

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Návrh 3D skeneru pro snímání povrchu pohybujících  
se objektů.

Bc. Jiří Touška

Diplomová práce  
2024

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Touška**  
Osobní číslo: **I21297**  
Studijní program: **N0714A060018 Komunikační a radarové systémy**  
Téma práce: **Návrh 3D skeneru pro snímání povrchu pohybujících se objektů.**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

## Zásady pro vypracování

Vytvořte 3D skener snímající dopravníkový pás s možností snímání kontury objektu. Součástí práce bude algoritmus třídění balíků podle velikosti a jejich vhodné umístění do vyhrazeného prostoru. Rozměry balíků uvažujte do 0.5 m a s rozlišovací schopností min. 1 cm. Skener bude poskytovat souřadnice povrchu objektů ve formě mračna bodů popisujících povrch. Objekty se pod skenerem pohybují konstantní rychlostí po dopravníkovém pásu.

Pro účely snímání uvažujte kamery s hloubkovou mapou, lidary, či rámy s tof senzory. Proveďte rešerši dostupných technologií a zvolte vhodné řešení s ohledem na finální cenu.

Objekty se pod snímačem pohybují konstantní rychlostí do 10 cm/s.

Pro 3D objekty spočítejte základní popisné charakteristiky (objem, šířka, délka, největší rozměr). Pro naměřené souřadnice proveďte zarovnání souřadného systému dle největší souřadnice.

Součástí práce je řešení jednoduchého snímače rychlosti posunu objektů (použijte technologii dle uvážení –kamera, inkrementální snímač, infrazávory). Uvažujte konstantní rychlost pohybu objektu.

Rozsah pracovní zprávy: **40-60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Muhammad M., Mohammad A., Arif S., „Design of 3D scanner for surface contour mapping by ultrasonic sensor“, AIP Conference Proceedings 1656, 040006 (2015).  
Emereld A. „A laser scanner for profile and contour measurement“ Sensor Review, ISSN: 0260-2288 (2019).

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **18. listopadu 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2023**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.** v.r.  
děkan

L.S.

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. listopadu 2022

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

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

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 14. 5. 2024

Bc. Jiří Touška

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Martinu Dobrovolnému, Ph.D. za cenné rady. Poděkování patří také mé rodině, která mi byla vždy oporou a podporovali mě po celou dobu studia.

**Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem HW zařízení 3D skeneru pro snímání pohybujících se těles po dopravníkovém pásu. Kontura těles je snímána TOF snímači.

**Klíčová slova**

3D skener, bezdotykové měření, TOF snímače, LIDAR, PLC, dopravník

**Title**

Design of 3D scanner for surface contour mapping.

**Annotation**

This thesis deals with design of HW device of a 3D scanner for scanning objects transported on conveyor's belt. The contour of the objects is scanned by TOF sensors.

**Keywords**

3D scanner, non-contact measurement, TOF sensors, LIDAR, PLC, conveyor

## Obsah

Seznam zkratk.....	8
Terminologie .....	9
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	11
Úvod.....	12
<b>1 DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE MĚŘENÍ .....</b>	<b>13</b>
1.1 Dotykové měření .....	13
1.2 Bezdotykové měření.....	14
1.2.1 Kamerové měření tělesa proti měřící stupnici.....	14
1.2.2 Měření pomocí optických závor.....	15
1.2.3 Měření s ultrazvukovými senzory .....	16
1.2.4 Měření pomocí LIDAR laserového snímače.....	17
1.2.5 Měření s využitím hloubkové kamery .....	19
1.2.6 Měření stereoskopickými kamerami .....	21
1.2.7 Měření s užitím strukturovaného světla.....	22
1.2.8 Radarové měření vzdálenosti.....	23
1.2.9 Měřicí rám s TOF senzory.....	24
1.3 Shrnutí .....	25
<b>2 NÁVRH 3D SKENERU .....</b>	<b>26</b>
2.1 Volba řídicí jednotky .....	27
2.2 Komunikační sběrnice řídicí jednotky.....	28
2.2.1 Protokol EtherCAT.....	28
2.2.2 Protokol EtherNet/IP .....	29
2.3 Odměřování pozice.....	31
2.3.1 Inkrementální enkodér .....	31
2.3.2 Absolutní enkodér .....	32
2.3.3 Vstupní zařízení pro poziční enkodéry .....	32
2.4 Pohyb těles pod snímačem .....	33
2.4.1 Zařízení s vlastním posuvem měřených těles.....	33
2.4.2 Užití dopravního systému nepatřícího k zařízení .....	35
2.5 Snímací část.....	35

2.5.1	Mechanické uspořádání měřicí části v dálce .....	36
2.5.2	Mechanické uspořádání měřicí části výškově .....	37
2.6	FORMÁTY 3D DAT .....	38
2.6.1	PLY.....	38
2.6.2	STL.....	39
2.6.3	OBJ.....	40
2.6.4	AMF .....	40
2.6.5	3MF .....	41
2.6.6	Shrnutí .....	41
2.7	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....	42
2.7.1	Natočení dat a transformace souřadného systému.....	44
2.7.2	Sloučení dat snímačů .....	48
2.7.3	Ořez měřené scény.....	49
2.7.4	Ořez scény na jednotlivá tělesa .....	49
2.8	Zpracování dat jednotlivých těles.....	50
2.8.1	Zaokrouhlení dat.....	50
2.8.2	Vymezení a filtrace dat těles .....	50
2.9	ALGORITMUS UMÍSTĚNÍ TĚLES DO VYHRAZENÉHO PROSTORU.....	51
2.9.1	Tělesa.....	52
2.9.2	Kontejnery .....	52
2.10	Algoritmy pro řešení BPP .....	52
2.10.1	Policové algoritmy.....	52
2.10.2	Gilotinové algoritmy .....	54
2.10.3	Algoritmy maximálních obdélníků.....	55
<b>3</b>	<b>TESTOVACÍ PROTOTYP NÁVRHU .....</b>	<b>57</b>
3.1	Řídící jednotka.....	58
3.2	Pohyb těles pod snímačem .....	59
3.2.1	Řízení pojezdu dopravníkové pásu prototypu .....	60
3.3	Snímač těles.....	61
3.4	Průběh měření.....	62
3.5	Zpracování výstupních dat v testovacím prototypu.....	63
3.5.1	Sloučení dat snímačů v testovacím prototypu .....	63
3.5.2	Ořez a rozdělení měřené scény v testovacím prototypu .....	66



3.5.3	Vymezení těles v testovacím prototypu .....	67
<b>Závěr</b>	.....	<b>68</b>
<b>LITERATURA</b>	.....	<b>69</b>

## Seznam zkratek

SW	Software
TOF	Time of flight
LIDAR	Light detection and ranging
PLC	Programmable logic controller
NC	Numerical control
CI	ControlNet International
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LAN	Local Area Network
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol
MAC	Media Access Control
IPC	Industrial PC
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology
ETG	EtherCAT Technology Group
HDD	Hard Disk Drive
SSD	Solid-state drive
XML	Extensible Markup Language
ASTM	American Society for Testings and Materials
ISO	International Organization for Standardization
ODVA	Open DeviceNet Vendors Association
PLY	Polygon file format
STL	Standard tessellation language
OBJ	Object files
MTL	Material template library
AMF	Additive Manufacturing
DIN	Deutsches Institut für Normung
FTP	File transfer protocol
USB	Universal serial bus
SW	Software
CSV	Comma Separated Value
BPP	Bin Packing Problem

## Terminologie

Skener – hardwarové vstupní zařízení, umožňující převod fyzické předlohy do digitální podoby

Mračno bodů – jedná se o velké množství bodů, přičemž každý bod má své přesné souřadnice souřadného systému

RGB model – způsob vyjádření barvy, založený na aditivním míchání červené, modré a zelené barvy

Embedded system – vestavěný systém, ve kterém je řídicí systém zcela zabudován do zařízení, které ovládá

Multicast – metoda přeposílání zpráv z jednoho zdroje skupině více koncových stanic

Frekvenční měnič – zařízení umožňující regulaci otáček třífázového motoru

Servo zesilovač (Servodriver) – zařízení určené pro řízení servopohonů, umožňují vyšší dynamiku a lepší přesnost řízení s vyšší účinností

Fazeta – název pro šikmou rovinnou plošku, nejčastěji mnohoúhelného tvaru. Příkladem může být seříznutá nebo zbroušená okosená hrana

Polární souřadný systém – souřadný systém ve kterém jedna souřadnice udává vzdálenost bodu od počátku souřadného systému, druhá souřadnice udává úhel spojnice tohoto bodu a počátku od zvolené osy ležící v rovině

Kartézský souřadný systém – souřadný systém ve kterém jsou souřadnicové osy vzájemně kolmé přímkami, které se protínají v jednom bodě označovaným jako počátek soustavy souřadnic, jednotlivé souřadnice polohy tělesa jsou definovány jako kolmé průměty polohy k jednotlivým osám

Algoritmus – předpis konečného počtu kroků, kterými je možno řešit stejnorodé úkoly

Prototyp – první zkušební výrobek

Interference – označení pro vzájemné ovlivňování nebo střetávání jevů

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Měření dotykovou sondou [22].....	13
Obrázek 2 Znázornění chyby měření při odečtu hodnoty ze stupnice [23].....	14
Obrázek 3 Znázornění měřících paprsků optických závor [24] .....	15
Obrázek 4 Současné měření výšky a šířky pomocí optických závor [25].....	15
Obrázek 5 Znázornění principu měření hladiny užitím ultrazvukovým senzorem [8].....	16
Obrázek 6 Bezpečnostní laserový skener OS32C [26].....	17
Obrázek 7 Princip funkce laserového skeneru (TOF) .....	18
Obrázek 8 Hloubková kamera D455 Intel RealSense [27] .....	19
Obrázek 9 Hloubková kamera Blaze (Autor: Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.) .....	19
Obrázek 10 Snímek pořízen pomocí hloubkové kamery RGB snímek (vlevo) a hloubkový snímek (vpravo) [28] .....	20
Obrázek 11 Stereoskopická kamera od firmy Basler [9].....	21
Obrázek 12 Znázornění stereoskopické metody Off-axis [8].....	22
Obrázek 13 Ukázka měření objektu s využitím projekce strukturovaného světla [10].....	22
Obrázek 14 Znázornění radarové detekce [29].....	23
Obrázek 15 Znázornění měřícího rámu s TOF senzory [13].....	24
Obrázek 16 Architektura návrhu .....	26
Obrázek 17 Příklad možné topologie protokolu EtherCAT [30] .....	29
Obrázek 18 Diagram propojení protokolu EtherNet/IP v režimu multicast.....	30
Obrázek 19 Znázornění propojení zařízení pomocí protokolu EtherNet/IP [31] .....	30
Obrázek 20 Různé druhy rotačních enkodérů [17].....	31
Obrázek 21 Princip detekce směru rotace optického enkodéru [17].....	31
Obrázek 22 Měřicí poziční karta EL5101 pro připojení inkrementálních enkodérů [32]...	32
Obrázek 23 Příklad dopravníku ve formě válečkové dráhy .....	33
Obrázek 24 Příklad mechanického propojení enkodéru a měřené soustavy .....	34
Obrázek 25 Příklad použití enkodéru pro snímání polohy asynchronního motoru [33] .....	35
Obrázek 26 Mechanické uspořádání měřících senzorů .....	36
Obrázek 27 Pohled na snímací roviny senzorů zepředu.....	37
Obrázek 28 CAD reprezentace prstence a jeho STL aproximace [34].....	39
Obrázek 29 Znázornění implementace barevných informací a textur na stranu krychle ve formátu OBJ [35].....	40
Obrázek 30 Znázornění užití zakřivených trojúhelníků [36].....	41
Obrázek 31 Postup zpracování naměřených dat.....	42
Obrázek 32 Naměřená data ze snímače v polárních souřadnicích .....	44
Obrázek 33 Znázorněná pozice podlahy v naměřených datech .....	45
Obrázek 34 Znázornění situace při výpočtu výšky snímače nad referenční rovinou.....	46
Obrázek 35 Naměřená data v kartézském souřadném systému.....	48
Obrázek 36 Znázornění ořezu scény ořezovým oknem.....	49
Obrázek 37 Znázornění ořezu scény na jednotlivá tělesa.....	49
Obrázek 38 Znázornění detekce tělesa .....	51
Obrázek 39 Ukázka výsledku získaného pomocí Policového algoritmu [37].....	53

Obrázek 40	Proces rozdělení volného místa pomocí gilotinového algoritmu. [37] [20] ....	54
Obrázek 41	Ukázka uložení těles Gilotinovým algoritmem [37].....	54
Obrázek 42	Znázornění uložení informace o volných obdélnících.....	55
Obrázek 43	Architektura prototypového zařízení .....	57
Obrázek 44	IPC C6920 [38] .....	58
Obrázek 45	Dopravní pás použitý v prototypu [39].....	59
Obrázek 46	EL7031 [21] .....	60
Obrázek 47	Umístění skeneru nad dopravníkem.....	61
Obrázek 48	Tělesa připravená na dopravníku před měřením.....	62
Obrázek 49	Mračno bodů z levého snímače.....	63
Obrázek 50	Mračno bodů z pravého snímače .....	64
Obrázek 51	Zobrazení dat ze snímače 1 před zpracováním .....	65
Obrázek 52	Zobrazení dat ze snímače 2 před zpracováním .....	65
Obrázek 53	Zobrazení sloučených dat ze snímače 1 a 2 .....	66
Obrázek 54	Výsledné mračno bodů znázorňující model 3D tělesa.....	67

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Porovnání parametrů hloubkových kamer.....	20
Tabulka 2	Porovnání parametrů LIDAR senzorů.....	38

## Úvod

Vznik této práce byl podnícen potřebou automatického měření vnějších kontur zásilek určených pro leteckou přepravu. Získání digitalizované podoby přepravovaných zásilek umožní jejich jednodušší katalogizaci a následnou správu. Digitální informace o rozměrech zásilek umožňují jejich následné předání do SW vyhodnocujícího jejich ideální umístění v transportním kontejneru. Zásilky mohou být o rozměrech do 2 metrů výšky a 2 metrů délky. Konvenční technologie používané v době tvorby této práce jsou pro tuto aplikaci nevhodné především kvůli svým limitacím – maximální rozměr skenovaného tělesa, rozlišení měření, mechanická zástavba, cena zařízení.

Cílem této diplomové práce bylo připravit návrh zařízení 3D skeneru pro snímání povrchu pohybujících se objektů po dopravníkovém pásu. Kontura objektů je snímána s využitím TOF senzorů. Součástí návrhu je řešení řídicího systému, připojení senzorů a následné zpracování naměřených dat do mračna bodů. Nedílnou součástí práce je detekce naměřených těles a určení jejich rozměrů pro následné další využití.

Tato práce se věnuje návrhu zařízení, zamýšleného do použití v průmyslových prostorách a provozech. Je kladen důraz na vysokou odolnost a spolehlivost zařízení a zároveň na variabilitu výsledného začlenění do různých typů provozu. V práci je tedy popsáno více možností řešení zástavbových situací a případné implementování do již stávajících zařízení. Použití konkrétní komponenty pak vždy záleží na konkrétní situaci. Navržený systém lze velmi snadně upravovat, přičemž tyto změny nijak zásadně nemění koncepci návrhu.

V závěru kapitoly návrhu 3D skeneru je nastíněna problematika algoritmu pro efektivní umístění zásilek do kontejneru – Bin Packingu. Je zde uvedena základní problematika a přehled základních metod pro řešení.

# 1 DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE MĚŘENÍ

Zásadní úvodní částí práce byl rozbor dostupných technologií měření povrchu a rozměrů objektů. Pro tyto účely bylo nutné provést rešerši dostupných měřících technologií a analyzovat jejich výhody, nevýhody a použitelnost pro konkrétní zadání. Nevhodná volba snímače může znamenat například chybně nasnímaná data, neúměrně vysoké cenové náklady, nízké rozlišení nasnímaných dat, nebo příliš pomalou rychlost snímání.

Naopak poznatky z dostupných technologií mohou pomoci vytvořit návrh, který pro danou aplikaci nejvhodnější.

Prvotní volba měřící technologie následně determinovala celkový návrh zařízení, kterému se věnuje druhá část práce.

Následující kapitoly představují přehled v praxi běžně užívaných měřících technologií s jejich měřícími prvky. U každé ze zmíněných metod je popsána technologie s principem funkce a popisem jejího užití.

## 1.1 Dotykové měření

Měření probíhá pomocí dotykové sondy. Je vyžadován fyzický kontakt dotyku sondy s měřeným povrchem tělesa.[1] Postupně jsou nasnímány body na povrchu tělesa. Následně jsou tato data zpracována SW který vyhodnotí rozměr tělesa. Tato metoda je velmi často užívána při kovoobrábění a následné kontrole rozměrů obrobku.



Obrázek 1 Měření dotykovou sondou [22]

Výhodou metody je vysoká přesnost – běžně jednotky  $\mu\text{m}$ .

Nevýhodou této metody je velmi nízká rychlost měření (jednotky metrů za minutu) a vysoká pořizovací cena měřících sond. Další nevýhodou je velmi vysoká citlivost na vibrace měřícího zařízení a měřeného tělesa. Zároveň musí být obsluha vysoce vyškolená pro práci s touto technologií měření.

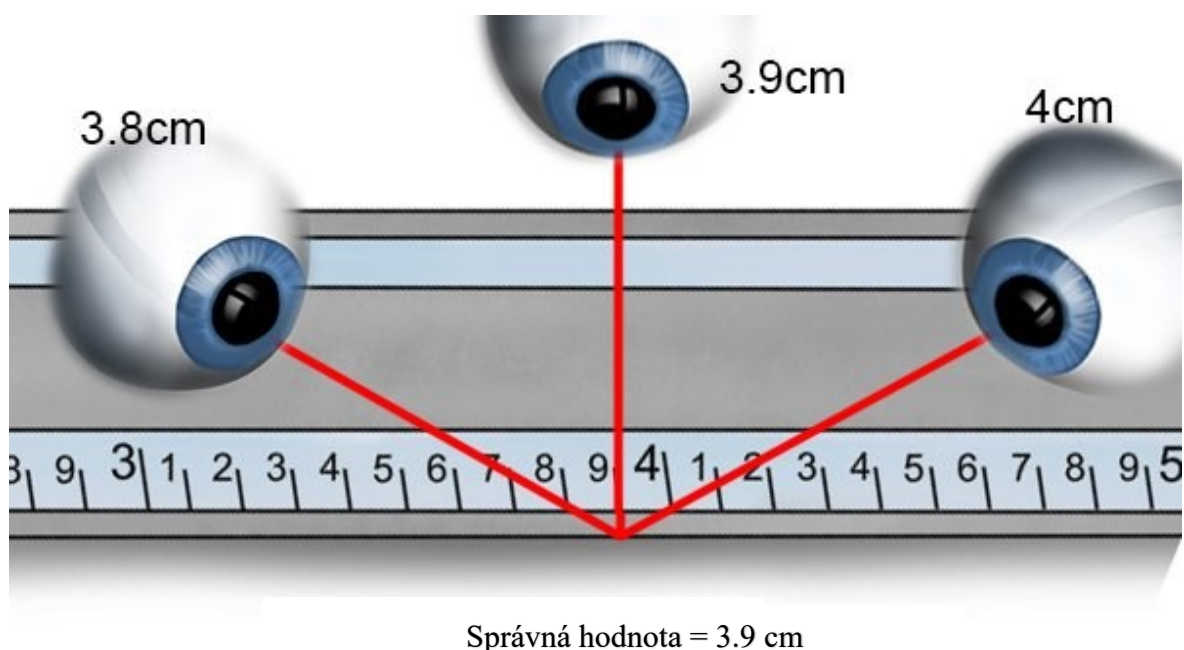
Z výše zmíněných důvodů je tato metoda pro použití v navrhovaném modelu nevyužitelná. Veškerá měření by trvala příliš dlouhou dobu, muselo by být zajištěno vysoká mechanická stabilita měřených těles i měřícího ústrojí.

## 1.2 Bezdotykové měření

Metoda měření, při které se měřicí prvek nebo sonda nedotýká měřeného tělesa v průběhu měření. Měřené těleso může být v pohybu a měření probíhá rychleji. Zároveň se ovšem tyto metody vyznačují nižším rozlišením a nižší přesností měření. Existuje mnoho metod bezdotykového měření rozměrů. V dalších podkapitolách jsou tyto metody představeny.

### 1.2.1 Kamerové měření tělesa proti měřicí stupnici

Měřené těleso je postaveno před měřicí stupnicí a kamerovým systémem je vyhodnocena jeho pozice dle stupnice. Tato metoda je používána například při pořizování policejních



Obrázek 2 Znárodnění chyby měření při odečtu hodnoty ze stupnice [23]

fotografií pachatelů trestných činů, nebo například u nalezených důkazů z místa činu – fotografované těleso má v těsné blízkosti přiložené měřítko, nebo u měření těles v pohybu.

Výhodou této metody je její jednoduchý princip. Pozorovaný objekt může být v pohybu, je možné měřit například výšku a šířku objektu pohybujícího se na válečkové dráze.

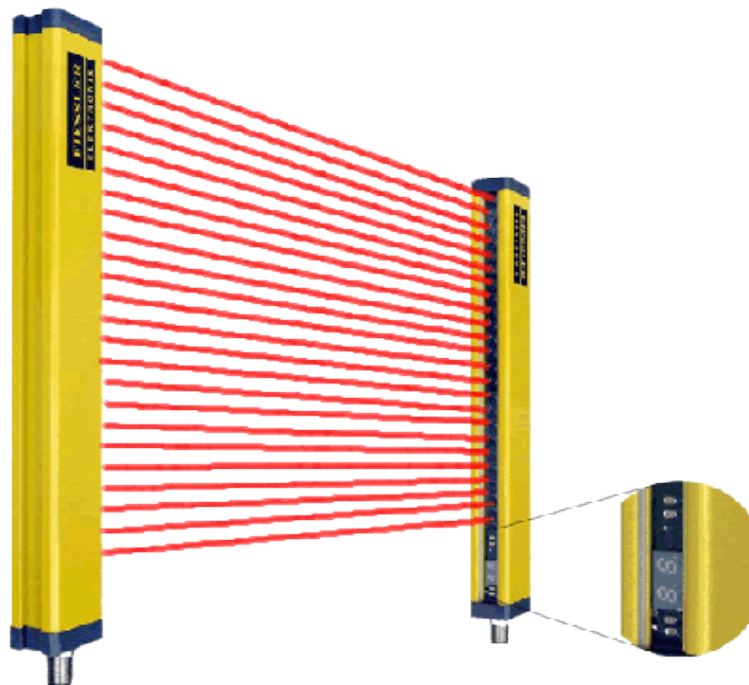
Hlavní nevýhodou je její nízká přesnost. Maximální přesnosti lze dosáhnout umístěním kamery kolmo proti měřicí stupnici, měřená hrana tělesa musí ležet v této rovině. Není-li tato podmínka dodržena a hodnota stupnice je snímána pod jiným úhlem než 90°, dochází k nepřesnému odečtu měřené hodnoty. Dalším důvodem znevýhodňujícím tuto metodu je potřeba stabilní světelné scény a náročnější realizace.

Tato metoda bývá často používána při vysokorychlostním kamerovém měření. Prostory pro toto měření je nutné kvalitně a velmi silně osvětlit, zároveň kamerové systémy pro toto měření se vyznačují velmi vysokou cenou.



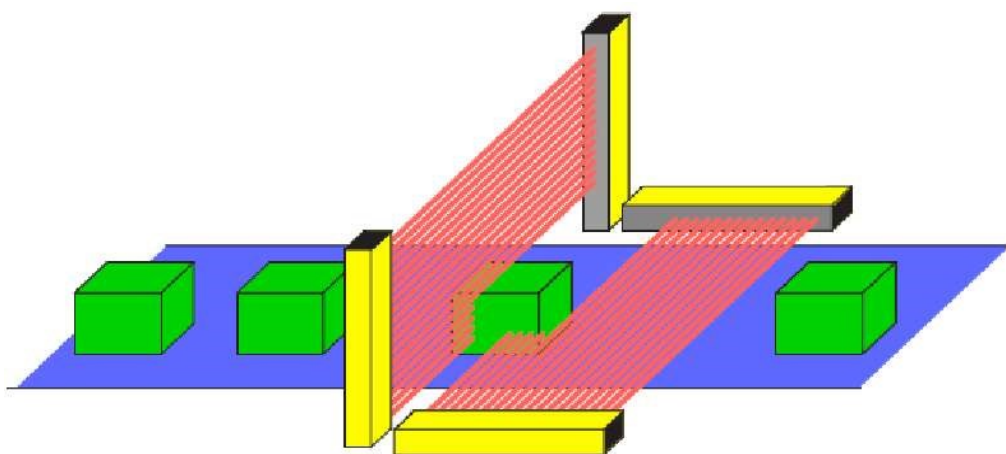
### 1.2.2 Měření pomocí optických závor

Měřené těleso je snímáno párem optických závor. Optické závory jsou vybaveny množstvím infračervených světelných paprsků v pravidelném rozestupu. Měřící paprsky závor jsou znázorněny na Obrázek 3.



Obrázek 3 Znázornění měřících paprsků optických závor [24]

Měřící paprsky jsou tvořeny soustavou diod a fotocitlivých tranzistorů. Optické závory jsou vyráběny jako závory použitelné pouze pro měření rozměrů nebo pro ochranu před újmou na zdraví s bezpečnostními funkcemi. V případě bezpečnostních optických závor je nutno užít typ, který umožňuje diagnostiku počtu zacloněných paprsků. Tato funkce není u všech závor standardně vybavena.



Obrázek 4 Současné měření výšky a šířky pomocí optických závor [25]

Při měření těleso projíždí mezi závorami. Počet přerušovaných paprsků následně indikuje výšku měřeného objektu. Závory je možno umístit pro měření ze stran měřeného tělesa pro měření výšky, ale i ze stran pro současné měření šířky. Tento případ je znázorněn na Obrázek 4.

Výhodou této metody je jednoduchost a časová nenáročnost její konstrukce. Odolnost proti prachu a vibracím. Zároveň je snadná údržba měřících prvků.

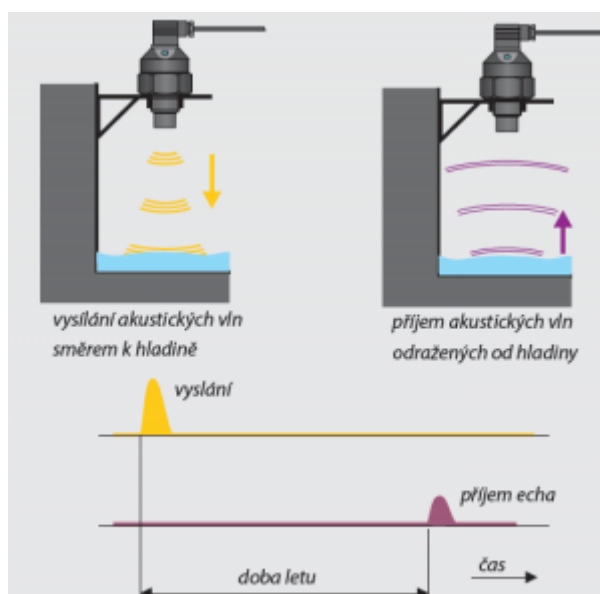
Nevýhodou jsou omezené rozměry závor určující maximální rozměr měřeného tělesa. Při měření dochází ke kvantizační chybě, která je definována vzájemnou vzdáleností snímacích paprsků. Další značnou nevýhodou je nutnost umístění měřících prvků po obou stranách měřených os, čímž se navyšují nároky na zástavbový prostor.

### 1.2.3 Měření s ultrazvukovými senzory

Ultrazvukový senzor se využívá jako prostředek pro měření vzdálenosti k překážce. Vzdálenost od překážky je získána měřením doby, která je rovná polovině doby od vyslání zvukového signálu do přijetí odraženého zvukového signálu od překážky, tzv. echa. [2] Velmi často jsou ultrazvukové senzory používány například pro měření hladiny kapaliny v nádobách. [3] Ultrazvukové snímače pro měření vzdálenosti mají běžně dosah od 1 m až 20 m. Přesnost bývá v rozmezí 1,5 mm až 3mm.

Výhodou je lehká a kompaktní zástavba senzoru. Velmi často je tato metoda užívána v robotických platformách pro detekci překážky před tělesem. Důležitým faktorem je i nízká cena senzorů.

Nevýhodou této metody je nutnost použití většího množství senzorů. Je tedy nutné řešit jejich vzájemné interference. Tato skutečnost může ovlivňovat dobu měření. Dalším negativem je nutnost obhospodaření všech senzorů a jejich připojení k



Obrázek 5 Znázornění principu měření hladiny užitím ultrazvukovým senzorem [8]

#### 1.2.4 Měření pomocí LIDAR laserového snímače

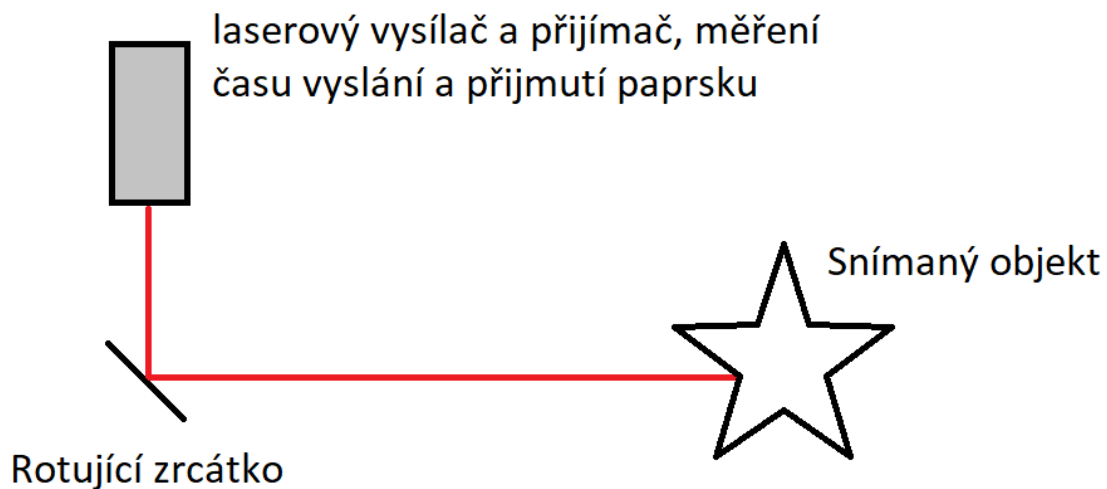
Velmi často využívaná metoda u mobilních robotů a robotických vysavačů. Robotické mobilní zařízení využívají LIDAR snímač ve formě laserového skeneru pro orientaci v prostoru, případně pro zajištění bezpečného provozu při pohybu v blízkosti osob. Často jsou LIDAR snímačem vybaveny i mobilní telefony. Dále je používán při leteckém měření povrchu a tvorby digitálního modelu povrchu. Stejně tak i pro pozemní skenování při tvorbě digitálních modelů budov.

Technologie LIDAR funguje na principu TOF snímače. Senzor odměřuje dobu mezi vysláním a příjmem vyzářeného paprsku. V průmyslovém prostředí se používají převážně LIDAR snímače ve formě rotačního laserového skeneru. Příklad průmyslového laserového skeneru lze vidět na Obrázek 6.



Obrázek 6 Bezpečnostní laserový skener OS32C [26]

Vyzařovaný paprsek je rotačním segmentem postupně azimutálně vychylován. Tímto způsobem lze změřit prakticky celé okolí skeneru.[4] Měřicí dosah a přesnost měření jsou určeny použitým skenerem. Obrázek 7 znázorňuje princip funkce. Výsledná vzdálenost je vypočtena ze znalosti vlnové délky vyzařovaného paprsku a poloviny doby změřené mezi vysláním paprsku a jeho následným příjmem.



Obrázek 7 Princip funkce laserového skeneru (TOF)

Pro přesné určení vzdálenosti existují dvě metody – přímá a nepřímá. Při užití přímé metody je měřen čas mezi vyslaným a přijatým pulzem pomocí rovnice (1). [5]

$$d = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1)$$

kde

$d$  ... vzdálenost měřeného bodu

$c$  ... rychlost světla

$\Delta t$  ... je uplynulá doba mezi vysláním a příjmem pulzu

Pro užití přímé metody je nutný dostatečný výkon vysílače a zisk přijímače, vysoký poměr signál / šum a přesná detekce počáteční hrany pulzu.

V případě užití nepřímé metody je pulz modulován spojitou vlnou, a je změřen fázový rozdíl mezi vyslaným a přijatým signálem podle rovnice (2).

$$d = \frac{c}{2f \bmod} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (2)$$

kde

$d$  ... vzdálenost měřeného bodu

$c$  ... rychlost světla

$f \bmod$  ... frekvence laserové modulace

$\Delta\varphi$  ... fázový rozdíl

Nepřímá metoda má nižší nároky na výkon vysílače a zisk přijímače, a neklade přílišný důraz na tvar přijatého pulzu.

Výhodou těchto snímačů je velmi vysoké úhlové rozlišení mezi paprsky a dlouhý dosah – běžně jednotky až nižší jednotky desítek metrů. Další výhodou je možnost různé mechanické zástavby – skenery běžně mohou pracovat v různých náklonech.

Hlavní nevýhodou je nutná citlivost při údržbě. Měřicí paprsky prochází skrze průhledné sklíčko, toto sklíčko může být potřeba, v závislosti na prašnosti okolí, očistit. V případě nešetrného zacházení je zde vysoké riziko poškrábání tohoto sklíčka. V místě škrábanců nemůže být paprsek vyzářen ve správném směru a dochází k chybně změřeným hodnotám, případně k okamžitému odrazu zpět a nulové naměřené hodnotě.

### 1.2.5 Měření s využitím hloubkové kamery

Hloubková kamera je snímač využívající TOF měřící technologii. Kamera využívá infračervený projektor k promítání statického obrazce na scénu. Obrazec se nachází mimo viditelné spektrum a není tedy zachyceno RGB kamerou.[6] Z přijatého ekvivalentu je následně vytvořen hloubkový snímek. [7] Následně je možné zobrazit pouze RGB snímek, nebo hloubkový snímek, nebo jejich vzájemnou kombinaci ve formě mračna bodů které má pro každý bod definovanou hodnotu pixelu z RGB snímku. Obrázek 8 zobrazuje hloubkovou kameru D455 prodávanou společností Intel.



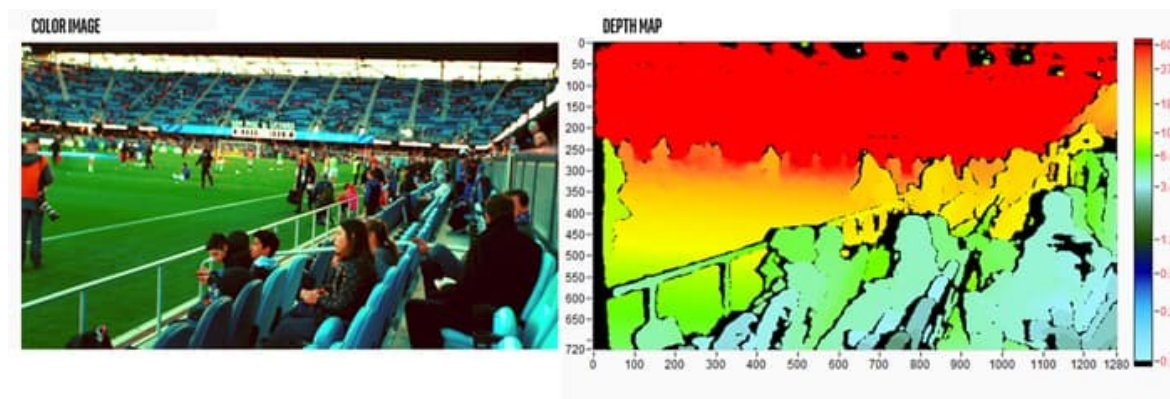
Obrázek 8 Hloubková kamera D455 Intel RealSense [27]

Obrázek 9 vyobrazuje hloubkovou kameru od společnosti Basler, typ Blaze.



Obrázek 9 Hloubková kamera Blaze  
(Autor: Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.)

Na Obrázek 10 lze vidět příklad RGB a hloubkového snímku z hloubkové kamery.



Obrázek 10 Snímek pořízen pomocí hloubkové kamery RGB snímek (vlevo) a hloubkový snímek (vpravo) [28]

Tabulka 1 zobrazuje porovnání základních parametrů vybraných modelů hloubkových kamer. U hloubkových kamer je velmi často možná jejich vzájemná synchronizace. Tato funkce omezuje vzájemné interference kamer. Zařízení od firmy Basler jsou připravena pro užití v průmyslových aplikacích. Kamery řady RealSense, jsou méně vhodné pro užití v průmyslových aplikacích, jde ale o dlouhodobě vyvíjený a velmi rozšířený produkt. Zároveň jsou vývojové sady a potřebné programové vybavení volně dostupné.

Tabulka 1 Porovnání parametrů hloubkových kamer

Parametr	blaze-101	blaze-102	RealSense D455
Dosah	0,3 – 10 m	0,3 – 10 m	0,4 – 6 m
Vlnová délka záření	940 nm	850 nm	850 nm
Horizontální úhel infračerveného snímače	67°	67°	87°
Vertikální úhel infračerveného snímače	51°	51°	58°
Diagonální úhel infračerveného snímače	výrobce neuvádí	výrobce neuvádí	95°
Barva obrazu	Mono	Mono	Barevné
Rozlišení barevného snímače (H x V)	640x480 pixelů	640x480 pixelů	1280x800 pixelů
Horizontální úhel barevného snímače	67°	67°	90°
Vertikální úhel barevného snímače	51°	51°	65°
Diagonální úhel barevného snímače	výrobce neuvádí	výrobce neuvádí	98°
Připojení k PLC	TCP/IP	TCP/IP	USB
Možnost synchronizace	Ano	Ano	Ano
Rychlost snímání	20 snímků/s 30 snímků/s	20 snímků/s 30 snímků/s	5, 15, 30, 60, 90 snímků/s

Výhodou této metody je možnost zisku obou typů snímků naráz. Zároveň jsou výstupní data velmi často ve formátu mračna bodů. Tento formát velmi usnadňuje následnou práci s daty.

Nevýhodou je nízká rozlišovací schopnost hloubkových kamer. Rovněž je přenášeno velké množství dat, které klade vyšší nároky na výkon řídicího systému a rychlost přenosových komponent.

### 1.2.6 Měření stereoskopickými kamerami

Stereoskopická technologie umožňuje vytvořit určitý prostorový vjem. Technologie je založena na principu vnímání člověka. Intenzita vjemu je závislá na vzájemné vzdálenosti kamer a jejich průměty. Existuje více metod pro zajištění těchto vjemů z prostoru. Metody se rozlišují různým rozestavením kamer. [8]

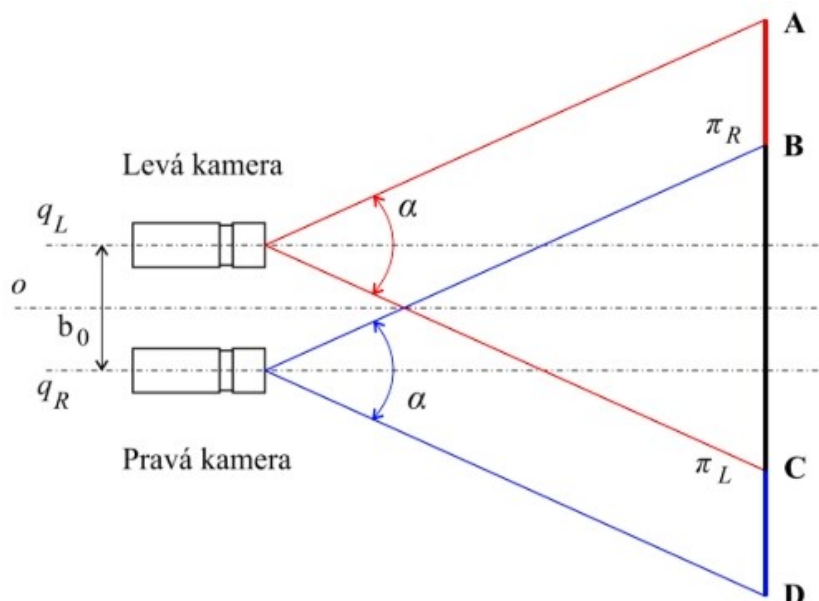


Obrázek 11 Stereoskopická kamera od firmy Basler [9]

Stereoskopické kamery se vyznačují krátkým měřicím dosahem – od 0,2 m do 3 m, a velmi úzkým pracovním rozsahem –  $61^\circ \times 48^\circ$  (výška x šířka). [9]

Výhodou je kompaktní provedení kamer, lze je díky malým rozměrům a váze velmi snadno upevnit například na robotické rameno.

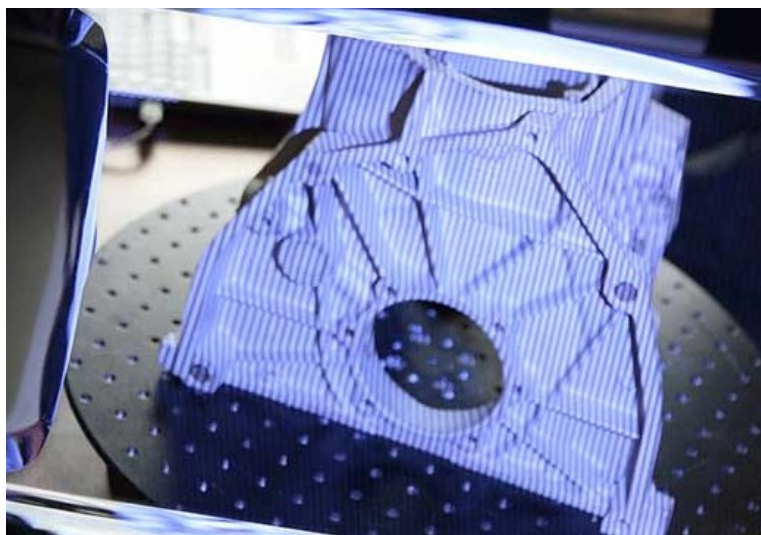
Nevýhodou je malý rozměr pracovního rozsahu.



Obrázek 12 Znáornění stereoskopické metody Off-axis [8]

### 1.2.7 Měření s užitím strukturovaného světla

Metoda užívá projekci světelného vzoru na měřené těleso. Tento vzor je následně snímán kamerou. Vzhledem k nesouhlasné pozici zdroje světelného vzoru a snímací kamery, je nasnímaný vzor deformován. Výpočet 3D souřadnic je proveden ze znalosti vzdálenosti kamery, úhlu projektoru a definovaného vzoru.[10]



Obrázek 13 Ukázka měření objektu s využitím projekce strukturovaného světla [10]

Metoda je velmi často využívána v průmyslu ke kontrole rozměrů vyhotovených dílců. Měření se opět vyznačuje krátkým měřicím dosahem a malým měřicím prostorem. Měření dosahuje vysokých přesností – jednotky  $\mu\text{m}$ . [11] Lze měřit i pohybující se tělesa, dochází



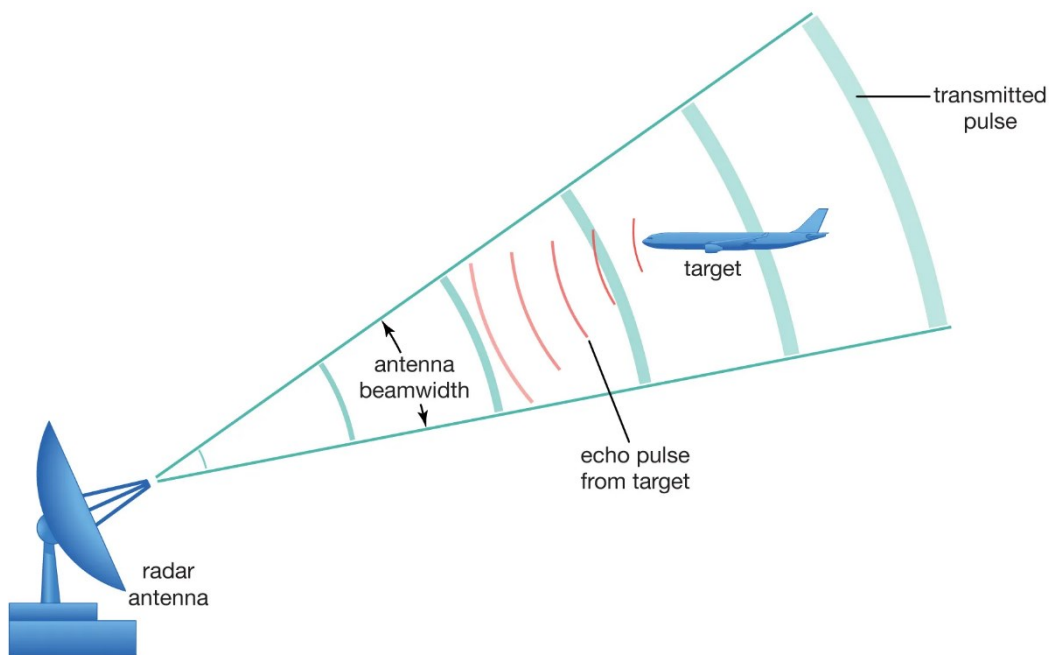
ale k znatelnému snížení přesnosti. Různé měřené scény, mohou vyžadovat různé světelné vzory. Volba vhodného vzoru a kalibrace přístroje vyžadují určitý čas.

Výhodou metody je velmi přesné měření. Projektor i snímací kamera mohou mít velmi kompaktní zástavbu a nízkou váhu. Je tedy možné je umístit na robotické rameno pro automatizované skenování.

Nevýhodou metody je opět malý pracovní rozsah a dosah měření. Zároveň dochází při pohybu měřeného tělesa k většímu snížení přesnosti měření.

### 1.2.8 Radarové měření vzdálenosti

Tato metoda je velmi často používána například v leteckém a obranném průmyslu. V průběhu měření dojde k vyzáření a následnému příjmu elektromagnetické vlny, odražené od měřeného tělesa. Tímto způsobem lze detekovat překážky na velmi velkou vzdálenost. Dosah měření se odvíjí dle typu aplikace a provedení radaru od jednotek metrů, ve speciálních provedeních a aplikacích i méně, až po desítky km, případně nižší stovky km.



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Obrázek 14 Znárodnění radarové detekce [29]

Radarové měření vzdálenosti má výhodu v maximálním dosahu a rychlosti měření.

Nevýhodou je výrobně složitá technická realizace pro krátké vzdálenosti s vysokým rozlišením měření. Technologie měření tímto způsobem je na krátké vzdálenosti s vysokým rozlišením teprve v experimentálním stádiu. Testování probíhá v laboratořích za pečlivě připravených podmínek. [12]

### 1.2.9 Měřicí rám s TOF senzory

Měřicí systém sestávající z množství měřících TOF senzorů. Sensory v pravidelném rozestupu jsou umístěny na rámu, který obepíná měřený prostor. Měřená tělesa projíždí rámem a jednotlivé senzory snímají vzdálenost od senzoru k tělesu.

Rám je možno obsadit maximálním počtem 500 senzorů. Vzdálenost mezi měřícími paprsky může být – 5 mm, 10 mm nebo 25 mm. [13] Měřitelný rozsah je 100 mm až 3030 mm v obou rozměrech. Měřené těleso může být v pohybu o rychlosti až 2 m/s. [13]. Měřicí systém nativně disponuje komunikačním rozhraním TCP/IP. Volitelně může obsahovat rozhraní PROFIBUS nebo RS232. [13]

Jednoznačnou výhodou je jednoduchost konstrukce a její robustnost.



Obrázek 15 Znárodnění měřícího rámu s TOF senzory [13]

Nevýhodou je nutnost orámování dopravníku – měřená tělesa nesmí přesahovat maximální měřitelný rozměr, není tedy možné například převést tělese bez jeho změření. Další nevýhodou je omezení počtu měřících senzorů. Při maximálním rozsahu měření, není rozlišení měření dostatečné.

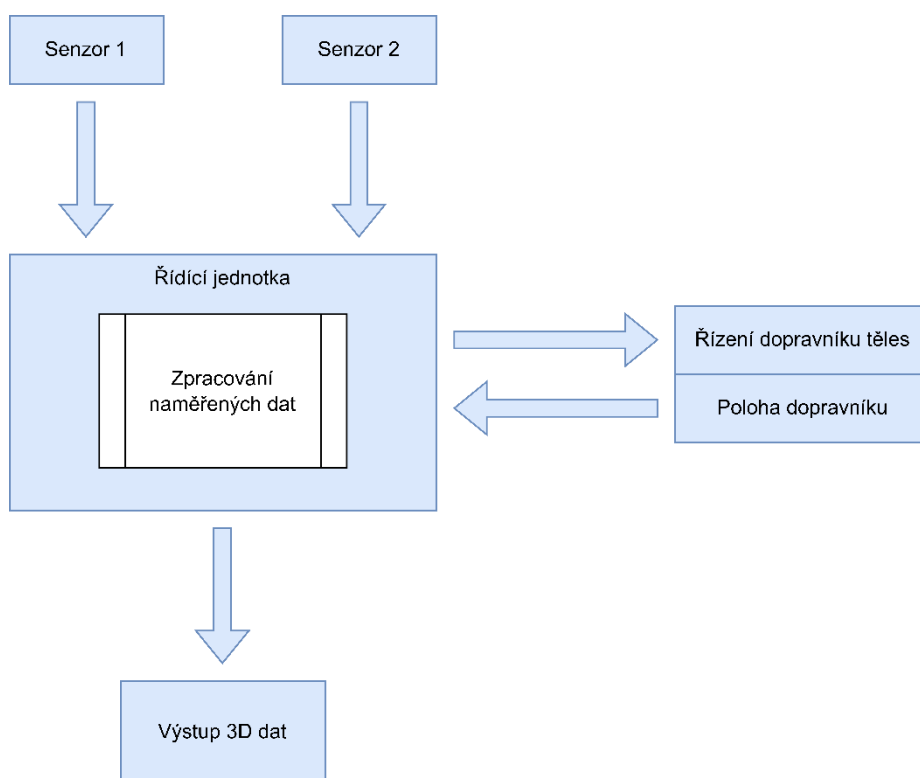
### 1.3 Shrnutí

Z výše zmíněných technologií byla nakonec zvolena technologie LIDAR laserového snímače. Důvodem pro výběr byl především požadavek na měření těles o rozměrech 2 x 2 m v kombinaci s požadovaným rozlišením měření. Velmi podstatným důvodem je také komplexnost elektroinstalace a nižší doba potřebná k instalaci zařízení. Zároveň je tento typ snímače na trhu zastoupen ve vysokém počtu variant s různými parametry. Lze tedy velmi snadno vybrat vhodný typ přesně pro požadovanou aplikaci. Další výhodou je snadnější implementace do průmyslového řešení. Výše zmíněné riziko ohledně údržby lze snížit dostatečným zaškolením techniků a užitím přípravků pro čištění optických komponent. Zároveň je možné umístit nad skener kryt pro zmírnění účinku dopadajících prachových částic a prodloužení doby mezi čistícími procesy údržby.

## 2 NÁVRH 3D SKENERU

V následující kapitoly jsou věnovány návrhu a popisu jednotlivých částí 3D skeneru a jejich funkce. Zařízení je koncipováno pro průmyslové užití. Důležitými parametry je vysoká odolnost komponent a možnost sloučení do již hotových provozů za pomoci průmyslově používaných sběrnic. Díky čemuž bude možné zařízení použít samostatně, nebo ho začlenit do nové nebo již fungující provozní linky. Určité části mají více možných řešení, která mají svá různá opodstatnění a nelze jednoznačně hodnotit některé jako vhodné nebo nevhodné. V těchto případech jsou nastíněna různá provedení konečného řešení. Konkrétní detaily však vždy záleží na konkrétní aplikaci a lze je různě modifikovat.

Návrh spočívá ve dvou (počet lze případně navýšit dle potřeb situace) snímačích vzdálenosti umístěných nad dopravníkem převážející měřená tělesa. Snímače a dopravník jsou připojeny k řídicí jednotce. Tato jednotka obstarává kompletní řízení a správu připojených komponent. Řídicí jednotka zároveň spouští měření a zpracovává naměřená data ze snímačů. Následně jsou data z obou snímačů zpracována a provedeno jejich sloučení.



Obrázek 16 Architektura návrhu

Návrh předpokládá možnost funkce skeneru jako samostatného zařízení. Po spuštění měření operátorem, aktivuje řídicí jednotka dopravníkový systém a tělesa na něm umístěná budou nasnímaná senzory. Data budou následně zpracována a výstupem budou digitalizovaná 3D data jednotlivých umístěných těles na dopravníkovém systému.

Koncepce návrhu umožňuje použití zařízení jako součást jiného průmyslového zařízení, například výrobní linky. V tomto případě je předpokládána aktivace skeneru

nadřazeným zařízením. Není zde předpokládáno spouštění měření přímo operátorem, i tak je ale nutné tuto možnost předpokládat, například pro kusové měření nebo servisní účely.

## 2.1 Volba řídicí jednotky

Řídicí jednotka zajišťuje komunikaci s ostatními prvky zařízení skrze komunikační sběrnice viz. KAPITOLA 2.2. Provádí zpracování přenášených dat ze snímacích prvků a řízení akčních členů dle interního programu. 3D skener je možné osadit různým typem řízení, pro vysokou odolnost, spolehlivost a možnost začlenění systému s dalšími komponenty bylo zvoleno řízení pomocí PLC.

Existuje mnoho výrobců a typů PLC. Řešení je založené s využitím IPC od firmy Beckhoff. Které obsahují software TwinCAT. Systém TwinCAT umožňuje vykonávat funkce PLC a řídicích systémů NC na počítači. Přednostní je otevřená architektura počítače typu PC s obrovskou výpočtovou kapacitou.[14] Zároveň i možnost využít velká paměťová úložiště ve formě HDD nebo SSD disků. V případě potřeby lze systém TwinCAT využít i ve standardním PC bez průmyslových standardů a odolnosti. Firma Beckhoff nabízí IPC v následujících konfiguracích:

- Panelové PC – PC je implementováno do ovládacího displeje,
- Standardní PC,
- Embedded PC – kombinace PC a modulárních I/O s možností uchycení na DIN lištu.

Hlavní výhodou je možnost využití mnoha běžně používaných funkcí a systémů ve firmách, například:

- Modbus (TCP/RTU) Server/klient,
- FTP klient,
- Databázový server,
- Databázový klient,
- Využití MATLAB a Simulink programů,
- C++ programování.

Zároveň jsou k dispozici již předpřipravené funkční bloky, například pro řízení pohonů, automatizace osvětlení (DMX512, DALI), řízení chytrých budov a podobně. Je také možné využít vlastní aplikaci v jazyce C++ a propojit její proměnné s obslužným programem v PLC.

## 2.2 Komunikační sběrnice řídicí jednotky

Komunikace PLC s dalšími komponentami je realizována prostřednictvím komunikačních sběrnic. Průmyslových sběrnic existuje velké množství – například:

- PROFIBUS,
- CANopen,
- EtherNet/IP,
- PROFINET,
- EtherCAT,
- DeviceNET,
- Modbus,
- S7 PDU.

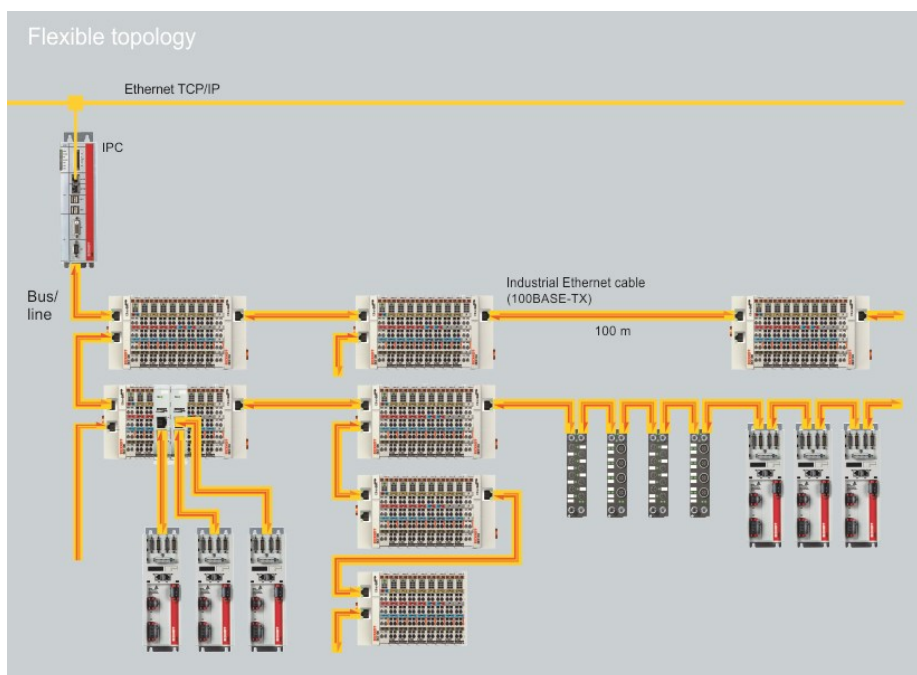
Následující kapitoly popisují dvě sběrnice, které jsou v zařízení automaticky implementovány a pomocí kterých PLC komunikuje se snímači a dalšími periferiemi. Důležitým hlediskem pro výběr sběrnic byla jejich jednoduché a všestranné využití a široká podpora ve velkém množství existujících zařízení. V případě potřeby lze další potřebné sběrnice do zařízení doimplementovat, za použití SW nebo HW řešení. Je tedy zajištěna možnost v případě potřeby nebo budoucích úprav připojení dalších komponent skrze různé sběrnice.

### 2.2.1 Protokol EtherCAT

Standard průmyslové Ethernetu s názvem EtherCAT byl vyvíjen s důrazem na rychlý přenos dat s krátkým komunikačním cyklem. Propagace a vývoj je zajištěn skupinou dodavatelů ETG. Pro dosažení vysokého výkonu a determinismu, standard EtherCAT kompletně nahrazuje přístupovou vrstvu (MAC) obsaženou ve standardním Ethernetu. [15]

Síť EtherCAT využívá pro komunikaci schéma *master-slave*. Oproti běžnému Ethernetu nejsou data odesílána po jednotlivých ethernetových rámcích. Vyslaný rámec prochází v rámci jednoho cyklu přes všechna podřízená zařízení (*slave*). Tyto zařízení obsahují speciální hardware s minimálně dvěma, případně více, ethernetovými porty. Tento hardware umožňuje zpracovat rámce za běhu, s co nejmenší časovou prodlevou – řádově jednotky nanosekund. Rámce jsou odesílány vždy řídicím zařízením – *master*. Rámec je zpracováván při svém průchodu každým zařízením. V průběhu jednoho cyklu může být odesláno několik paketů. Topologie sítě je vždy logický kruh, tato situace zajišťuje poslední prvek typu *slave* na segmentu, který odesílá rámec stejnou cestou zpět. Standardem EtherCAT je definován vlastní typ ethernetového rámce – *Ethertype*. Tím je protokol EtherCAT přímo přenášen uvnitř ethernetového rámce. V tomto rámci jsou podle protokolu EtherCAT řazeny jednotlivé datagramy typu EtherCAT obsahující data. *Slave* zařízení dle situace data čtou nebo je zapisují. [15]

U veškerých komponent určených pro řízení zařízení je předpokládáno jejich připojení skrze protokol EtherCAT.



Obrázek 17 Příklad možné topologie protokolu EtherCAT [30]

### 2.2.2 Protokol EtherNet/IP

Protokol EtherNet/IP vznikl v roce 2009 spoluprací mezi sdružením ODVA a CI pod záštitou ODVA a jejich členů. Využívá rozhraní Ethernet s protokolem TCP/IP. Rozhraní EtherNet/IP a jeho standardizovaný hardware, jsou definovány normou TCP/IP IEEE 802.3. Dle informací ODVA byl protokol EtherNet/IP v roce 2017 zastoupen v oblasti průmyslového Ethernetu podílem 25 %, v roce 2018 již 28 %. [16]

Protokol EtherNet/IP definuje dvě role uživatelů:

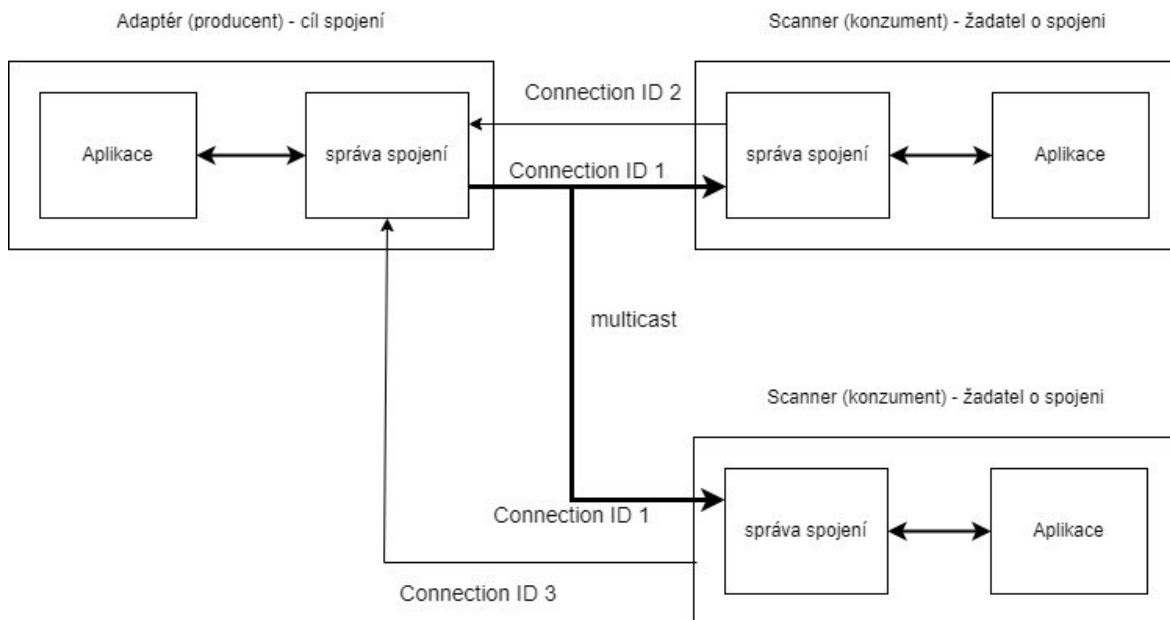
- Scanner (konzument, originator) – zařízení které otevírá spojení a inicializuje přenos dat,
- Adapter (producent) – poskytuje data scanneru po otevření spojení.

Podle způsobu přenosu jsou definovány dva způsoby komunikace:

- explicitní – přenos je realizován s použitím protokolu TCP/IP a je určen k přenosu typu žádost-odpověď mezi dvěma uzly sítě,
- implicitní – přenos je založen na protokolech UDP/IP a je určen pro cyklický přenos vstupních, výstupních a uživatelských dat.

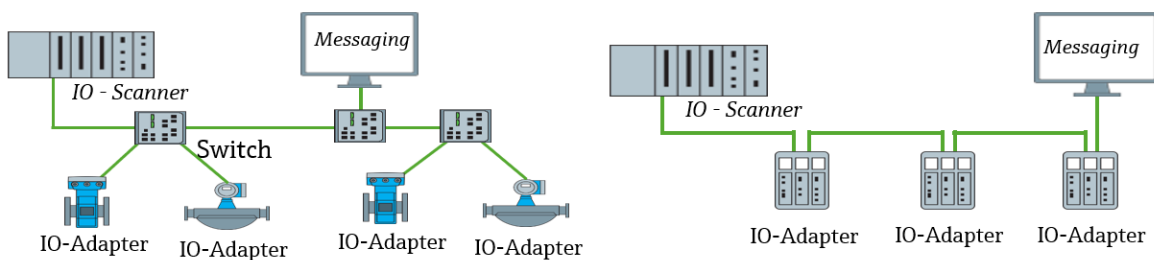
Zařízení, které potřebuje číst určitá data (Scanner), si jejich příjem vyžádá pouze jednou. Zařízení, které tato data poskytuje (Adapter), je bude cyklicky odesílat po vytvoření spojení. Zařízení typu Scanner nejprve odešle explicitní zprávu s požadavkem o vytvoření spojení, jež obsahuje parametry spojení.

Pokud je cílový adaptér schopen spojení navázat, odešle potvrzovací zprávu s přesnými parametry a naváže spojení. [15] Spojení může fungovat i v režimu multicast, další zařízení typu Scanner posílá žádost o příjem v režimu spojení pouze ke čtení – *listen only*. Následně zde může poslouchat v módu multicast. Tento režim je zobrazen na Obrázek 18.



**Obrázek 18 Diagram propojení protokolu EtherNet/IP v režimu multicast**

Protokol EtherNet/IP je běžně využíván pro komunikaci PLC s běžnými perifériemi a čidly. Je s ním ale možné navázat komunikaci mezi dvěma nebo více zařízeními, která spolu nemusí technicky ani aplikačně souviset. Nebo musí být možný jejich nezávislý provoz. Tato situace je běžná například při sběru statických dat o produkční efektivitě strojů a jejímu následnému vyhodnocení. Dalším příkladem může být přenos výrobních dat mezi navazujícími stroji výrobní linky při vykonávání technologických operací na produktu.



**Obrázek 19 Znáornění propojení zařízení pomocí protokolu EtherNet/IP [31]**



## 2.3 Odměrování pozice

Tyto kapitoly jsou věnovány principům a možnostem řešení snímání mechanického pohybu a jeho převedení na do formy elektrického signálu který je dále zpracovatelný dalšími zařízeními. Kapitoly si kladou za cíl představit čtenáři jakým způsobem je možno tento převod zajistit, a položit základní informace, z jejichž základů vychází KAPITOLA 2.4

Odměrování pozice, úhlu natočení, rychlosti rotačního pohybu poháněné soustavy nebo všechny veličiny které na ně lze převést jsou snímány rotačními enkodéry. Rotační enkodér převádí mechanický pohyb na elektrický signál. Běžně se používá 16 až 32bitové rozlišení.



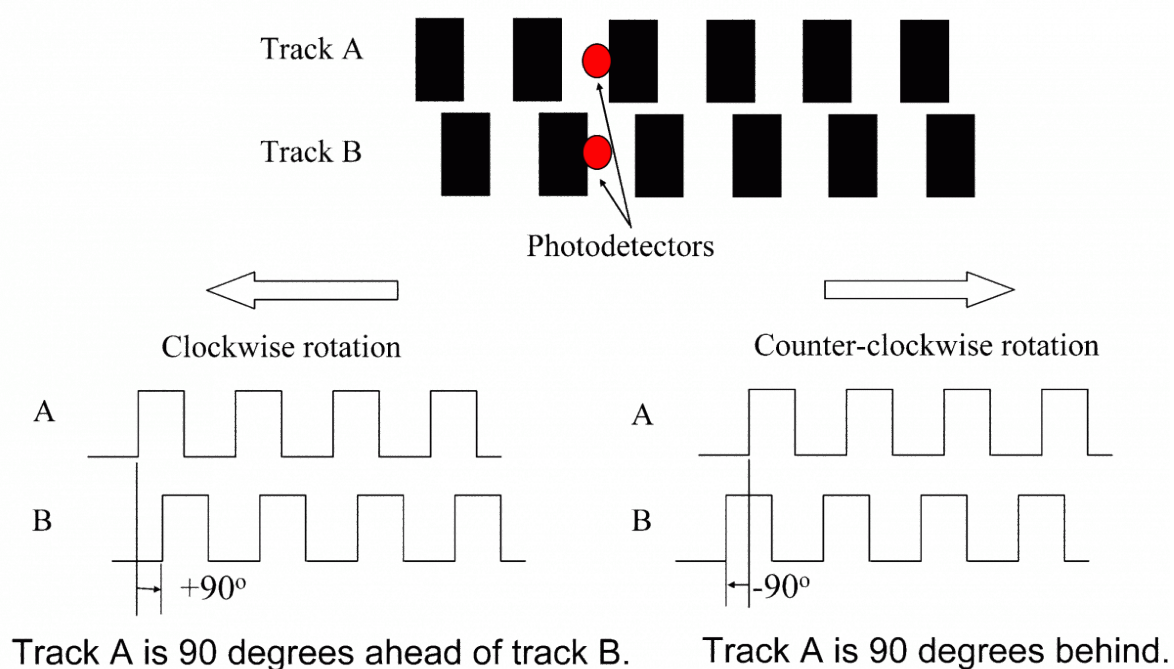
Obrázek 20 Různé druhy rotačních enkodérů [17]

Rotační enkodéry rozdělujeme na 2 skupiny:

- Inkrementální – generují sled pulsů,
- Absolutní – produkují sled unikátních kódů.

### 2.3.1 Inkrementální enkodér

Inkrementální enkodér obvykle generuje dva obdélníkové průběhy.[17] Tyto průběhy jsou vzájemně fázově posunuté o  $90^\circ$ , nazývají se kanál A a kanál B. V případě užití pouze



Obrázek 21 Princip detekce směru rotace optického enkodéru [17]

jednoho kanálu lze detekovat inkrementální přírůstek pohybu a rychlost otáčení. Při užití obou kanálů lze dle generované sekvence pulzů rozeznat i směr otáčení. Obrázek 21 znázorňuje průběh pulzů v závislosti na směru rotace hřídele enkodéru. Enkodér může být vybaven nulovým kanálem, tento kanál udává referenční polohu hřídele enkodéru. Generovaný pulz je ve shodné fázi s kanálem A. Kanál referenční polohy se označuje jako Z kanál, nebo *Z-phase*.

### 2.3.2 Absolutní enkodér

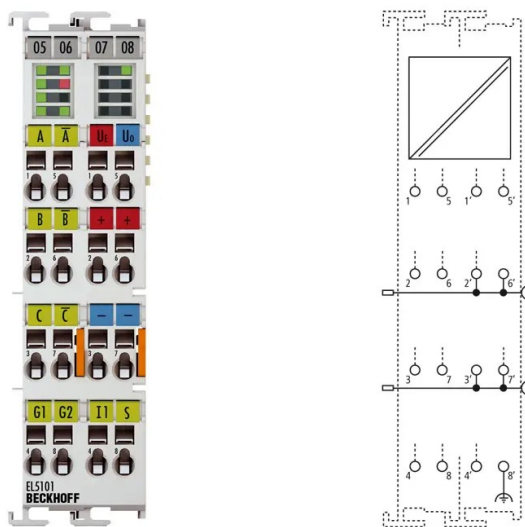
Oproti inkrementálním enkodérům poskytuje absolutní enkodér informaci o aktuálním úhlu natočení hřídele enkodéru. Absolutní enkodér informuje o poloze kódovými slovy.[17] Nejčastěji se užívají tato kódování:

- binární kód,
- Grayův kód.

Binární kód je jednoduchý a lehce srozumitelný, ale užití v enkodérech má praktické nevýhody. [17] Binární kód je velmi náchylný na generování hazardních stavů. Vlivem nedokonalé výroby vnitřních částí enkodérů může dojít k chybnému stavu, například mezi stavem 01 a 10 může na velmi krátký okamžik generován stav 00. V případě užití Grayova kódu je tento jev potlačen. Oproti binárnímu kódování, u Grayova kódu dochází vždy ke změně pouze jednoho bitu slova mezi sousedícími stavy.

### 2.3.3 Vstupní zařízení pro poziční enkodéry

V případě řízení motoru servo zesilovačem (*servodriver*), je možné připojit enkodér do servo zesilovače. U frekvenčních měničů není obvyklá vybavenost jednotkou pro připojení enkodérů. Existují situace, kdy je nutná znalost polohy soustavy bez využití motoru, nebo bez možnosti jeho připojení – například při snímání polohy soustavy jiného zařízení, bez



Obrázek 22 Měřicí poziční karta EL5101 pro připojení inkrementálních enkodérů [32]

jeho ovlivnění. Pro připojení samostatného enkodéru jsou využívány měřicí polohové karty. Tyto karty obvykle umožňují připojit jeden až čtyři enkodéry. Následně lze tuto informaci o poloze dále zpracovávat v PLC.

## 2.4 Pohyb těles pod snímačem

Následující kapitoly přibližují možné způsoby pohybu těles pod snímačem skeneru. S vlastním dopravním systémem i s dopravním systémem jiného zařízení. Kapitoly nedefinují přesné specifikace pro dopravníkový systém. Přesná specifikace se odvíjí od požadavků a možností začlenění do cílového procesu.

### 2.4.1 Zařízení s vlastním posuvem měřených těles

Posuv těles je možné řešit například pomocí válečkové dráhy, pásového nebo řetězového dopravníku. Je důležité zajistit, aby přepravované těleso neměnilo svou polohu oproti požadované poloze na dopravníku. V případě že by hrozilo například podklouznutí přenosové mechaniky oproti tělesu, je nutné těleso při přenosu mechanicky zajistit, nebo



Obrázek 23 Příklad dopravníku ve formě válečkové dráhy

zvýšit odolnost soustavy vůči tomuto riziku. Toto riziko lze snížit nebo úplně potlačit například pomocí mechanických zářezek na přenosných řetězech nebo pásu, případně užitím pogumovaných dopravních válečků dopravníku.

Pro pohon dopravního systému je vhodné použít asynchronní motor. Pro zajištění konstantní rychlosti dopravníku je možné snímat jeho rychlost a polohu následujícími způsoby:



**Obrázek 24 Příklad mechanického propojení enkodéru a měřené soustavy**

- enkodérový snímač instalovaný v pohonném motoru soustavy,
- enkodérový snímač instalovaný na poháněném prvku soustavy,
- enkodérový snímač instalovaný v pohonném motoru soustavy a zároveň na poháněném prvku soustavy.

V případě užití enkodérového snímače v motoru, je výhodné použít asynchronní servomotor řízený pomocí servodriveru. Je nutné použít servodriver s podporou asynchronních motorů, nebo frekvenční měnič. Jelikož u frekvenčních měničů není vstup zpětné vazby standardě vybaven, je zapotřebí využít vstupní poziční kartu z řady EL5xxx, přesný typ karty závisí na typu užitého enkodéru. Tímto způsobem lze velmi přesně řídit rychlost a aktuální natočení motoru. Zůstává neměřená chyba způsobená přenosem točivého momentu motoru do zbytku dopravníkové soustavy.

Pokud je enkodérový snímač instalován pouze na poháněné soustavě, má systém přesnou informaci o aktuální poloze soustavy a poloze měřeného tělesa. Může ale dojít k nepřesnému řízení rychlosti motoru pohánějícího soustavu, jelikož řídicí prvek motoru nemá zpětnou vazbu o jeho aktuální rychlosti, případně poloze. Výsledná rychlost tělesa může například oscilovat.

Varianta s enkodérovými snímači na motoru a poháněné soustavě přináší přesnou informaci o rychlosti hnacího motoru a o výsledném pohybu soustavy. Řídící systém tedy dokáže kompenzovat chyby přenosu pohybu v rámci poháněné soustavy. Nevýhodou je navýšení ceny zařízení o další měřící prvek.

#### **2.4.2 Užití dopravního systému nepatřícího k zařízení**

V případě posuvu měřených těles pod snímačem s použitím transportního systému, který není řízen řídicím systémem 3D skeneru není možné pohon řídit dle potřeby systému. Je tedy nutné na dopravní systém instalovat enkodérový snímač pro znalost pozice soustavy. Zároveň je vhodné instalovat ve vzdálenosti před měřícím snímačem na dopravní systém optické čidlo pro detekci posuvu měřeného tělesa do oblasti měření.

Tato situace se vyskytne převážně v případě již fungujícího systému, a zařízení 3D skeneru je přidáno později bez původního předpokladu.



**Obrázek 25 Příklad použití enkodéru pro snímání polohy asynchronního motoru [33]**

## **2.5 Snímací část**

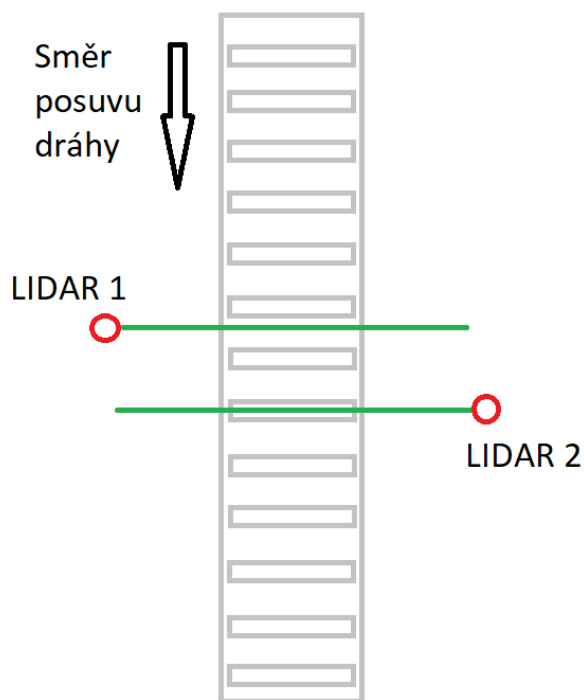
Následující část práce je věnována měřící části zařízení. Jejím mechanickému uspořádání a popisu principu její funkce. Snímací část zajišťuje měření vnější kontury tělesa po definovaných ujetých vzdálenostech.

Pro měřící část byly vybrány dva typy snímačů. Oba snímače mají přibližně podobné možnosti. Jejich vzájemná kombinace není předpokládána, je ale možná. Volba typu snímače závisí na konkrétních požadavcích aplikace 3D skeneru.

Snímače je možné připojit pomocí zmíněných sběrnic v KAPITOLE 2.2, případně přímo pomocí USB, TCP/IP, UDP/IP s vytvořenou aplikací v C++ a její následném zavedení do řídicího PLC.

### 2.5.1 Mechanické uspořádání měřící části v dálce

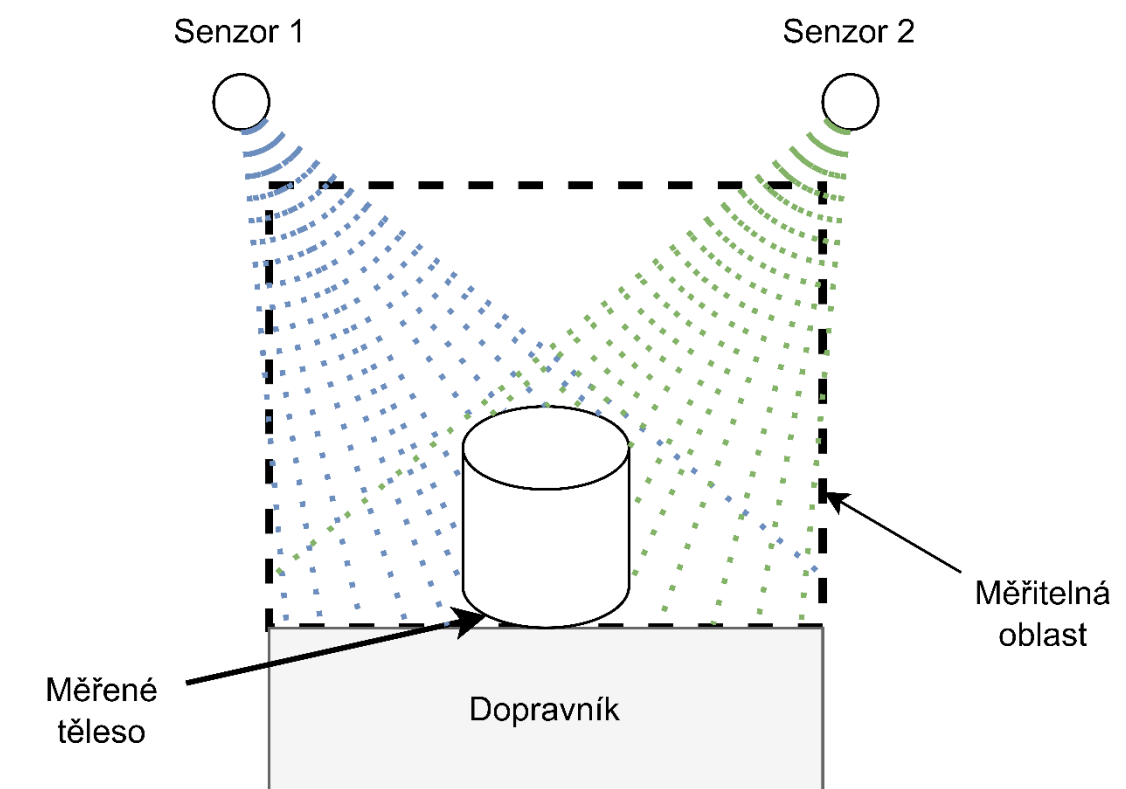
Při užití LIDAR sensorů je nutné zamezit vzájemné interferenci mezi senzory. Je tedy nutné umístit senzory v dostatečné vzdálenosti od sebe ve směru průchodu měřených těles. Tato vzdálenost závisí na parametrech udávaných výrobcem. Situace rozmístění sensorů je znázorněna na obrázku **OBRÁZEK 26** V případě že senzory umožňují vzájemnou synchronizace bez rizika vzájemné interference, je možné je umístit na stejné měřící rovině. Vzdálenost mezi senzory je nutné zahrnout při následném zpracování dat.



**Obrázek 26** Mechanické uspořádání měřících sensorů

## 2.5.2 Mechanické uspořádání měřící části výškově

Obrázek 27 vyobrazuje měřící roviny senzorů skeneru. V ideálním případě by dosah obou senzorů měl být vyšší než vzdálenost senzorů od dopravníkového systému. Pokud bude měřící dosah menší, dochází k zvětšení minimální měřitelné výšky a šířky tělesa. Výška senzorů nad dopravníkovým systémem a jejich vyzařovací úhel, určuje maximální možnou výšku měřeného tělesa. V ideálním případě by měřená tělesa měla být snímána z obou stran symetricky. Případné překrytí snímacích rovin senzorů lze využít pro následnou fúzi dat. Překrytí snímacích zón lze také využít v případě že měřená tělesa neprochází přesně uprostřed snímacích rovin. Příčná vzdálenost mezi senzory je závislá na maximální šíři měřeného objektu. Sensory je nutné umístit po stranách vedle snímaného objektu. Tímto rozmístěním je zajištěno že těleso nebude snímáno jen z vrchní strany ale i z boční. Pokud by senzory byly rozmístěny v zákrytu nad tělesem, byly by boční strany tělesa v optickém stínu a výsledný naměřený model by byl zkreslen, viz. 1.2.1. Přesná vzdálenost od hrany tělesa je závislá na aktuálním natočení snímací oblasti senzoru a úhlové vzdálenosti jeho paprsků.



Obrázek 27 Pohled na snímací roviny senzorů zepředu

S narůstající vzdáleností měřeného tělesa od měřícího senzoru dochází k narůstání vzdálenosti měřících bodů od sebe. Dochází k zachycení menšího množství měřících bodů na malých měřených tělesech oproti velkým. A těleso je nasnímáno s menším rozlišením. V případě potřeby velkého snímaného rozlišení i u velmi malých těles, je nutné přiblížit senzor blíže k měřené rovině, nebo použít senzor s dostatečným úhlovým rozlišením mezi paprsky.

Pro snímání prostoru lze použít přímo měřící LIDAR senzory, například senzor řady LMS4000 vyráběný firmou SICK. Je také možné použít bezpečnostní skenery, například skener OS32C-BP-DM z portfolia firmy OMRON. Následující tabulka porovnává parametry senzorů od výše zmíněných výrobců.

**Tabulka 2 Porovnání parametrů LIDAR senzorů**

	OS32C-BP-DM	OS32C-BP-DM-4M	LMS4124R-13000S01	picoScan150 Core-1	picoScan150 Prime-1
Výrobce	Omron	Omron	Sick	Sick	Sick
Dosah	10 m	15 m	0,5 – 5,5 m	0,05 – 25 m	0,05 – 60 m
Zorný úhel	270°	270°	70°	276°	276°
Úhlové rozlišení	0,4°	0,4°	0,0833°	0,25°; 0,33°	0,05°; 0,1°; 0,125°; 0,25°; 0,33°; 0,5°
Skenovací perioda	40 ms	40 ms	1,6 ms	66,6 ms; 40 ms	66,6 ms; 50 ms; 40 ms; 33,3 ms; 25 ms; 20 ms
Napájecí napětí	24 VDC	24 VDC	24 VDC	9-30 VDC	9-30 VDC
Zdroj záření (vlnová délka)	Infračervená laserová dioda (905 nm)	Infračervená laserová dioda (905 nm)	Viditelné červené světlo (660 nm)	Infračervené (905 nm)	Infračervené (905 nm)
Připojení k PLC	EtherNET/IP	EtherNET/IP	TCP/IP, UDP/IP	TCP/IP, UDP/IP	TCP/IP, UDP/IP
Možnost synchronizace	ne	ne	ano	ne	ne

## 2.6 FORMÁTY 3D DAT

Naskenovaná tělesa obsahují, v závislosti na rozlišovací schopnosti přístroje, velké množství dat. Tato data je nutné uchovávat tak, aby bylo možno je zpracovávat mezi více systémy a zajistit tedy vzájemnou kompatibilitu. Zároveň je důležité zachovávat vzájemnou geometrii dat. K tomu je využíváno velké množství souborových formátů, kterým se věnují následující podkapitoly.

### 2.6.1 PLY

PLY formát je jednoduchý formát pro popis objektu jako polygonového modelu. Formát byl vyvinut v Stanford Computer Graphics Laboratory v roce 1990, kde byl používán pro modely vzniklé za pomoci 3D laserového triangulačního skeneru. Formát je definován ve formě ASCII nebo binárního souboru. Je možné zapsat jednotlivé body a plochy mezi nimi. [18]

Soubory v obou formách začínají ASCII hlavičkou. V hlavičce je definován počet bodů, které jsou v souboru definovány a datový typ souřadnic. Následuje zápis o informaci počtu ploch. Body jsou zapisovány ve formě jejich koordinátů v trojrozměrném prostoru pomocí

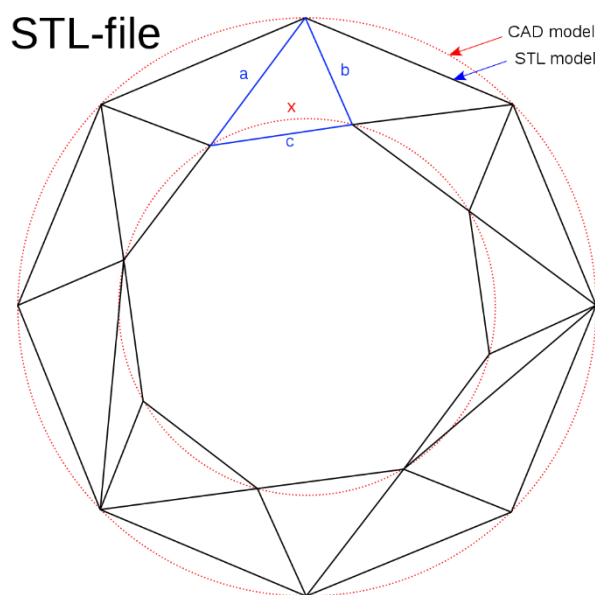


souřadnic  $x$ ,  $y$  a  $z$ . V případě plochy je vždy určen počet bodů, které určují plochu a jejich index jejich pozice v seznamu bodů.[18]

### 2.6.2 STL

Formát popisující pouze povrchovou geometrii bez informací o barvě, textur nebo jiných běžných CAD modelových atribut.[19] STL formát je specifikuje binární i ASCII formy. STL formát popisuje nestrukturovaný trojúhelníkový povrch pomocí jednotkové normály a vrcholu (řazeno dle pravidla pravé ruky) trojúhelníků pomocí tří-dimenzionálního Kartézského koordinačního systému.[19] Jakmile byl formát STL použit v první 3D tiskárně, stal se velmi rychle 3D tiskovým standardem. Obrázek 28 znázorňuje aproximaci prstence reprezentovaného CAD výkresem a jeho aproximaci pomocí STL formátu. Přesnost aproximace je závislá na počtu jednotlivých bodů generovaných z původního modelu a jejich propojení plochami.

Nevýhodou formátu je jeho značná velikost, neschopnost detekovat nebo opravit chyby data (hlavně nespojité plochy). [19]

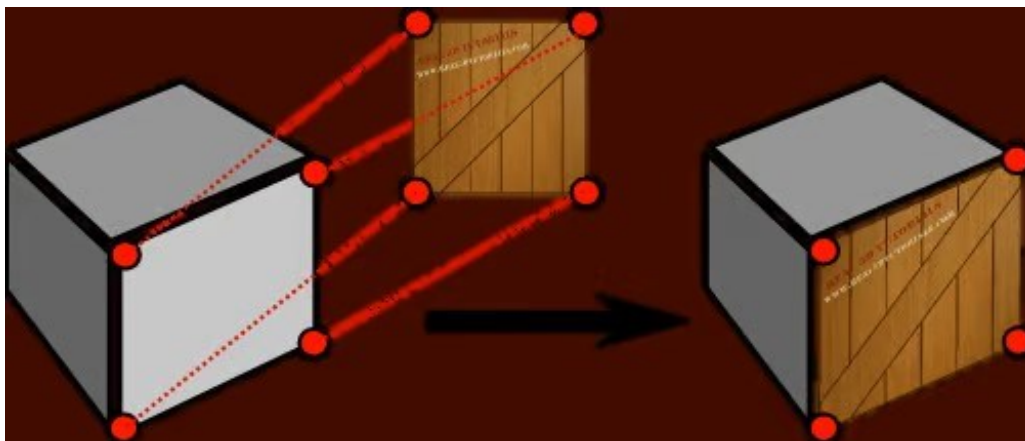


**Obrázek 28 CAD reprezentace prstence a jeho STL aproximace [34]**

### 2.6.3 OBJ

Formát OBJ byl původně používán 3D grafickými designéry jako neutrální formát pro výměnu 3D grafických dat. Později byl komunitou 3D tiskařů používán pro 3D tisk, jakmile 3D tiskárny umožňovaly tisk více barvami a materiály. Formát podporuje ASCII i binární formát dat.

OBJ formát popisuje povrch 3D objektů stejným způsobem jako STL formát. Umožňuje ale i využití pokročilého schématu volno-prostorových křivek a volno-prostorových povrchů. [19] OBJ formát zároveň umožňuje uchovávat informace o barvě a textuře v přidruženém



Obrázek 29 Znárodnění implementace barevných informací a textur na stranu krychle ve formátu OBJ [35]

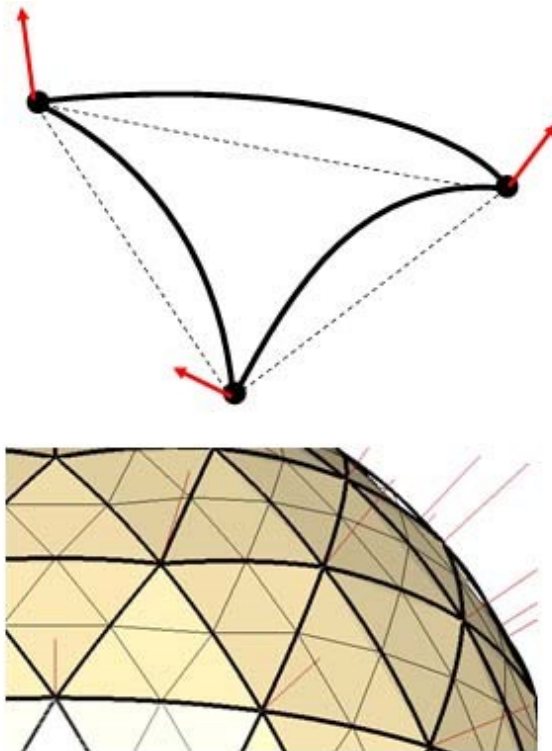
souborovém formátu MTL. Pokud je OBJ soubor párován s MTL, je možné generovat vícebarevný texturovaný model Princip je znázorněn na Obrázek 29.[19] Formát OBJ je mnohem komplikovanější v porovnání s STL formátem. Opravit poškozený OBJ soubor může být velmi náročné. Zároveň je méně častěji podporován v porovnání s STL.[19]

### 2.6.4 AMF

Formát vzniklý v roce 2011, jako náhrada STL formátu. Cílem bylo vylepšit nedostatky STL formátu, především velikost souboru, rychlost zpracování, možnost chyb dat a nemožnost obsažení informací o barvě, materiálu a textuře. [19] AMF formát je definován pomocí XML formátu (lidsky čitelného) s hierarchií o pěti prvcích:

- Objekt,
- Materiál,
- Textura,
- Konstelace,
- Metadata.

XML formát zajišťuje že je soubor snadné číst, zapsat a zpracovat. Formát popisuje povrch pomocí trojúhelníkových sítí stejně jako STL. Dovoluje ale oproti STL zakřivené trojúhelníky jako přídavek k rovinným přímým trojúhelníkům. Na Obrázek 30 lze vidět příklad. Je tedy možné popsat zakřivený povrch bez použití přílišného množství fazet. Tím je zajištěno že formát AMF dokáže popsat zakřivené povrchy, zatímco zůstává nízká velikost souboru. AMF formát souboru se stal v roce 2013 ISO standardem [19].



Obrázek 30 Znárodnění užítí zakřivených trojúhelníků [36]

### 2.6.5 3MF

Formát vyvinutý firmou Microsoft. Stejně jako AMF formát, využívá formát 3MF zápis založen na XML formátu. Reprezentace geometrie je podobná jako ve formátu STL, ale o něco více kompaktní a velikostně přívětivější oproti AMF formátu. Například více identických objektů může být umístěno s referencí na stejnou popisnou síť. [19] Stejně jako u AMF formátu je možné přímo implementovat informace o barvě modelu, materiálu a texturách. Zároveň je formát volně šiřitelný. Je tedy možné získat bezplatný přístup k balíčku vývojových nástrojů a dokumentaci. [19]

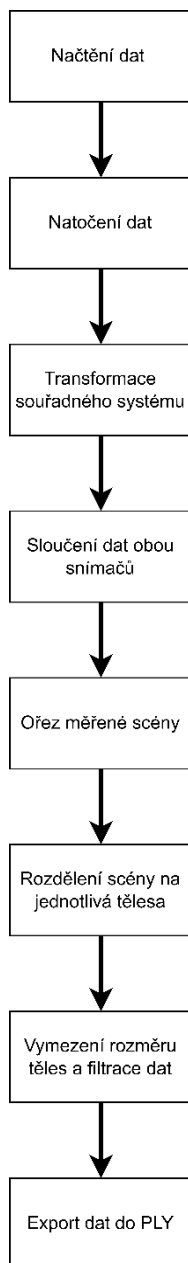
### 2.6.6 Shrnutí

Většina zmíněných formátů 3D dat v předchozích kapitolách popisuje vnější kontury těles. Nelze jednoznačně určit nejvýhodnější formát dat. Z hlediska jednoduchosti tvorby a zpracování dat je ovšem nejjednodušší formát PLY. Lze ho jednoduše přímo vytvořit i v méně výkonných zařízeních. V případě potřeby může tento formát sloužit jako výchozí formát pro převod do ostatních 3D formátů. Z tohoto důvodu je zařízení navrhováno s využitím tohoto formátu pro ukládání 3D dat.

## 2.7 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Předchozí kapitoly popisují zařízení skeneru, která pospolu zajišťují skenování těles a získání změřených dat. Naměřená data jsou rozdělena na mnoho jednotlivých měření pro každý senzor. Následující kapitoly se zabývají zpracováním dat do formátu vhodného pro export.

Pro zjednodušení zpracování, byla naměřená data zpracována v prostředí MatLab. Pro další zpracování dat byl zvolen formát PLY. Tento formát přináší výhodu především v nativní implementaci v prostředí MatLab a jednoduchosti jeho formátu.



Obrázek 31 Postup zpracování naměřených dat

Zvolená řídicí jednotka umožňuje přímé napojení na výpočetní SW MatLab, je tedy možné toto prostředí nainstalovat přímo do řídicí jednotky a níže vypsané operace provádět v prostředí MatLab.

Další možností je provádět přímo v podprogramu PLC. Výhodou tohoto přístupu je že odpadá potřeba instalovat další SW a licence do řídicí jednotky. Nevýhodou může být složitější zpracování podprogramu, jelikož PLC disponuje pouze základními funkcemi a složitější operace s daty budou vyžadovat větší časovou náročnost na přípravu.

Předposlední variantou je využití SW v jiném programovacím jazyce, například C++, nebo C-Sharp. Řídicí jednotka disponuje možností přenosu dat i do dalších externích aplikací v těchto jazycích, které opět mohou být provozovány přímo v operačním systému řídicí jednotky.

Poslední možností je export dat například do externí databáze a zpracování dat provést na jiném zařízení.

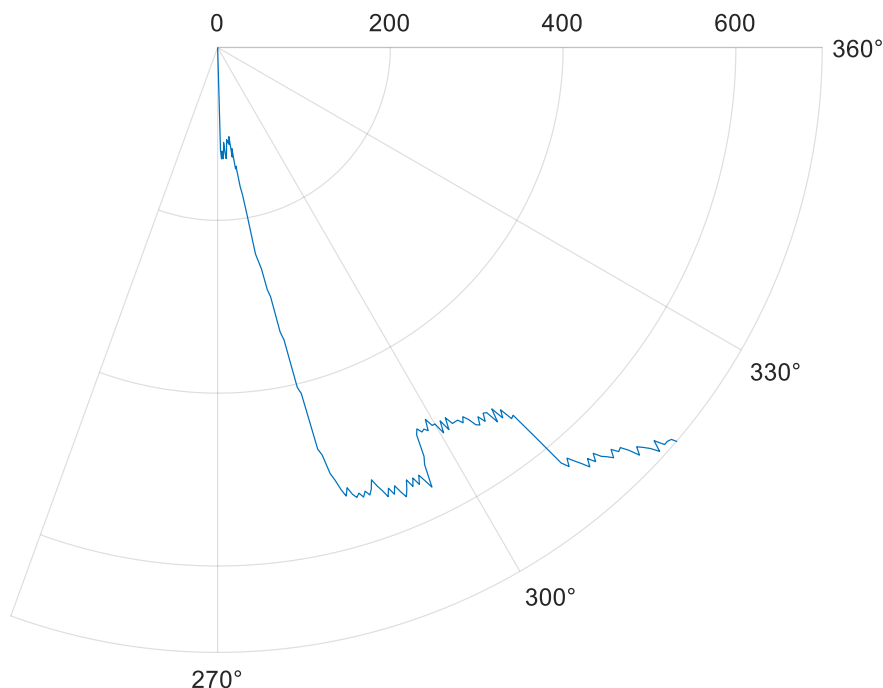
Zde je rychlý přehled operací s naměřenými daty:

- 1) Načtení dat do prostředí MatLab,
- 2) Úhlové natočení dat – data je vhodné před zpracováním úhlově zarovnat, například aby naměřená data podlahy byly rovnoběžná s reálnou předlohou,
- 3) Transformace souřadného systému – data jsou nasnímána v polárním souřadném systému, pro další zpracování je vhodné převést data do kartézského souřadného systému,
- 4) Sloučení dat – data jsou rozdělena na dvě, případně více částí, v závislosti na počtu senzorů. Po převodu do kartézského souřadného systému lze data sloučit do jedné měřené scény,
- 5) Ořez měřené scény – data obsahují i okolní prostor (podlahu, dopravník atd..) tato data nejsou pro další zpracování nutná a je možné je odebrat,
- 6) Rozdělení scény na jednotlivá tělesa – scéna stále obsahuje všechna tělesa dohromady. Tato část zpracování rozděluje scénu na menší části, kdy každá odpovídá jednomu tělesu,
- 7) Vymezení rozměru těles a filtrace dat – závěrečná část zpracování dat, která si klade za cíl odfiltrovat případná šumová data a detekovat přesné rozměry tělesa z naměřených dat.

V následujících podkapitolách jsou výše zmíněné operace podrobně popsány.

### 2.7.1 Natočení dat a transformace souřadného systému

Naměřená data jsou ve formátu polárních souřadnic. K jednotlivým měřeným úhlům náleží změřená vzdálenost od snímače k překážce. Z takto formátovaných dat nelze přímo určit rozměr měřených těles, jen vzdálenost tělesa od snímače. Je tedy nutné provést transformaci z polárních souřadnic do kartézského souřadného systému.

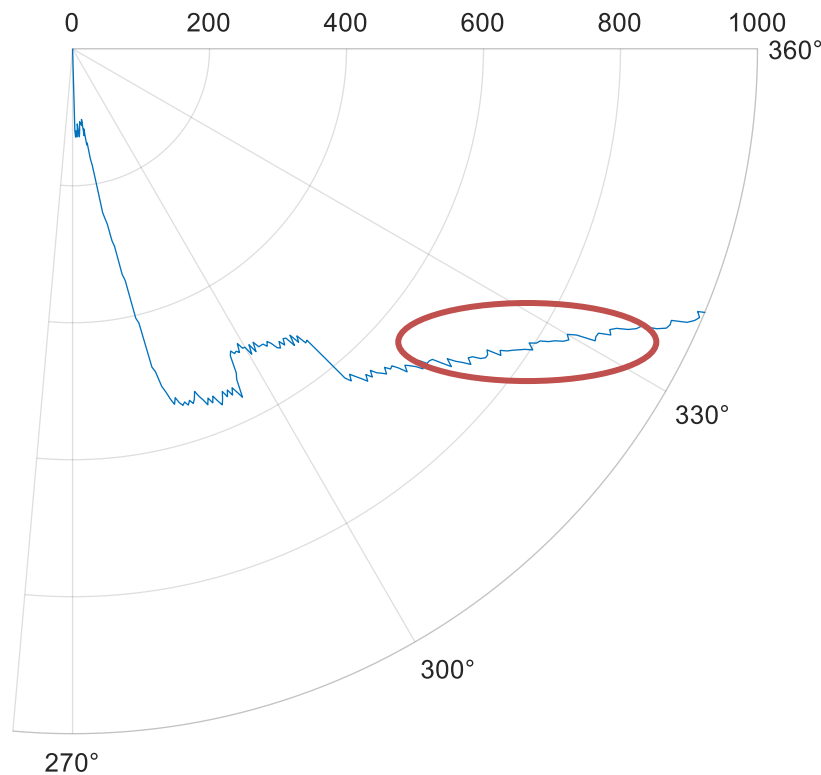


Obrázek 32 Naměřená data ze snímače v polárních souřadnicích

Na Obrázek 32 je patrné, že naměřená data jsou úhlově natočena, tento důsledek je způsoben tím, že měřená tělesa neprojíždí přímo pod měřícím snímačem ale ze strany. Před samotnou transformací souřadnic je vhodné data zarovnat, například aby naměřená podlaha v datech úhlově ležela v polárním grafu rovnoměrně s úhlovou osou o hodnotě 360°. V polárních souřadnicích tato úprava dat spočívá v přičtení nebo odečtení hodnoty úhlu ke všem datům. Korekce je tedy výrazně snazší než v kartézském souřadném systému.

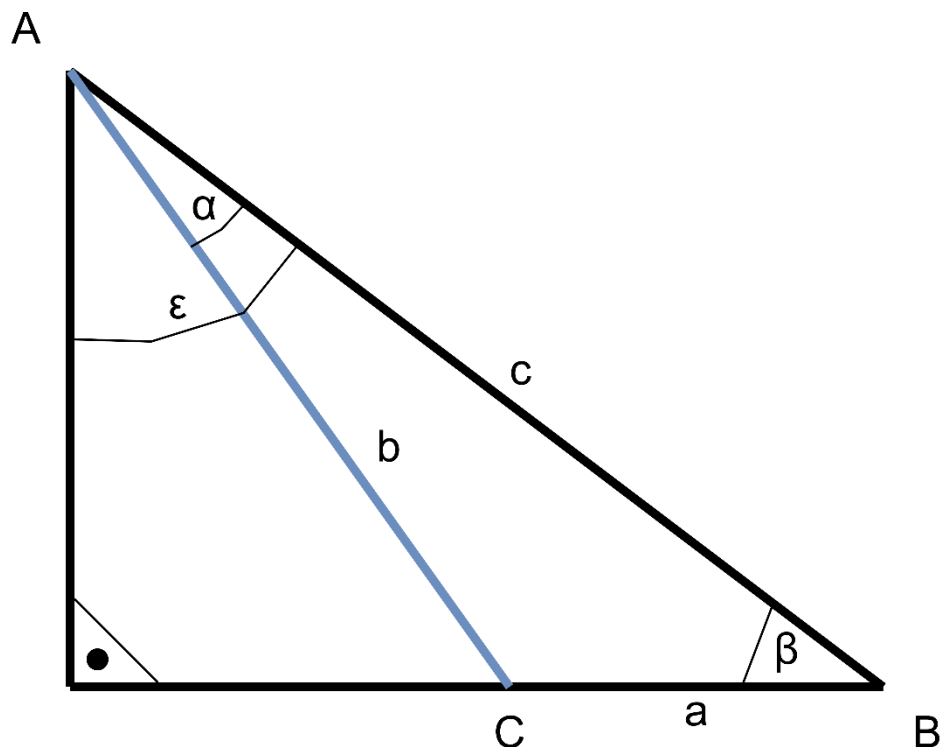
Pro transformaci je důležitá znalost pozice snímače v prostoru. V aplikaci 3D skeneru je důležitá především znalost výšky snímače nad zemí, respektive nad snímanou plochou. Jelikož je snímač opatřen ochrannými kryty, nelze jednoznačně určit pozici nulového bodu snímaného souřadného systému na těle snímače. Lze se znalostí parametrů snímače z naměřených dat vypočítat.

V naměřených datech je nutné nalézt data, která lze použít jako referenci k výpočtu výšky snímače. V případě testovaného prototypu byla využita část naměřených dat odpovídajících podlaze, na které byl dopravník a snímač položen. Data jsou znázorněna na Obrázek 33



**Obrázek 33** Znázorněná pozice podlahy v naměřených datech

Každá změřená vzdálenost náleží jednomu měřicímu paprsku snímače. Se znalostí vzájemného úhlu mezi měřicími paprsky a vzdálenostmi naměřenými těmito paprsky je možné určit výšku snímače nad referenční rovinou.



Obrázek 34 Znáornění situace při výpočtu výšky snímače nad referenční rovinou

Z Obrázek 34 a rovnice (3) vycházející z kosinové věty lze určit vzdálenost mezi změřenými body C a B.

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 * b * c * \cos(\alpha) \quad (3)$$

kde

*a ... vzdálenost mezi 2 změřenými sousedícími body [mm]*

*b ... změřená vzdálenost prvním měřícím paprskem [mm]*

*c ... změřená vzdálenost druhým měřícím paprskem [mm]*

*A ... pozice snímače*

*B ... pozice druhého změřeného bodu*

*C ... pozice prvního změřeného bodu*

*α ... úhel mezi sousedními paprsky [°]*

*β ... úhel mezi druhým měřeným paprskem a referenční rovinou [°]*

*ε ... úhel mezi druhým měřeným paprskem a kolmicí od čidla k referenční rovině [°]*

Vypočtenou vzdálenost lze dosadit do rovnice (4) vycházející se sinové věty a vypočítat úhel β.



$$\sin(\beta) = \frac{b * \sin(\alpha)}{a} \quad (4)$$

kde

$\alpha$  ... úhel mezi sousedními paprsky [°]

$\beta$  ... úhel mezi druhým měřeným paprskem a referenční rovinou [°]

Nyní lze vypočítat neznámý úhel  $\alpha$ . Viz. následující rovnice.

$$\varepsilon = 180 - 90 - \beta \quad (5)$$

kde

$\varepsilon$  ... úhel mezi druhým měřeným paprskem a kolmicí od čidla k referenční rovině [°]

$\beta$  ... úhel mezi druhým měřeným paprskem a referenční rovinou [°]

Na závěr rovnic č.(6) lze spočítat výšku snímače nad referenční rovinou.

$$v = c * \cos(\varepsilon) \quad (6)$$

kde

$v$  ... výška snímače nad referenční rovinou

$c$  ... změřená vzdálenost druhým měřicím paprskem

$\varepsilon$  ... úhel mezi druhým měřeným paprskem a kolmicí od čidla k referenční rovině [°]

Nyní lze provést transformaci souřadného systému z polárních souřadnic na kartézské s užitím rovnic (7).

$$\begin{aligned} x &= r * \cos(\varphi) \\ y &= r * \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

Kde

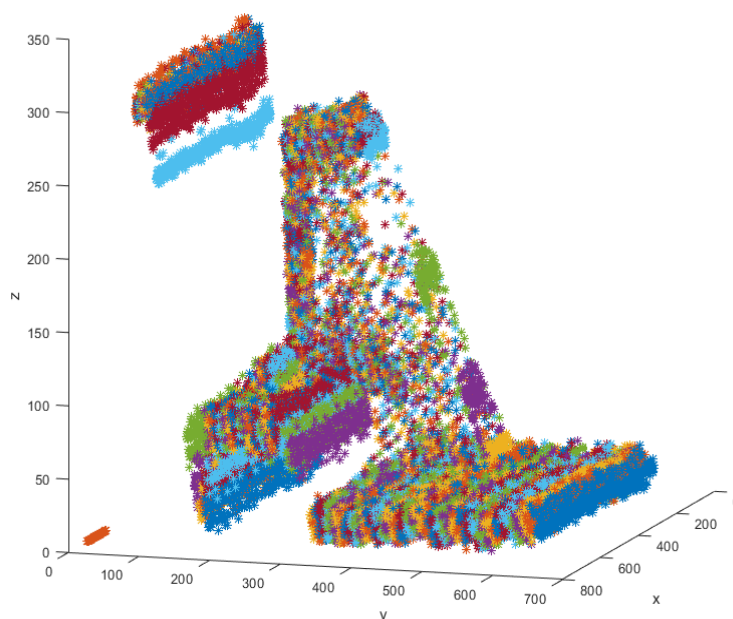
$x, y$  ... souřadnice kartézského systému

$r$  ... vzdálenost dat od středu v polárních souřadnicích [mm]

$\varphi$  ... úhel dat v polárních souřadnicích [°]

Posledním krokem je přičtení k z souřadnici všech dat výše vypočtenou výšku snímače. Obrázek 35 znázorňuje výsledná data v kartézském souřadném systému. Následně jsou data uložena.

Naměřená data v kartézském souřadném systému



Obrázek 35 Naměřená data v kartézském souřadném systému

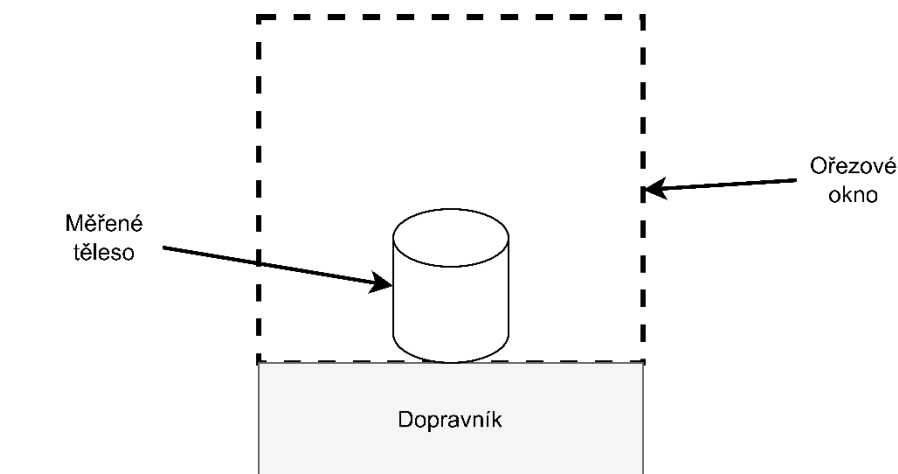
### 2.7.2 Sloučení dat snímačů

Návrh předpokládá použití 2 měřících snímačů. Obecně může být měřících snímačů více. Naměřená data od všech těchto snímačů je nutné sloučit do jednoho mračna bodů. Vzhledem k fyzickému rozmístění snímačů, mohou být jednotlivé sady dat proti sobě posunuty ve všech třech osách – X, Y, Z.

Pro kalibraci obou snímačů a následnému korektnímu sloučení dat, je zapotřebí znalost pozic snímačů vůči sobě. Zaměření těchto pozic je problematické, podobně jako při měření výšky snímače nad dopravníkem těles. Lze ale využít kalibračního tělesa. Tedy těleso které má dané přesné rozměry a tyto informace jsou nám známé. Jako kalibrační těleso lze užít například přesně frézovaný a zabroušený kvádr. Provést měření tohoto tělesa a následně při procesu sloučení a zarovnání dat lze potřebné parametry nalézt.

### 2.7.3 Ořez měřené scény

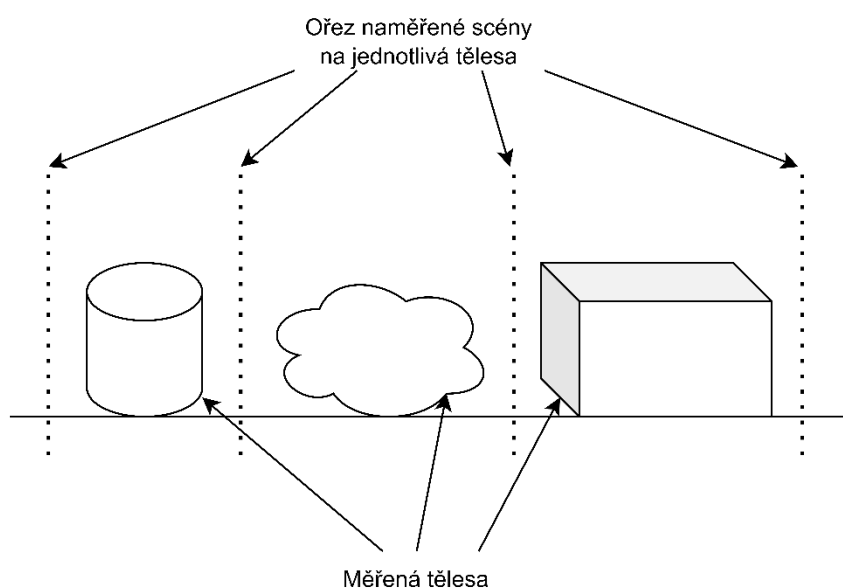
Naměřená data scény je nyní nutné ořezat od naměřených hodnot, které náleží pozicím mimo měřenou scénu. Například naměřený dopravník, podlaha a podobně. Tuto situaci lze řešit velmi jednoduše pomocí ořezového okna. V naměřených datech je nutné určit požadované mezní měřené rozměry. Následně vytvořit ořezové okno o těchto rozměrech a provést filtraci naměřených dat tímto oknem. Obrázek 36 znázorňuje situaci ořezu. Výsledkem budou pouze požadovaná data scény.



Obrázek 36 Znázornění ořezu scény ořezovým oknem

### 2.7.4 Ořez scény na jednotlivá tělesa

Po oříznutí obsahuje naměřená scéna již jen scéna těles. Následně je nutné rozdělit scénu na jednotlivá tělesa. Po separaci dat těles bude možná jejich filtrace a určení přesných dat jednotlivých těles.



Obrázek 37 Znázornění ořezu scény na jednotlivá tělesa

Tuto lze situaci řešit několika způsoby:

- 1) Je možné využít vstupní detekční čidlo pro přibližné změření délky tělesa. Následně je možné provést automatické rozdělení dat dle těchto vzdáleností a po-té těleso v naměřených datech přesněji lokalizovat.
- 2) Provádět měření vždy pouze s jedním tělesem na dopravníkovém systému. Tato metoda je proveditelně nejjednodušší, zároveň ale snižuje výťažnost zařízení.
- 3) Provádět měření v předem definovaných rozestupech. Tato metoda limituje maximální možnou délku měřených těles.

## **2.8 Zpracování dat jednotlivých těles**

Data jsou nyní rozdělena po jednotlivých měřených tělesech. Stále však nejde pouze o data těles. Data nyní obsahují i část prázdného naměřeného prostoru před a za tělesem. Tento prostor většinou obsahuje naměřenou horní plochu dopravníku, případně data šumu.

### **2.8.1 Zaokrouhlení dat**

Naměřená data jsou nyní s přesností na mnoho desetinných míst. Tyto hodnoty vznikly především při předchozí transformaci z polárního do kartézského souřadného systému. Pro zjednodušení následného zpracování lze pozice všech naměřených bodů zaokrouhlit na celá čísla.

### **2.8.2 Vymezení a filtrace dat těles**

Posledním krokem je konečná detekce těles. Těleso je detekováno rovinami kolnými k osám kartézského souřadného systému. Tyto osy se přibližují od nekonečna k počátku. Při každém posunutí roviny, dojde k součtu všech bodů ležících v rovině. Pokud je tato hodnota menší než určená prahová hodnota, dojde k dalšímu posunutí roviny blíže k počátku. V případě že je součet bodů roven nebo větší než prahová hodnota, je posun roviny ukončen. Následně jsou všechny body, ležící od této roviny dál směrem k nekonečnu smazány. Tento postup je opakován pro všechny osy. Obrázek 38 znázorňuje zmíněný postup. Tato operace zároveň provádí filtraci šumových hodnot.

Výsledné mračno bodů je považováno za výsledné těleso a uloženo ve formátu PLY. Tato data je následně možno použít v dalších návazných systémech.



Rozlišujeme variantu online BPP a offline BPP. V případě online BPP, je každé příchozí těleso okamžitě umístěno do konkrétního kontejneru. Rozměry tělesa nejsou dopředu známy. Následně je umístěno další těleso. Offline BPP varianta je opakem online BPP varianty, v tomto případě je dopředu známá kompletní množina vstupních těles včetně jejich rozměrů.

Do algoritmu vstupují množiny těles a homogenních kontejnerů.

### **2.9.1 Tělesa**

Každé těleso v množině těles je popsáno rozměry – šířkou, výškou a hloubkou.

Pro všechny tělesa platí následující pravidla:

- 1) tělesa se nesmí vzájemně překrývat, částečně ani úplně,
- 2) tělesa do sebe nesmí být vzájemně vložena,
- 3) rozměry jednotlivých těles nesmí překročit rozměry kontejneru,
- 4) tělesa nemohou být dělena na menší části,
- 5) tělesa mohou být uložena do kontejneru pouze tak, aby byla zachována rovnoběžnost hran těles s hranami kontejneru.

V závislosti na charakteristice aplikace může být povoleno či zakázáno otáčení těles.

### **2.9.2 Kontejnery**

Každý kontejner v množině kontejnerů je popsán rozměry – šířkou, výškou a hloubkou. Při reálném užití algoritmu může být určen maximální počet kontejnerů. V závislosti na použitém algoritmu je možné určit, zda bude otevřen jen jeden, nebo více kontejnerů. Algoritmus volí, do kterého kontejneru bude vkládáno další těleso. Pro otevření dalšího kontejneru je nejprve nutné některý z již otevřených kontejnerů uzavřít.

## **2.10 Algoritmy pro řešení BPP**

Následující kapitoly jsou věnovány algoritmům řešení BPP. Pro jednodušší popis a snazší pochopení jsou všechny podkapitoly věnovány dvojdimenzionálnímu BPP. Pro použití v trojdimenzionálním prostoru je nutné přidat třetí osu, princip algoritmu se ovšem nemění. Algoritmy je možné rozšířit o další rozměr, využívány například k rozhodování, zda může být těleso umístěno v některé ze spodních vrstev kontejneru, nebo pouze v horní vrstvě z důvodu přílišné zátěže na těleso a riziku jeho poškození. Tímto rozšířením dojde k dalšímu navýšení složitosti algoritmu.

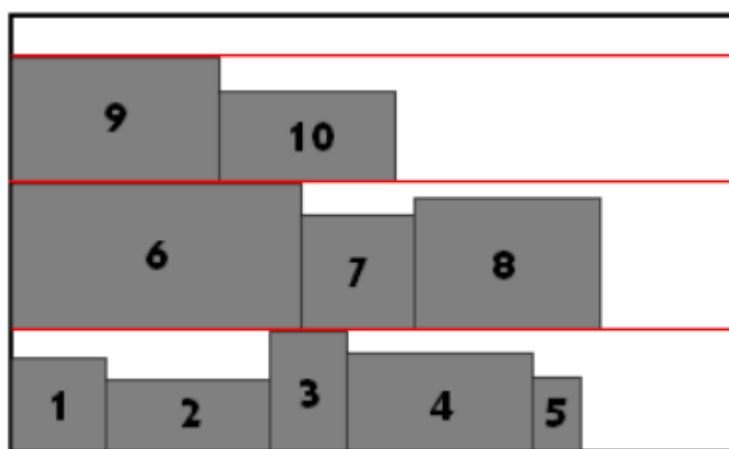
### **2.10.1 Policové algoritmy**

Jde o základní algoritmy, které jsou používány pro ukládání těles do kontejnerů. Je definována obdélníková část o definované výšce a šířce, tato část je nazývána policí. Police jsou v rámci kontejneru uspořádány odspoda nahoru. Tělesa jsou do polic vkládána zleva doprava. Nejvrchnější police je nazývána otevřená police. Výška police je definována dle nejvyššího umístěného tělesa do ní, je tedy snaha umístit tělesa tak, aby byla výška vždy co nejnižší.[20]

Následně jsou hledána tělesa pro vyplnění volných prostor mezi tělesy a další policí. Způsobů vyplňování volných prostor je velké množství.

Níže je vypsán seznam základních variant policových algoritmů:

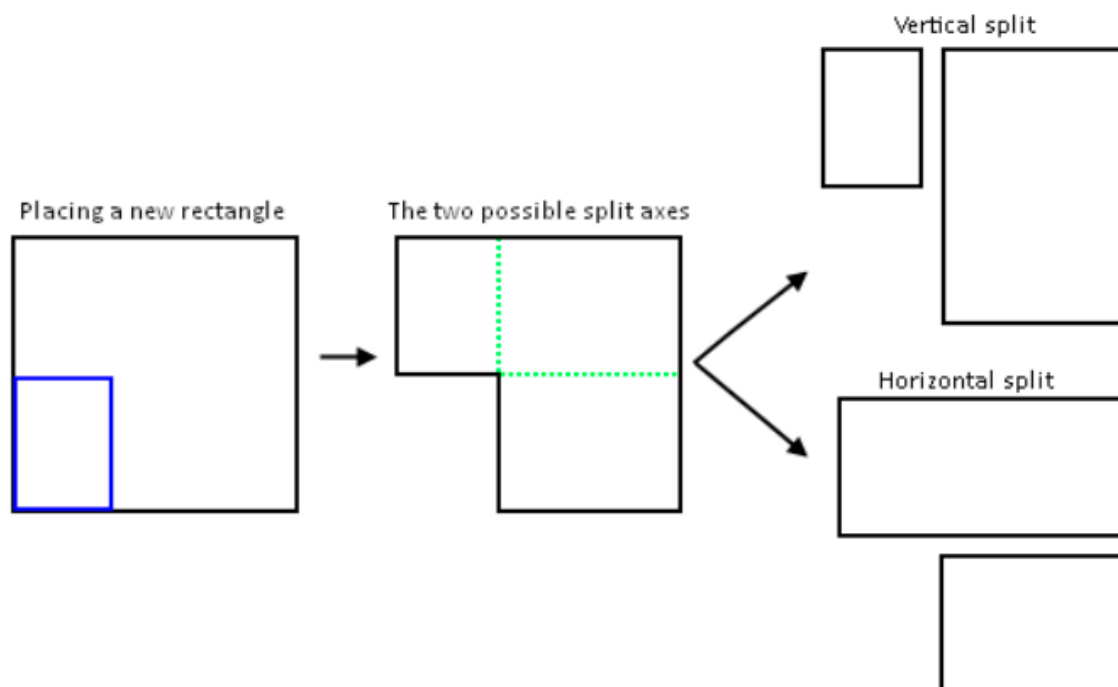
- 1) Shelf Next Fit (SHELF-NF),
- 2) Shelf First Fit (SHELF-FF),
- 3) Shelf Best Width Fit (SHELF-BWF),
- 4) Shelf Best Height Fit (SHELF-BHF),
- 5) Shelf Best Area Fit (SHELF-BAF),
- 6) Shelf Worst Width Fit (SHELF-WWF),
- 7) Shelf Floor-Ceiling.



Obrázek 39 Ukázka výsledku získaného pomocí Policového algoritmu [37]

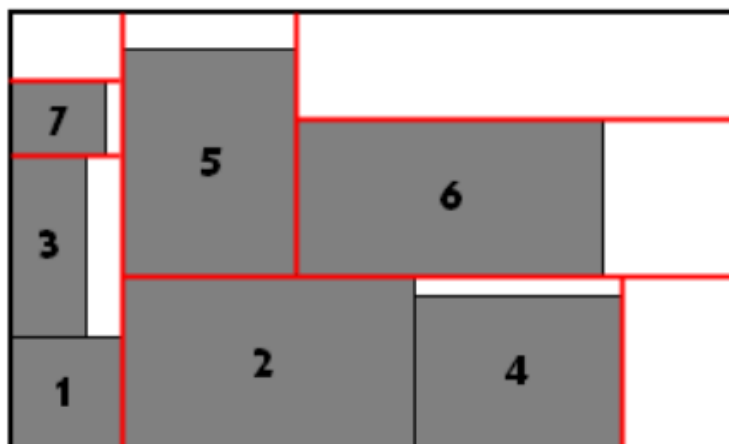
## 2.10.2 Gilotinové algoritmy

Gilotinové algoritmy jsou založeny na umístování tělesa do rohu volného obdélníku v kontejneru, následně zbylé volné místo ve tvaru L je opět rozděleno na dva samostatné obdélníky. Metoda je graficky znázorněna na Obrázek 40.



Obrázek 40 Proces rozdělení volného místa pomocí gilotinového algoritmu. [37] [20]

Algoritmus začíná s prázdným obdélníkem, který symbolizuje celý prostor kontejneru. Při každém umístění tělesa je těleso umístěno do levého dolního rohu prvotního obdélníku. Následně je obdélník rozdělen dle gilotinového algoritmu. Vzniknou dva obdélníky, které nahradí původní obdélník v seznamu volných obdélníků. Tento proces je opakován, než vznikne situace, kdy se další těleso do žádného volného obdélníku nevejde, V té chvíli je kontejner uzavřen a pokračuje se vložem tělesa do dalšího kontejneru stejným postupem.[20]



Obrázek 41 Ukázka uložení těles Gilotinovým algoritmem [37]



Výhodou těchto algoritmů je sledování neobsazeného místa v kontejneru. Oproti policovým algoritmům je volné místo neustále evidováno pro možnost jeho zaplnění.

Algoritmus se pokouší umístit těleso vždy pouze do jednoho volného obdélníkového místa, do kterého nejlépe pasuje. Zároveň ale nikdy nedovolí, aby těleso leželo přes hranu obdélníkového volného místa.

Existuje velké množství jednotlivých variant tohoto algoritmu, v následujícím seznamu jsou některé z nich:

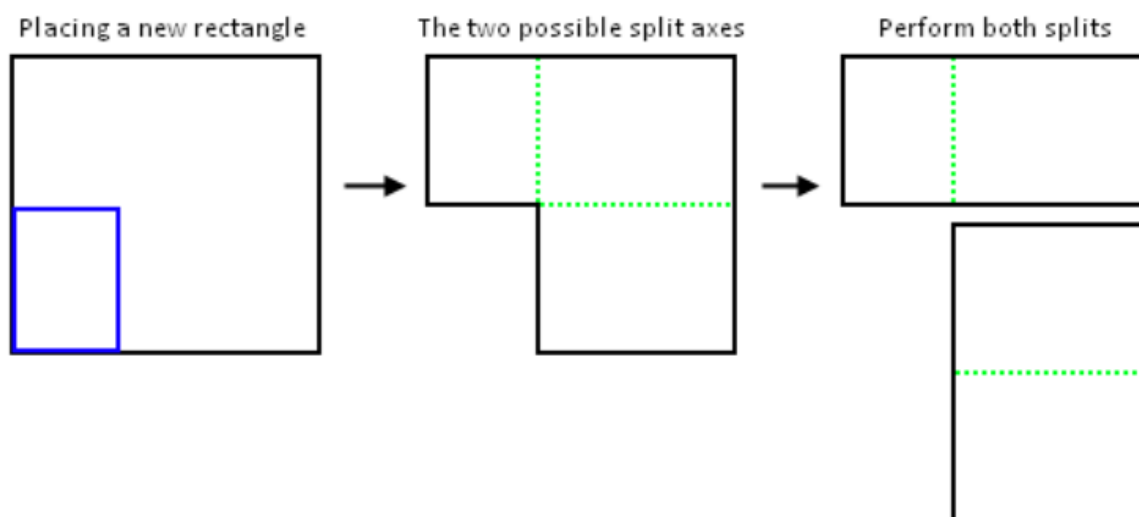
- 1) Shorter/Longer Axis Split Rule (-SAS, -LAS),
- 2) Shorter/Longer Leftover Axis Split Rule (-SLAS, -LLAS)
- 3) Max/Min Area Split Rule (-MAXAS, -MINAS).

### 2.10.3 Algoritmy maximálních obdélníků

Tyto algoritmy vycházejí z principu Gilotinových algoritmů, ale rozšiřují jejich pravidla.

Stejně jako si Gilotinový, i tento algoritmus si eviduje volné místo. Oproti gilotinovému algoritmu, si tento algoritmus nevolí jednu dělicí osu. Algoritmus maximálních obdélníků provádí operaci, odpovídající výběru obou dělicích os naráz. [20]

Při každém uložení tělesa jsou tedy zachovány informace o obou možnostech obdélníkového volného místa. Je tedy zajištěna možnost uložení dalšího tělesa přes hranu volného obdélníkového prostoru do jiného. Tato vlastnost nebyla u gilotinového algoritmu přípustná.



Obrázek 42 Znázornění uložení informace o volných obdélnících

Je tedy evidován co největší prostor volného místa mezi umístěnými tělesy, a je tím využití volného místa velmi optimalizováno. [20]

Seznam některých variant algoritmu:

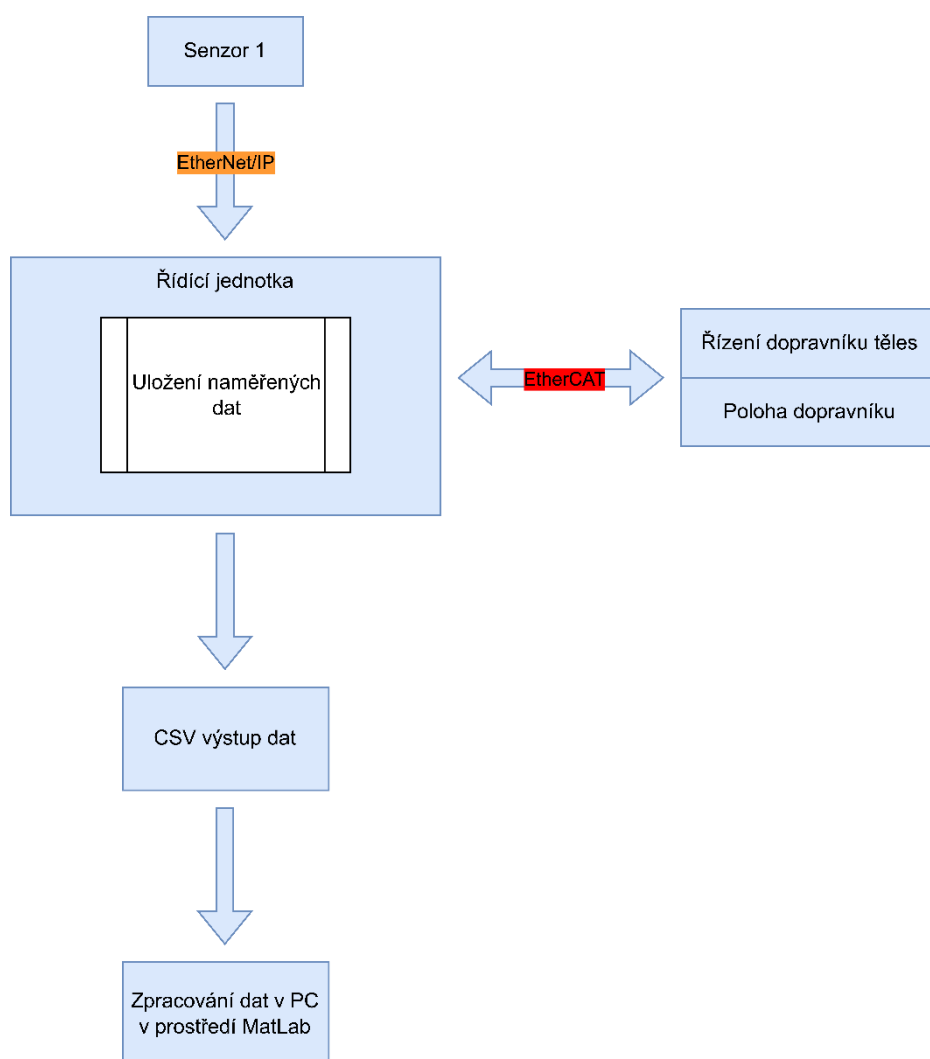
- 1) Maximal Rectangles Bottom Left (MAXRECTS-BL),
- 2) Maximal Rectangles Best Area Fit (MAXRECTS-BAF),

- 3) Maximal Rectangles Best Short Side Fit (MAXRECTS-BSSF),
- 4) Maximal Rectangles Best Long Side Fit (MAXRECTS-BLSF),
- 5) Maximal Rectangles Contact Points (MAXRECTS-CP).

### 3 TESTOVACÍ PROTOTYP NÁVRHU

Pro účely testování a ověření funkce návrhu zařízení byl vytvořen testovací prototyp ve zmenšeném laboratorním měřítku. Prototyp byl zjednodušen vynecháním vstupního čidla pro spouštění odměřování a snímání. Oproti navrhnutému zařízení byl použit pouze jeden snímač, bylo tedy nutné provádět každé měření těles dvěma průjezdy pod snímačem. Pro druhý průjezd bylo nutné přemístit měřicí snímač na druhou stranu dopravníku a průjezd opakovat. Měřená tělesa byla tvořena různě na sebe položenými dřevěnými kvádry ze společenské hry JENGA. Kvádry byly všechny téhož rozměru – 25 mm x 75 mm x 15 mm.

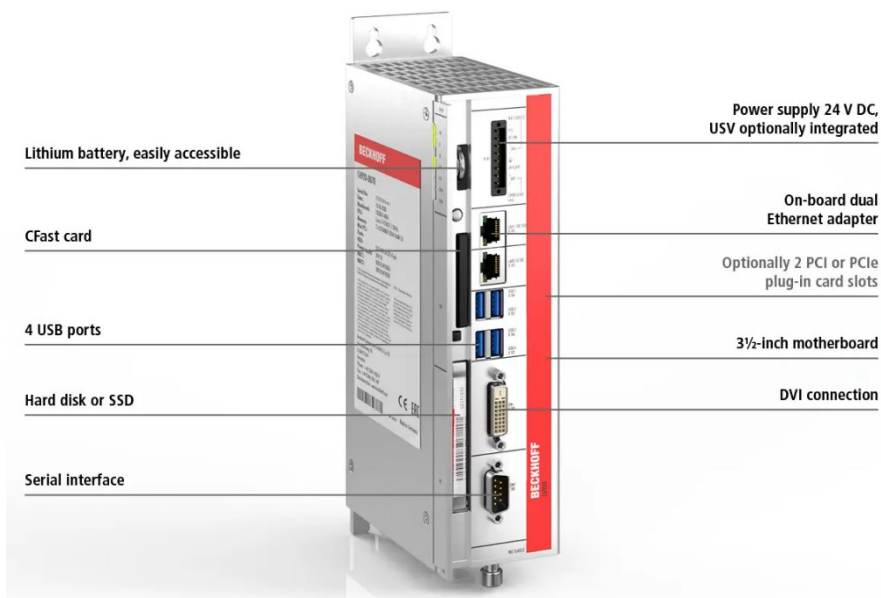
Výstupní data byla dále zpracována v prostředí MatLab, podrobnější informace jsou v kapitole 2.7 a jejích podkapitolách.



Obrázek 43 Architektura prototypového zařízení

### 3.1 Řídící jednotka

Pro řízení prototypu byl zapůjčen IPC C6920. IPC obsahuje dva LAN porty, které jsou v prototypu aktivně využívány.



Obrázek 44 IPC C6920 [38]

První port je využit pro připojení snímače s využitím protokolu Ethernet/IP. Druhý port je nastaven pro komunikaci po sběrnici EtherCAT. Přiřazení portů není díky řídicímu systému TwinCAT nijak fyzicky vázáno, a lze jej určit libovolně. Zároveň je IPC vybaven čtyřmi USB porty, které lze využít pro připojení uživatelských periférií ale i snímačů které využívají komunikaci přes USB sběrnici.

### 3.2 Pohyb těles pod snímačem

Pohyb těles pod snímačem je v prototypu řešen laboratorním dopravním pásem od firmy DOBOT. Tento pás je doplňkové příslušenství k učebním robotům firmy DOBOT a společně se používají při výuce robotiky a automatizace.



Obrázek 45 Dopravní pás použitý v prototypu [39]

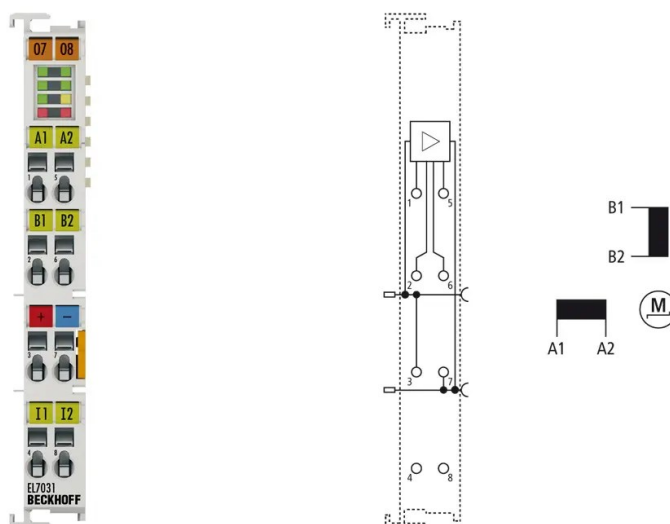
Dopravník má následující parametry:

- váha přepravovaných těles - 500 g,
- efektivní přepravovaná vzdálenost - 600 mm,
- maximální rychlost - 120 mm/s,
- maximální zrychlení - 1100 mm/s<sup>2</sup>,
- délka - 700 mm,
- šířka - 215 mm,
- výška - 60 mm.

Dopravník je poháněn krokovým motorkem bez zpětné vazby. Vzhledem k absenci zpětnovazební informace o poloze motoru nebo poloze pásu, bylo nutné zavést v řídicím SW konstantu upravující pojezdovou vzdálenost. Tím byl zajištěn posuv měřených těles o správnou vzdálenost a měření nebylo zkresleno.

### 3.2.1 Řízení pojezdu dopravníkové pásu prototypu

Motor je buzen řídicí kartou EL7031. Tato karta je určena pro 1kanálové přímé řízení krokových motorů do příkonu 1.5 A. Je možné připojit unipolární i bipolární motory. Karta obsahuje 2 digitální vstupy které je možné využít pro připojení čidel. [21] Je možné přes ně připojit například čidla limitních pozic dráhy, nebo startovní odměřovací čidlo. V prototypu je spuštění měření prováděno ručně, z tohoto důvodu jsou tyto vstupy nevyužity.



Obrázek 46 EL7031 [21]

Karta umožňuje nastavení parametrů motoru pro jeho přesné řízení. Především tyto parametry:

- odpor vinutí,
- maximální proud,
- nominální napětí,
- počet kroků na otáčku.

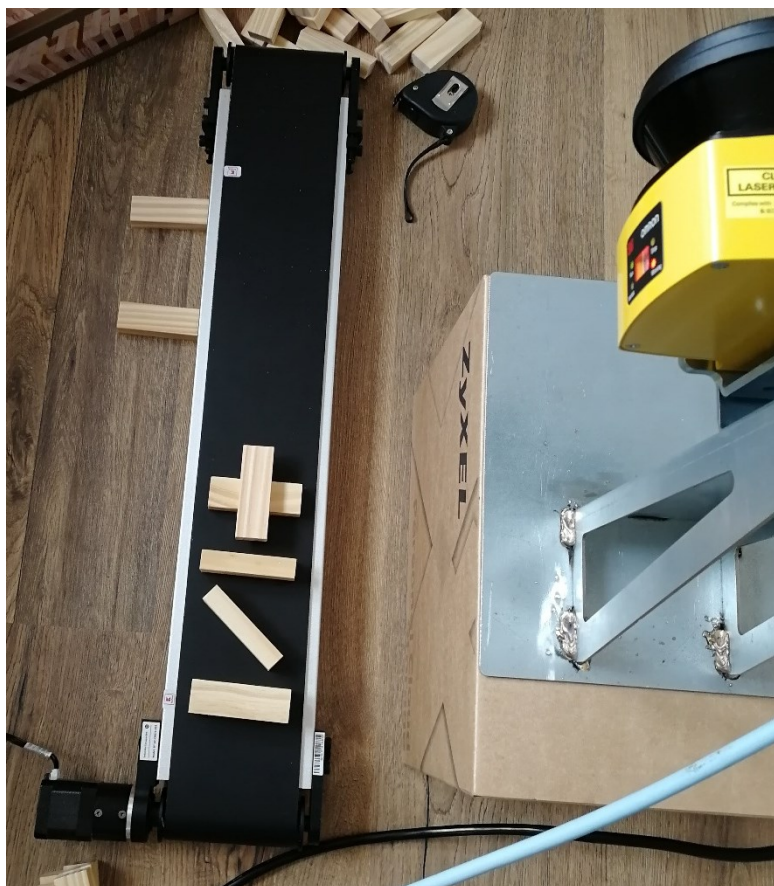
Karta je připojena ke komunikační sběrnici EtherCAT přes EtherCAT coupler EK1101. Tím je zajištěná rychlá výměna dat mezi IPC a řídicí kartou.

### 3.3 Snímač těles

V prototypovém zařízení je pro snímání měřených těles použit snímač OS32C-SP1-DM-4M. Jde o bezpečnostní skener, který umožňuje odesílání naměřených dat. Skener je připojen k IPC sběrnici Ethernet/IP. V závislosti na vyměňovaných datech mezi IPC a skenerem je možné volit jaká data jsou přijímána a jejich formát, např.:

- úhel přijímaných dat,
- naměřená vzdálenost,
- aktivní bezpečnostní zóna,
- reflektivita,
- naměřená vzdálenost a reflektivita,
- formát změřené vzdálenosti 0–50000 milimetrů,
- formát změřené vzdálenosti 0–32756 milimetrů.

V prototypu bylo použito pouze měření vzdálenosti, a to ve formátu 0-50000 milimetrů. Pro ověření funkce je tato volba dostatečná.



Obrázek 47 Umístění skeneru nad dopravníkem

### 3.4 Průběh měření

Měření je spouštěno ručně, aktivací proměnné v řídicím SW. Vzhledem k možnostem dopravníku bylo měření prováděno se zastavením. Po spuštění měření dopravník po 1 milimetrových přejezdech přepraví měřená tělesa pod měřicím snímačem. Vždy po dokončení pojezdu dojde načtení naměřených dat ze skeneru a uložení do paměti IPC. Následně dojde ke spuštění pojezdu o další vzdálenost a děj se opakuje, dokud nedojde k přejezdu celé vzdálenosti dráhy.

Jelikož bylo možno provádět prototypové měření pouze s jedním snímačem, bylo nutné ho vždy po prvním měření přemístit na pozici druhého snímače a měření opakovat. Opakované měření bylo provedeno při přejezdu dopravníku zpět na výchozí pozici. Naměřená data ze snímače 2 byla z tohoto důvodu nasnímána v jiném natočení a byly nutné další procedury s daty. Řešení této situace je popsáno v podkapitole 2.7.



Obrázek 48 Tělesa připravená na dopravníku před měřením



Prototypové zařízení provádělo snímání po celou délku dopravníkového pásu. Toto řešení neseperuje více naměřených těles od sebe. Pro účely otestování prototypu byla tato data rozdělena opěr pomocí prostředí MatLab, s ručně zadanými parametry pozic ořezu.

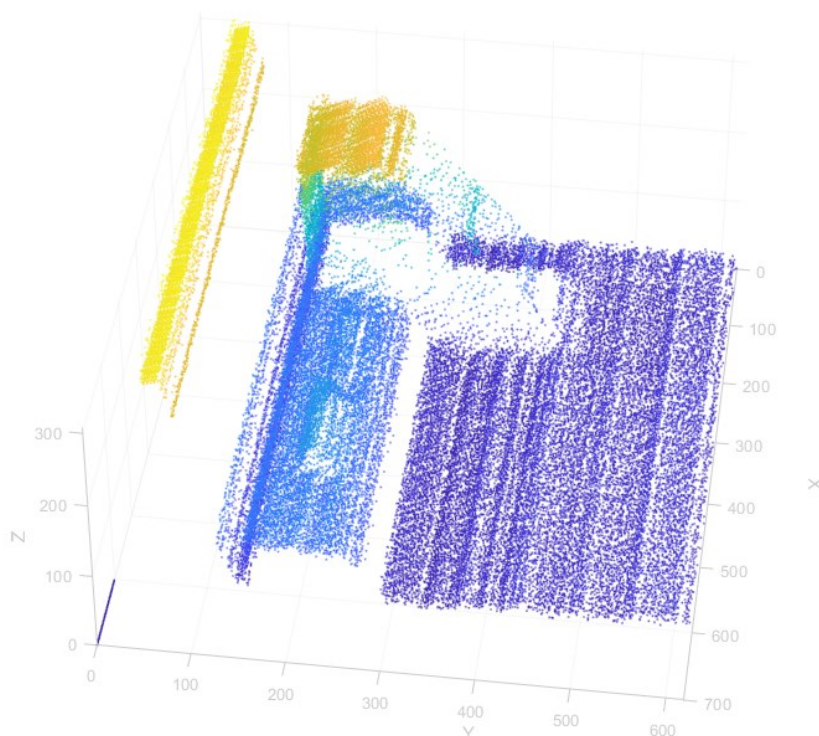
### 3.5 Zpracování výstupních dat v testovacím prototypu

Po dokončení měření jsou data seřazena a zapsána do souboru v CSV formátu. V prototypovém zařízení je tato metoda dostačující. V reálném zařízení může být naměřených velké množství dat, může tedy být vhodnější využít jiný formát dat a jejich uložení.

Následné zpracování dat bylo provedeno v prostředí MatLab

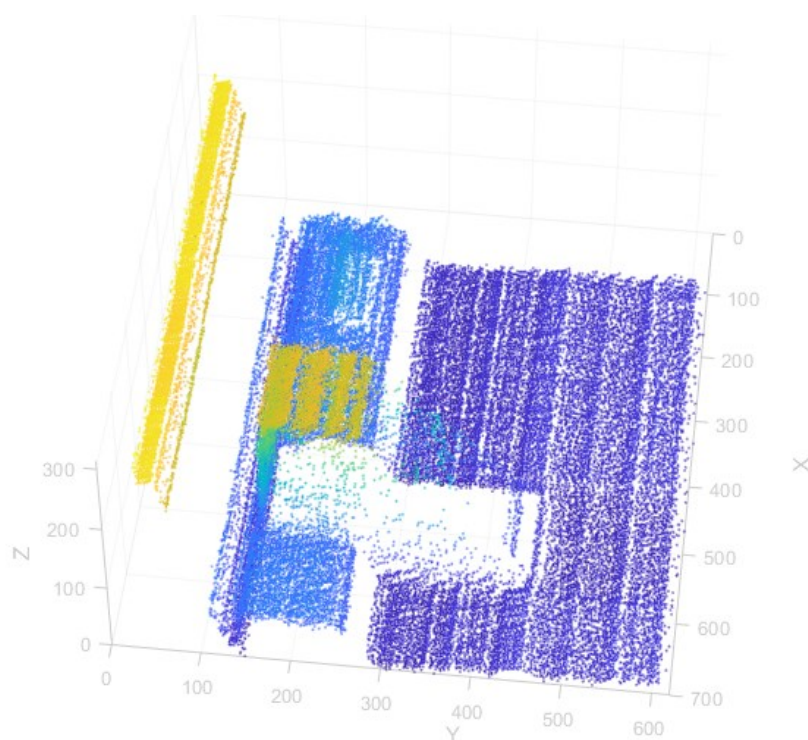
#### 3.5.1 Sloučení dat snímačů v testovacím prototypu

Pro účely prototypu byl vytvořen program, který umožňuje translaci, rotaci a převrácení pořadí dat. Na Obrázek 49 a Obrázek 50 lze vidět data z jednotlivých snímačů již ve formátu PLY. Prostředí MatLab umí data v tomto formátu zobrazit přehledněji než na Obrázek 35. V případě prototypového zařízení byla data ze snímače 2 naskenována v opačném pořadí.



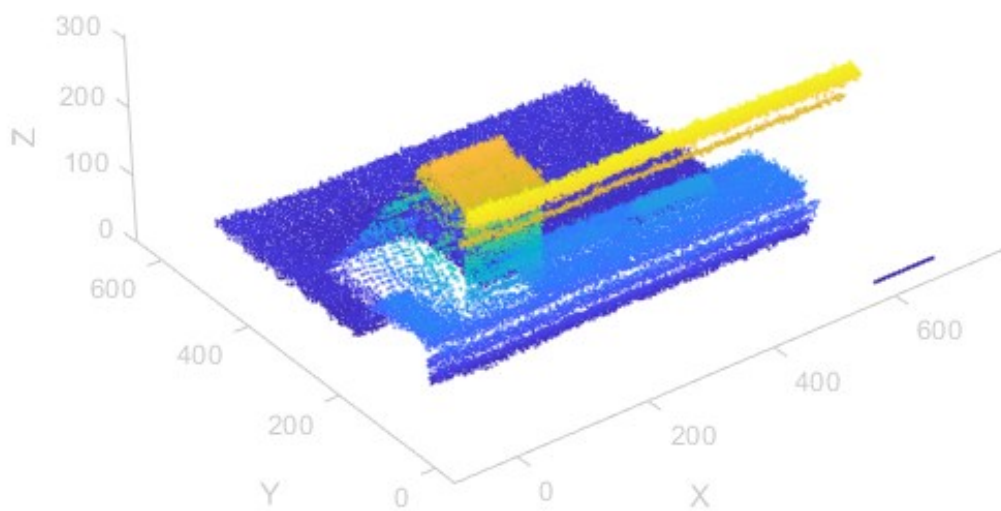
Obrázek 49 Mračno bodů z levého snímače

Na Obrázek 51 a Obrázek 52 lze vidět naměřená data z obou snímačů bez natočení. Takto vstupují data do programu pro jejich sloučení. V testovacím prototypovém zařízení bylo využito situace, kdy je pásový dopravník velmi malé velikosti. Jeho vnější kontura však byla oproti podlaze výrazně vyvýšena a bylo možno jej využít jakožto výše zmíněné kalibrační těleso. Šířka dopravníku byla využita pro určení vzdálenosti snímačů od sebe v ose Y. Vzhledem k nutnosti přemísťování snímače nebylo možné využít podobného principu pro osu X. Zarovnání v ose X bylo tedy provedeno odměrem vzdáleností hranových bodů těles a následným posuvem o tuto vzdálenost. Mimo tento případ lze ovšem využít kalibrační těleso ke kalibraci v obou osách.



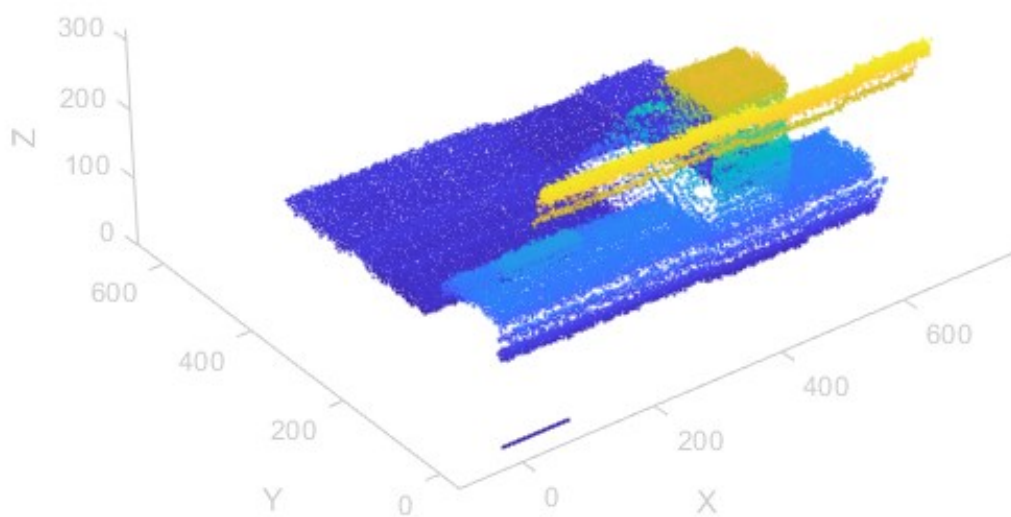
**Obrázek 50** Mračno bodů z pravého snímače

Vstupní data 1



Obrázek 51 Zobrazení dat ze snímače 1 před zpracováním

Vstupní data 2

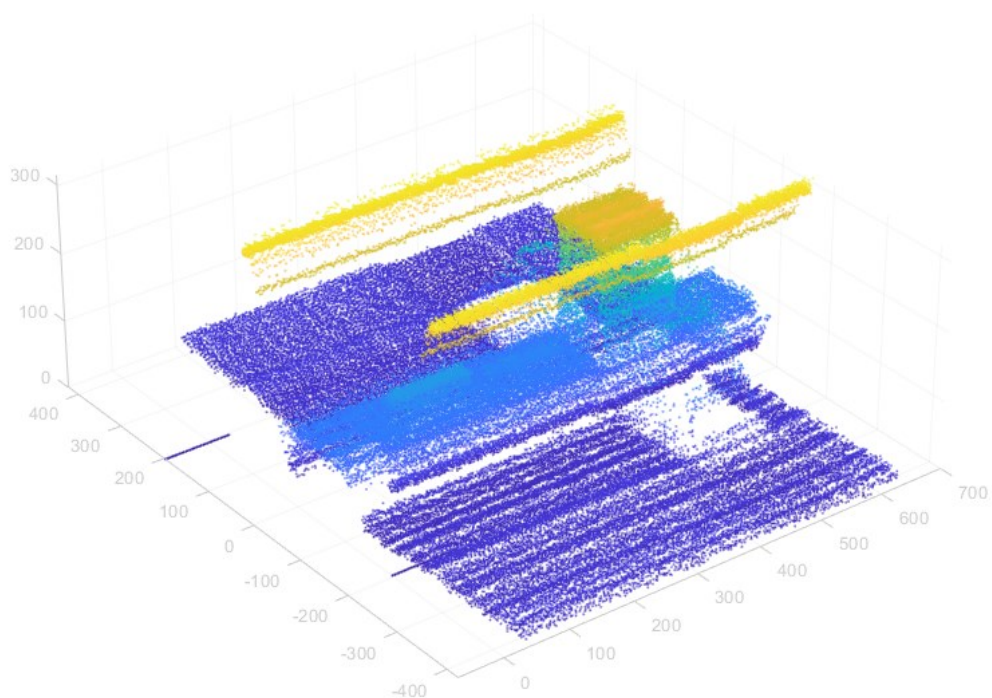


Obrázek 52 Zobrazení dat ze snímače 2 před zpracováním

### 3.5.2 Ořez a rozdělení měřené scény v testovacím prototypu

Na Obrázek 53 lze vidět data po sloučení. Nyní již lze přehledně rozpoznat scénu a její jednotlivé komponenty – pásový dopravník a měřená tělesa. Zároveň lze také vidět další obrazové body, které již k měřené scéně nenáleží, například podlaha.

Prototypové zařízení provádělo snímání po celou délku dopravníkového pásu. Toto řešení neseparuje více naměřených těles od sebe. Pro účely otestování prototypu byla tato data rozdělena opět pomocí prostředí MatLab, s ručně zadanými parametry pozic ořezu.

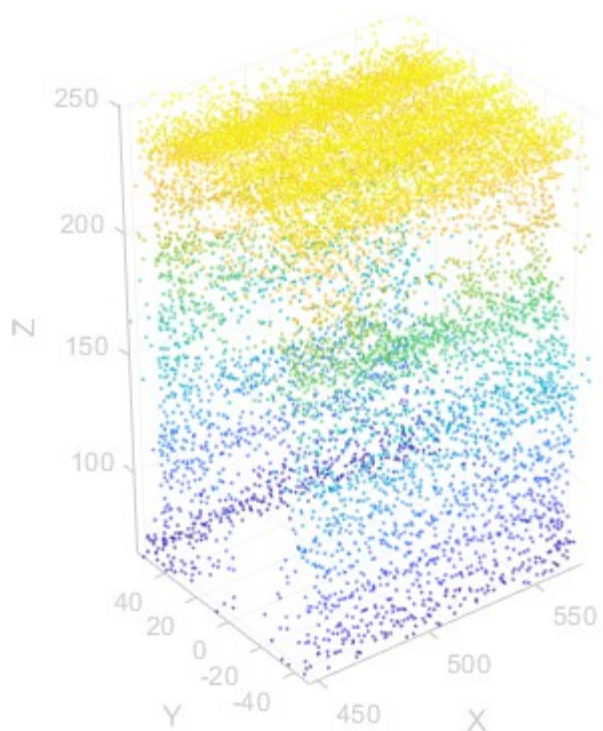


**Obrázek 53** Zobrazení sloučených dat ze snímače 1 a 2

### 3.5.3 Vymezení těles v testovacím prototypu

Pro tuto operaci byl vytvořen program v prostředí MatLab, který provádí filtraci šumu a detekuje finální konturu tělesa. S využitím metody popsané v KAPITOLE 2.8.2.

Na Obrázek 54 lze vidět výsledné mračno bodů, znázorňující naskenovaný model tělesa.



Obrázek 54 Výsledné mračno bodů znázorňující model 3D tělesa

## Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout zařízení 3D skeneru. Kapitola 1 se věnuje představení dostupných konvenčních měřících metod. Zároveň jsou v této kapitole vysvětleny důvody nemožnosti jejich využití v koncepci 3D skeneru. Návrhu 3D skeneru je věnována 2. kapitola. Je zde popis jednotlivých částí a jejich funkce. Zároveň se tato kapitola věnuje i popisu metodiky zpracování naměřených dat. Závěr kapitoly je věnován popisu algoritmu Bin packing problému, užívaného pro rozmístování těles do uzavřeného prostoru. V kapitole 3 je popsán testovací prototyp zařízení 3D skeneru.

Mým záměrem bylo navrhnout zařízení, které lze zakomponovat do různých průmyslových procesů. Důležitým aspektem pro mě byla možnost zakomponování 3D skeneru jako nové samostatné zařízení, zároveň ale i možnost zakomponování 3D skeneru do již funkčního zařízení. Zároveň vysoká variabilita dle požadavků na konkrétní aplikaci, například možnost volby jiného typu snímače. Pro řízení 3D skeneru jsem zvolil PLC od firmy Beckhoff. Snímání těles je zajištěno průmyslovým LIDAR skenerem. Zvolený systém umožňuje řídit vlastní dopravníkový systém, zároveň je možné využít i dopravníkový systém řízený jiným zařízením.

Návrh předpokládá užití LIDAR skeneru, díky zvolené řídicí jednotce a celkové architektuře je ovšem možné použití i snímačů typu hloubkových kamer. Tato situace nebyla testována, ale vzhledem k jistým podobnostem a společným vlastnostem lze předpokládat velmi podobný způsob návrhu a dalších částí řešení,

V rámci testovacího prototypu byly vytvořeny podprogramy v prostředí MatLab, které byly využity pro zpracování naměřených dat. Podprogramy měly za cíl ověřit jednotlivé principy zmíněné v kapitole věnující se návrhu 3D skeneru. Aplikovány byly v těchto situacích:

- 1) Transformace souřadného systému naměřených dat,
- 2) Sloučení dat ze snímačů,
- 3) Vymezení těles.

Zařízení předpokládá umístění měřených těles na střed dopravníku rovnoběžně se směrem posuvu. Automatické zarovnání souřadného systému a SW řešení BPP algoritmu nebylo pro svou složitost realizováno.

Testovací prototyp prokázal že koncipovaný návrh je možné využít, jeho funkce byla ověřena. Nasnímaná data byla zatížena šumem, tato skutečnost může způsobena především použitím snímače určeným pro běžné užití v jiné aplikaci a s nižší rozlišovací schopností.

## LITERATURA

- [1] STEKLÝ, Luboš. *Měřicí systémy ve VSN*. Diplomová práce, vedoucí Ing. Petr Keller, Ph.D. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014.
- [2] ŽELECHOVSKÝ, Josef. *ZAŘÍZENÍ PRO ZÍSKÁNÍ ROVINNÉ HLOUBKOVÉ MAPY S POMOCÍ ULTRAZVUKOVÉHO SENZORU*. Bakalářská práce. Pardubice: UNIVERZITA PARDUBICE, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2020.
- [3] HW SERVER S.R.O. *Spojité měření výška hladiny - principy měření a provedení snímačů*. Online. HW SERVER S.R.O. Automatizace.HW.cz. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/spojite-mereni-vyska-hladiny-principy-mereni-a-provedeni-snimacu.html>. [cit. 2024-05-09].
- [4] PAVELKA, Karel. *Laserové skenování: Nová technologie sběru prostorových dat*. Online. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2017. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2006-14.pdf>. [cit. 2023-07-20].
- [5] EVANCZUK, Stephen. *How to Quickly Launch 3D Optical Time-of-Flight Sensing Designs*. Online. DigiKey. Minnesota: Digi-Key Corporation, 2022. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/how-to-quickly-launch-3d-optical-time-of-flight-sensing-designs>. [cit. 2023-07-20].
- [6] KUNT, Lukáš. *Detekce objektů z hloubkové kamery*. Bakalářská práce, vedoucí RNDr. Petr Štěpán, Ph.D. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020.
- [7] BERAN, Ladislav. *Odhad hloubkové mapy za využití neuronových sítí*. Disertační práce, vedoucí doc. Ing. Petr Doležel, Ph.D., Ing. Luboš Rejček, Ph.D. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2022.
- [8] JANEČEK, Martin. *SOUSTAVA KAMER JAKO STEREOSKOPICKÝ SENZOR PRO MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI V REÁLNÉM ČASE*. Diplomová práce, vedoucí Ing. MARTIN HASMANDA. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2014.
- [9] BASLER AG. *Basler Stereo Camera*. Online. BASLER AG. Basler: Machine Vision Expert. C2024. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/cameras/basler-stereo-camera/>. [cit. 2024-05-08].
- [10] HEXAGON AB. *Skenery se strukturovaným světlem*. Online. HEXAGON AB. Hexagon - Empowering an autonomous, sustainable future. C2024. Dostupné z: <https://hexagon.com/cs/products/product-groups/measurement-inspection-hardware/structured-light-scanners>. [cit. 2024-05-08].

- [11] ČERMÁK, Jan. *METODY 3D SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ*. Bakalářská práce, vedoucí ING. TOMÁŠ MARADA, PH.D. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2015.
- [12] GU, Shanshan; XI, Guangrong; GE, Lingyu; YANG, Zhong; WANG, Yizhi et al. Compressed Sensing for THz FMCW Radar 3D Imaging. Online. *Complexity*. 2021, roč. 2021, č. Volume 2021, article 5576782, s. 1-10. ISSN 1099-0526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2021/5576782>. [cit. 2024-05-09].
- [13] B&W SOLUTIONS GMBH. *3D LASER SCANNER Quantum Frame*. Online. B&W SOLUTIONS GMBH. B&w solutions. Dostupné z: <https://www.b-w-solutions.com/en/products/3d-laser-scanner-quantum/quantum-frame.html>. [cit. 2024-05-08].
- [14] HOLÍK, Jiří. Průmyslové počítače plní funkce PLC i NC. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2002, roč. 8, č. 12, s. 14. ISSN 1210-9592.
- [15] ZEZULKA, František a HYNČICA, Ondřej. Průmyslový Ethernet IX: EtherNet/IP, EtherCAT. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2008, roč. 14, č. 10, s. 60-64. ISSN 1210-9592.
- [16] EITEL, Lisa. *EtherNet/IP versus PROFINET*. Online. DigiKey. Minnesota: DigiKey, 2020. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/ethernet-ip-versus-profinet>. [cit. 2023-07-21].
- [17] VOJÁČEK, Antonín. *Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu*. Online. Automatizace.HW.cz: rady a poslední novinky z oboru. Praha: HW server, 2017. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-rizeni-pohonu-a-pohybu.html>. [cit. 2023-07-25].
- [18] *Polygon File Format (PLY) Family*. Online. Library of Congress. Washington: The Library of Congress, 2019. Dostupné z: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000501.shtml>. [cit. 2023-07-21].
- [19] IANCU, Cătălin. *Analele Universității "Constantin Brâncuși" din Târgu Jiu: Seria Inginerie: ABOUT 3D PRINTING FILE FORMATS*. Online. 2018, roč. 2018, č. 2. Romania: Editura Academica Brâncuși, 2018. ISSN 2537-530X. Dostupné z: [http://www.utgjiu.ro/rev\\_ing/](http://www.utgjiu.ro/rev_ing/). [cit. 2023-07-21].
- [20] KYSELA, Marek. *Plošná optimalizace - Bin Packing Problem*. Bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2014.



- [21] BECKHOFF AUTOMATION. *EL7031 | EtherCAT Terminal, 1-channel motion interface, stepper motor, 24 V DC, 1.5 A*. Online. BECKHOFF AUTOMATION. Beckhoff. C2024. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/i-o/ethercat-terminals/el-elm7xxx-compact-drive-technology/el7031.html?> [cit. 2024-02-07].
- [22] *Měřicí sonda*. Online. Adeon CZ. Tečovice: ADEON CZ, c2002–2022. Dostupné z: <https://www.adeon.cz/katalog/inventorcam/sonda/>. [cit. 2023-07-19].
- [23] WONKEE DONKEE TOOLS. *How to measure accurately with a rule*. Online. WONKEE DONKEE TOOLS. Wonkee Donkee Tools. C2021. Dostupné z: <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/rules/how-to-measure-accurately-with-a-rule>. [cit. 2024-02-18].
- [24] *System ULCT*. Online. Fiessler Elektronik. Aichwald: Fiessler Elektronik. Dostupné z: <https://www.fiessler.de/en/start/product-portfolio/safety-products/light-barriers/safety-light-curtains/system-ulct>. [cit. 2023-07-19].
- [25] *Měření hladiny, průtoku, otáček: Senzorické systémy*. Online. Contra s.r.o. Brno: Snasel, c2010. Dostupné z: <https://www.contra-brno.cz/produkt/senzoricke-systemy-fiessler>. [cit. 2023-07-19].
- [26] *OS32C: Bezpečnostní laserový skener*. Online. OMRON: Průmyslová automatizace. Praha: OMRON Corporation, c2023. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/os32c>. [cit. 2023-07-20].
- [27] *Depth camera D455*. Online. IntelRealSense. Santa Clara: Intel Corporation. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/>. [cit. 2023-07-20].
- [28] *Beginner's guide to depth*. Online. IntelRealSense. Santa Clara: Intel Corporation, July 15, 2019. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/beginners-guide-to-depth/>. [cit. 2023-07-20].
- [29] SKOLNIK, Merrill I. *Radar*. Online. ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, INC. Encyklopedia Britannica. C2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/radar>. [cit. 2024-05-09].
- [30] *CXxxxx-B110: EtherCAT Slave Optional Interface*. Online. Beckhoff Information Syst. Hülshorstweg: Beckhoff Automation. Dostupné z: [https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/b110\\_ethercat\\_optioninterface/1969492491.html&id=](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/b110_ethercat_optioninterface/1969492491.html&id=). [cit. 2023-07-30].

- [31] *Everything you need to know about EtherNet/IP and IIoT*. Online. In: Netilion Blog. Reinach: Endress+Hauser Process Solutions. Dostupné z: <https://netilion.endress.com/blog/ethernet-ip/>. [cit. 2023-07-22].
- [32] *EL5101 | EtherCAT Terminal: 1-channel encoder interface, incremental, 5 V DC (DIFF RS422, TTL), 1 MHz*. Online. Beckhoff: New Automation Technology. Hülshorstweg: Beckhoff Automation, c2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/i-o/ethercat-terminals/el5xxx-position-measurement/el5101.html>. [cit. 2023-07-28].
- [33] *Examples of Encoder Functions*. Online. Encoder Products Company. Idaho: Encoder Products Company, c2022. Dostupné z: <https://www.encoder.com/wp2011-basics-how-an-encoder-works>. [cit. 2023-08-02].
- [34] *STL*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/STL>. [cit. 2023-07-21].
- [35] *The OBJ File Format – Simply Explained*. Online. All3DP. Munich: All3DP, c2023. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/obj-file-format-3d-printing-cad/>. [cit. 2023-07-21].
- [36] *Additive manufacturing file format*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Additive\\_manufacturing\\_file\\_format](https://en.wikipedia.org/wiki/Additive_manufacturing_file_format). [cit. 2023-07-21].
- [37] JUKKA, Jylänki. *A Thousand Ways to Pack the Bin: A Practical Approach to Two-Dimensional Rectangle Bin Packing*. 2010.
- [38] BECKHOFF AUTOMATION. *C6920 | Control cabinet Industrial PC*. Online. BECKHOFF AUTOMATION. Beckhoff. C2024. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/ipc/pcs/c69xx-compact-industrial-pcs/c6920.html>. [cit. 2024-01-27].
- [39] DOBOT.US. *Conveyor Belt*. Online. DOBOT.US. Dobot Magician USA. C2023. Dostupné z: <https://www.dobot.us/product/conveyor-belt/>. [cit. 2024-02-07].