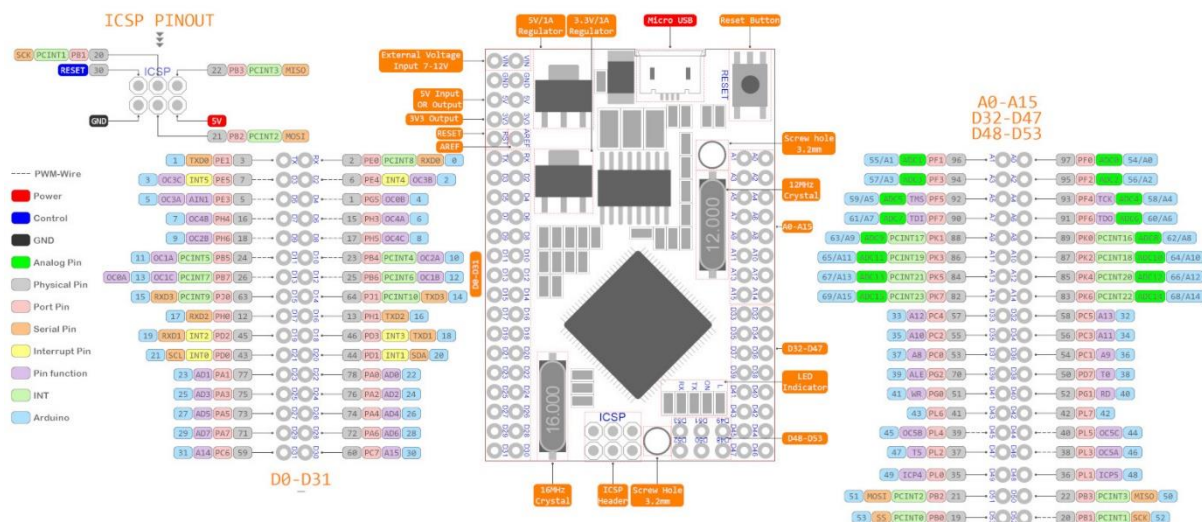
K přenosu rotačního pohybu motoru na lineární jsem se rozhodl pro ozubené řemeny a ozubené řemenice, jelikož mají oproti trapézovým tyčím mnohem menší vůle a použití kuličkových šroubů by bylo zbytečně finančně náročné. System lineárního pojezdu je vidět na Obr. 13.



Obrázek 13-Lineární pojezd s označením MGN-12H od firmy HiWin [18]

3.4 Mikroprocesor

K řízení všech elektrických částí budu používat mikroprocesor AT Mega2560 umístěný na rozměrově menší verzi Arduina Mega, tedy Arduino Pro Mega. Při výběru jsem se rozhodoval mezi použitím právě Arduina Mega a Arduina Due, které je výkonnější. Zvolený sensor vzdálenosti má možnost jak analogového výstupu, tak digitálního výstupu. Nejdříve jsem chtěl použít analogový výstup s Arduino Due, jelikož má oproti Arduino Mega 8krát větší rozlišení snímání napětí na analogových vstupech, tím pádem větší přesnost snímání vzdálenosti. Samotný sensor však obsahuje vlastní analogový snímač o stejném rozlišení jako má Arduino Due a převádí ho na signál digitální. Rozhodl jsem se tedy kvůli finanční stránce pro Arduino Pro Mega. Schéma rozložení pinů je vidět na Obr. 14. [19]

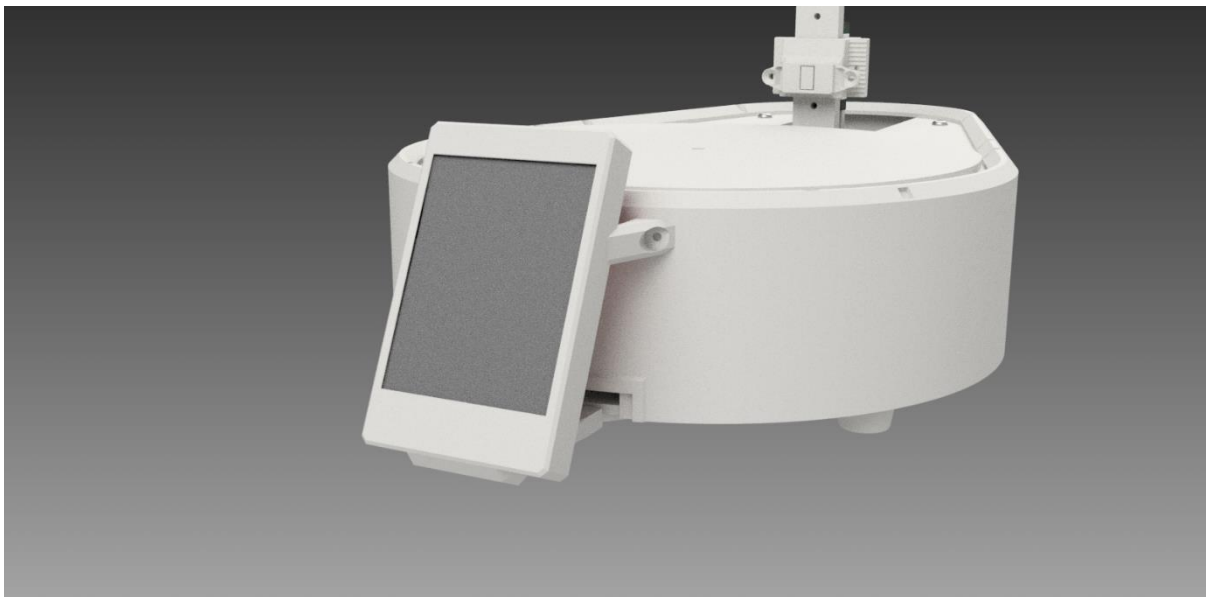


Obrázek 14-Označení pinů na desce Arduino Mega2560 Pro Mini [13]

K programování mikroprocesoru využiji prostředí Arduino IDE. Zvolil jsem tak z prostého důvodu, komptabilita s mikroprocesory a zkušenosti s prostředím.

3.5 Uživatelské rozhraní

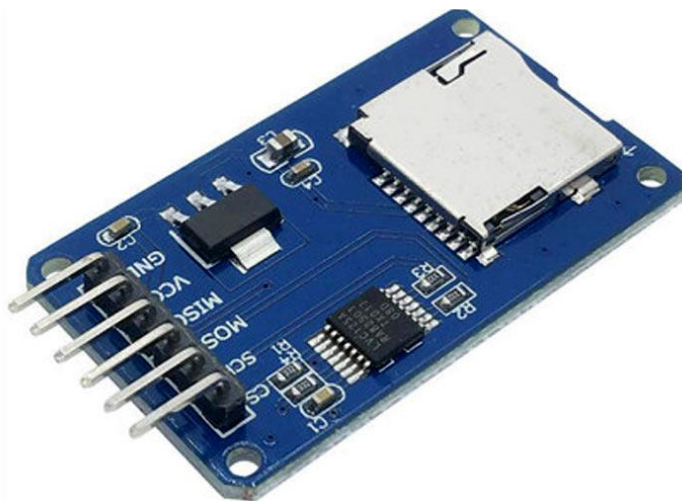
Ke komunikaci 3D skeneru s uživatelem bude sloužit dotykový displej. Přesněji TFT LCD dotykový displej s úhlopříčkou 3,2 palce. Popis fungování TFT displeje je mimo obsah této práce a bude tedy stačit informace, že je dotykový. Bude umístěn v přední části skeneru tak, aby byl lehce přístupný a uživatel tak mohl lehce skener ovládat. Na obrazovce displeje bude jak nastavení rozlišení skenování, tak nastavení rychlosti skenování a další uživatelská nastavení, které by mohl uživatel mít potřebu měnit. Dále zde bude tlačítko pro spuštění skenování, pozastavení skenování a jeho ukončení. Náhled skenu na obrazovce nebude z důvodu složitosti kódu. Umístění displeje na skeneru je možné vidět na Obr. 15.



Obrázek 15-Render umístění displeje na skeneru z programu Inventor

3.6 Ukládání dat

K uložení dat využiju modul čtečky MicroSD karet, pro který již existuje knihovna a je tak jednoduché ho zprovoznit. Komunikace s mikroprocesorem bude také probíhat přes rozhraní I2C Data ze skeneru budou zapsána do textového souboru v podobě tří souřadnic XYZ oddělených středníkem, kdy každý řádek bude reprezentovat jeden bod. Tato data pak v programu Matlab utvoří matici, se kterou se bude jednoduše pracovat. Použitá čtečka je vidět na Obr. 16.



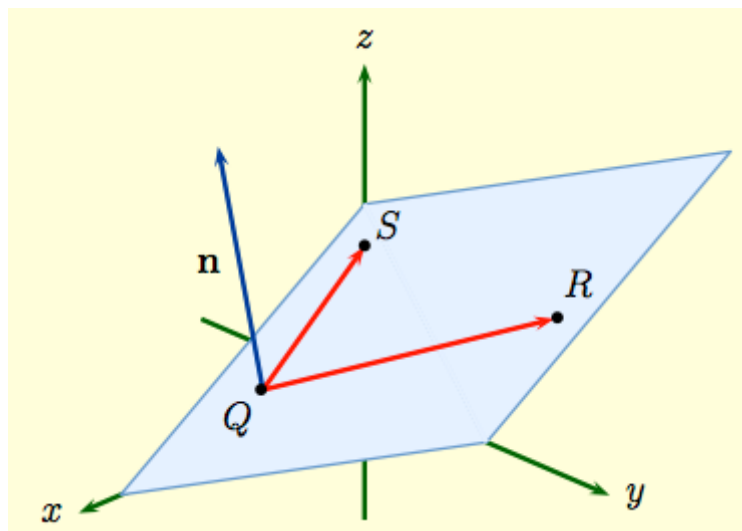
Obrázek 16-Čtečka Mikro SD karty pro Arduino [20]

3.7 Zpracování dat

Zpracování dat bude provedeno v programu Matlab. Program si nejdříve nahraje data ze skeneru do matice. Z této matice následně vytvoří soubor ve formátu STL.

3.7.1 Formát STL

STL je zkratka názvu stereolitografie. Jedná se o soubor, který dokáže uchovat rozměry modelu, ale nedokáže zapsat jeho vlastnosti, jako je například hustota, či barva. Jednoduše řečeno je to pouze zápis množiny trojúhelníků, kdy každý řádek reprezentuje jeden trojúhelník. Na každém řádku jsou zapsány tři body v 3D prostoru (X, Y, Z) a normálový vektor (n) trojúhelníku. Normálový vektor se dá snadno spočítat pomocí tří bodů v prostoru. Polohy vektorů a roviny jsou znázorněny na Obr. 17.



Obrázek 17-Znázornění vektorů na ploše v kartézském souřadnicovém systému [15]

$$n = \overrightarrow{QR} \times \overrightarrow{QS}$$

$$Q = (-1, 1, 2)$$

$$R = (-4, 2, 2)$$

$$S = (-2, 1, 5)$$

$$\overrightarrow{QR} = \langle -3, 1, 0 \rangle$$

$$\overrightarrow{QS} = \langle -1, 0, 3 \rangle$$

$$n = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -3 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 3 \end{vmatrix} = 3i + 9j + k \rightarrow n = \langle 3, 9, 1 \rangle$$

[21]

STL se dá zapsat ve třech formátech, ato textovém, ASCII a binárním. Binární je z hlediska velikosti souboru nejlepším řešením, jelikož zabírá nejméně místa na disku, ale já vytvořím soubor STL ve formátu textovém, aby byla lépe vidět struktura souboru.

4 Praktická část

S praktickou částí, jsem začal tvorbou modelu v programu Inventor. Při návrhu jsem se snažil, aby byl skener co nejvíce kompaktní a všechny jeho vnitřnosti byly skryté. Úkol skeneru bylo skenování součástí o malých rozměrech, proto jsem se rozhodl o maximální průměr skenovaného objektu 200 mm a maximální výšce 220 mm.

4.1 Tvorba základny 3D modelu

Mnou vybraný sensor funguje na principu měření množství přijatého infračerveného světla od skenovaného povrchu.

Tvar základny bude tedy tvořit hlavní kružnice, na kterou bude navazovat pomocí tečných přímků kružnice vedlejší, tak aby se zde mohl pohybovat sensor v určitém rozptylu od středu hlavní kružnice, pokud by bylo nutné sensor posunout do minimální vzdálenosti od povrchu 40 mm a zůstal tak zachován maximální skenovací průměr 220 mm

Kvůli dostatečné stabilitě uložení otočné plošiny jsem se rozhodl pro dva nad sebou odsazené pláty, tím také vznikne dutina, ve které bude možno schovat veškerou elektroniku a mechaniku. Hotová neosazená základna je na Obr. 18.



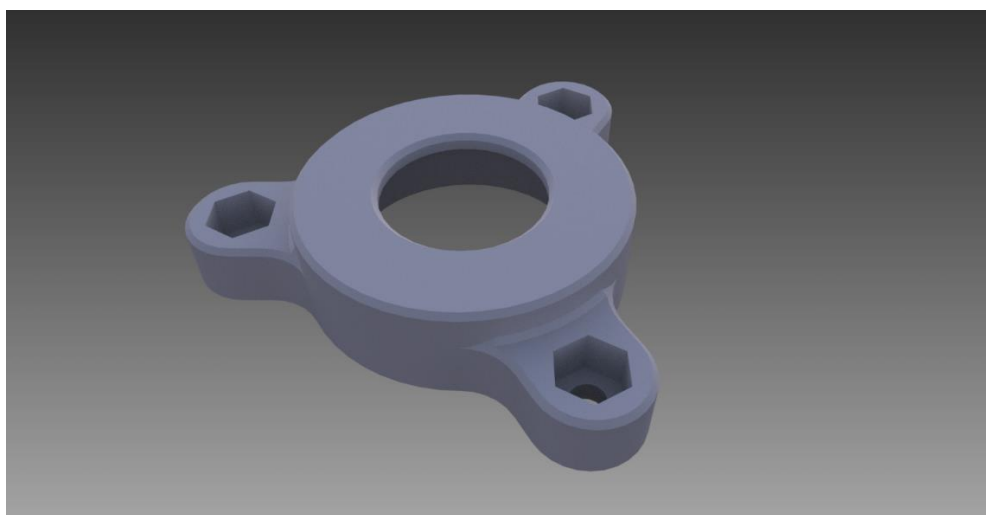
Obrázek 18-Neosazená základna skeneru



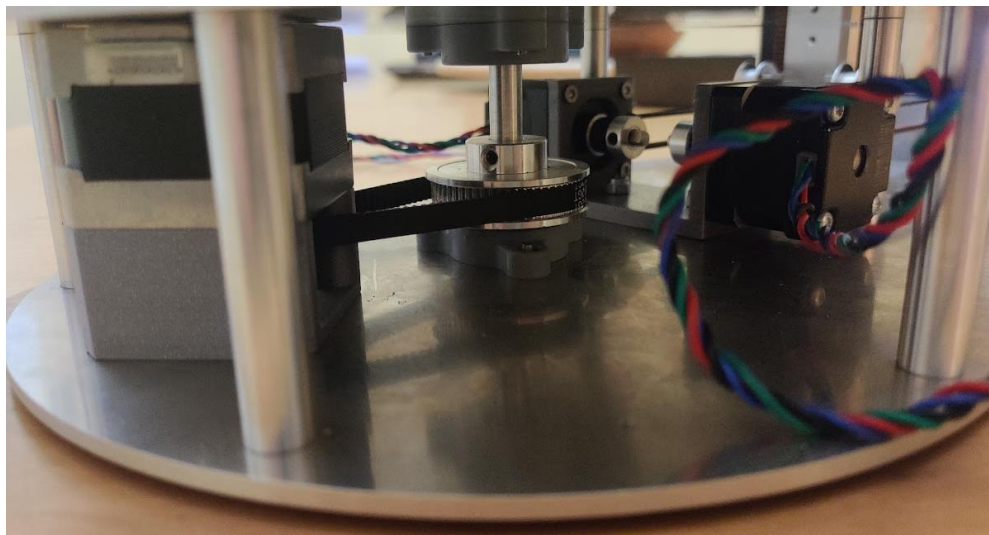
Abych zajistil dostatečnou tuhost základny, zvolil jsem jako materiál dural a všechny spoje provedl pomocí šroubů. K výrobě součástí jsem použil CNC frézku, pro upřesnění frézku s označením CNC 6040, konvenční soustruh a konvenční frézku, které jsem měl možnost využít. Složitější součásti, jako jsou domky pro ložiska nebo domek pro uložení sensoru, jsem vytiskl na SLA LCD 3D tiskárně, která dokáže tisknout s vysokou přesností.

4.2 Osa Y

Pohyb rotační osy Y bude proveden pomocí ozubeného řemene a dvojice ozubených řemenic s převodovým poměrem 1:5. Menší ozubená řemenice bude napřímo spojena s hřídelí motoru pomocí stavěcích šroubů. Větší ozubená řemenice bude opět pomocí stavěcích šroubů připevněna k hřídeli osy Y. Tato hřídel je uložena ve dvou radiálních ložiskách připevněných k základním deskám skeneru pomocí tištěného ložiskového domku, Obr. 19. Axiální pojištění hřídele je uskutečněno pomocí šroubu na spodní části hřídele. Napínání řemene je uskutečněno pomocí posunutí motoru. Motor má čtyři díry rozmístěné ve tvaru čtverce. Jednu z nich jsem tedy nechal pouze ve formě díry, u zbylých tří jsem udělal soustředné kružnice ke kružnici první díry a poté na obvodu těchto kružnic vytvořil drážky. Motor má tedy možnost rotace podle krajní díry o 5 stupňů a na napnutí řemenu je to postačující. K pohonu této osy jsem zvolil krokový motor s přírubou Nema 17 a výšce 35 mm. Na FDM tiskárně jsem vytiskl odsazení mezi motorem a základnou. Na Obr. 20 je vidět celý mechanismus osy Y.



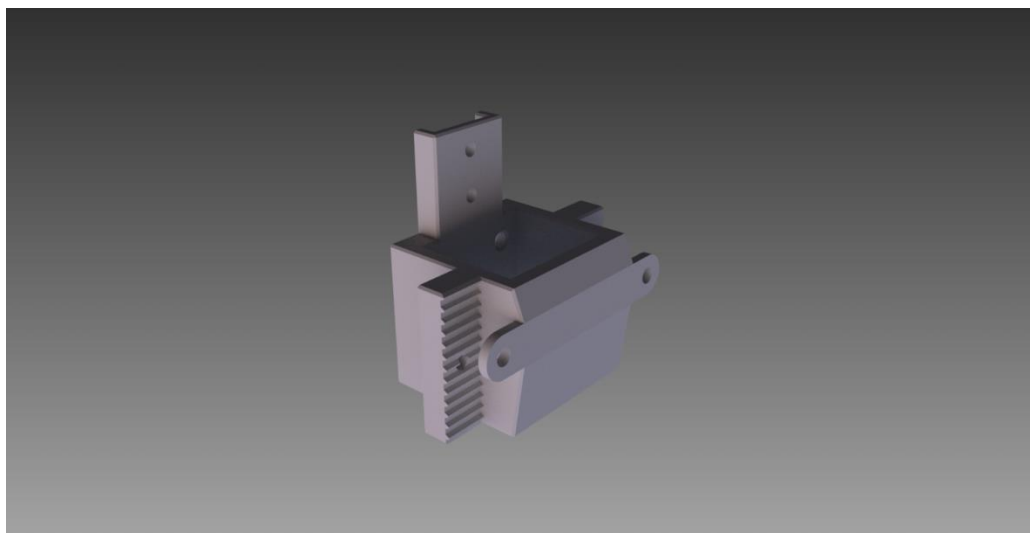
Obrázek 19-Ložiskový domek osy Y



Obrázek 20-Převod pomocí řemenu na ose Y

4.3 Osy X a Z

Jak již bylo dříve zmíněno, pohyb bude uskutečněn pomocí ozubených řemenů a řemenic. Abych nemusel na pohyblivou osu X připevňovat motor, inspiroval jsem se při volbě kinematiky u FDM tiskáren, které v dnešní době čím dál častěji využívají systém Core XY. Oba motory tedy budou ležet v jedné ose a budou na pevně připevněny k základně pomocí vyfrézovaného domku. K pohonu jsem použil dva krokové motory s přírubou Nema 14 o délce těla 35 mm. Bylo by možné použít i menší motory, jelikož nebude pohyb brzděn ničím jiným, než odporem tření v řemenicích a odporem mezi kolejnicí a vozíkem. Celkem jsem pro osy X a Z použil 6 ozubených řemenic a 4 hladké řemenice. Dvojice řemenic byly zakoupeny již s nalisovanými ložisky a bylo tedy nutné pro každou dvojici (kromě hnaných řemenic) vyrobit hřídel. To jsem provedl na soustruhu z duralové tyče. Řemenice jsou axiálně pojištěné pomocí distanční podložky a matice. Jelikož se jedná o závitovou dvojici o velikosti M3, zvolil jsem jako pojištění tmel od firmy Loctite. Hřídele jsou v domkách axiálně zajištěny pomocí stavěcího šroubu.



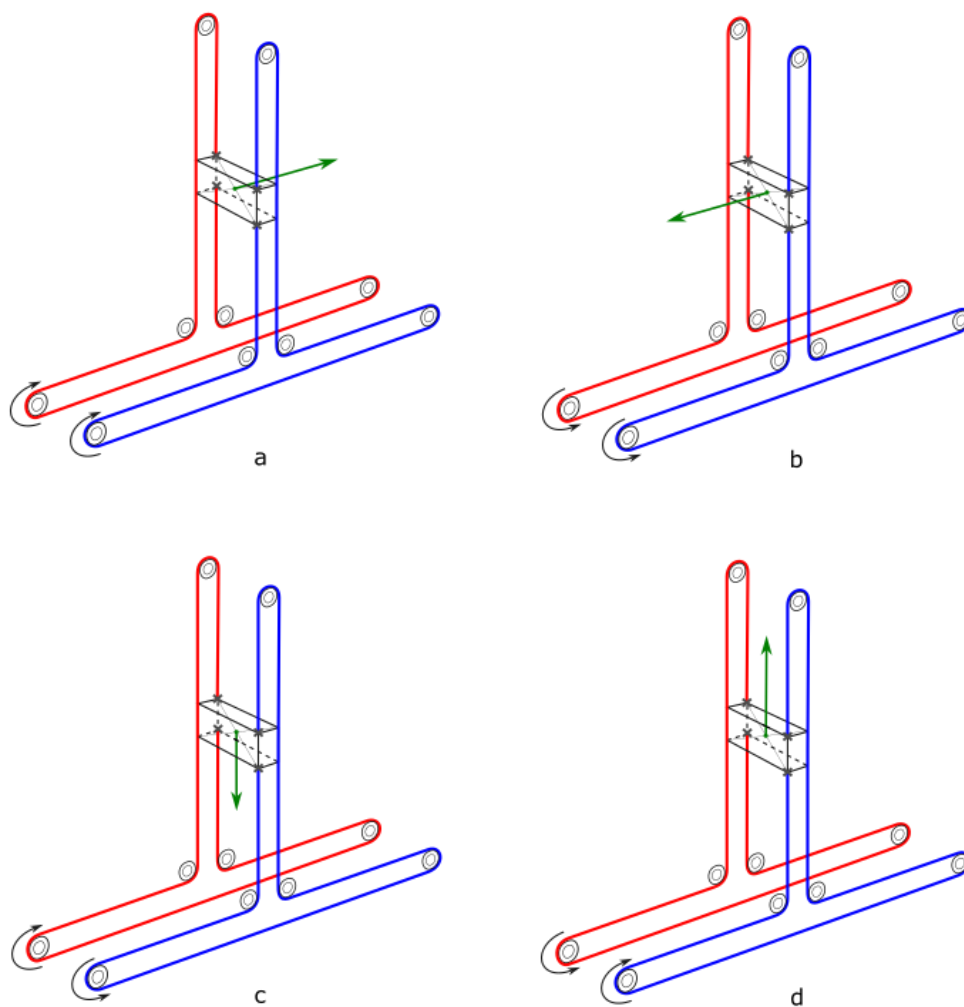
Obrázek 21-Pojezdový domek pro sensor

4.3.1 Kinematický systém Core XY

Core XY funguje na principu dvojice kooperujících motorů. To má značnou výhodu jak v odlehčení dalších os, na kterých by v opačném případě musela být pohonná jednotka, tak vyšší silou posuvu, za použití stejných pohonných jednotek, jelikož neustále zabírají dva motory. Na obrázku 22 je znázorněn směr pohybu sensoru v závislosti pohybu motorů



Šedé křížky označují připevnění řemenů k sensoru (černě zbarvený kvádr). Černě zbarvené elipsy v přehybech řemenů označují pevně upevněné řemenice. Všechny šipky naznačují směr pohybu, černé pohyb řemenů, zelená pohyb sensoru.



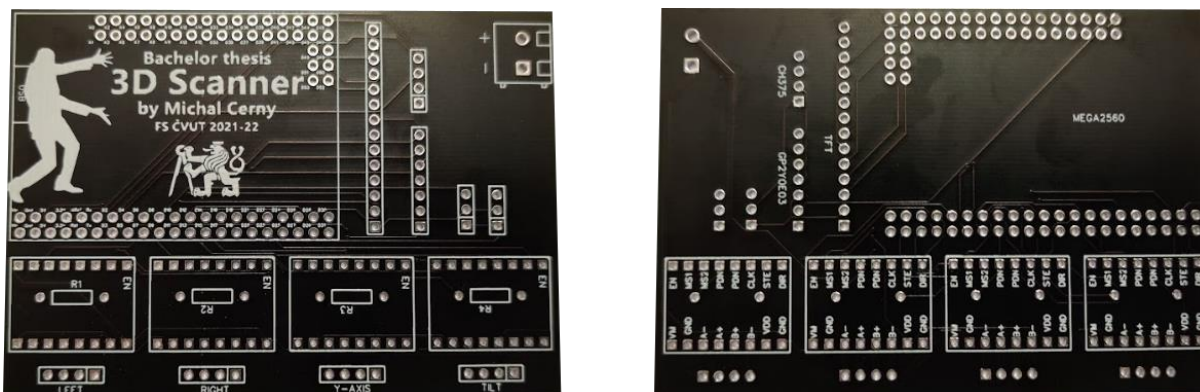
Obrázek 22-Znázornění pojezdů na osách X a Z v systému CoreXY

4.4 Elektronika

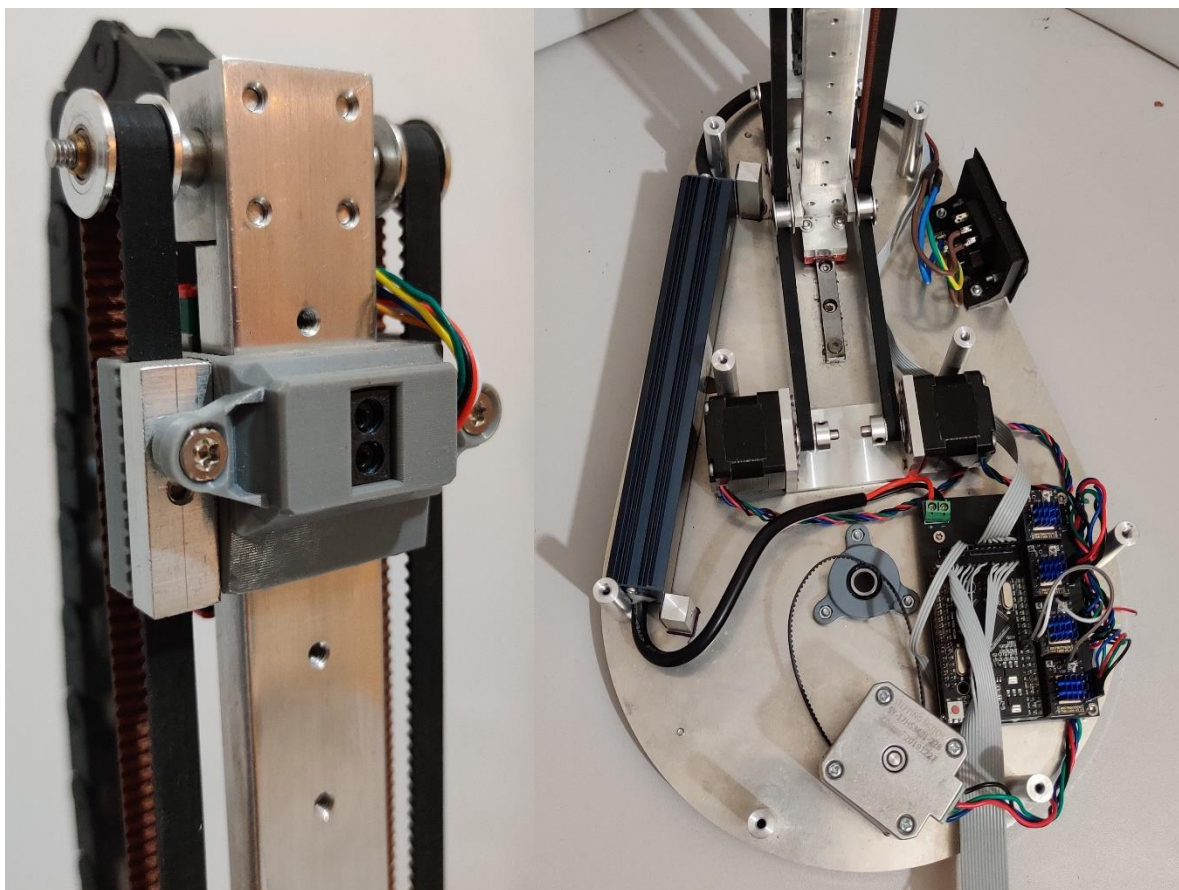
Všechna elektronika pracuje s napětím 5 V. Toto napětí ovšem není dostačující pro krokové motory a bude tedy nutné použít zdroj s napětím alespoň 12 V. Já jsem zvolil takový zdroj, aby se vešel do půdorysu základny a mohl být tak schován uvnitř. Konektor pro vstup napětí do skeneru je klasický síťový konektor s označením IEC60320. Nad konektor, který se nachází na pravé straně skeneru, jsem umístil kolébkový přepínač, který ovládá napájení celého skeneru. Všechna řídicí elektronika je na plošném spoji, který jsem navrhl a poté nechal vyrobit. Všechnu elektroniku nacházející uvnitř, je možné vidět na Obr. 24, na Obr. 25 je vidět připevněný sensor.

4.4.1 Návrh plošného spoje

Pro návrh plošného spoje jsem použil program EasyEda. V programu jsem nejdříve propojil dané součástky. Poté jsem dal vygenerovat cesty, kdy si program pomocí iterační metody vytváří cesty měděné vrstvy, která propojuje jednotlivé místa na desce. Na Obr. 23 je vidět konečný výsledek, který jsem nechal zhotovit u firmy EasyPCB.



Obrázek 23-Neosazený plošný spoj řídicí elektroniky



Obrázek 24-Umístění sensoru na skeneru (vpravo)

Obrázek 25-Rozložení elektroniky ve skeneru (vlevo)

4.4.2 Kód pro mikroprocesor

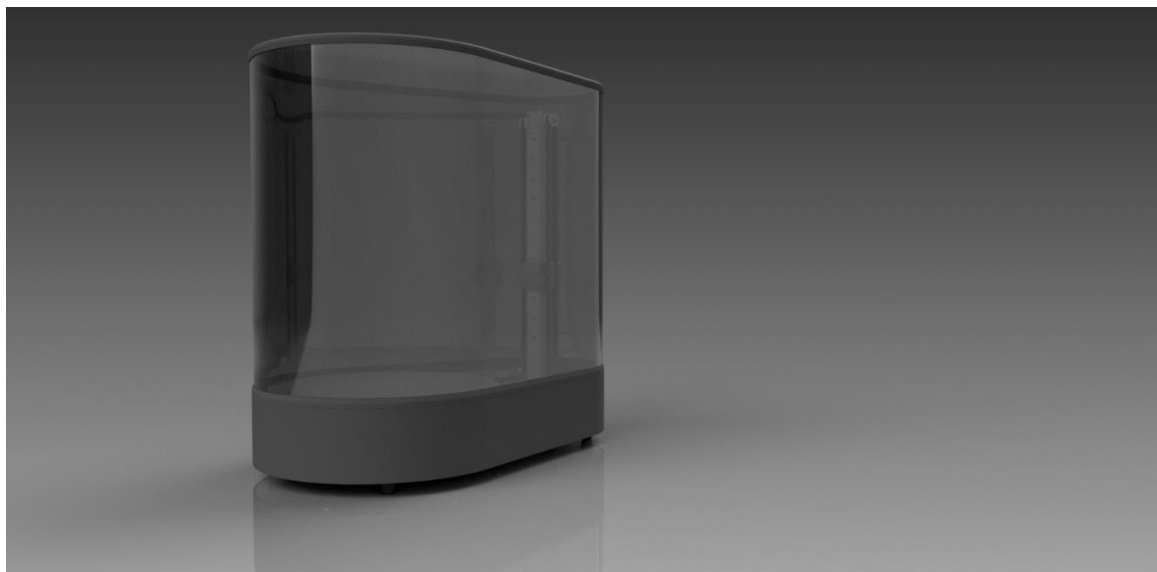
Kód jsem vytvořil v prostředí Arduino IDE. Celý program je tvořen hlavním souborem s názvem Main.h, a několika knihovnami na které se hlavní soubor odkazuje, kdy podprogramy v knihovně ovládají určité součásti. Uživatelské nastavení jako je například rychlost skenování se ukládá do vnitřní paměti zvané EEPROM, která dokáže uchovat hodnoty proměnných i po vypnutí napájení mikroprocesoru.

4.4.3 Ukládání a zpracování dat

Ukládání naskenovaných bodů probíhá současně při skenování na mikro SD kartu. Uložené souřadnice se poté ve formě matice nahrají do programu v prostředí Matlab, který mapu bodů převede na 3D formát STL.

4.5 Finální návrh v programu Inventor

Na Obr. 26 a 27 je vidět finální návrh skeneru v programu Inventor.



Obrázek 26-Render finálního návrhu skeneru s krytem v programu Inventor



Obrázek 27-Render finálního návrhu skeneru bez krytu v programu Inventor

4.6 Sestavený skener

Na Obr. 28 a 29 je možné vidět sestavený 3D skener. V porovnání s návrhem jsem na osu Z přidal energetický řetěz pro vedení kabelů.



Obrázek 28-Sestavený skener



Obrázek 29-Profil sestaveného skeneru

4.7 Experiment

V této části naskenuji objekt nejdříve pomocí svého skeneru, poté pomocí průmyslového skeneru Creaform HandyScan 307 a poté oba výsledky porovnám, jak mezi sebou, tak i s 3D modelem skutečného objektu v počítači.

4.7.1.1 Skenování

K experimentu jsem zvolil jednoduchý model, který jsem našel v knihovně 3D modelů na internetu a vytiskl na 3D tiskárně. Model bude celý z jednoho materiálu, měl by tedy mít na celém povrchu podobnou barvu a odrazivost paprsku infračerveného světla. Tato vlastnost je pro tento typ skeneru vyhovující. Jako objekt jsem zvolil sochu Alberta Einsteina o výšce 150 mm. Model byl vytištěn na LCD tiskárně od firmy Phrozen s označením Sonic Mega 8k. K tisku jsem zvolil bílý resin, tato barva by měla nejlépe odrážet světlo a výsledek by tak měl být přesnější.

Na skeneru jsem nastavil úhlový krok 5 stupňů a výškový krok 3 mm, poté úhlový krok 3 stupně a výškový krok 2 mm a poslední sken jsem udělal s nastavením úhlového kroku 1 stupeň a výškový krok 1 mm. Porovnání skenů z mého skeneru s různým nastavením je vidět na Obr. 30. Naskenované souřadnice jsem poté nahrál do programu v Matlabu, který mi data převedl na formát STL.

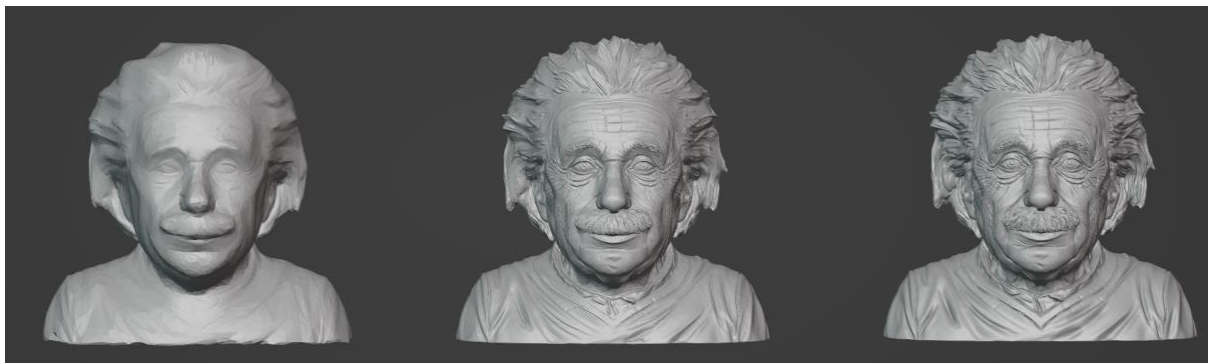


Obrázek 30-Porovnání skenů z mého skeneru s různým nastavením úhlového a výškového kroku. A) úhl. krok 5 stupňů, výškový krok 3 mm, B) úhl. krok 3 stupně, výškový krok 2 mm, A) úhl. krok 1 stupeň, výškový krok 1 mm.

Modely z mého skeneru jsem ještě v programu Blender doopravil, přesněji jsem použil vyhlazení modelu, jelikož na modelu byly body, které lehce vyčnívaly z modelu.

Při porovnání modelů ze skeneru je vidět, že mezi prvním a druhým skenem je poměrně veliký rozdíl v detailech, ale mezi druhým a třetím skenem už tak veliký rozdíl není. Lze z toho tedy usoudit, že při dalším zjemňování kroků posuvu, by nedošlo k velkému zlepšení výsledku skenování.

Stejný objekt jsem také naskenoval skenerem Creaform HandyScan 307, abych mohl výsledek s něčím porovnat. Porovnání je na Obr. 31, kde je první z levé strany mnou naskenovaný objekt, uprostřed se nachází objekt naskenovaný průmyslovým skenerem HandyScan a napravo je skutečný model objektu. S výsledkem mého skenu jsem spokojen. Sice postrádá detaily, které zvládl průmyslový skener HandyScan naskenovat, ale z modelu se dá poznat a jakou postavu se jedná.



Obrázek 31-Porovnání modelů, zleva model z mého skeneru, model z HandyScan 307, skutečný model



5 Závěr

V práci byla nejprve provedena rešerše 3D skenerů. Nejdříve jejich rozdělení a poté rozepsání mnou vybraných důležitých metod a jejich zástupce, které jsou běžně dostupné.

V další části práce byly popisovány další jednotlivé hardwarové prvky, pomocí kterých bude skener realizován. Volba hardwaru závisela především na dostupnosti, mých zkušenostech při práci s ním a na dostupnosti knihoven. V posledním bloku této části jsem popsal přepis souřadnic mapy bodů do formátu STL.

V práci jsou dále popisovány jednotlivé bloky systémového návrhu. V prvním bloku návrhu jsem se zabýval tvorbou základny skeneru, kterou jsem se snažil navrhnout tak, aby byl skener kompaktní a všechna elektronika a mechanika byla co nejvíce skryta. V dalším bloku jsem se zabýval jednotlivými osami. Pro svůj skener jsem zvolil systém pohybu CoreXY z důvodu odlehčení a miniaturizace pojezdu na ose X. Další blok byl věnován elektronice. Nejdříve jsem provedl návrh plošného spoje v programu EasyEDA, který dokáže na základě schématu vytvořit propojovací cesty na plošném spoji tak, aby se nepřekrývaly a bylo tak možné mít pouze dvouvrstvý plošný spoj. Dále jsem popsal rozložení programu pro mikroprocesor a konverzi dat ze skeneru do 3D formátu STL.

V poslední části jsem provedl experiment, při kterém jsem naskenoval vytištěný objekt nejdříve mnou sestrojeným skenerem s různými nastaveními rozlišení. Poté jsem objekt naskenoval průmyslovým skenerem Creafom HandyScan 307. Oba naskenované modely jsem pak porovnal s původním digitálním modelem.

Při skenování pomocí mého přístroje, jsem při zjemňování kroku skenování narazil na bod, kdy zmenšení kroku nemělo na kvalitu skenu velký rozdíl. To je způsobeno především senzorem.

Další vylepšování skenovacího procesu však touto prací skončit nemusí. Po softwarové stránce by bylo možné vylepšit plynulost chodu pojezdů při skenování a vyhlazení skenování snímání bodu iteračně. Po hardwarové stránce by se na skener dala přidat další osa, která by ovládala náklon samotného sensoru, který by se pak mohl dostat do úhlů, kam se nyní skener nedostane.

V této bakalářské práci byly splněny všechny stanovené cíle. A to od návrhu skenovacího zařízení a jeho sestavení až po testování funkčnosti přístroje.



6 Citovaná literatura

- [1] HRONČOK, Miro. *Skenování* [online]. 11 2018. Dostupné z: <https://courses.fit.cvut.cz/BI-3DT/tutorials/scan.html>
- [2] *Heidenhain probes* [online]. B.m.: HaidenHain. 2022. Dostupné z: <https://www.heidenhain.com/products/touch-probes-and-vision-systems/workpiece-measurement/ts-150-750>
- [3] WISNIEWSKI, P., R. SITEK a Jaroslaw MIZERA. *3D Scanning* [online]. 2019. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/337740470_3D_Scanning
- [4] MUELLER, S., M. FRITZSCHE, J. KOSSMANN, M. SCHNEIDER, J. STRIEBEL a P. BAUDISCH. *Relocating Physical Objects Using Destructive* [online]. B.m.: MIT CSAIL. 2017. Dostupné z: <https://hcie.csail.mit.edu/research/scotty/scotty.html>
- [5] YAGHOOTIAN, Amin a Farhang HONARVAR. *Modeling of Ultrasonic Time of Flight Diffraction signals By Nonpraxial Multigaussian Beams* [online]. B.m., 2012. Article. b.n. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304805523_Modeling_of_Ultrasonic_Time_of_Flight_Diffraction_signals_By_Nonpraxial_Multigaussian_Beams
- [6] KOUKOVINIS, Christos. Ultrasonic distance sensor. 1986, **1986**, The Journal of the Acoustical Society of America.
- [7] *Ultrasonic sensor with arduino uno* [online]. zima 2020. Dostupné z: <https://www.hackster.io/csw1/ultrasonic-sensor-with-arduino-uno-f33ca1>
- [8] PRAMOD, K. a M. C. AKSHAY. *LIDAR Technology* [online]. B.m., 2022. b.n. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/360989108_LIDAR_Technology
- [9] *SEN0259* [online]. B.m.: Farnell. 2022. Dostupné z: https://cz.farnell.com/dfrobot/sen0259/lidar-laser-range-sensor-tfmini/dp/3769959?gclid=CjwKCAjw0dKXBhBPEiwA2bmObZRq08octYpYRdIS CXTJ1GkqAXkLSR2kdYi-ijpX350lLDJzUv2-ZBoCDjsQAvD_BwE&mckv=_dc|pcrid||plid||keyword||match||slid||product|3769959|pgrid||ptaid||&CMP=KNC-GCZ-GEN-SHOPPING-PMax&gross_price=true
- [10] COBURN, Joseph. Distance Sensor: Chapter Goal: Install an IR distance sensor and detect when an object is in range. In: *Build Your Own Car Dashboard with a Raspberry Pi*. 1. vyd. 2020.
- [11] *GP2Y0A21YK0F* [online]. B.m.: SHARP. 2022. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/sharp/gp2y0a21yk0f/sensor-distance-analogue/dp/1243869?gclid=CjwKCAjw0dKXBhBPEiwA2bmObeyruDtHoyhghkqAK->



- NilOybhLxH9UExp1o7qT2mgrpGm4_0jQIif3hoCqMMQAvD_BwE&mckv=_dc|pcrid
||plid||keyword||match||slid||product|1243869|pgrid||ptaid||&CMP=K
NC-GCZ-GEN-SHOPPING-PMax&gross_price=true
- [12] BEGLEY, Christopher. *Structured Light Scanning* [online]. B.m., 2018. Article. b.n. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/329439623_Structured_Light_Scanning
- [13] *Creaform HandyScan 307* [online]. B.m.: Creaform. 2022. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/handyscan-3d-silver-series-professional-3d/technical-specifications>
- [14] ALKHIARY, Mohamed Yaser, M. Nassef TAMER a Yassine INAS. *MRI Scan* [online]. 2014. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/266853117_MRI_Scan
- [15] *GP2Y0E03* [online]. B.m.: SHARP. 2022. Dostupné z: https://global.sharp/products/device-china/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0e03_e.pdf
- [16] CARMIN, Fiore. *Stepper Motors Basics: Types, Uses, and Working Principles* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/stepper-motors-basics-types-uses>
- [17] *TMC2009* [online]. B.m.: Trinamic. 2022. Dostupné z: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2209-la/>
- [18] *HiWin MGN12-H* [online]. B.m.: HiWin. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/miniaturni-vedeni/236_uzky-vozik-mgn
- [19] *Arduino Mega2560 Pro Mini* [online]. B.m.: Arduino. 2022. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/hardware>
- [20] *Micro SD Card Adapter Module* [online]. B.m.: Components. 2021. Dostupné z: <https://components101.com/modules/micro-sd-card-module-pinout-features-datasheet-alternatives>
- [21] *Equations of planes* [online]. B.m.: University of Texas. 2016. Dostupné z: <https://web.ma.utexas.edu/users/m408m/Display12-5-3.shtml>



7 Seznam použitého SW

- Arduino IDE
- Autodesk Inventor
- Matlab
- EasyEda
- InkScape
- Blender



8 Seznam obrázků

Obrázek 1-Rozdělení 3D skenerů [1]	8
Obrázek 2-Sonda Heidenhain TS 750 [2]	9
Obrázek 3-Znázornění procesu destruktivního skenování a následného 3D tisku [4]	10
Obrázek 4-Ultrazvukový snímač vzdálenosti HC-SR04 [7]	11
Obrázek 5-LIDAR sensor SEN0259 [9]	12
Obrázek 6-IR sensor GP2Y0A21YK0F [11]	12
Obrázek 7-Creaform HandyScan 307 [13]	13
Obrázek 8-Závislost výstupních dat na skutečné vzdálenosti GP2Y0E03 [15]	14
Obrázek 9-Osazení GP2Y0E03 na desce [15]	15
Obrázek 10-Znázornění poloh při standardním chodu motoru bez mikrokrokování [16]	16
Obrázek 11-Znázornění chodu motoru při mikrokrokování [16]	17
Obrázek 12-TMC2009 osazené na desce plošného spoje [17]	18
Obrázek 13-Lineární pojezd s označením MGN-12H od firmy HiWin [18]	19
Obrázek 14-Označení pinů na desce Arduino Mega2560 Pro Mini [13]	20
Obrázek 15-Render umístění displeje na skeneru z programu Inventor	21
Obrázek 16-Čtečka Mikro SD karty pro Arduino [20]	21
Obrázek 17-Znázornění vektorů na ploše v kartézském souřadnicovém systému [15]	22
Obrázek 18-Neosazená základna skeneru	23
Obrázek 19-Ložiskový domek osy Y	24
Obrázek 20-Převod pomocí řemenu na ose Y	25
Obrázek 21-Pojezdový domek pro sensor	26
Obrázek 22-Znázornění pojezdů na osách X a Z v systému CoreXY	27
Obrázek 23-Neosazený plošný spoj řídicí elektroniky	28
Obrázek 24-Umístění sensoru na skeneru (vpravo)	29
Obrázek 25-Rozložení elektroniky ve skeneru (vlevo)	29
Obrázek 26-Render finálního návrhu skeneru s krytem v programu Inventor ..	30
Obrázek 27-Render finálního návrhu skeneru bez krytu v programu Inventor ..	30
Obrázek 28-Sestavený skener	31
Obrázek 29-Profil sestaveného skeneru	31
Obrázek 30-Porovnání skenů z mého skeneru s různým nastavením úhlového a výškového kroku. A) úhl. krok 5 stupňů, výškový krok 3 mm, B) úhl. krok 3 stupně, výškový krok 2 mm, A) úhl. krok 1 stupeň, výškový krok 1 mm.	32
Obrázek 31-Porovnání modelů, zleva model z mého skeneru, model z HandyScan 307, skutečný model	33