

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2023**

**ŠIMON  
EBRLE**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



Bakalářská práce

3D skener se strukturovaným světlem

Structured-Light 3D Scanner

Autor: Šimon Ebrle

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vítek Ph.D.

Studijní program: Elektronika a komunikace

Praha 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ebrle** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **473581**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**3D skener se strukturovaným světlem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Structured-Light 3D Scanner**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Podejte přehled metod rekonstrukce 3D modelů objektů. Soustředte se na metody aktivní, využívající projekce paprsku nebo struktury.
- 2) Navrhněte a implementujte aktivní systém tvorby 3D modelu pomocí projekce strukturovaného světla.
- 3) Proveďte analýzu přesnosti systému. Diskutujte vliv obrazce na kvalitu 3D modelu a možnosti zlepšení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

- [1] FOFI, David; SLIWA, Tadeusz; VOISIN, Yvon. A comparative survey on invisible structured light. In: Electronic Imaging 2004. International Society for Optics and Photonics, 2004. p. 90-98.
- [2] ROCCHINI, CMPPC, et al. A low cost 3D scanner based on structured light. In: computer graphics forum. Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers Ltd, 2001. p. 299-308.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za použití literárních zdrojů a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne .....

.....

Podpis autora práce

## **Poděkování**

Chtěl bych velice poděkovat doc. Ing. Stanislavu Vítkovi Ph.D za trpělivé a vstřícné vedení mé práce a také za ochotnou pomoc při řešení problémů. Dále bych rád poděkoval mé ženě za kontrolu logičnosti textu a dlouhodobou podporu.

## **Abstrakt**

Tato práce má za cíl informovat o moderních metodách 3D skenování, jejich rozdílech a využití. První část se zabývá rozdíly mezi pasivními a aktivními metodami a jejich uplatněním a možnou realizací. Druhá část se zabývá metodami využívající strukturované světlo a také porovnáváním různých technik, které se využívají k tomuto zpracování. V poslední části se zabývám vytvořením 3D skeneru za pomoci strukturovaného světla, který je tvořen běžně dostupnými součástkami. Také se v této části zabývám samotným zpracováním a výslednou reprezentací dat ve 3D.

**Klíčová slova:** 3D skener, strukturované světlo, Raspberry Pi 4, zpracování obrazu

## **Abstract**

This work aims to provide information on modern 3D scanning methods, their differences, and applications. The first part examines the distinctions between passive and active methods and their potential implementation and realization. The second part focuses on methods utilizing structured light and compares various techniques used for this processing. The final section addresses the creation of a 3D scanner using structured light, composed of commonly available components. Additionally, this section delves into the data processing itself and the resulting representation in 3D.

**Keywords:** 3D scanner, Structured-Light, Raspberry Pi 4, image processing

# Seznam použitých zkratk

3D	Trojdimenzionální
CT	počítačová tomografie
LiDAR	Light Detection And Ranging
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CCD	Charge-coupled device
LED	Light-Emitting Diode

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Ukázka stereoskopické kamery [10]	10
Obrázek 2 Ukázka otočné plošiny	11
Obrázek 3 Průmyslové CT	12
Obrázek 4 Princip ultrazvukového senzoru [5]	13
Obrázek 5 Princip práce ToF senzoru [6]	14
Obrázek 6 Triangulace [8]	15
Obrázek 7 Ukázka realizací strukturovaného světla [8]	16
Obrázek 8 Fotografie pořízena programem	17
Obrázek 9 Jeden z patthernů využívaných v aplikaci	18
Obrázek 10 Ukázka promítaného patternu	22
Obrázek 11 Ukázka detekce šachovnice	23
Obrázek 12 Fotografie po průchodu jednodušším programem	24
Obrázek 13 Obrázek po detekci hran	25
Obrázek 14 Zobrazení detekovaných čar na fotografii s patthernem	26
Obrázek 15 Obrázek s ručně zadaným průběhem čar na objektu	26
Obrázek 16 Výsledný graf	26

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Nekontaktní rekonstruování 3D objektu.....</b>	<b>10</b>
2.1. Pasivní metody.....	10
2.2. Aktivní metody.....	12
<b>3. Strukturované světlo.....</b>	<b>15</b>
3.1. Diferenční metoda.....	17
3.2. Binární metoda.....	18
3.3. Jiné způsoby kódování .....	20
<b>4. Praktická část.....</b>	<b>21</b>
4.1. Problematické části realizace a limitace.....	21
4.2. Kalibrace a program.....	22
4.3. Budoucí vývoj .....	27
<b>5. Závěr .....</b>	<b>28</b>
<b>Použitá literatura.....</b>	<b>29</b>
<b>Přílohy.....</b>	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>



# 1. Úvod

---

Převádění reálných objektů do virtuálního světa je v dnešní době obzvláště užitečnou schopností. Díky této schopnosti máme možnost si sami doma vyrábět např. náhradní díly na 3D tiskárně či se podívat, jak bude vypadat sedací souprava v našem obývacím pokoji dříve, než si jí zakoupíme. V minulosti byla tato technologie drahá, a tak nám pomáhala především ve vědě a při restaurování. V restaurování bylo a je hlavní využití v uchování dnešního stavu starobylých památek pro další generace, chápání vlastností různých objektů a také ve vývoji nových materiálů a technologií.

V průběhu času se převádění reálných objektů do virtuálního světa více a více zautomatizovalo. V začátcích počítačové grafiky se využívalo ruční precizní měření a byla zapotřebí zdatnost pracovníků, kteří pracovali s programy na vytváření modelů. Postupně začala růst poptávka po něčem rychlejším a přesnějším, což dalo vzniknout dvěma základním metodám 3D skenování - kontaktní a nekontaktní. V dnešní době se upouští od kontaktních metod, kde se měřicí přístroj musí fyzicky dotýkat měřeného objektu a přechází se na nekontaktní metody.

Nekontaktní metody jsou v dnešní době nejrozšířenější a tyto metody se dají dále řadit na aktivní a pasivní. Aktivní a pasivní metody nekontaktního 3D modelování budou hlouběji popsány v následujících kapitolách.

Ve své práci se zabývám optickou aktivní metodou strukturovaného světla. V druhé kapitole se seznámíme s různými aktivními a pasivními metodami nekontaktního skenování. Třetí kapitola se zabývá skenery na bázi strukturovaného světla a ve čtvrté kapitole je popsána samotná realizace mého domácího skeneru.

## 2. Nkontaktní rekonstruování 3D objektu

---

Nkontaktní skenery využívají senzory a kamery pro zachycení různého typu částic a vln. Pro vysokou citlivost a dobrou dostupnost součástí je nekontaktní metoda nejpoužívanější metodou při 3D skenování. Již v dnešní době dochází ke kombinacím všech níže popsanych metod tak, aby se dosáhlo, co možná nejdetailnějšího a nejpřesnějšího reprodukování reálného objektu do virtuálního světa.

### 2.1. Pasivní metody

Pasivní skenování je většinou cenově dostupné, protože nepotřebuje žádný specifický zdroj světla. Tyto metody jsou závislé na odraženém světle od objektu. Ve většině případů se využívají běžné digitální kamery. [2]

Stereoskopie je pasivní metoda, která využívá dvě kamery, u kterých je přesně definována vzdálenost. Obě kamery hledí na stejný objekt a díky malému posunu mezi snímky algoritmus zjistí, jak vypadá 3D objekt. Princip je převzatý z funkce lidského zraku, kde obě oči samostatně sledují objekt ze dvou úhlů. Mozek z těchto dvou obrazů vymodeluje 3D scénu.

Každá z kamer musí mít jinou Z souřadnici tak, aby bylo možné dopočítat i třetí souřadnici pro objekt. V případě, kdy budou obě kamery ve stejné výšce, bude možné vypočítat ze dvou snímků pouze dvě souřadnice. Kupříkladu Z souřadnici by se již nepodařilo vypočítat. Na snímcích se identifikuje stejný bod za pomoci softwaru, jako je OpenCV a porovná se jejich souřadnice. Veškeré prostorové souřadnice bodu jsou vypočítány ze znalosti vzájemné polohy kamer. Při tomto měření je důležité, aby byl dostatek okolního světla, a přitom nesvítilo žádné přímé světlo do objektivů kamer. [1],[3]



**Obrázek 1 Ukázka stereoskopické kamery [10]**

Tato metoda se mimo jiné využívá k natáčení 3D filmů a vytváření 3D fotografií. Velkou výhodou této metody je, že se dá využít tzv. realtime k rozpoznávání objektů na scéně.[2]

Další pasivní metodou je fotogrammetrie, která se v dnešní době z velké části využívá při mapování velkých objektů. Převážně se využívá k mapování povrchu planety, ale také je možné ji využít k vytváření 3D modelů ze série fotografií malých objektů. Když se převádí za pomoci fotogrammetrie malý objekt do virtuálního světa, může se k tomu přistoupit dvěma způsoby.

Prvním způsobem je, že fotoaparát je na jedné fixní pozici a otáčí se s objektem. Ideální je umístit objekt na otočnou plošinu a postupně s ním otáčet, jak můžete vidět na obrázku č.2. Druhým způsobem je focení statického objektu z různých úhlů. Při obou postupech je důležité mít dostatek světla a dostatečné množství fotografií. Čím složitější struktura objektu je, tím více fotografií je nutné udělat. První způsob je většinou více detailní, ale náročnější na přesnost uživatele. Velkou nevýhodou oproti stereoskopii je, že nelze tuto metodu jednoduše využít v realtime režimu. Další nevýhoda spočívá v potřebě velkého výpočetního výkonu, a proto se dodnes nejvíce využívá tato metoda ke zpracování dat v cloudu a zpracování open-source informací z map. Přesto existují softwary jako např. Meshroom, které dovedou velmi jednoduše zpracovat sadu fotografií jednoho objektu. Je ale nutné mít dostatek fotografií, a to z co možná nejvíce úhlů. Většinou se jedná o 100-200 fotografií. [2][4]



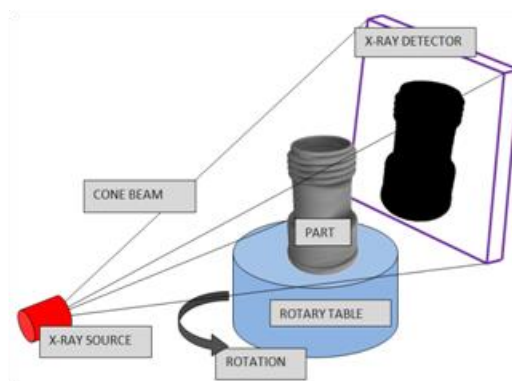
**Obrázek 2 Ukázka otočné plošiny**

## 2.2. Aktivní metody

Aktivní metody, na rozdíl od pasivních, využívají zářiče. Nejpoužívanějšími zářiči jsou projektory nebo laser. Především v průmyslu se využívají i zdroje radiace, zvuku nebo jiného typu elektromagnetické vlny, než je světlo. Krom zářičů je důležitý odpovídající snímač neboli senzor. Každý senzor musí být schopen detekovat námi zvolené záření a případně jeho změny.

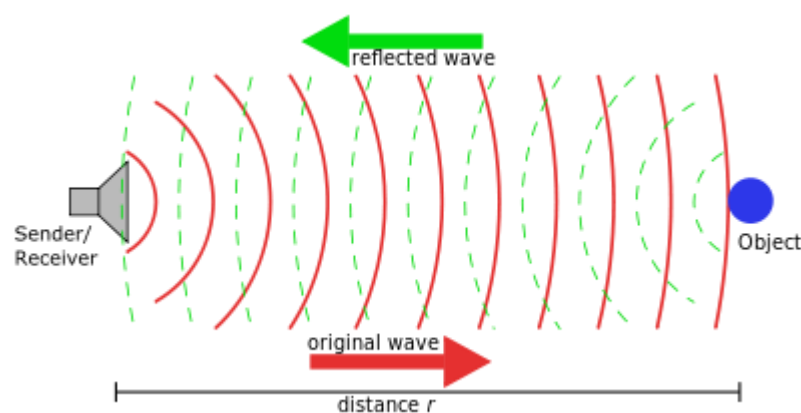
Jednou z možných aktivních metod je metoda, které využívá magnetické senzory. Tato technika funguje podobně, jako magnetická rezonance. Dochází ke zmagnetizování předmětu a poté se elektromagnetické pole vypne. Za pomoci cívky proměrujeme remanentní pole vyzařované předmětem. Toto pole indukuje v cívice napětí. Velkou výhodou je, že tímto způsobem lze také naskenovat vnitřní strukturu objektu. Tato metoda je nedestruktivní a pomáhá nám poznat vnitřek objektu bez nutného poškození předmětu. Tyto skenery jsou přenosné, ale je nutné, aby objekt bylo možné alespoň částečně zmagnetizovat. [1]

Další aktivní metodou je metoda, která využívá rentgenové záření. Stejně jako u předchozí metody tyto přístroje také skenují vnitřní strukturu objektu nedestruktivním způsobem. Proto se s nižší dávkou záření využívají jako počítačová tomografie. I když se v průmyslu dodnes využívají skenery, u kterých obíhá senzor a zdroj záření okolo objektu, tak se více využívá sestava otáčející měřený objekt. Průmyslové přístroje pracují s velkou dávkou rentgenového záření. Ozařuje se objekt a po průchodu objektem se na druhé straně od zářiče detekuje průchozí záření. Podle průchozího množství záření a zpoždění dopadu na druhé straně objektu se zjišťuje, jaké druhy materiálu a s jakou šířkou jsou v objektu obsaženy. Krom tohoto měření materiálu je možné také měřit tvar objektu. To se stává obzvláště jednoduchým při měření objektu, který je z jedné látky. Při použití otáčivé plošiny je nutné ukládat úhel natočení současně s daty ze senzoru, aby algoritmus vše zpracoval. [1]



Obrázek 3 Průmyslové CT

Třetí aktivní metodou je ultrazvuková metoda. Za pomoci této metody lze měřit pouze vnější povrch objektu. Ultrazvukové senzory mají největší zastoupení v průmyslových aplikacích. Mají vysokou rychlost, ale relativně nízkou přesnost. Principiálně se jedná o ultrazvukový dálkoměr. Buď se používá sestava „vysílač a přijímač“, nebo kombinace obou v jednom zařízení, kdy se přepíná mezi vysíláním a přijímáním signálu. Princip měřicího přístroje je velice jednoduchý vysílač. Tento vysílač vyšle ultrazvukový signál a poté čeká, až přijímač detekuje odraženou vlnu. Poté se podle změny frekvence signálu zjišťuje, jak daleko je objekt. Šíře záběru je tak malá, že se nevyužívá ke 3D skenování celých objektů. Primárně můžeme vidět tyto přístroje u kontrol kvality výrobků, kdy přístroj zkoumá možné vady zhotovených produktů. Na obrázku č. 4 můžeme vidět princip ultrazvukového senzoru. [5],[1]

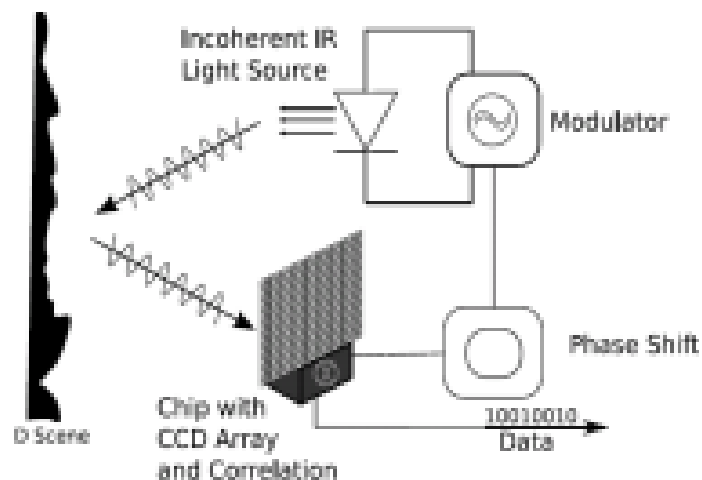


**Obrázek 4 Princip ultrazvukového senzoru [5]**

Nejpoužívanějšími metodami jsou dnes aktivní optické metody. Jednou z těchto aktivních metod je nasvícení laserem. Těmto přístrojům se říká „Light Detection And Ranging“ (LiDAR). Jak již naznačuje zkratka LiDAR, tyto přístroje pracují podobně jako radary, jen nevyužívají radiové vlny, ale laser. Zařízení LiDAR je v dnešní době velice drahé, ale již se začínají hojně využívat v automobilech. Automobilky využívají LiDAR jako radar a detekují s ním okolní objekty, především jejich vzdálenost a pohyb. I přes vysokou pořizovací cenu se LiDARy začínají využívat i v konzumní elektronice, například u tabletů či telefonů. LiDARy jsou optické dálkoměry, které většinou rotují a zjišťují vzdálenost od objektu. Ovšem moderní LiDARy využívané u běžné elektroniky spolupracují s fotoaparáty a dodávají přesnější informaci o vzdálenosti od objektu. S jejich pomocí fotogrammetrický software vytvoří 3D objekt, který ve správné velikosti naskenuje. Samotná fotogrammetrie má problém s nastavením správné velikosti objektu. [7]

Další velice moderní technologií je Time of Flight senzor, který by se dal přeložit jako senzor měření času letu. Tato technologie má velkou výhodu v poměru nízké ceny a vysoké rychlosti.

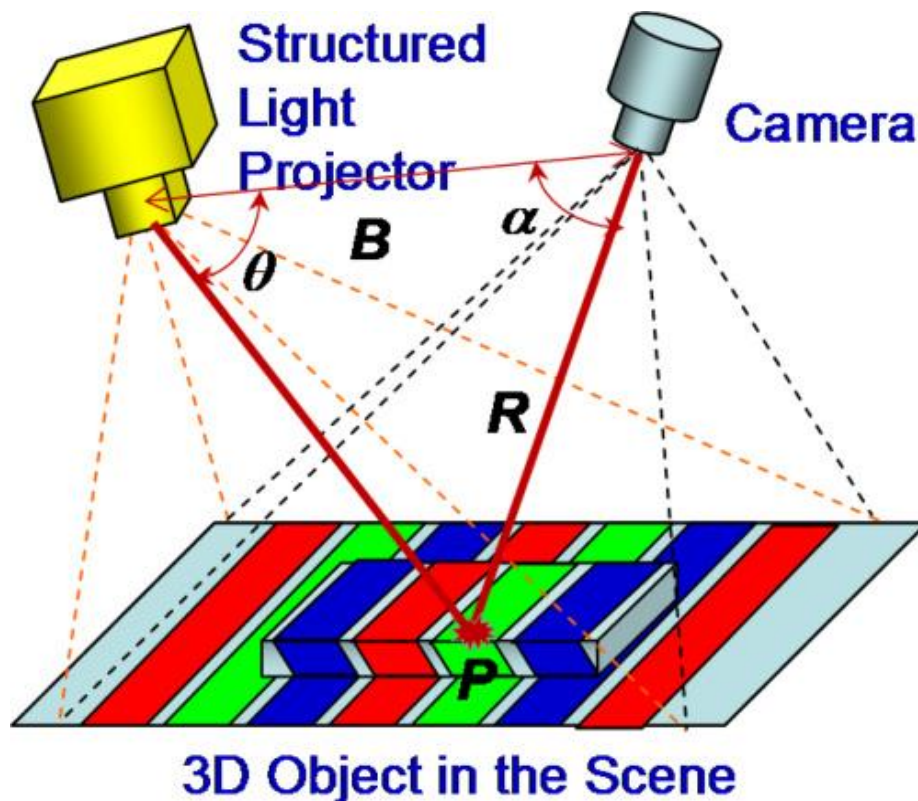
ToF senzor je předělaný běžný kamerový CMOS nebo CCD snímač, který má okolo sebe LED světla. V dnešní době se již používá i bez LED světla. Princip tohoto senzoru je velice jednoduchý. Měřenou veličinou je čas. Tento čas odpovídá době uplynulé mezi vysláním paprsku z LED světla a zpětného dopadu na senzor. Teoreticky se jedná o podobný způsob jako u LiDARu. Rozdíl ale spočívá v tom, že není potřeba koherentní záření. V dnešní době se často využívá v chytrých telefonech, kde dodává do algoritmu informaci o vzdálenosti objektu od fotoaparátu. Algoritmus se snaží správně rozostřit pozadí za objektem, který se nachází v popředí snímku. Tímto způsobem se imituje optické rozmazání pozadí, tzv. Bokeh effect. Samozřejmě je možné ToF senzor využít i jako 3D skener.[6]



Obrázek 5 Princip práce ToF senzoru [6]

### 3. Strukturované světlo

Skenery, které využívají strukturované světlo, jsou aktivní optické skenery. Tyto skenery využívají světelný zdroj na nasvícení skenovaného objektu. Tímto zdrojem je převážně dataprojektor, který nasvítí objekt předem definovaným vzorem. Tato scéna je poté snímána jednou či více kamerami. Velkou výhodou této metody je cenová dostupnost, vysoká rychlost a dobrá přesnost. Při zpracování se využívá metoda triangulace, kdy přesně známe vzdálenost mezi projektorem a fotoaparátem. Také víme, jaký svírají úhel s podložkou a jak jsou od ní vzdálené. Chceme-li využít 1D, 2D nebo 3D triangulaci, musíme podle toho využít různé druhy nasvícení. Nejzákladnější triangulací je 1D, kde se nasvítí objekt bodovým zdrojem světla. Při využití 2D nám stačí pruh světla a k 3D triangulaci jsou zapotřebí střídající se pruhy, nebo jiné vzory. [8]

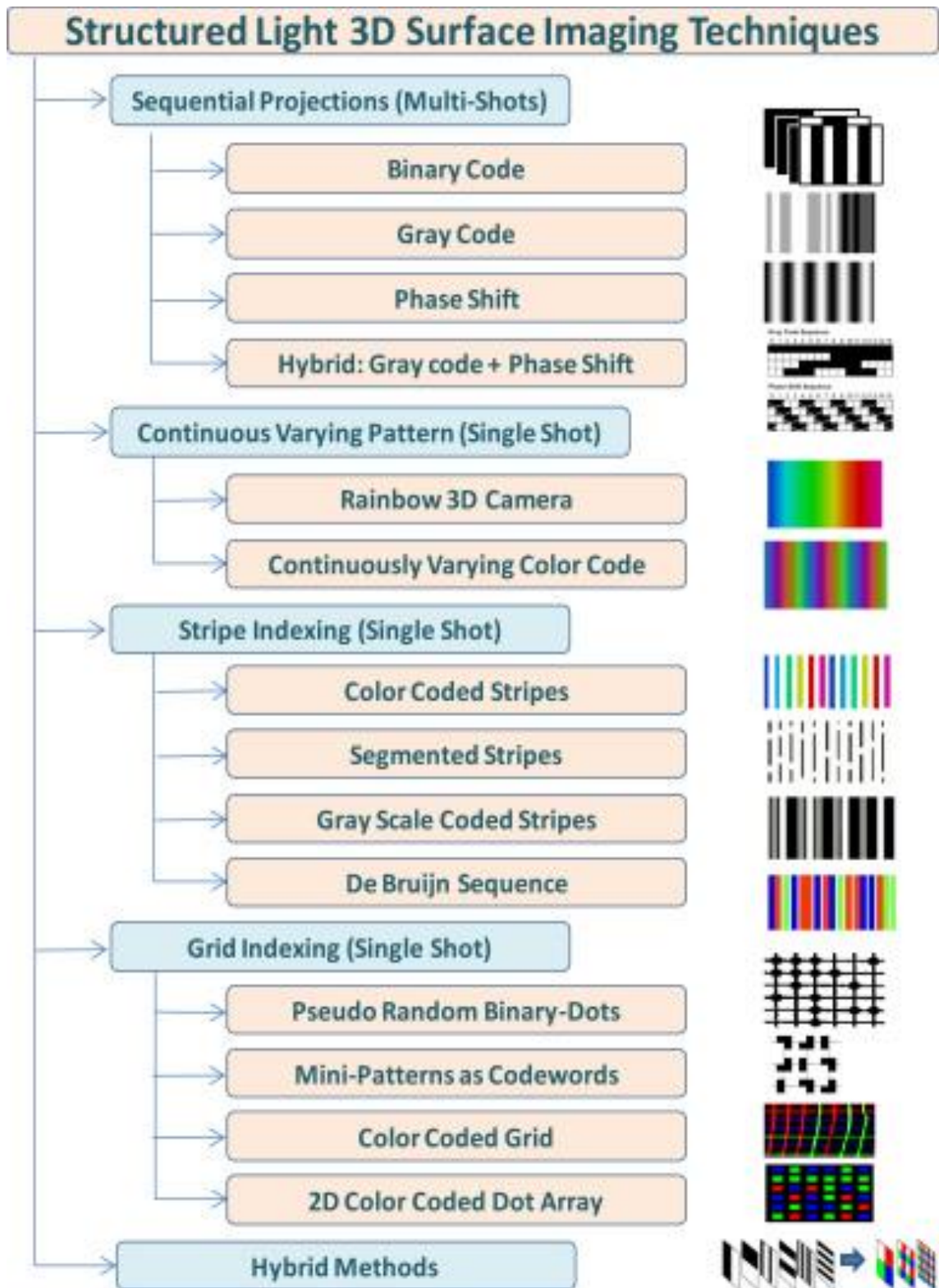


Obrázek 6 Triangulace [8]

Strukturované světlo je hodně obecný pojem, protože může mít velké množství podob. Nezáleží, jaký obrazec nasvítíme na objekt, ale je důležité, aby bylo možné vše zpracovat. Velkou výhodou pro zpracování je, když má světlo binární charakter, nebo jiný matematický základ,



jelikož vše zpracováváme na počítači. Na následujícím obrázku je ukázka kódování, které se dá použít a také ukázky samotných patternů. [8]



Obrázek 7 Ukázka realizací strukturovaného světla [8]



### 3.1. Diferenční metoda

Pro mou realizaci 3D skeneru jsou nejdůležitější dvě metody - diferenční a binární metoda. Obě metody v praktické části práce kombinuji pro získání lepšího výsledku, přesto primární metodou je diferenční. Z binární metody se snažím využít pouze důraz na zpracování série fotek. V této části popisuji, jak funguje diferenční metoda a co je pro nás klíčové.

Diferenční metoda využívá předpoklad, že se na objekt promítají vodorovné čáry, které mají po celé délce stejnou Z souřadnici. V případě, že bychom udělali pouze fotku pozadí, tak čáry budou všude stejné. Na základě tohoto předpokladu vypočítáme předpokládaný průběh čar. Poté tento předpoklad porovnáme s fotografií, na které je ve scéně měřený objekt. Ze změny, kterou zjistíme porovnáním dvou průběhů nám vyplyne, jakou hloubku má náš objekt v jednotlivých místech.

Pro přesné vyhodnocení je důležité mít zaostřený objektiv a také si nadefinovat, že jako čára se považuje přechod mezi černou a bílou. Dobré je také využít černobílou fotografii a mít objekt, který není úplně černý, nebo moc světlý, aby nepohlcoval nebo neodrážel moc světla.

V případě, že čáry jsou zakřivené nahoru od předpokládaného průběhu, pak naše kamera leží pod projektorem, který nasvěcuje objekt. V našem případě ale dochází k opačnému jevu. Čáry jsou vypouklé pod předpokládaným průběhem čar, jelikož je v naší sestavě projektor pod kamerou, která snímá objekt. Náš objekt se tím pádem zdá vypouklý, jak můžeme vidět na obrázku č.7.

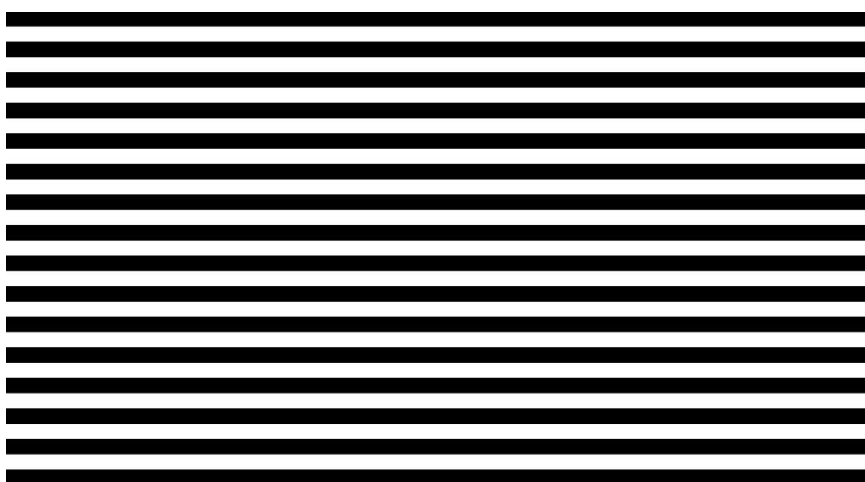


Obrázek 8 Fotografie pořízena programem

## 3.2. Binární metoda

Binární metoda spočívá ve vytvoření obrazců, které jsou zakódovány v černé a bílé barvě. Binární obrazec se skládá ze stejných černých a bílých obrazců. Během binární metody se vytvoří série fotografií z různých úhlů a následně se porovná každý pixel na fotografiích s polohou tohoto pixelu na další fotografii. Jelikož známe polohu fotoaparátu při každém snímku, tak zjistíme, jak se poloha pixelu změnila. [9]

Obrazce, které se promítají, jsou z vodorovných nebo horizontálních pruhů černé a bílé barvy. Tyto pruhy mají stejnou šířku a pravidelně se střídají. Pro ukázkou přikládám obrázek jednoho z patternů, které využívám já osobně.



Obrázek 9 Jeden z patternů využívaných v aplikaci

Jak jsem již výše zmiňoval, tak se v této metodě využívá více snímků toho samého objektu. Pokud nemáme možnost pohybovat s kamerou, a přesto chceme mít detailnější reprezentaci našeho objektu, pak využijeme více různých patternů. Velmi často se začíná na patternu, kde je jeden černý a jeden bílý pruh a postupně se hustota pruhů zvyšuje. Z takto pořízených fotek se získají data pro realizaci 3D reprezentace a zkombinováním všech těchto reprezentací se vytvoří detailní model. Pro jednodušší zpracování je důležité mít správně zaostřený projektor i fotoaparát. Pokud nejsou fotoaparát i projektor správně zaostřeny, lze tuto chybu částečně opravit v post processingu, kdy převedeme fotku do stupňů šedi a zvyšujeme kontrast.

V případě zpracovávání obrazu dochází k různým rušivým vlivům. Největším takovýmto vlivem je stín, který vrhá měřený objekt. Tento vliv lze eliminovat tím, že využijeme dvě fotografie s tím samým vzorem, jen s rozdílem, že na jedné je tento vzor inverzní. Poté detekujeme místo, kde se na obou snímcích nic nezměnilo a toto místo prohlásíme za stín.

Další možností redukce rušivých vlivů, je váhování pixelů. Tato metoda pomáhá s redukcí šumu, kdy se každý pixel porovná s okolními pixely. Pokud se příliš liší, tak se jeho váha sníží. Tímto postupem se omezí vliv rušivých pixelů na celkový výsledek. Pro vyšší rychlost a největší efektivitu se porovná pouze plocha 3x3, kdy se pixel porovná výhradně s přímo sousedícími pixely.[9]

### 3.3. Jiné způsoby kódování

V této části popisují další možnosti obrazového kódování strukturovaného světla. Nejběžnějším druhem kódu je binární a Grayův kód. Grayův kód má tu výhodu, že se mezi vedlejšími hodnotami mění pouze jeden bit oproti binárnímu, kde se běžně může měnit několik bitů najednou.[8]

Stupně šedi jsou další z metod pro kódování. Tato metoda je podobná binární metodě, kde jsou použity jako vzory čáry. To, co tuto metodu činí odlišnou, je, že stupně šedi využívají více jak dvě barvy a mají více možností, které odstíny šedé vytvoří. [8]

Další možností je takzvaná duhová kamera. Tato technika dokáže rekonstruovat objekt z jednoho snímku a tím pádem se dá využít i pro snímání pohyblivých objektů. Objekt je nasvícen duhovým světlem, kde známe úhel deviace u každé složky. Díky tomu, že známe úhel nasvícení a úhel kamery, tak za pomoci triangulace dokážeme vypočítat souřadnici jednotlivých pixelů. Tato metoda je problematická z důvodu různého absorbování jednotlivých složek světla povrchem objektu. [8] [9]

Poslední metodou, kterou zde zmíním, je metoda barevných pruhů. Tato technika se dá často kombinovat s metodou stupně šedi, kdy se pořízená fotografie následně převede do černobílé fotografie. Při metodě barevných pruhů se na objekt nasvítí barevné pruhy, ideálně takové, aby každá sousední barva byla od sebe ve spektru co možná nejdále. Pokud by barvy byly blízko sebe ve spektru, může docházet k prolínání. Celkové množství barev záleží pouze na zdroji, v našem případě na projektoru, kde záleží na počtu barev, které dokáže tento projektor nasvítit. [8] [9]

## 4. Praktická část

---

Pro můj 3D skener jsem využil sestavu s jednou kamerou a jedním projektorem. Můj 3D skener je tvořen mini počítačem Raspberry Pi 4 model B a kamerou HQ camera V1.0 s objektivem s ohniskem 2.8-12mm. Další součástí pro získání dat byl mini projektor DLPDLR230NPEVM, který je využit jako ozařovač. Tento projektor má rozlišení 1080p, podporuje 18-bit RGB a má svítivost 100 lumenů. Pro samotné zpracování dat jsem využil počítač s Windows 11 a procesorem Ryzen 5 3600. Mým skenovaným objektem byla vytištěná krabička na 3D tiskárně s velikostí hran 5cm a výřezem pro vložení spojovacího členu mezi dvě takovéto krabičky.

### 4.1. Problematické části realizace a limitace

Jednou z nejsložitějších částí projektu bylo zprovoznění samotného projektoru. Projektor se připojuje k Raspberry přes GPIO port. Bohužel se mi nedařilo správně nakonfigurovat Raspberry tak, aby vše správně komunikovalo. S vyřešením tohoto problému mi pomohlo zákaznické centrum, které doporučilo změny v nastavení základních programů. Při práci s tímto projektorem je složité ostření. Ostření probíhá otáčením velice malého kroužku okolo čoček. Pro zjednodušení práce je vhodné mít projektor na jednom místě. Ostrost jak projektoru, tak fotoaparátu jsem řešil zvýšením kontrastu, potlačením odlesků a potlačením stínů při následném zpracování.

Díky problémům s projektorem jsem neměl možnost si zkoušet předpřipravené programy a bohužel se stalo, že čtyři z pěti programů nefungovaly a jeden fungoval pouze částečně. Nakonec jsem byl nucen veškeré tyto programy přepsat.

Jedním z faktorů ovlivňující můj výsledek byl fakt, že kamera se při jakékoliv manipulaci rozostřovala. Toto byl problém především proto, že jsem se snažil měnit pozice a získávat snímky z více úhlů. Tento postup jsem nakonec opustil a zůstal jsem u postupu, kde kamera měla pevné místo.

Jeden z limitů mé metody je prostor. Já sám jsem si vytyčil cíl, že skener i s objektem, který měříme se musí vejít do středně velké krabice. Má krabice je velká 50×37×39 cm, takováto krabice se vejde do běžného bytu na skříň a není nutné nic skládat a rozkládat. Do tohoto prostoru samozřejmě můžeme vložit pouze menší objekty.

Během zpracování dat se objevil problém související s polohou fotoaparátu. Fotoaparát byl natočen, a proto pořizoval fotky s menším náklonem. Toto bylo problematické při porovnání s přesně vygenerovaným patternem. Tento problém se mi podařilo vyřešit. Řešením bylo, že se nejdříve pořídila série fotografií s objektem a poté bez objektu. Díky tomuto postupu se fotografie

s objektem porovnávala s přesným průběhem promítaného patternu na pozadí. Ukázka promítaného patternu je na snímku č.10.



**Obrázek 10 Ukázka promítaného patternu**

Pro získání co nejdetailnější reprezentace objektu jsem se snažil vytvořit hustou síť čar, ale právě díky tomu se mi nepodařilo vše automatizovat. Můj objekt měl moc velkou hloubku, vůči vzdálenosti a šířce pruhů. Původně jsem měl vybraný jiný objekt, který měl menší hloubku, ale bohužel byl příliš reflexní.

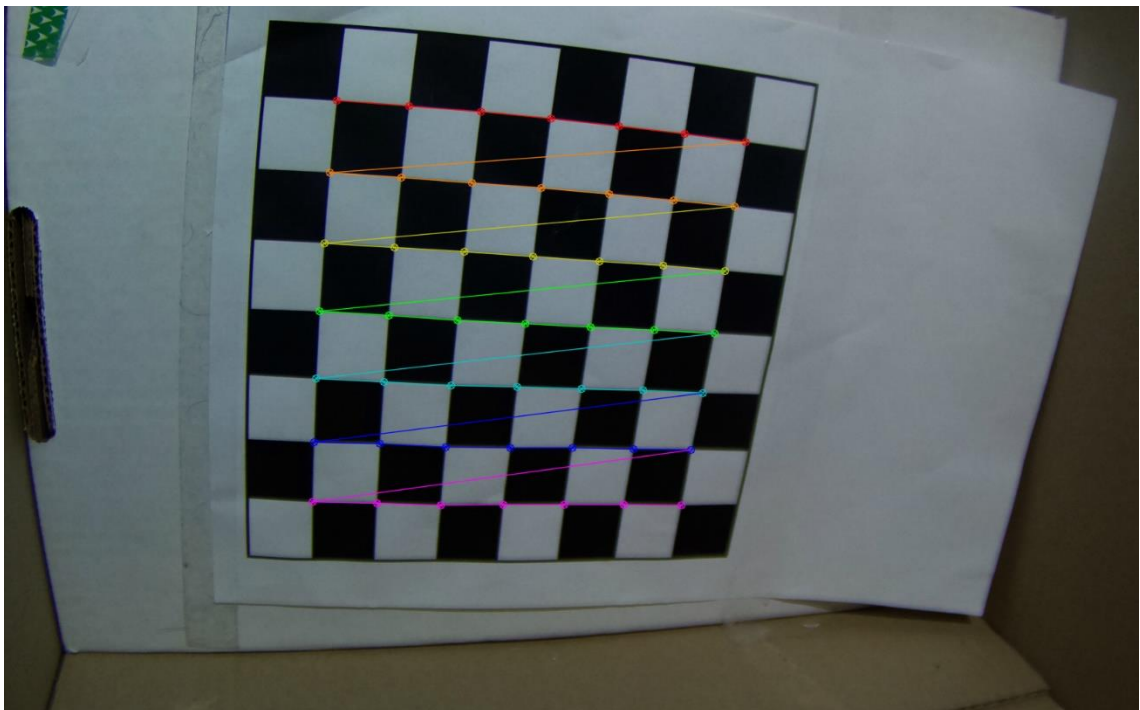
Snažil jsem se o zlepšení kvality výsledného grafu tím, že jsem kombinoval více snímků. Při kombinaci více snímků mělo dojít ke zvýšení přesnosti, a především k zahuštění výsledného modelu. Tuto techniku jsem zkoušel, když jsem na krabičku postupně promítal pruhy se šířkou 33,75 až 540 pixelů. Bohužel z důvodů problémů při zpracování jednotlivého snímku se mi nepodařilo tuto funkci kombinace více snímků implementovat.

Další technikou, pro kterou jsem měl podkladová data byla technika potlačení stínů. Pro možné budoucí zpracování jsem vytvořil patterny s inverzní barvou pruhů. Během zpracování je poté možné využít porovnávání rozdílů mezi obrázky. Tam, kde je nulový či minimální rozdíl se tyto pixely nepovažují za vhodné ke zpracování. Celou techniku jsem již popsal v kapitole 3.2.

## **4.2. Kalibrace a program**

Během zpracovávání praktické části jsem zjistil, že dochází k velkému zkreslení fotografií na okrajích. Protože jsem měl v plánu vytvářet modely větších objektů, chtěl jsem využít ukázkový

program pro kalibraci fotoaparátu od OpenCV. Tento program nepočítá s prací starších modulů kamer pro Raspberry Pi, a proto jsem nakonec využil jiný program. Tento nový program sestavuje matici kamery na základě souboru fotografií šachovnice. Důležité je, aby šachovnice byla pokaždé na jiném místě a ideálně i s různými úhly natočení. Pro zpracování je vhodné mít nejméně pět obrázků. Tento počet je dostatečný pro vyhovující výsledek. Program dále pro správné zpracování potřebuje znát množství čtverců, které má hledat. Z těchto dat program vypočítá matici, kterou lze posléze využít ke korekci fotografií. Pro mou kalibraci jsem vytiskl šachovnici na papír, a jelikož jsem měl v okrajích vše spojené černou čarou, využil jsem pouze vnitřních 49 čtverců. Program sám detekoval hrany čtverců a po vyhodnocení změny tvaru čtverců na snímcích vyhotovil matici. Touto maticí jsem zkoušel upravovat snímky - snímky měly značně nižší distorzi obrazu na okrajích. Na obrázku č.11 je vidět, jak algoritmus detekuje samotné čtverce.



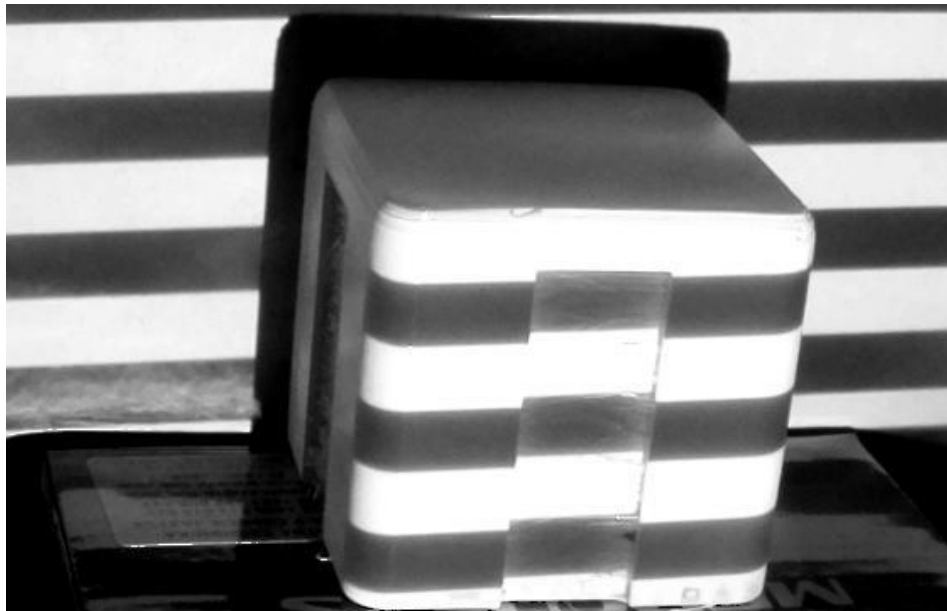
**Obrázek 11 Ukázka detekce šachovnice**

Pro vytváření a zpracování obrázků jsem vytvořil tři různé programy. Jeden program je určen přímo pro Raspberry Pi. Tento program vytváří a promítá patterny a pořizuje fotografie. Dalším programem je program na úpravu fotografií. A posledním programem je samotný program pro vytvoření 3D modelu.

První z programů je spuštěn přímo na Raspberry Pi. Tento program využívá knihovnu Pillow na vytváření patternů, pro které jsem využil vodorovné černé a bílé čáry. Tyto čáry měly stejnou šířku a pravidelně se střídaly. Program vždy vygeneruje dvě varianty patternu se stejnou šířkou.

První pattern se zaznamená jako běžný a druhý jako inverzní. Samotný program po spuštění zobrazí dvě tlačítka. Po stisku tlačítka „First set“ program promítne patterny a uloží fotografie se jménem objektu. Před stisknutím druhého tlačítka by měl uživatel odstranit ze scény objekt, protože program po stisknutí ukládá fotografie s označením PhotoP, kde P značí pattern.

Druhý z programů je program na úpravu fotografií. Tento program upravuje jas, kontrast, a velikost snímků. Program pro tyto úpravy uplatňuje běžné funkce z knihovny Pillow. V rozšířené verzi program za pomoci knihovny OpenCV detekuje na obrázku hrany. Tato část je velice citlivá na správné nastavení první části kódu. Když dojde k nedostatečnému potlačení odlesků, funkce Edge detection detekuje i tyto odlesky jako hrany. Výsledné obrázky z rozšířené verze jsem dále využil při zpracování 3D modelu. Základní verze bez detekce hran vytvoří fotografii, kterou můžeme vidět níže na obrázku č.12 a pro porovnání přikládám také výsledný obrázek po detekci hran, který je na obrázku č.13.



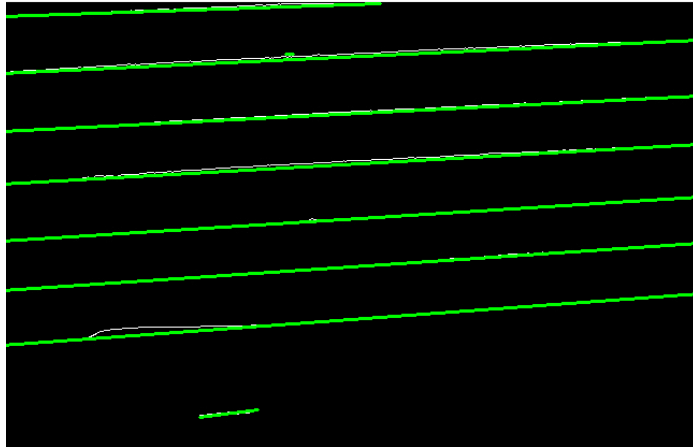
**Obrázek 12 Fotografie po průchodu jednodušším programem**



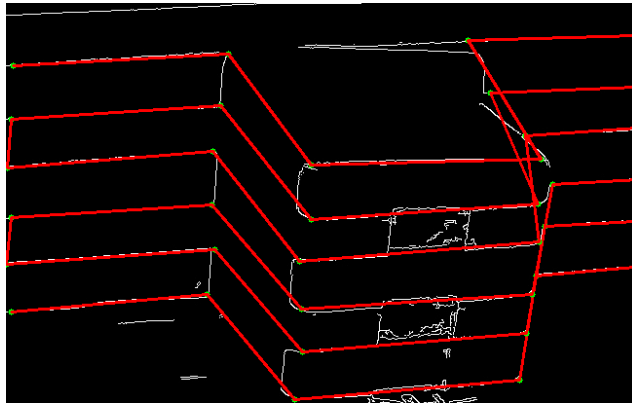


**Obrázek 13** Obrázek po detekci hran

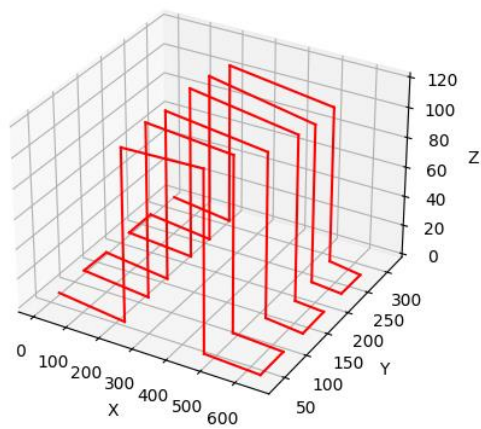
Poslední program vytváří samotný 3D model. Programu se poskytnou obrázky, které mají detekované hrany. Jeden obrázek obsahuje samotný pattern a druhý obrázek obsahuje objekt nasvícený tímto patternem. V první části programu se automaticky detekují čáry na patternové fotografii. Výsledek této operace je na obrázku č.14. Dále se uživateli zobrazí obrázek s objektem a program vyzve uživatele, aby každou z čar označil šesti body. Nejprve si zvolíme jeden z pruhů. První bod se umísťuje na jeden z okrajů fotografie do míst, kde začíná vybraný pruh. Jako druhý bod označíme místo, kde je viditelný přechod pruhu z pozadí na objekt. Následující dva body jsou umístěny na začátek a konec pruhu na tomto objektu. Předposlední bod je umístěn do stejného místa jako druhý, ale na opačné straně objektu. Poslední bod je kontrolní a označuje konec námi vybrané linie. Protože se mi nepodařilo odstranit horizontální linie z obrázku a nepovedlo se ani odstranit dostatečně odlesky, tak vše bylo nutné zpracovávat ručně. Posledním krokem v programu je přiřazení námi identifikovaných průběhů k průběhům, které byly předpokládány a z jejich odlišnosti se vypočítá třetí souřadnice. Tato část zpracování vybere první z šesti bodů a porovná ho s předpokládanými průběhy. Když je vzdálenost menší, než 7 pixelů, program vybere tuto linii jako tu, se kterou bude porovnávat zbylé body. U bodů, které mají vzdálenost od úsečky větší než 7, se tato vzdálenost zapíše a definuje jako Z souřadnice pro tuto část úsečky. Protože kamera je v pozici nad projektorem a hledí tedy na objekt shora, naše výsledná hloubková souřadnice koresponduje s vypouklostí objektu, a tudíž jí není nutné invertovat.



Obrázek 14 Zobrazení detekovaných čar na fotografii s patternem



Obrázek 15 Obrázek s ručně zadaným průběhem čar na objektu



Obrázek 16 Výsledný graf

### 4.3. Budoucí vývoj

Po skončení této práce bych rád dále vyvíjel software na zpracování dat. Již nyní mám dostatek fotografií objektů a patternů ke zlepšování samotného softwaru. Další vývoj by měl směřovat k detekci objektu na vícero snímcích. Při této detekci by se zpracovávaly snímky s různou hustotou čar a tím by se zlepšil výsledný graf. Rád bych zapojil do výpočtu grafů i inverzní patterny, které jsem do mé práce nevyužil. Při tomto využití by mělo být možné odfiltrovat další zdroje rušení, především stíny.

Rád bych celý projekt směřoval do komunity kutilů. Z tohoto důvodu bych se soustředil na automatizaci celého postupu a zefektivnění výpočtu tak, aby veškerý nutný výpočetní výkon poskytovalo Raspberry Pi. Jednou z již připravených funkcí, kterou by bylo možno použít k dosažení tohoto cíle, je kalibrace.

Tento přístup ke 3D skenování začíná v dnešní době nabývat na oblibě. Již existují řešení využívající například Arduino pro skenování. Mé řešení by mělo nesporné výhody. Hlavní výhodou je, že by se data nemusela přenášet mezi dvěma zařízeními, ale vše by zpracovával jeden mikropočítač. Další z výhod při využití mini dataprojektoru je nízká náročnost na prostor.

## 5. Závěr

---

Mým cílem bylo seznámení čtenáře s moderními typy 3D skenování, které jsou nekontaktní. V první části popisuji typy pasivních skenerů, které využívají zachycování okolního světla. Tyto přístroje využívají pokročilé algoritmy, které na základě fotografií rekonstruuji samotný objekt.

Dalším důležitým poznatkem pro čtenáře je, že aktivní skenery využívají sestavu zdroje a senzoru záření. Využívané záření je elektromagnetické, světelné a také je možné využít zvukové vlny či radiaci. Výhodou bývá menší náročnost na výpočetní výkon a možnost skenování vnitřní struktury objektu bez nutnosti destrukce. Především díky nedestruktivní možnosti skenování vnitřní struktury se využívají v lékařství a ve velké části průmyslu.

Během realizace jsem narazil na mnoho omezení použité metody. Především jsem zjistil, že tato metoda není vhodná pro menší objekty s větší hloubkou. Celá metoda se dá zkombinovat s dalšími postupy a tím tak zlepšit výsledné měření objektu. Největší problémy jsem řešil hned na začátku. Mini projektor, který nemělo být složité připojit, se mi nedařilo připojit, a proto jsem nemohl od začátku testovat své programy. Mé předpřipravené programy byly nefunkční s daty, které jsem pořídil, a tak jsem vše programoval od začátku. Při generování patternů se mi úspěšně podařilo využít knihovnu Pillow a také jsem některé z funkcí této knihovny vyžil při zpracování finálních fotografií.

Finální 3D skener je spíše ukázkou možných postupů při skenování a částí kódů, které je dále možné využít pro zlepšení výsledného 3D grafu. V poslední části práce popisuji možné budoucí uplatnění a celkový směr, kterým by se měl tento projekt vydat.

## Použitá literatura

---

- [1] ČERMÁK, J. Metody 3D skenování objektů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.
- [2] 3D Scanners Information. *Global Spec* [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing\\_process\\_equipment/inspection\\_tools\\_instruments/3d\\_scanners](https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/3d_scanners)
- [3] ZED stereo camera simulates human visual depth perception. *The Next Web: International technology news, business & culture* [online]. 2015 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: [https://thenextweb.com/dd/2015/05/19/zed-stereo-camera-simulates-human-visual-depthperception/#.tnw\\_eoI9W9FF](https://thenextweb.com/dd/2015/05/19/zed-stereo-camera-simulates-human-visual-depthperception/#.tnw_eoI9W9FF)
- [4] Meshroom Manual. *Meshroom Contributors* [online]. 2020, 2021 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/>
- [5] Ultrasound. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2019 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>
- [6] KOLB, Andreas, Reinhard KOCH a Erhardt BARTH. *ToF-Sensors: New Dimensions for Realism and Interactivity* [online]. IEEE Xplore, 2008 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/224320538\\_ToF-sensors\\_New\\_dimensions\\_for\\_realism\\_and\\_interactivity](https://www.researchgate.net/publication/224320538_ToF-sensors_New_dimensions_for_realism_and_interactivity). Conference Paper. Universität Siegen.
- [7] WANG, Xin. *The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement*. Proceedings of the First China Digital Earth Conferenc, 2020. Conference Paper. Information Engineering University, Zhengzhou, China.
- [8] GENG, Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011, 3(2), 128-. DOI: 10.1364/AOP.3.000128. ISSN 1943-8206. Dostupné také z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=aop-3-2-128>

[9] PATOČKA, Václav. *Metody rekonstrukce 3D modelů*. ČVUT, 2017. Bakalářská práce.  
ČVUT. Vedoucí práce Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.