

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**POUŽITÍ TOF SENZORU PRO DETEKCI A LOKALIZACI
PŘEDMĚTŮ VE VÝROBĚ**

Václav Sháněl

Bakalářská práce
2021

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Václav Sháněl**
Osobní číslo: **I18089**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Téma práce: **Použití ToF senzoru pro detekci a lokalizaci předmětů ve výrobě**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je zprovoznění metody pro detekci a lokalizaci předmětů v definované oblasti pomocí ToF senzoru. Student v rámci práce vytvoří software do ToF senzoru pro snímání a vyhodnocení dat z ToF senzoru včetně rozhraní do nadřazeného řídicího systému. Zařízení bude minimálně umožňovat detekci a lokalizaci dvou typů objektů ve statickém sledovaném prostoru.

Teoretická část: Stručná rešerše existujících nástrojů pro detekci a lokalizaci objektů v průmyslové výrobě. Popis funkce a využití ToF senzorů. Popis softwarových nástrojů použitých pro řešení praktické části.

Praktická část: Návrh a implementace metody pro detekci a lokalizaci objektů pomocí ToF senzoru. Sběr a analýza dat. Návrh a implementace softwarového nástroje ovládání senzoru. Komplexní testování aplikace. Dokumentace vyvinutých nástrojů včetně testovacího scénáře demonstrujícího použití.

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

Seznam doporučené literatury:

HANSARD, M. a kol. *Time-of-Flight Cameras*. Springer-Verlag, 2012. ISBN 978-1447146575.
BENAMOUN, M. a kol. *Object Recognition*. Springer-Verlag, 2012. ISBN 978-1447137245.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Doležel, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

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

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

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. ledna 2021

Prohlášení

Prohlašuji:

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

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

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

V Pardubicích dne **5.5.2021**

Václav Sháněl

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat za poskytnuté informace a prostředky vedoucímu práce doc. Ing. Petru Doleželovi, Ph.D. Dále chci poděkovat firmě SPEL a.s. za poskytnuté moderní prostředky pro průmyslovou automatizaci. Chci také poděkovat za podporu mé rodině, bez které bych se až sem nedostal.

V Pardubicích dne [5.5.2021](#)

Václav Sháněl

ANOTACE

Bakalářská práce je zaměřena na metody pro detekci a lokalizaci předmětů v definované oblasti pomocí optického senzoru. V teoretické části jsou popsány principy detekce objektů společně s možnostmi detekce a lokalizace objektů v průmyslové výrobě společně s vhodnými softwarovými nástroji. Jako nástroj pro detekci a lokalizaci objektů je zde popsán ToF senzor. Praktická část je věnována návrhu softwarového řešení pro detekci a lokalizaci objektů pomocí 3D ToF senzoru. Problematika je dále zaměřena na sběr a analýzu dat společně s testováním aplikace. Získané výsledky jsou zdokumentovány a demonstrovány.

KLÍČOVÁ SLOVA

ToF senzor, optický senzor, poloha, vzdálenost, detekce, lokalizace

TITLE

TOF SENSOR FOR DETECTION AND POSITIONING OF OBJECTS IN INDUSTRY

ANNOTATION

Bachelor thesis is focused on methods for detecting and positioning of objects with optical sensor in defined area. The theoretical part of the work deals with the principles, methods and software tools for object detection and positioning in industrial production. A special attention is paid on a ToF sensor. In a second part of the work, a process of software design for detection and positioning of objects with a ToF sensor is comprehensively addressed. Problematics is focused especially on collecting and analyzing data together with testing application. Final results are documented and demonstrated.

KEYWORDS

ToF sensor, optical sensor, position, distance, detection, localization

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ.....	13
SEZNAM ILUSTRACÍ	14
SEZNAM TABULEK.....	15
ÚVOD	14
1 SENZORY VZDÁLENOSTI A JEJICH ROZDĚLENÍ.....	15
1.1 Ultrasonické vysílače a přijímače	15
1.2 Piezoelektrický jev	16
1.3 Sonary	18
1.4 Dopplerův jev.....	19
1.5 Ultrasonické senzory pro měření průtoku	20
1.6 Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu.....	20
2 SENZORY OPTICKÉ	24
2.1 Úvod do problematiky optických senzorů	24
2.2 Optický odraz světla.....	24
3 Time-of-Flight.....	25
3.1 Technologie ToF	25
3.2 Princip měření ToF	25
3.2.1 Série časových pulzů.....	26
3.3 Amplitudová modulace signálu	26
3.3.1 Vysílání pulzů se střídou 50 %	26
3.3.2 Konstrukční náročnost	27
3.3.3 Určování fázového posuvu pomocí sinusoidy	27
3.3.4 Metoda měření diferenciálního napětí na nabitých kondenzátorech	28
3.4 Point Cloud	29
4 PRÁCE S TOF SENZOREM	31
4.1 Popis ToF senzoru Swift-E	31
4.2 RSLinx Classic Lite	33
4.2.1 Jednotlivé kroky pro přidání Swift-E do RSLinx Classic Lite	34

4.3	Použití Web Connect k nastavení Swift-E.....	35
4.4	Studio 5000	38
4.5	Blokové schéma komunikace.....	39
4.6	Vytvoření nového projektu a přidání Swift-E do Studia 5000.....	39
4.7	Monitorování dat z Swift-E ve Studiu 5000	44
4.8	Natočení snímaných objektů z referenčního umístění	48
4.9	Snímání na větší vzdálenost.....	49
4.10	Test snímání Swift-E v zadýmeném prostředí výrobníkem mlhy.....	51
4.11	Jednoduchý program pro detekci předmětu v Studiu 5000.....	52
5	ZÁVĚR	54
	POUŽITÁ LITERATURA	56
	PŘÍLOHY	59

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

2D	dvojrozměrný
3D	trojrozměrný
4D	čtyřrozměrný
CAT	kategorie
CIP	společný průmyslový protokol
GHz	gigahertz
IP	internetový protokol
I/O	vstupní/výstupní
kHz	kilohertz
LAN	místní síť
LiDAR	detekce a rozsah světla
MHz	megahertz
PC	osobní počítač
PET	polyethylentereftalát
PLC	programovatelný logický automat
PWM	pulzní šířková modulace
ToF	čas letu
UTP	nestíněná kroucená dvojlinka

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

v	rychlost, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
t	čas, s
L	vzdálenost, m
c	rychlost zvukových vln, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
f	frekvence, Hz
Q	objemový průtok, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
φ	fázový posuv, $^\circ$
x	strana pixelu na ose x, mm
y	strana pixelu na ose y, mm
A1, A2, A3, A4	vzorkované body na sinusoidě, rad

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Příčné vlnění v pevných látkách (SPŠ el-it Dobruška 2013).....	15
Obr. 1.2 – Podélné vlnění v plynných látkách (SPŠ el-it Dobruška 2013).....	15
Obr. 1.3 – Deformace krystalové mřížky (ČVUT, nedatováno)	16
Obr. 1.4 – Měření vzdálenosti ultrasonickým senzorem (KEYENCE, nedatováno)	17
Obr. 1.5 – Ultrasonický senzor HC–SR04.....	17
Obr. 1.6 – Princip a použití sonaru (iNEWS, 2021)	18
Obr. 1.7 – Dopplerův jev (Armáda České republiky, nedatováno)	20
Obr. 1.8 – Průtokoměr s vyhodnocením doby průchodu signálu (Kadlec, 2013)	23
Obr. 2.1 – Odraz optického paprsku (Králová, nedatováno)	24
Obr. 3.1 – Blokové schéma ToF upraveno podle (Hughes, 2019)	25
Obr. 3.2 – Měření vzdálenosti pomocí ToF metoda 1 (Hughes, 2019)	26
Obr. 3.3 – Měření vzdálenosti pomocí ToF metoda 2 (Hughes, 2019)	26
Obr. 3.4 – Měření vzdálenosti pomocí ToF metoda 3 (Hughes, 2019)	27
Obr. 3.5 – Fázový posuv signálů (Hughes, 2019)	27
Obr. 3.6 – Určení fázového posuvu z nabitých kondenzátorů (Hughes, 2019).....	29
Obr. 4.1 – Swift-E 3D senzor (Novus Light, 2018).....	31
Obr. 4.2 – Zorné pole Swift-E (Novus Light, 2018).....	32
Obr. 4.3 – Délka stran zorného pole.	33
Obr. 4.4 – RSLinx Classic Lite úvodní konfigurace.....	34
Obr. 4.5 – Swift-E a možné nastavení portu.....	35
Obr. 4.6 – Prostor připraven ke snímání senzorem Swift-E.	36
Obr. 4.7 – Vzhled prostředí Web Connect.....	36
Obr. 4.8 – Vytvoření nové šablony	37
Obr. 4.9 – Uložení projektu.	38
Obr. 4.10 – Možnosti nastavení Swift-E přes Web Connect	38
Obr. 4.11 – Blokové schéma komunikace	39
Obr. 4.12 – Úvodní strana Studia 5000.	39
Obr. 4.13 – Vytvoření nového projektu.....	40
Obr. 4.14 – Finální založení projektu	41
Obr. 4.15 – Vzhled Studia 5000 po založení projektu.....	41
Obr. 4.16 – Přidání nového modulu do projektu.	42
Obr. 4.17 – Nalezení Swift-E V katalogu modulů.....	42

Obr. 4.18 – Nastavení IP adresy Swift-E v Studiu 5000	43
Obr. 4.19 – Úspěšné přidání Swift-E ve Studiu 5000.....	44
Obr. 4.20 – Nastavení PLC do módu Rem Prog.....	44
Obr. 4.21 – Monitorování vstupně výstupních proměnných Swift-E.....	45
Obr. 4.22 – Vytvoření šablony pro snímání 4 lahví.....	45
Obr. 4.23 – Vstupní proměnné z Swift-E ve Studiu 5000	46
Obr. 4.24 – Výstupní proměnné.....	46
Obr. 4.25 – Balení PET lahví s víčky vyznačenými kružnicemi.....	48
Obr. 4.26 – Pohnutí PET lahvemi z referenčního umístění	49
Obr. 4.27 – Snímání objektů na větší vzdálenost.	50
Obr. 4.28 – Posunutí objektů z referenčního umístění.	51
Obr. 4.29 – Test přesnosti snímání s párou v místnosti.....	52
Obr. 4.30 – Snímaný předmět v rozhraní Web Connect.....	53
Obr. 4.31 – Ladder diagram pro detekci jednoho objektu	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Rychlost šíření zvuku v jednotlivých prostředích (ELUC, nedatováno).....	18
Tab. 1.2 – Rychlost šíření ultrasonických vln ve vzduchu o specifické teplotě (ELUC, nedatováno).....	19
Tab. 4.1 – Klíčové vlastnosti Swift-E (Odos Imaging, 2020).	31
Tab. 4.2 – Vstupní data z Swift-E do Studia 5000 (Odos Imaging, 2020).....	46
Tab. 4.2 – Vstupní data z Swift-E do Studia 5000 - pokračování	47
Tab. 4.3 – Výstupní data ze Studia 5000 do Swift-E (Odos Imaging, 2020).....	47

ÚVOD

Senzory měřící vzdálenost se stávají čím dál více žádaným artiklem v průmyslu. Jsou používány při měření vzdálenosti objektů, měření přítomnosti objektů nebo v pokročilých aplikacích k 3D mapování objektů, které může sloužit jak pro zjištění aktuální polohy objektu, tak i pro zjištění patřičných vad na objektu. Motivace k použití senzorů vzdálenosti stále roste například při automatizaci výrobních prostor. Na rozdíl od lidského pracovního faktoru mají senzory vzdálenosti udanou maximální možnou pracovní odchylku.

Senzory vzdálenosti se dělí na kontaktní a bezkontaktní. U kontaktních senzorů je možné získávat na výstupu pouze logickou hodnotu, která udává, jestli je objekt přítomen. Nevýhodou kontaktních senzorů může být dotyk s měřeným předmětem, který může vést k mechanickému opotřebení předmětu. U senzorů bezkontaktních lze z logické výstupní úrovně určit nejen přítomnost objektu, ale i jeho přesnou polohu s udanou odchylkou senzoru. Bezkontaktní senzory umožňují určit polohu daného objektu od řádu mikrometrů až po jednotky kilometrů.

Cílem práce bylo navrhnout systém určování polohy obrobků ve výrobě s pomocí 3D ToF senzoru. Společnost SPEL a.s. požaduje problematiku řešit pomocí 3D ToF senzoru Swift-E od firmy Odos Imaging spadající pod Rockwell Automation.

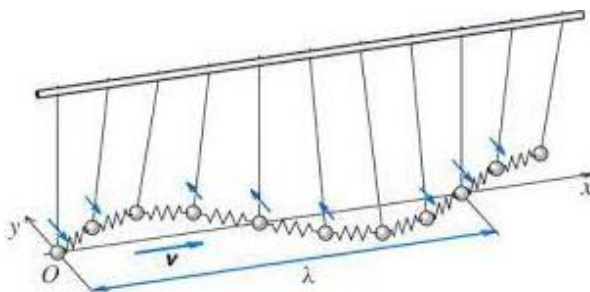
Praktická část bakalářské práce by měla ukázat možnosti Swift-E senzoru a jeho základní konfiguraci. Na základě praktické části bakalářské práce si společnost SPEL a.s. může stanovit, zda je Swift-E pro jejich problematiku, detekce objektu v automatizovaných prostor, vhodným nástrojem.

1 SENZORY VZDÁLENOSTI A JEJICH ROZDĚLENÍ

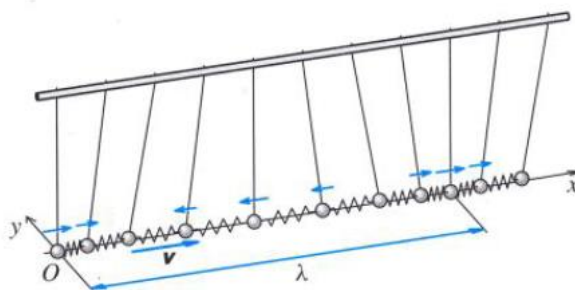
V následujícím textu je proveden rešeršní průzkum senzorů pro měření vzdálenosti zaměřený především na senzory založené na ultrasonickém a optickém principu. Těchto principů využívají i ToF senzory.

1.1 Ultrasonické vysílače a přijímače

Šíření ultrasonických vln je podmíněno existencí vazebných sil mezi částicemi látek, díky kterým se ultrazvukové vlny šíří. Šíření mechanického vlnění v prostředí si lze představit jako vazebné síly představované pružinami. Při rozkmitání jedné pružiny se chvějí i ostatní. Mechanické vlnění částic v látce lze rozdělit na postupné mechanické vlnění příčné a postupné mechanické vlnění podélné. Postupné mechanické vlnění příčné je pouze v pevných látkách. Částice obsažené v pevném prostředí zde kmitají směrem kolmo od směru šíření mechanického vlnění, viz obr. 1.1. Naproti tomu podélné mechanické vlnění vzniká v plynných látkách. Částice obsažené v plynném prostředí zde kmitají ve směru šíření mechanického vlnění, viz obr. 1.2 (Brabec, nedatováno).



Obr. 1.2 – Příčné vlnění v pevných látkách (SPŠ el-it Dobruška)



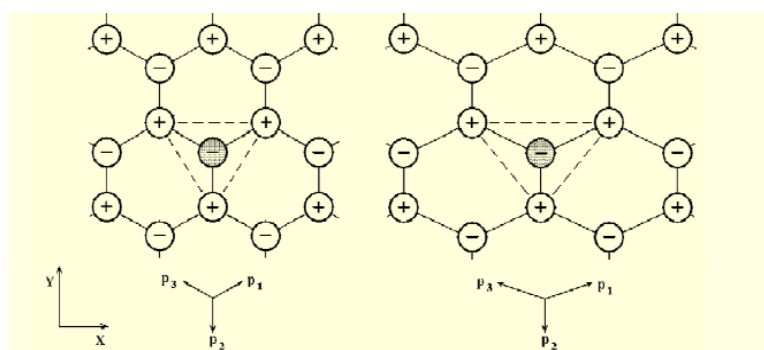
Obr. 1.1 – Podélné vlnění v plynných látkách (SPŠ el-it Dobruška)

Ultrasonické vysílače vysílají zvukové vlny s vysokou frekvencí do prostředí. V momentě, kdy vyslaná vlna narazí na překážku, ultrasonický zvukový signál se od překážky odrazí zpět k vysílači. Tohoto jevu využívají i savci, např. netopýři či delfini (KEYENCE, nedatováno).

Z ultrasonického vysílače je vysílán zvuk nad hranici slyšitelnosti lidským sluchovým ústrojím. To znamená zvuk vyšší než 20 KHz. Nízkofrekvenční ultrazvukové přístroje pracují v rozsahu 20 až 100 kHz. Vysokofrekvenční přístroje pracují v rozsahu 100 kilohertz až po jednotky megahertz. Ultrasonické vysílače jsou založeny na principu obráceného piezoelektrického jevu. Přijímače ultrazvukových vln jsou založeny na principu přímého piezoelektrického jevu (ČVUT, nedatováno), (Lékařská fakulta Masarykovy univerzity, 2013).

1.2 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev je schopnost krystalů vytvářet elektrické napětí při jejich stlačení. Přímý piezoelektrický jev vzniká pouze v krystalové mřížce tak, že při deformaci krystalové mřížky se od sebe kladné a záporné ionty vzdálí, viz obr. 1.3. Důsledkem tohoto pohybu vznikne elektrický náboj, který vyvolá vnitřní elektrické pole v krystalu. Toto pole je zanedbatelně malé, ovšem při deformaci většího množství krystalových mřížek se může toto pole proměnit i na elektrické pole o řádech voltů. Podstatnou veličinou je také deformační síla působící na krystal. S rostoucí silou zároveň roste i elektrický náboj. Tohoto jevu využívají např. piezoelektrické zapalovače či přijímače ultrasonických vln, viz obr. 1.5 (ČVUT, nedatováno).



Obr. 1.3 – Deformace krystalové mřížky (ČVUT, nedatováno)

Obrácený piezoelektrický jev, který je použit u vysílačů ultrasonických vln, viz obr. 1.4, vzniká při působení vnějšího elektrického pole. Vnější elektrické pole působí na krystalovou mřížku, kde dochází k posunutí iontů. Posunutí iontů má následný vliv na deformaci krystalu.

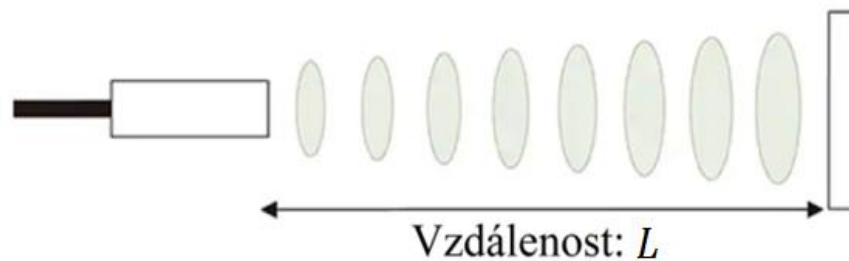
Při působení nestacionárního elektrického pole na krystal dochází k opakované deformaci krystalu, což má za následek rezonanci krystalu. Při deformaci krystalické mřížky se zároveň mění i rezistivita krystalické mřížky. Při změně rezistivity krystalické mřížky hovoříme o piezorezistivním jevu. Piezorezistivního jevu se využívá například ve snímačích tlaku (ČVUT, nedatováno).

Vzdálenost objektu od předmětu lze dopočítat pomocí vztahu

$$v \cdot t = 2 \cdot L, \quad (1.1)$$

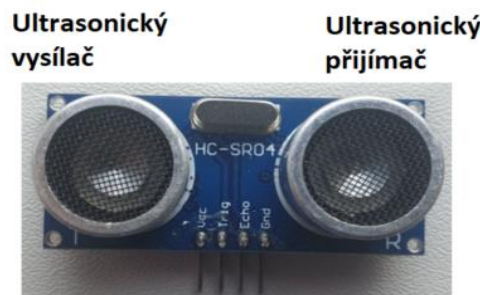
$$\frac{v \cdot t}{2} = L, \quad (1.2)$$

kde L – vzdálenost, m,
 v – rychlost, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 t – čas, s (KEYENCE, nedatováno).



Obr. 1.4 – Měření vzdálenosti ultrasonickým senzorem (KEYENCE, nedatováno)

Jako příklad ultrasonického vysílače je modul pro HC-SR04, viz obr. 1.5. Modul je opatřen ultrasonickým vysílačem na principu obráceného piezoelektrického jevu a ultrasonickým přijímačem na principu piezoelektrického jevu, který snímá odražené zvukové vlny (ČVUT, nedatováno).



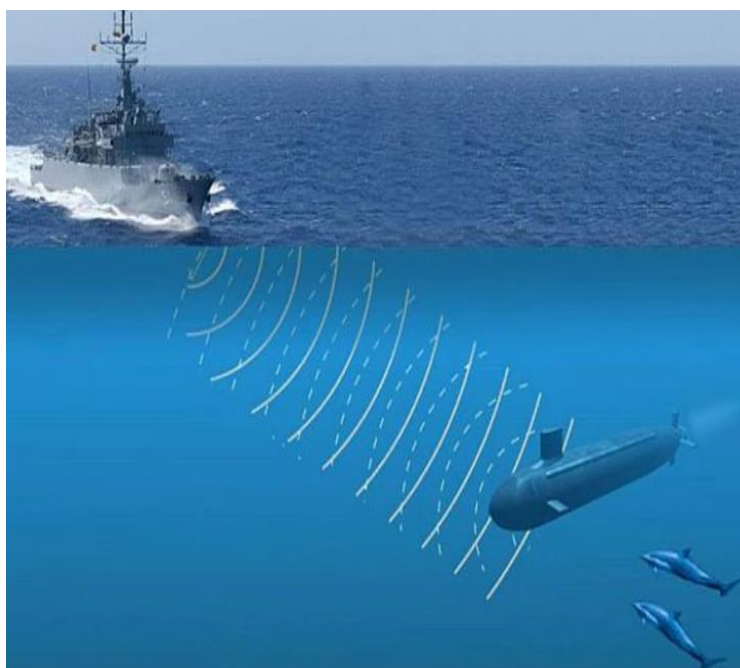
Obr. 1.5 – Ultrasonický senzor HC-SR04

Tab. 1.1 – Rychlost šíření zvuku v jednotlivých prostředích
(ELUC, nedatováno)

Prostředí [20 °C]:	Rychlost šíření, $m \cdot s^{-1}$
Vzduch	340
Voda	1500
Sklo	5200
Led	3200
Ocel	5000

1.3 Sonary

Sonary využívají ultrasonického jevu k detekci předmětů nacházejících se pod vodní hladinou. Slovo sonar pochází z anglického slovního spojení „sound navigation ranging“. Zařízení vysílá pulzy procházející ve vodě až k samotnému dnu, o které se ultrazvukové vlny odraží. Pokud stojí v cestě překážka, kterou může být, viz obr. 1.6, např. ponorka, ultrazvukové vlny se od ní odrazí dřív, než dopadnou na dno a detekují tak v daném místě překážku. Moderní sonary jsou schopné ze zpětně odražené vlny určit nejen vzdálenost předmětu, ale podle síly zpětného pulzu se může určit i tvrdost daného objektu. Ultrasonické pulzy mají vždy kuželový tvar, což znamená, že u hladiny je plocha k detekování objektů mnohem menší jak plocha k detekování objektů u dna (Deeper, nedatováno).



Obr. 1.6 – Princip a použití sonaru (iNEWS, 2021)

1.4 Dopplerův jev

Pokud se zdroj zvukového vlnění do prostoru a objekt pohybují, pak při vzájemném přibližování těchto objektů je slyšitelná frekvence přijímaného zvukového vlnění vyšší než skutečná. Při vzájemném vzdalování objektů je přijímaná frekvence naopak nižší než skutečná, viz obr. 1.7 (Armáda České republiky, nedatováno).

Vztah pro výslednou frekvenci Dopplerova jevu lze popsat z následujících vztahů

$$f_1 = \frac{c}{c+v} \cdot f_0, \quad (1.3)$$

$$f_2 = \frac{c}{c-v} \cdot f_0, \quad (1.4)$$

kde f_1 – frekvence, Hz,

f_2 – frekvence, Hz,

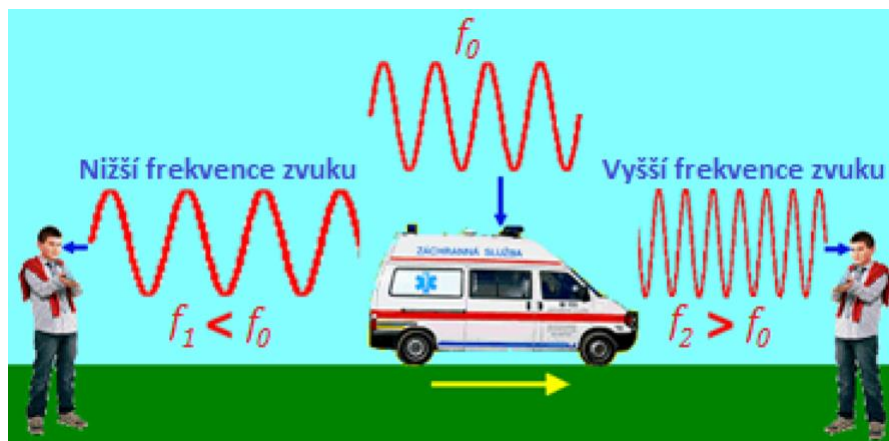
f_0 – frekvence, Hz,

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

v – rychlost, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Armáda České republiky, nedatováno).

Tab. 1.2 – Rychlost šíření ultrasonických vln ve vzduchu o specifické teplotě (ELUC, nedatováno)

Teplota vzduchu v , °C	Rychlost šíření zvuku, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
0	331,82
10	337,92
20	344,02
30	350,12
35	353,17



Obr. 1.7 – Dopplerův jev (Armáda České republiky, nedatováno)

1.5 Ultrasonické senzory pro měření průtoku

Ultrazvukové průtokoměry můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Do první skupiny patří průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu a do druhé skupiny patří průtokoměry využívající Dopplerův jev. Z hlediska konstrukčního provedení ultrasonických průtokoměrů dělíme průtokoměry na průtokoměry se smáčenými snímači (in-line), v tomto konstrukčním provedení se jedná o kontaktní měření průtoku. Další možnost je provedení s příložitými snímači (clamp-on), kdy jsou senzory umístěné na stěnu potrubí a jedná se tak o bezkontaktní měření průtoku (Kadlec, 2013).

1.6 Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu

Konstrukce těchto průtokoměrů jsou založeny buď na dvojici vysílače s přijímačem nebo na tzv. diferenčním uspořádání, kde jsou použity dva páry vysílačů a měničů. Vysílač V2, viz obr. 1.8, vysílá zvukové vlnění po směru průtoku dané látky. Vysílač V1, viz obr. 1.8, vysílá vlnění protisměru průtoku. Proud látky protékající potrubím zároveň unáší zvukové vlny z ultrasonických vysílačů. V případě V2 jsou vlny unášeny po směru vysílání. To má za následek zvýšení rychlosti signálu společně se zkrácením časového intervalu mezi vysláním a přijmutím signálu. V případě vysílače V1 a přijímače P2, viz obr. 1.8, působí průtok látky proti vysílanému signálu, což má za následek zpomalení rychlosti vlnění společně s prodloužením časového intervalu mezi vysláním a přijmutím zvukového signálu. Průtokoměry jsou vhodné i

pro měření průtoku tuhých kapalin a kalů, kde by mechanické průtokoměry nebyly vhodné (Kadlec, 2013).

Matematicky lze dojít k výsledné rychlosti proudění podle následujících výpočetních vztahů

$$t_1 = \frac{L}{c - \bar{v} \cdot \cos(\alpha)}, \quad (1.5)$$

$$t_2 = \frac{L}{c + \bar{v} \cdot \cos(\alpha)}, \quad (1.6)$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2 \cdot L \cdot \bar{v} \cdot \cos(\alpha)}{c^2 + \bar{v}^2 \cdot \cos^2(\alpha)}, \quad (1.7)$$

$$\Delta t \cdot c^2 + \Delta t \cdot \bar{v}^2 \cdot \cos^2(\alpha) = 2 \cdot L \cdot \bar{v} \cdot \cos(\alpha), \quad (1.8)$$

kde t_1 – čas, s,
 t_2 – čas, s,
 Δt – čas, s,
 c – rychlost zvuku, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 L – vzdálenost, m,
 \bar{v} – průtoková rychlost, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 α – úhel, ° (Kadlec, 2013).

Za předpokladu, že $v^2 \ll c^2$ lze provést úpravu, která rovnici s minimální chybou zjednoduší,

$$\Delta t \cdot c^2 = 2 \cdot L \cdot \bar{v} \cdot \cos(\alpha), \quad (1.9)$$

kde Δt – čas, s,
 c – rychlost zvuku, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 L – vzdálenost, m,
 \bar{v} – průtoková rychlost, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 α – úhel, ° (Kadlec, 2013).

Střední průtoková rychlost

$$\bar{v} = \frac{\Delta t \cdot c^2}{2 \cdot L \cdot \cos(\alpha)}. \quad (1.10)$$

kde Δt – čas, s,
 c – rychlost zvuku, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 L – vzdálenost, m,

\bar{v} – průtoková rychlost, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

α – úhel, ° (Kadlec, 2013).

Rychlost šíření ultrazvuku lze dopočítat dle vztahu

$$c = \frac{2 \cdot L}{t_1 + t_2}, \quad (1.11)$$

kde t_1 – čas, s,

t_2 – čas, s,

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

L – vzdálenost, m (Kadlec, 2013).

Po dosazení c do vztahu pro výpočet střední průtokové rychlosti vyjde

$$\bar{v} = \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2} \cdot \frac{2 \cdot L}{\cos(\alpha)}, \quad (1.12)$$

kde t_1 – čas, s,

t_2 – čas, s,

Δt – čas, s,

L – vzdálenost, m,

\bar{v} – průtoková rychlost, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

α – úhel, ° (Kadlec, 2013).

Objemový průtok lze vypočítat z rovnice

$$Q_v = \bar{v} \cdot S, \quad (1.13)$$

$$Q_v = \bar{v} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (1.14)$$

$$Q_v = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2}, \quad (1.15)$$

kde t_1 – čas, s,

t_2 – čas, s,

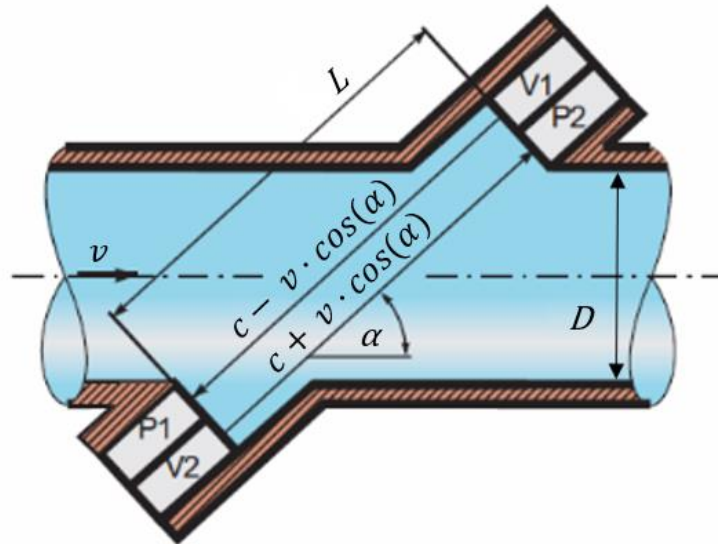
Q_v – objemový průtok, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

D – průměr, m,

L – vzdálenost, m,

\bar{v} – průtoková rychlost, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

α – úhel, ° (Kadlec, 2013).



Obr. 1.8 – Průtokoměr s vyhodnocením doby průchodu signálu (Kadlec, 2013)

2 SENZORY OPTICKÉ

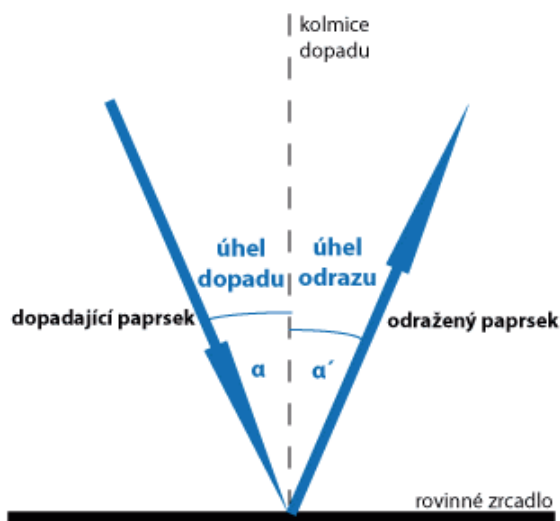
2.1 Úvod do problematiky optických senzorů

Optické senzory jsou měřicí zařízení, ve kterých se měřené množství převádí na optický signál, který je následně převeden na elektrický signál pomocí optického snímače. Optická veličina může být popsána jako jakákoli veličina charakterizující nebo ovlivňující generování a šíření elektromagnetických vln se spektrem odpovídajícím viditelnému světlu (Ripka, 2003).

2.2 Optický odraz světla

Odraz světla je optický jev, který je pozorovatelný na rozmezí dvou opticky různorodých prostředí. Závisí na vlastnostech hraničního povrchu mezi prostředími. Pokud je nerovnost hraničních ploch menší než vlnová délka optického záření, je odraz charakterizován jako zrcadlový. To nastává v případě opticky hladkých povrchů, mezi které považujeme každý dokonale vyleštěný povrch, který odráží optický paprsek pouze jedním směrem (Ripka, 2003), (Králová, nedatováno).

V případě zrcadlového odrazu určuje rovnost mezi úhlem dopadu a odraženým paprskem jednoduchý zákon odrazu (Králová, nedatováno).

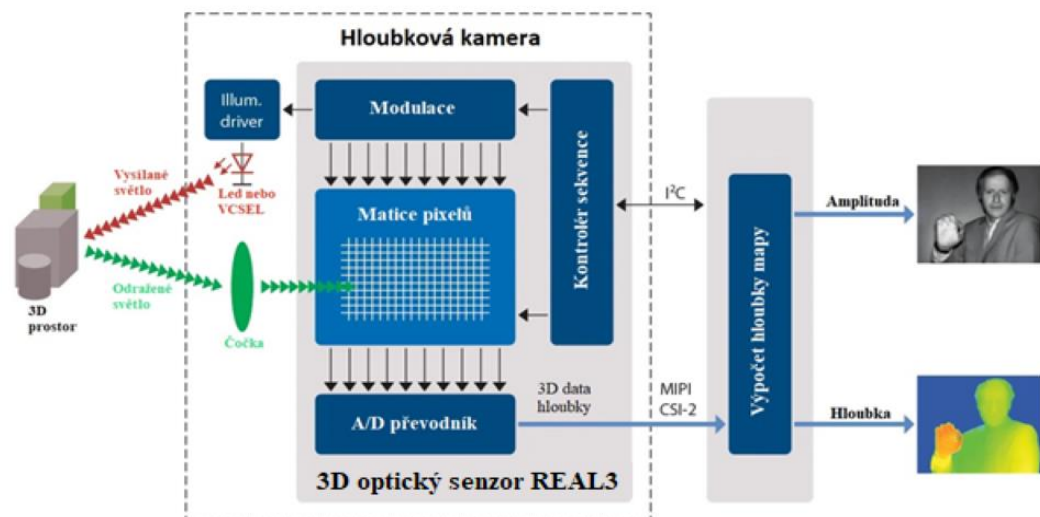


Obr. 2.1 – Odraz optického paprsku (Králová, nedatováno)

3 Time-of-Flight

3.1 Technologie ToF

ToF je optická technologie snímání umožňující stereoskopické vidění objektů. Podle použité technologie lze ToF senzory rozdělit na senzory s ultrasonickými vysíláči a přijímači nebo senzory s optickými vysíláči a přijímači. V praxi se častěji používají ToF senzory s optickými vysíláči a přijímači zejména díky tomu, že oproti ultrazvuku nabízí vyšší rychlost, širší přenosové pásmo a při použití infračervené části optického spektra lze zvýšit odolnost vůči šumu běžného denního světla, které má menší vlnovou délku (Hughes, 2019).



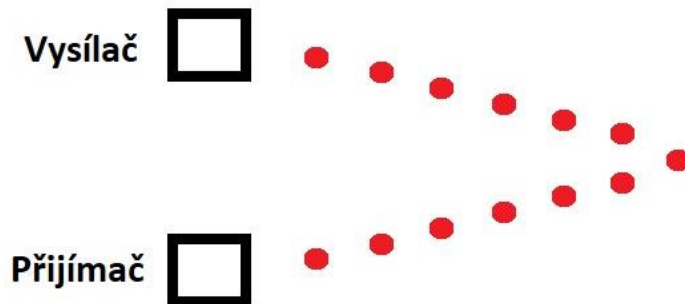
Obr. 3.1 – Blokové schéma ToF upraveno podle (Hughes, 2019)

3.2 Princip měření ToF

ToF senzor vyšle optický či ultrasonický signál do prostoru. V prostoru se signál odrazí od překážky zpět do přijímače senzoru. Jednou ze základních metod vyhodnocování vzdálenosti překážky je měření času mezi vysláním a přijmutím signálu a následným vypočítáním dráhy za předpokladu, že je známa rychlost šíření světla. Signál lze vysílat a přijímat pomocí různých metod (Hughes, 2019).

3.2.1 Série časových pulzů

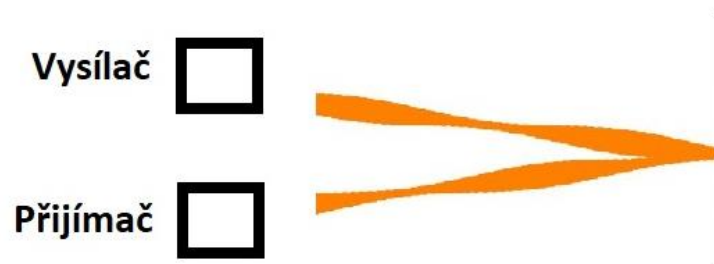
Metoda série časových pulzů je zachycena na obr. 3.2. Tato metoda vyžaduje náročné požadavky na vnitřní elektroniku senzoru pro rychlou vysílací i přijímací frekvenci. Tento požadavek se poté odráží na ceně senzoru (Hughes, 2019).



Obr. 3.2 – Měření vzdálenosti pomocí ToF metoda 1 (Hughes, 2019)

3.3 Amplitudová modulace signálu

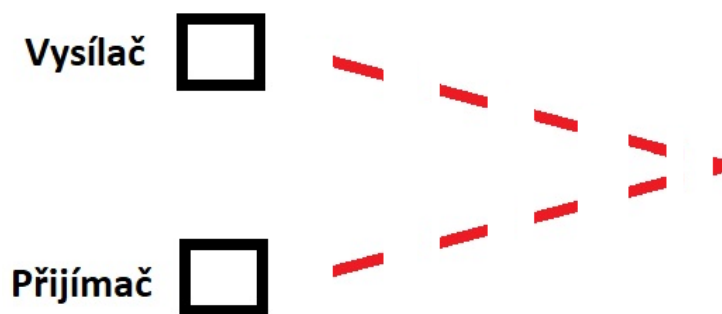
Metoda amplitudové modulace signálu je zachycena na obr. 3.3. Tato metoda moduluje signál pomocí amplitudové modulace. Výkonnostní požadavky na senzor jsou nižší, ovšem rychlost snímání není dostačující (Hughes, 2019).



Obr. 3.3 – Měření vzdálenosti pomocí ToF metoda 2 (Hughes, 2019)

3.3.1 Vysílání pulzů se střídou 50 %

Metoda vysílání pulzů se střídou 50 % je zachycena na obr. 3.4. Tato metoda je dostatečně rychlá a zároveň požadavky na elektroniku senzoru jsou nižší (Hughes, 2019).



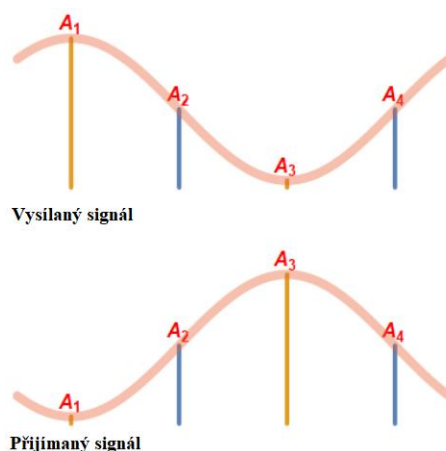
Obr. 3.4 – Měření vzdálenosti pomocí ToF metoda 3 (Hughes, 2019)

3.3.2 Konstrukční náročnost

Při konstrukci ToF senzorů schopných detekovat objekt s přesností jeden milimetr lze uvažovat, že rychlost světla je 300 000 000 000 mm/s. Z toho vyplývá, že jeden milimetr urazí světelný paprsek za 3,3 ps. Pro určení polohy s rozlišením 1 mm je tedy nutné pro zpracování signálu uvažovat řád pikosekund. Modulování těchto krátkých signálů by bylo z ekonomického i technického hlediska velice náročné, jednalo by se totiž o vzorkování signálu v řádu stovek GHz. Naštěstí se zde nabízí dvě metody zpracování těchto vysokých frekvenčních signálů, které zajišťují modulační signál v řádech MHz (Hughes, 2019).

3.3.3 Určování fázového posuvu pomocí sinusoidy

Metoda určování fázového posuvu přijímané sinusoidy oproti vysílané sinusoidě výpočetně, viz obr. 3.5, zaručuje modulační signál v řádech MHz (Hughes, 2019).



Obr. 3.5 – Fázový posuv signálů (Hughes, 2019)

Vztah pro výpočet fázového posuvu je

$$\varphi = \text{ArcTan}\left(\frac{A1 - A3}{A2 - A4}\right), \quad (1.16)$$

kde φ – fázový posun, rad,

$A1$ – vzorkovaná hodnota sinusoidy, rad,

$A2$, – vzorkovaná hodnota sinusoidy, rad,

$A3$ – vzorkovaná hodnota sinusoidy, rad,

$A4$ – vzorkovaná hodnota sinusoidy, rad (Hughes, 2019).

Po výpočtu fázového posuvu skutečnou vzdálenost od předmětu lze vypočítat z následujícího vztahu

$$L = \frac{c \cdot \varphi}{4 \cdot \pi \cdot f}, \quad (1.17)$$

kde f – frekvence, Hz,

φ – fázový posun, rad,

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

L – vzdálenost, m (Hughes, 2019).

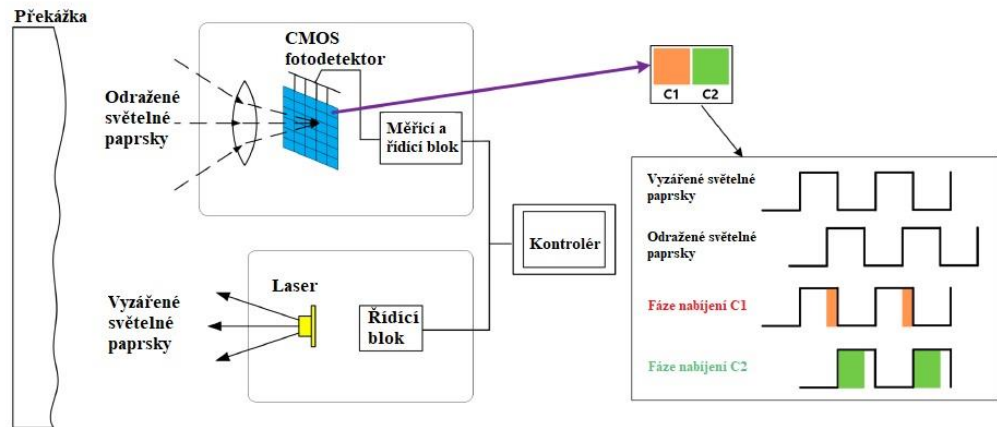
3.3.4 Metoda měření diferenciálního napětí na nabitých kondenzátorech

Metoda určování fázového posuvu měřením diferenciálního napětí na nabitých kondenzátorech, viz obr. 3.6, zaručuje modulační signál v řádech MHz (Hughes, 2019).

Tato metoda spočívá v porovnání dvou napěťových hodnot na nabitých kondenzátorech umístěných v jednotlivých pixelech a následném určení fázového posuvu pomocí porovnaných hodnot (Hughes, 2019).

Jako zdroj světelného signálu je použit laserový stroboskop. Na přijímací straně světelného signálu jsou umístěny maticové CMOS fotodetektory. Každý pixel fotodetektoru obsahuje 2 kondenzátory. Kondenzátory jsou přepínány hodinovým signálem se střídou 50 % a zároveň na jednom z kondenzátorů se akumuluje náboj úměrně dle odraženého paprsku ze světelného zdroje (Hughes, 2019).

Světelný signál vyzářovaný ze stroboskopu je ovládán signálem PWM, který má stejný hodinový signál (střídu), jakým jsou přepínány kondenzátory fotodetektoru mezi sebou. Toto chytré uspořádání má za následek rozdílné nabití kondenzátorů, jenž má přímou souvislost s fázovým posuvem světelného signálu (Hughes, 2019).



Obr. 3.6 – Určení fázového posuvu z nabitých kondenzátorů (Hughes, 2019)

3.4 Point Cloud

Point Cloud jsou úložiště pro datové typy charakterizující 3D prostor popsány jednotlivými body. Uložené body v Point Cloudu obsahují souřadnice bodu X, Y a Z na vzorkované ploše. Množství těchto bodů dává dohromady 3D prostor. Pokud každý bod nese informace o své poloze i o své barvě, lze hovořit o 4D datech prostoru (Gray, nedatováno).

Mračna bodů (neboli Point Cloud) jsou generována například při měření technologií LiDAR nebo ToF, kdy každý bod v mračně bodů představuje jedno měření v prostoru. Po spojení všech bodů dohromady lze hovořit o procesu zvaném registrace (Gray, nedatováno).

Základní operace s mračny bodů, jako je ukládání a zobrazování, je jednoduchá. Ovšem pokud dojde k operacím, jako je např. filtrování bodů či rekonstrukce povrchu, jedná se o softwarově náročnější operace (Gray, nedatováno).

Point Cloud Library je knihovna napsaná v jazyce C++, která umožňuje práci s 2D a 3D mračny bodů. Point Cloud Library je software, který lze nainstalovat na operačních systémech, jako je Windows, Linux, macOS a Android. Knihovna při práci s mračny souborů umožňuje pomocí algoritmů operace, jako je např. spojování 3D mračen, filtrace bodů v prostoru, vytváření povrchů z mračen souborů, rozpoznávání 3D objektů, atd (Point Cloud Library), (Gray, nedatováno).

Formátů Point Cloud úložišť existují stovky. Jako příklad formátů pro Point Cloud jsou formáty typu: OBJ, STL, PLY, XYZ, PCG, RCS, RCP a E57 (Thomson, nedatováno).

OBJ – Formát vyvinut společností Wavefront technologies. Jedná se o jednoduchý formát, který reprezentuje 3D geometrii – polohu každého vrcholu, informace o textuře a barvě. Využívá se například v 3D tiskové metodě „multi-material“ a 3D grafických aplikacích zejména CAD. Data jsou uložena v ASCII, ovšem je možné i uložení binární verze OBJ (Thomson, nedatováno), (Chakravorty, 2018).

STL – Formát popisující pouze geometrii 3D tělesa. Formát se využívá zejména v 3D tisku. Informace o 3D tělesu jsou zakódovány v konceptu zvaném mozaikování. Mozaikování je proces, kdy popsání 3D objektu pomocí jednoho, případně více polygonů. STL lze uložit jak v ASCII, tak i v binárním souboru (Chakravorty, 2019).

PLY – Formát inspirovaný z OBJ. Objekty jsou reprezentovány pomocí seznamů polygonů. Formát souboru může reprezentovat barvu, průhlednost, normály povrchu, texturu a hodnoty spolehlivosti dat (Thomson, nedatováno).

XYZ – Formát používaný především v chemickém průmyslu. Udává počet atomů molekuly společně s kartézskými souřadnicemi charakterizujícími informace o atomech. Výstupním formátem je ASCII. Zásadní nevýhodou je nedostatek okolních hodnot specifikujících vlastnosti objektu (Thomson, nedatováno), (Reviversoft, nedatováno).

PCG, RCS, RCP – Jedná se o formát vytvořený společností Autodesk k vytváření mračen bodů v projektech. Nejčastěji se formátů RCS, RCP používá při ukládání projektů v programu Autodesk ReCap, který je schopen otevřít skenované body mnoha obvyklých formátů a následně je upravovat (Thomson, nedatováno), (Autodesk, nedatováno).

E57 – Formát pro ukládání objektů získaných ze snímacích systémů, jako jsou například laserové skenery. Získané data lze uložit ve formátu binárním i ASCII. E57 podporuje normály, barvy a intenzitu skalárního pole (Thomson, nedatováno).

4 PRÁCE S TOF SENZOREM

4.1 Popis ToF senzoru Swift-E

Swift-E je 3D ToF senzor určený především do průmyslového prostředí. Swift-E je vybaven integrovaným rozhraním Web Connect pro jednoduchou práci se senzorem. Výrobce senzoru je Odos Imaging, jenž je divizí Rockwell Automation. Firma byla založena v roce 2010 a v roce 2017 byla odkoupena právě společností Rockwell Automation. Odos Imaging se zabývá především vývojem a výrobou 3D snímacích zařízení s vysokým rozlišením pro průmyslovou automatizaci (Odos Imaging, 2020), (Odos Imaging, nedatováno).

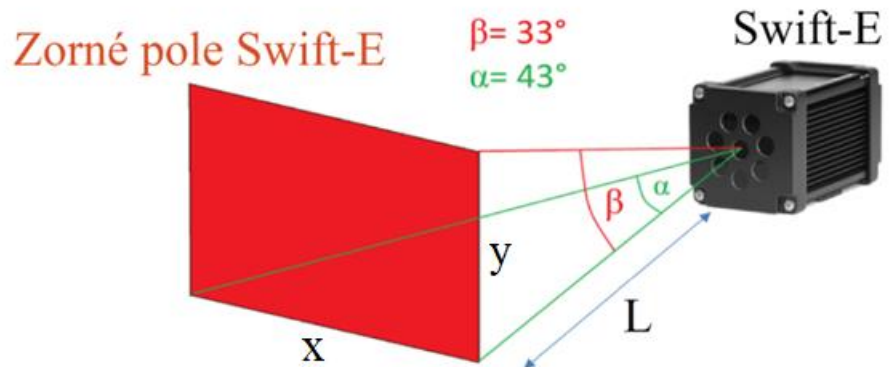


Obr. 4.1 – Swift-E 3D senzor (Novus Light, 2018)

Tab. 4.1 – Klíčové vlastnosti Swift-E (Odos Imaging, 2020).

Parametr	Hodnota
Snímaná oblast	640 × 480 pixelů
Zorný úhel	43° × 33°
Rozlišení	1 cm
Přesnost měření	±1 cm (obvykle na vzdálenost 2 m, může se lišit podle prostředí)
Iluminace	7 x LED dioda s vlnovou délkou 850 nm
Pracovní rozsah	0,5 – 6 m
Výstupní data	Výška, vzdálenost
Doba odezvy	100 ms
Komunikační protokol	EtherNet/IP
Napájecí napětí	12 V stejnosměrné
Výkon	60 W maximální
Provozní teplota	-20 °C až 50 °C
Stupeň krytí	IP20
Počet snímaných objektů	Až 64 objektů v každé šabloně
Počet šablon	Až 255

Rozměr zorného pole Swift-E si lze představit viz obr. 4.2.



Obr. 4.2 – Zorné pole Swift-E (Novus Light, 2018)

Pokud je vzdálenost, viz obr. 4.2, kde $L=2000$ mm, tak lze dopočítat délku stran zorného pole pomocí goniometrických vzorců, viz obr. 4.3. Kde po dosažení úhlu a vzdálenosti

$$x = \tan \frac{\alpha}{2} \cdot L \cdot 2 = \tan 21,5^\circ \cdot 2000 \cdot 2 = 1575,642 \text{ mm,}$$

$$y = \tan \frac{\beta}{2} \cdot L \cdot 2 = \tan 16,5^\circ \cdot 2000 \cdot 2 = 1184,854 \text{ mm.}$$

Pokud získané výsledky budou poděleny počtem pixelů v řádcích či sloupcích, dojde k vypočtení výsledných rozměrů prostředí, které odpovídá rozměru jednoho pixelu.

Rozměr strany na ose x viz obr. 4.2 v prostoru snímáný jedním pixelem, ze vzdálenosti 2000 mm

$$x = \frac{1575,642}{640} = 2,462 \text{ mm.}$$

Rozměr strany na ose y, viz obr. 4.2, v prostoru snímáný jedním pixelem ze vzdálenosti 2000 mm

$$y = \frac{1184,854}{480} = 2,468 \text{ mm.}$$

Z výsledků je vidět, že při ideálním snímání na 2 m by minimální plocha obdélníkového předmětu musela být větší než $2,468 \times 2,462$ mm ($6,076$ mm²), aby ToF senzor zvládl teoreticky předmět zobrazit alespoň na 1 pixel.

Pokud je umístěn předmět ve vzdálenosti, viz obr. 4.2, kde $L=6000$ mm, což je maximální udávaný pracovní rozsah Swift-E, tak lze délku stran zorného pole dopočítat podle goniometrických vzorců, viz obr. 4.3. Kde po dosažení úhlu a vzdálenosti

$$x = \tan \frac{\alpha}{2} \cdot L \cdot 2 = \tan 21,5^\circ \cdot 6000 \cdot 2 = 4726,926 \text{ mm,}$$

$$y = \tan \frac{\beta}{2} \cdot L \cdot 2 = \tan 16,5^\circ \cdot 6000 \cdot 2 = 3554,561 \text{ mm.}$$

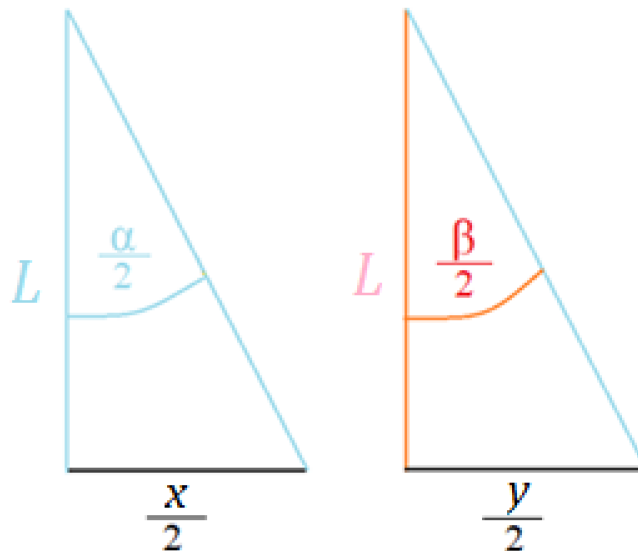
Rozměr strany na ose x v prostoru, viz obr. 4.2, snímáný jedním pixelem se vzdáleností 6000 mm

$$x = \frac{4726,926}{640} = 7,386 \text{ mm.}$$

Rozměr strany pixelu na ose y v prostoru, viz obr. 4.2, snímáný jedním pixelem se vzdáleností 6000 mm

$$y = \frac{3554,561}{480} = 7,405 \text{ mm.}$$

Na vzdálenost 6 m by při ideálním snímání musela být plocha obdélníkového objektu nejméně $7,386 \times 7,405 \text{ mm}$ ($54,693 \text{ mm}^2$), aby ToF senzor zvládl teoreticky předmět zobrazit alespoň na 1 pixel.



Obr. 4.3 – Délka stran zorného pole

4.2 RSLinx Classic Lite

RSLinx Classic Lite slouží pro komunikaci s řídicími systémy od firmy Allen-Bradley. RSLinx Classic Lite je schopen komunikovat s protokoly DH485, DH+, ControlNet, DeviceNet, DF1, Remote I/O i s protokolem EtherNet/IP, který podporuje i ToF 3D senzor Swift-E (ControlTech, nedatováno).

RSLinx Classic Lite v tomto případě lze využít pro úvodní komunikaci Swift-E přes rozhraní Ethernet/IP.

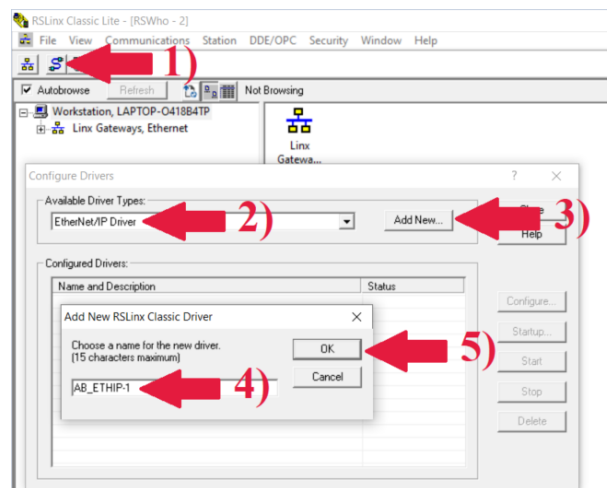
Ethernet/IP je průmyslový standard Ethernetu, se kterým je Ethernet kompatibilní. Ethernet/IP na rozdíl od Ethernetu využívá průmyslový protokol CIP. CIP zaručuje schopnost

komunikace různých systémů, které CIP podporují. CIP používá různé typy zpráv a služeb sloužící k výměně dat sloužící pro řízení procesu a systému, bezpečnost, synchronizaci či přenosu dat a konfiguraci (Michalec, 2020).

Pro komunikaci s PC pomocí LAN použijme přímý UTP kabel CAT5E zakončený konektory RJ-45, který je zároveň pro přenosovou rychlost doporučován i výrobcem snímacího 3D senzoru Swift-E. V prostředí RSLinx Classic zjistíme, zda PC komunikuje se Swift-E přes Ethernet/IP či nikoliv. Dále zde můžeme zjistit či nastavit IP adresu Swift-E (Odos Imaging, 2020).

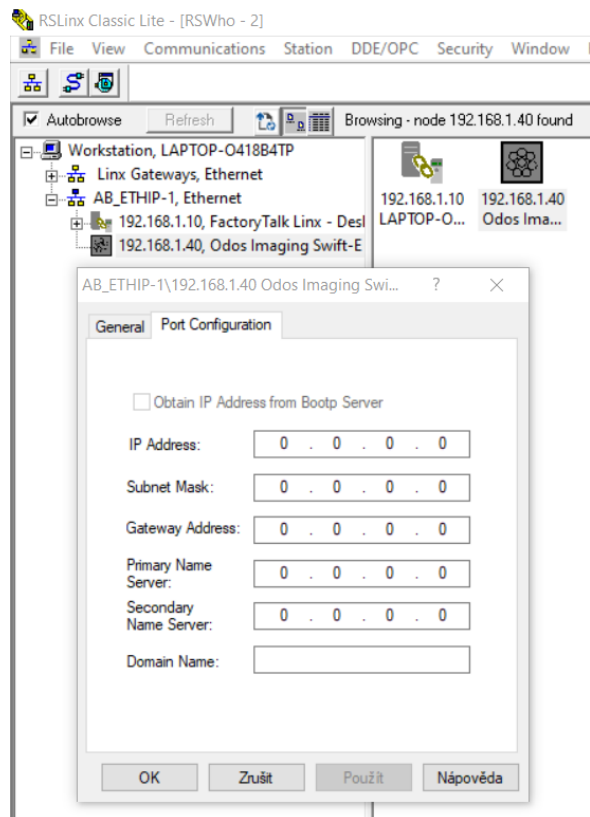
4.2.1 Jednotlivé kroky pro přidání Swift-E do RSLinx Classic Lite

- Pro přidání ovladače Ethernet/IP je nutné zvolit „Configure drivers“,
- jako ovladač zvolit „Ethernet/IP Driver“,
- po zvolení ovladač „Ethernet/IP Driver“, zvolíme „Add New“,
- v „Add New“ je nutné nastavit jméno nastavení ovladače (v tomto případě ponechat předdefinované),
- konfiguraci potvrdit zvolením „OK“.



Obr. 4.4 – RSLinx Classic Lite úvodní konfigurace

V případě potřeby lze přímo v RSLinx Classic Lite nastavit konkrétní IP adresu pro Swift-E. Při nastavování IP adresy je nutné dbát na to, aby nová nastavená adresa spadala do stejné podsítě jako naše zařízení. V tomto případě IP adresu Swift-E ponechat s nastavenou IP adresou z výroby: 192.168.1.40.



Obr. 4.5 – Swift-E a možné nastavení portu

4.3 Použití Web Connect k nastavení Swift-E

Web Connect je rozhraní, které umožňuje získávat hloubková či obrazová data ve formě grafického výstupu. Web Connect pro Swift-E je zprostředkován firmou Odos Imaging.

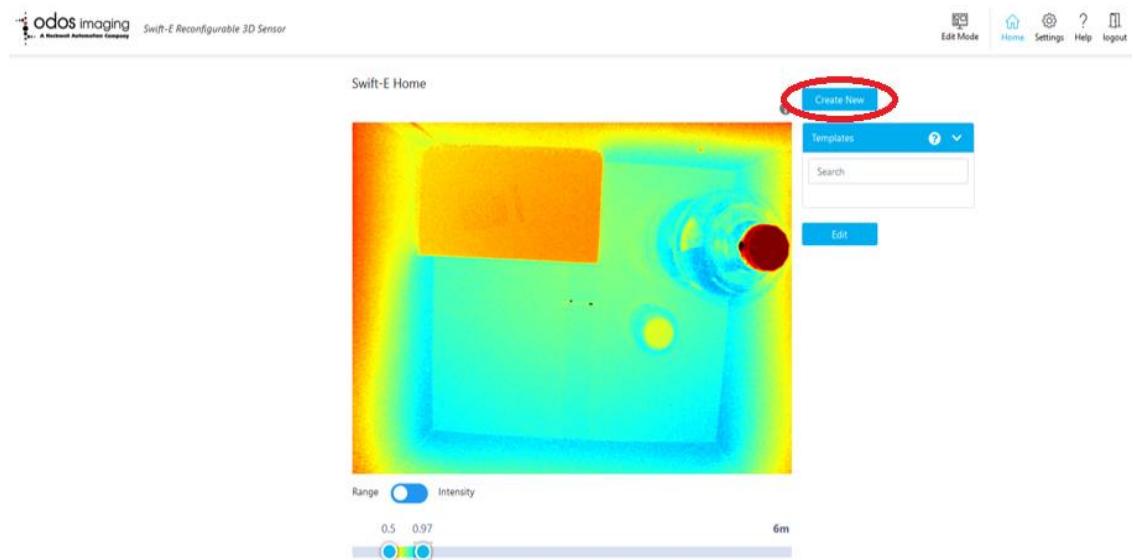
V rozhraní Web Connect lze vytvořit různé šablony, které se po uložení v prostředí Web Connect uloží do vnitřní paměti Swift-E. Po připojení Swift-E k PLC lze po správném nakonfigurování získávat data z vytvořených šablon.

Pro ukázkou snímání byl Swift-E uchycen k pracovní desce stolu ve výšce 800 mm nad dnem snímaného prostoru. Do snímaného prostoru ToF senzorem byla umístěna krabice s rozměry 340×380×310 mm. Do útroby krabice byly vloženy 3 předměty: PET lahev s minerální vodou Magnesia, plastová krabička od žvýkačky Orbit a prázdná papírová krabice s rozměry 110×110×200 mm. Na obr. 4.6 je zachyceno umístění snímaných objektů společně s uchycením Swift-E.



Obr. 4.7 – Prostor připraven ke snímání senzorem Swift-E

Obr. 4.7 zobrazuje snímané objekty v útrobách krabice v prostředí Web Connect. Po přihlášení se do prostředí Web Connect proběhlo nastavení patřičné vzdálenosti objektů. Nastavení na vzdálenost 0,5 m a 0,97 m se jevilo pro toto snímání jako nejvíce příznivé. Nastavení vzdálenosti má vliv na zobrazovanou barvu jednotlivých předmětů. Pokud dojde k vytvoření nové šablony, tak pro označení snímaných objektů je nutné zvolit „Create New“, viz obr. 4.7.



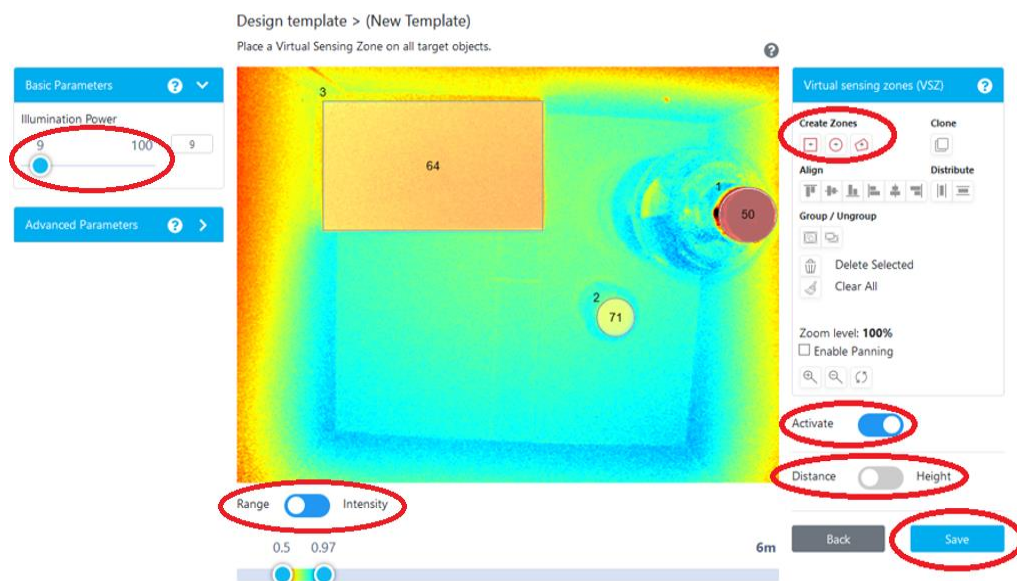
Obr. 4.6 – Vzhled prostředí Web Connect

Obr. 4.8 ukazuje práci se šablonou. Pro označení snímaného objektu následuje část „Create Zones“. V „Create Zones“ lze vybrat útvary, jako jsou čtverec/obdélník, kružnice a polygon z nakreslených úseček.

Pro zobrazení vzdálenosti od označených objektů je nutné zvolit tlačítko „Activate“. Nabízí se také možnost zobrazit výšku objektů namísto vzdálenosti objektů od Swift-E. Tato možnost se nabízí po stisku tlačítka „Distance/Height“.

V prostředí Web Connect je možnost nastavit světelný tok 7 infradiod pomocí posuvníku s názvem „Illumination Power“. V tomto případě je světelný tok nastaven na nízkou úroveň, jelikož se snímané objekty nachází v těsné blízkosti od 3D ToF senzoru.

Dále je zde možnost nastavení „Range/Intensity“. Kde „Range“ zobrazí snímané prostředí zbarvené dle vzdálenosti předmětů, viz obr. 4.7, a režim „Intensity“ zobrazí snímané prostředí v černobílé barvě.



Obr. 4.8 – Vytvoření nové šablony

Po stisknutí „Save“ v nové šabloně, viz obr. 4.8, se otevře okno zobrazené na obr. 4.9. Zde do „Template ID“ napíšeme číslo projektu, pod kterým se bude zobrazovat ve Studiu 5000 a zároveň i v prostředí Web Connect. Do „Template Name“ nutné zadat jméno projektu. Poté můžeme projekt finálně uložit zvolením „Save“ nebo zvolení „Save and New“, kde se po zvolení zobrazí další šablona, viz obr. 4.8.

Save Template

Template ID	Template Name
<input type="text" value="Search"/>	<input type="text"/>

Obr. 4.10 – Uložení projektu

V prostředí Web Connect je také možnost změnit nastavení pro Swift-E po zvolení „Settings“, viz obr. 4.7. Okno s nastavením, viz obr. 4.10, umožňuje změnit heslo pro vstup do rozhraní Web Connect, změnit IP adresu společně s maskou a bránou, nahrát nový firmware, restartovat Swift-E, obnovit tovární nastavení Swift-E a další uživatelsky méně potřebná nastavení.

Obr. 4.9 – Možnosti nastavení Swift-E přes Web Connect

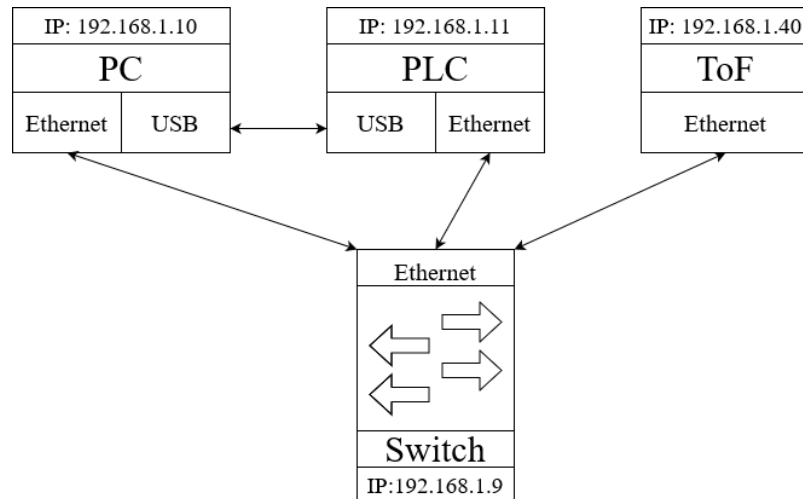
4.4 Studio 5000

Jedná se softwarový nástroj k vytváření aplikačních programů k řídicím systémům od firmy Allen-Bradley. Ovládání editoru je jednoduše zpracováno, což zaručuje rychlejší vývoj aplikačních programů. Studio 5000 je určeno zejména k programování PLC v jazycích jako

jsou Ladder Diagram, Function Block Diagram, Sequential Function Chart a Structured Text. V tomto případě je použito Studio 5000 pro připojení Swift-E k PLC Allen-Bradley CompactLogix™ 5380 a následné získání dat ze senzoru Swift-E (ControlTech, nedatováno).

4.5 Blokové schéma komunikace

Na obr. 4.11 je zobrazeno blokové schéma komunikace mezi PC, PLC, ToF a Switchem.



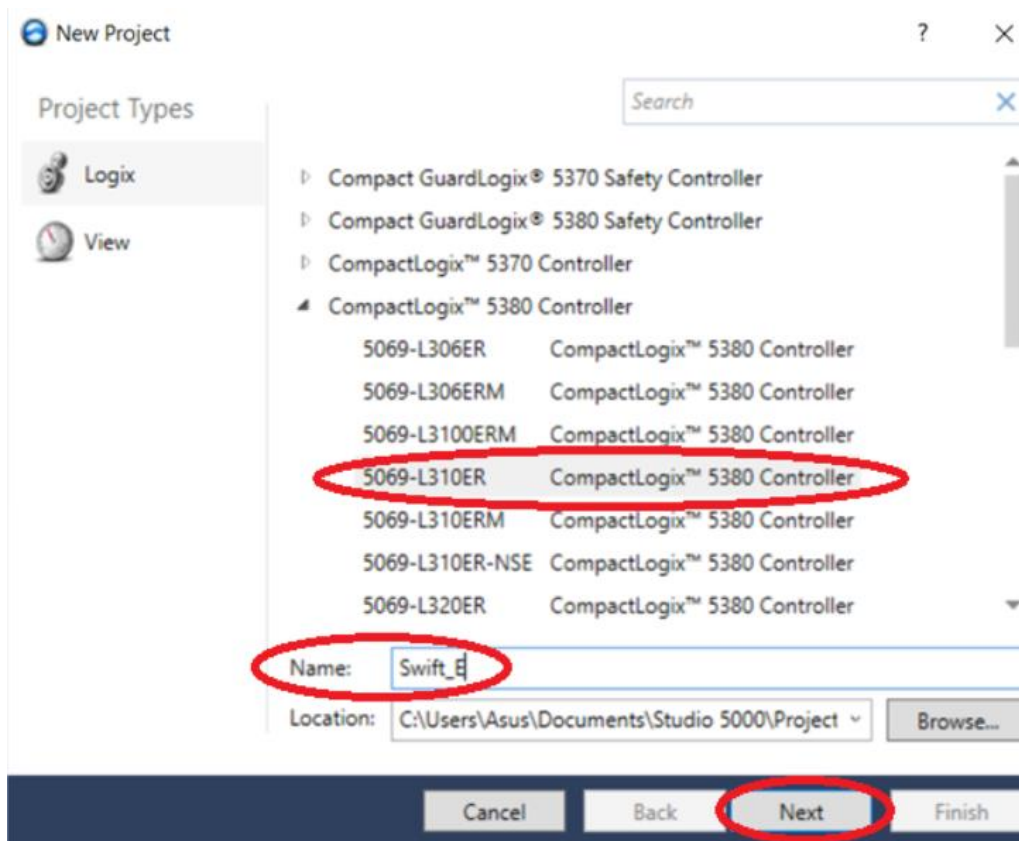
Obr. 4.11 – Blokové schéma komunikace

4.6 Vytvoření nového projektu a přidání Swift-E do Studia 5000

Po otevření Studia 5000 je nutné zvolit „New Project“, viz obr. 4.12, kdy po zvolení dojde k vytvoření nového projektu.



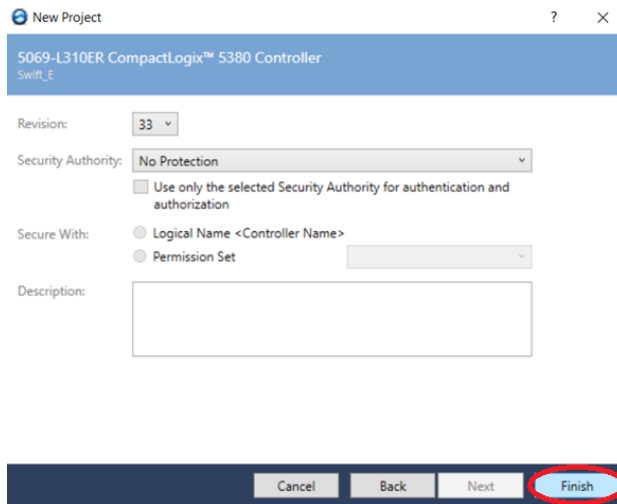
Obr. 4.12 – Úvodní strana Studia 5000



Obr. 4.13 – Vytvoření nového projektu

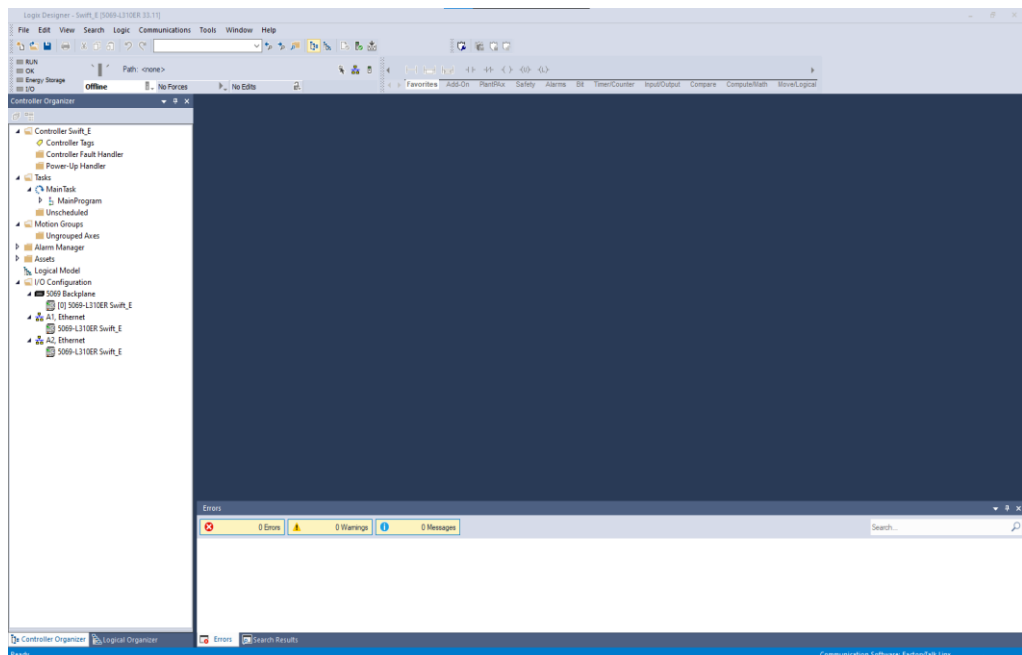
Po vytvoření nového projektu je nutné vybrat kontrolér, který je připraven k úvodnímu nastavení, viz obr. 4.13. V tomto případě se jedná o kontrolér CompactLogix™ 5380, model 5069-L310ER. Po zvolení kontroléru je projekt pojmenován a následně je zvoleno tlačítko „Next“.

V části pro nastavení revize a oprávnění je v tomto případě ponecháno vše přednastavené. Projekt je založen zvolením tlačítka „Finish“, viz obr. 4.14.



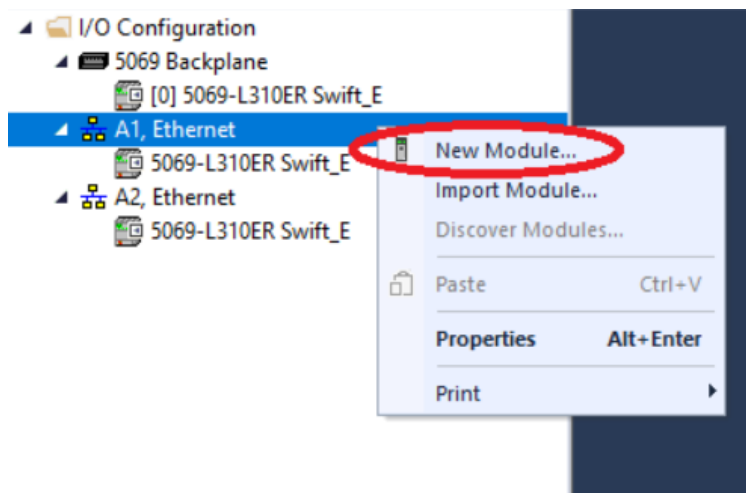
Obr. 4.15 – Finální založení projektu

Projekt je po založení prázdný, viz obr. 4.15. V následujících krocích je přidán do projektu modul Swift-E a následně je vytvořen jednoduchý Ladder diagram pro vyhodnocování přítomnosti objektu.



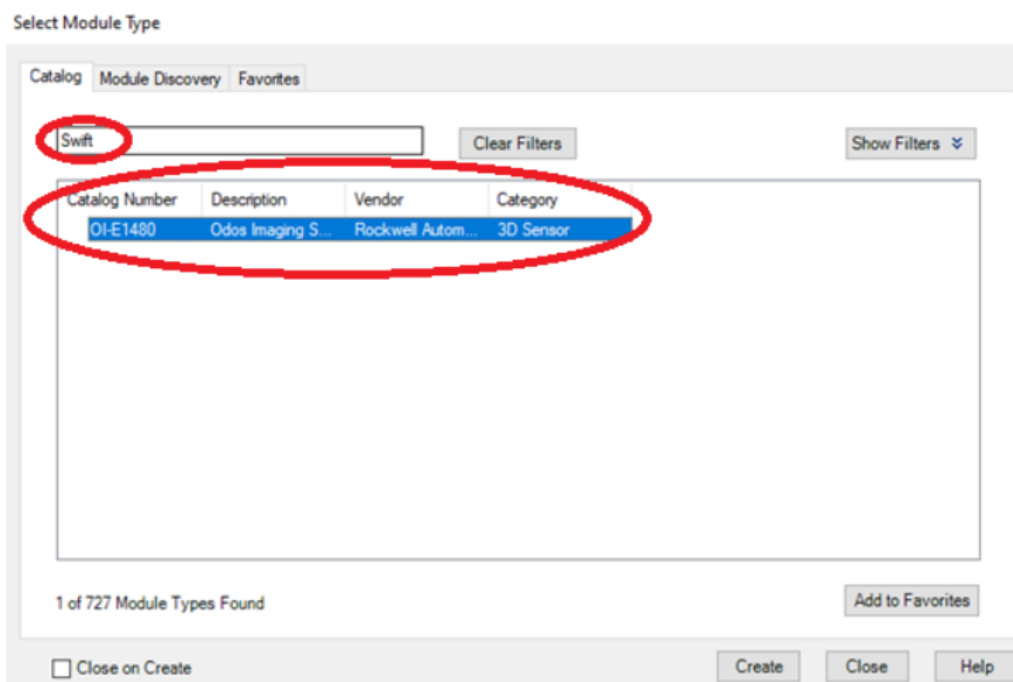
Obr. 4.14 – Vzhled Studia 5000 po založení projektu

Nový modul lze přidat zvolením pravého tlačítka myši po umístění kurzoru na ethernetový port A1. PLC CompactLogix™ 5380, model 5069-L310ER obsahuje dva ethernetové porty – A1 a A2. V tomto případě bude komunikovat Swift-E s ethernetovým portem A1.



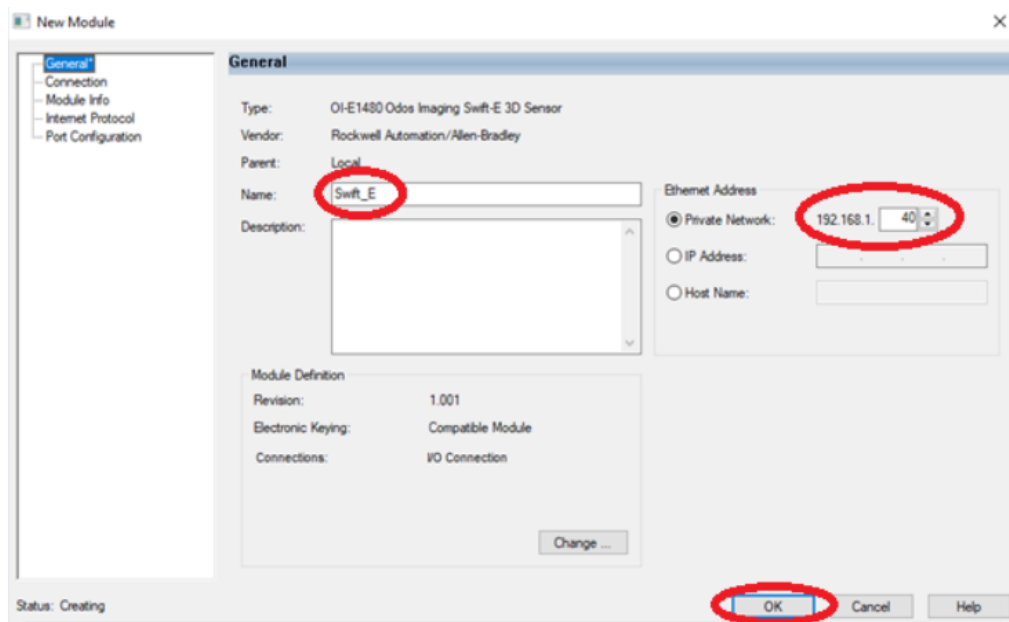
Obr. 4.16 – Přidání nového modulu do projektu

Modul Swift-E je možné najít v řádku pro vyhledávání pomocí zadání klíčových slov. V tomto případě bylo zadáno slovo „Swift“. Následně se v katalogu produktů zobrazila položka 3D senzoru.



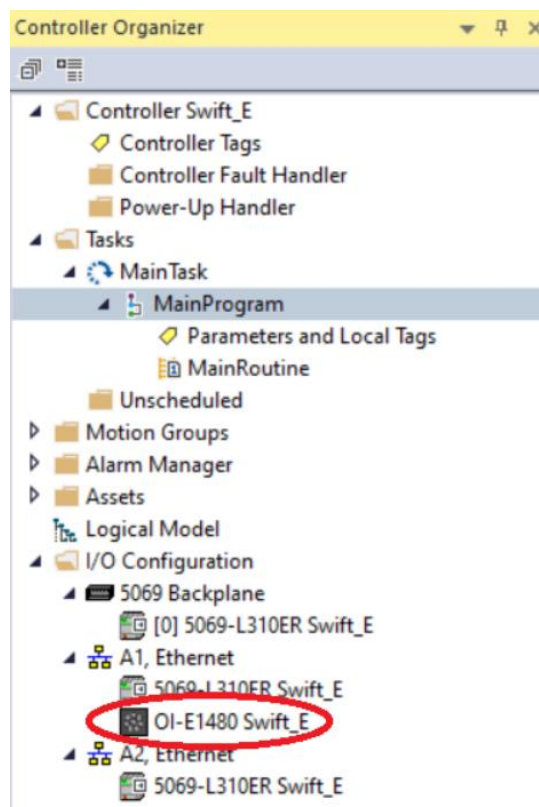
Obr. 4.17 – Nalezení Swift-E V katalogu modulů

Zobrazenou položku je nutné následně otevřít. Poté lze nastavit jméno modulu v tomto případě „Swift_E“ společně s IP adresou modulu. Změny je nutné potvrdit zvolením tlačítka „OK“, viz obr. 4.18.



Obr. 4.18 – Nastavení IP adresy Swift-E v Studiu 5000

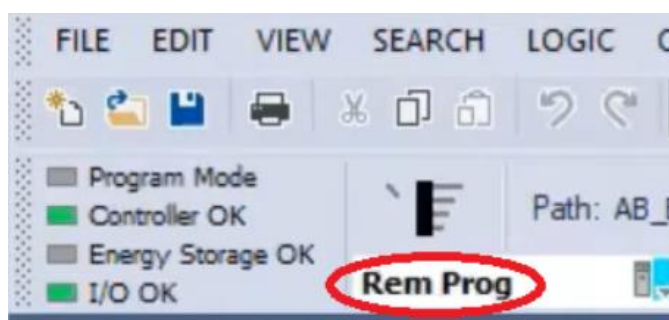
Následně je nutné okno pro přidávání modulů zavřít. V okně Controller Organizer, viz obr. 4.19, složka I/O Configuration lze vidět nově přidaný modul Swift_E.



Obr. 4.19 – Úspěšně přidány Swift-E ve Studiu 5000

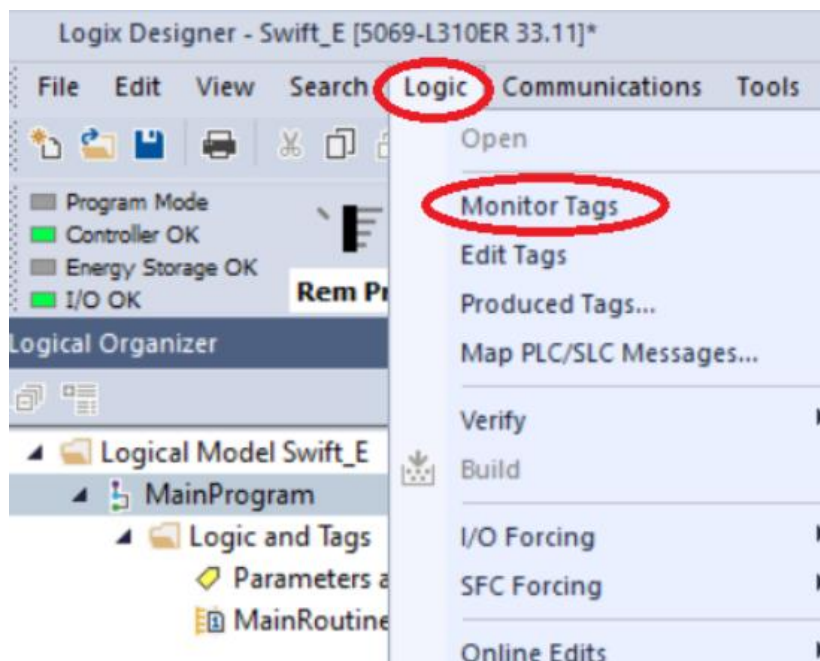
4.7 Monitorování dat z Swift-E ve Studiu 5000

Změny provedené při nastavování modulů je nutné nahrát do PLC a poté nastavit kontrolér do módu „Rem Prog“, viz obr. 4.20.



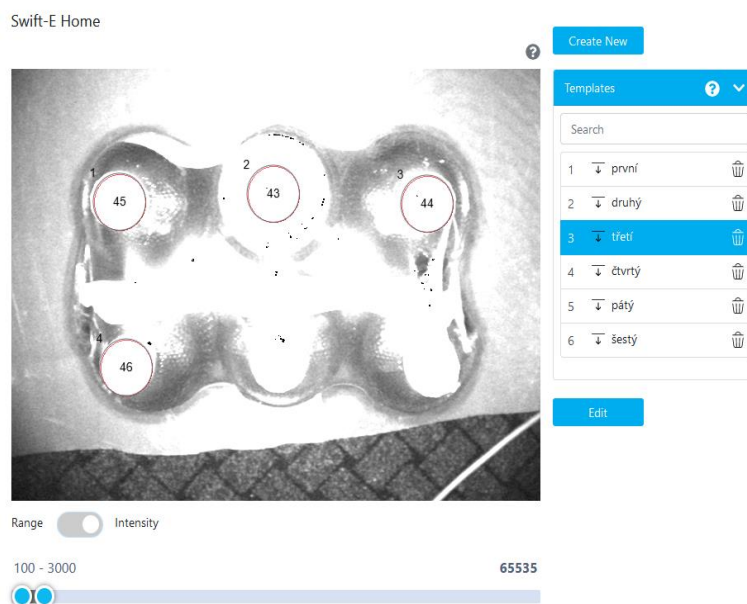
Obr. 4.20 – Nastavení PLC do módu Rem Prog

Následně je nutné otevřít Monitor Tags v kartě „Logic“, viz obr. 4.21. Po otevření Monitor Tags se zobrazí tabulka s daty z Swift-E, viz obr. 4.23.



Obr. 4.21 – Monitorování vstupně výstupních proměnných Swift-E

Na obr. 4.22 bylo jako pokusný předmět použito balení minerální vody Mattoni. Balení bylo umístěno pod Swift-E. Následně proběhlo vytvoření nové šablony v prostředí Web Connect s názvem „třetí“. Jako objekty byla v nové šabloně označena víčka čtyř lahví z balení. Následně došlo k uložení šablony.



Obr. 4.22 – Vytvoření šablony pro snímání 4 lahví

Po následování kroků z obr. 4.20 a 4.21 se zobrazí data z Swift-E. Data označená jako Data_VSZ1, Data_VSZ2, Data_VSZ3, Data_VSZ4 korespondují se vzdáleností objektů a s pořadím označených objektů z obr. 4.22 na obr. 4.23. Význam jednotlivých dat je patřičně zdokumentován v tab. 4.2.

Swift_E.I.ConnectionFaulted	0	Decimal	BOOL
▶ Swift_E.I.Status	0	Decimal	SINT
▶ Swift_E.I.Template_In_Use	3	Decimal	INT
▶ Swift_E.I.Number_of_VSZ	4	Decimal	SINT
▶ Swift_E.I.Trigger_Counter	4	Decimal	INT
▶ Swift_E.I.Data_VSZ1	45	Decimal	INT
Swift_E.I.Status_VSZ1	0	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Used_In_Template_VSZ1	1	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Type_VSZ1	0	Decimal	BOOL
▶ Swift_E.I.Data_VSZ2	43	Decimal	INT
Swift_E.I.Status_VSZ2	0	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Used_In_Template_VSZ2	1	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Type_VSZ2	0	Decimal	BOOL
▶ Swift_E.I.Data_VSZ3	44	Decimal	INT
Swift_E.I.Status_VSZ3	0	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Used_In_Template_VSZ3	1	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Type_VSZ3	0	Decimal	BOOL
▶ Swift_E.I.Data_VSZ4	46	Decimal	INT
Swift_E.I.Status_VSZ4	0	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Used_In_Template_VSZ4	1	Decimal	BOOL
Swift_E.I.Type_VSZ4	0	Decimal	BOOL

Obr. 4.24 – Vstupní proměnné z Swift-E ve Studiu 5000

▶ SwiftE:O.Template_To_Use	0	Decimal	INT
SwiftE:O.Trigger	0	Decimal	BOOL
SwiftE:O.Illumination_Pause	0	Decimal	BOOL
SwiftE:O.Web_Connect_Enable	0	Decimal	BOOL
SwiftE:O.Reset_Trigger_Counter	0	Decimal	BOOL
SwiftE:O.Clear	0	Decimal	BOOL

Obr. 4.23 – Výstupní proměnné

Obr. 4.24 obsahuje kopii obrazovky s výstupními daty ze Studia 5000 do Swift-E. Význam jednotlivých dat je zobrazen v tab. 4.3.

Tab. 4.2 – Vstupní data z Swift-E do Studia 5000 (Odos Imaging, 2020)

Označení	Datový typ	Popis
ConnectionFaulted	BOOL	Swift-E není připojen, ConnectionFaulted= 1. Swift-E je připojen, ConnectionFaulted= 0.
Status	SINT	Udává status z posledního měření. 0 – měření proběhlo v pořádku. 63 – probíhá měření, ale není dokončeno. 128 – vnitřní chyba.

Tab. 4.3 – Vstupní data z Swift-E do Studia 5000 - pokračování

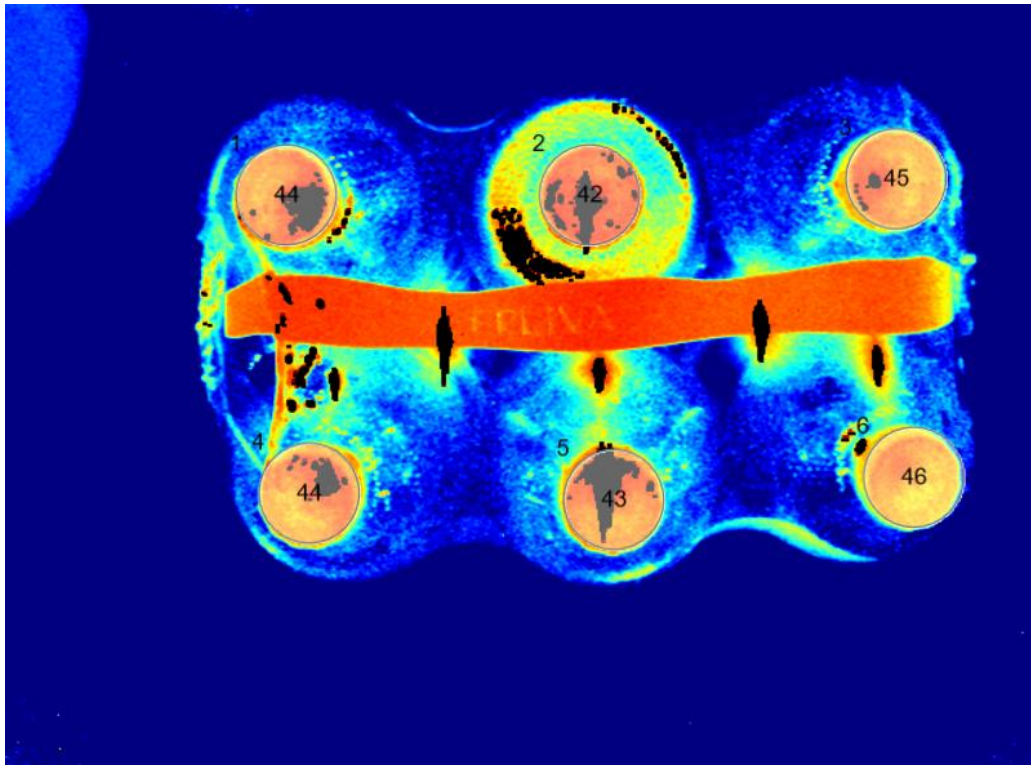
Template_In_Use	INT	Číslo aktuálně používané šablony.
Number_of_VSZ	SINT	Udává počet označených objektů v šabloně.
Trigger_Counter	INT	Inkrementuje po jedné při započítání nového měření.
Data_VSZx	INT	Vzdálenost objektu s číslem x od Swift-E udávaná v centimetrech. Pokud se zobrazí hodnota 999, předmět je mimo rozsah měření Swift-E.
Status.VSZx	BOOL	Pokud je vše v pořádku, hodnota je 0. V případě, že je předmět mimo rozsah, hodnota je 1.
Used_In_Template.VSZx	BOOL	V případě, že se objekt vyskytuje v snímané šabloně, hodnota je 1. Jinak je hodnota 0.
Type.VSZx	BOOL	Pokud VSZx=0 – data udávají vzdálenost objektu od senzoru. Pokud VSZx=1 – data udávají vzdálenost objektu od povrchu, na kterém leží.
Ve VSZx x udává počet vytvořených objektů v šabloně.		

Tab. 4.4 – Výstupní data ze Studia 5000 do Swift-E (Odos Imaging, 2020)

Označení	Datový typ	Popis
Template_To_Use	INT	Číslo šablony, které se přidá zařízení v dalším měření.
Trigger	BOOL	Při nastavení hodnoty Trigger na 1 dojde k zahájení měření.
Illumination_Pause	BOOL	Při nastavení hodnoty Illumination_Pause na 1 dojde k vypnutí napájení infradiod sloužících k měření vzdálenosti.
Web.Connect.Enable	BOOL	Pokud je Web.Connect.Enable nastaven na 1, je možné používat prostředí Web Connect i v RUN mode.
Reset_Trigger_Counter	BOOL	Pokud je Reset_Trigger_Counter nastaven na hodnotu 1, Trigger_Counter se resetuje.
Clear	BOOL	Při nastavení Clear na 1 dojde k vymazání vstupních dat ze senzoru do Studia 5000.

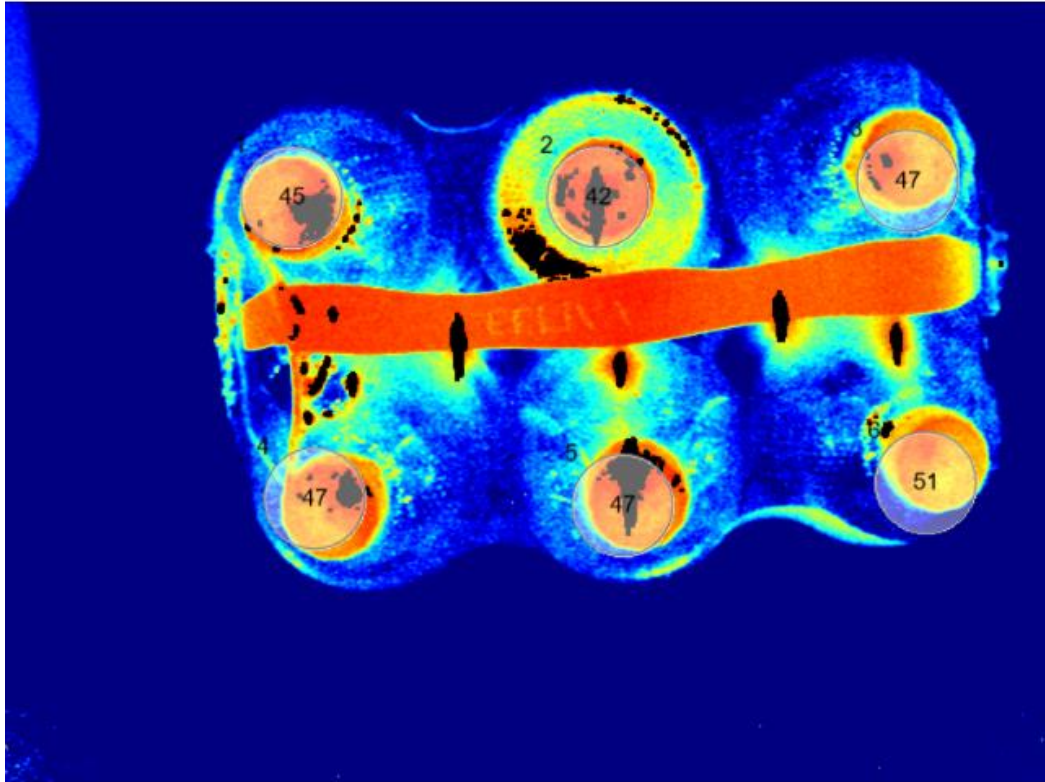
4.8 Natočení snímaných objektů z referenčního umístění

Na obr. 4.25 je umístěno balení PET lahví minerální vody Mattoni. Jako referenční body pro snímání aktuální polohy balení PET lahví jsou použita plastová víčka vyznačena kružnicemi v prostředí Web Connect. Jak si lze všimnout z obr. 4.25, tak čirý plastový obal, ve kterém jsou PET lahve zabalené, optický signál propouští. Naměřené hodnoty vzdálenosti na obr. 4.25 jsou: 44 cm, 42 cm, 45 cm, 44 cm, 43 cm a 46 cm.



Obr. 4.25 – Balení PET lahví s víčky vyznačenými kružnicemi

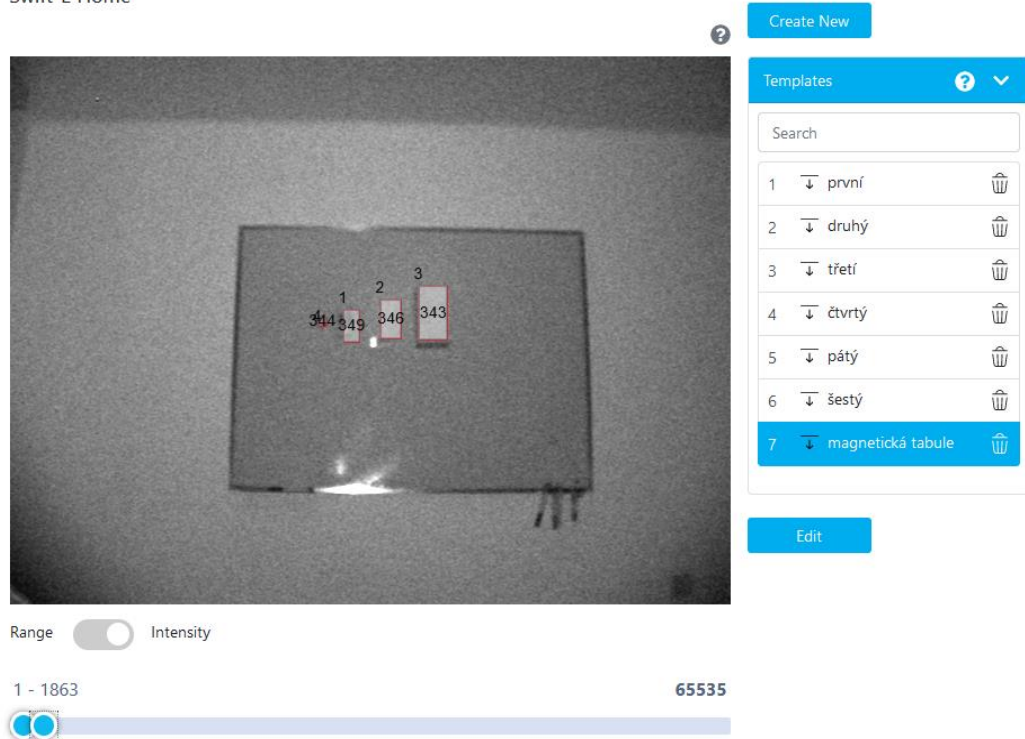
Na obr. 4.26 došlo k mírnému natočení plastového balení PET lahví z referenčního umístění. Jak lze vidět, tak všechny hodnoty objektů, až na hodnotu objektu umístěného v horní řadě uprostřed, se změnily. Při porovnání posunutí objektů z referenční polohy a změn jednotlivých dat lze konstatovat, že přesnost měření je v řádech desetin milimetru. Lze také poznamenat, že větší nepřesnost může vzniknout při kreslení polygonů kolem objektu, než nepřesností snímání Swift-E.



Obr. 4.26 – Pohnutí PET lahvemi z referenčního umístění

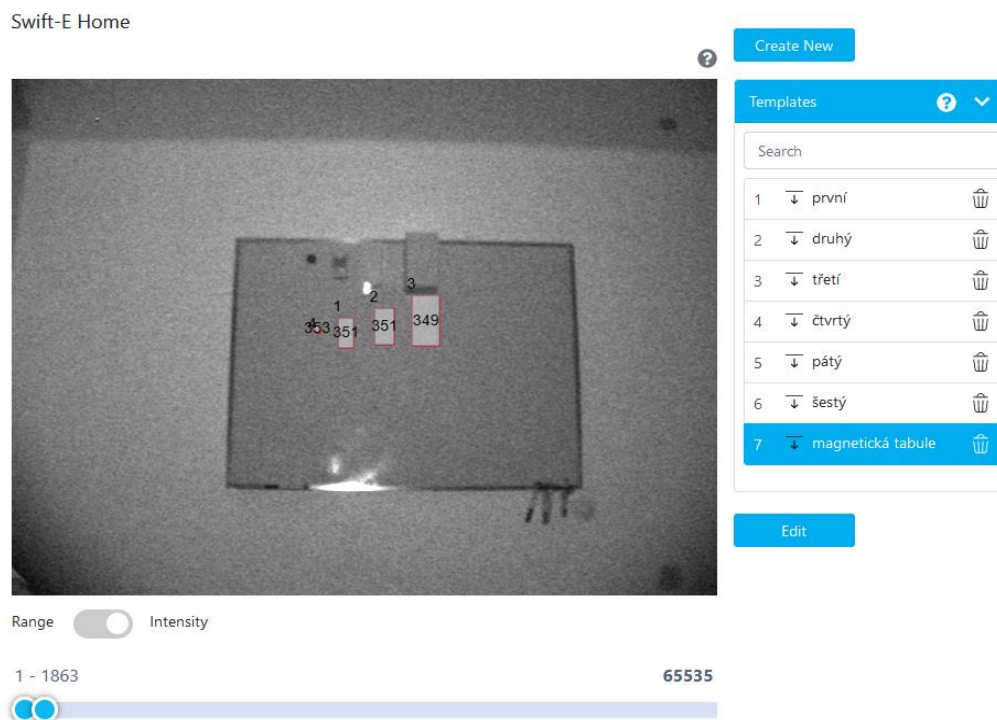
4.9 Snímání na větší vzdálenost

Plocha, na které jsou předměty, je umístěna 3200 mm od Swift-E. Rozměry snímaných předmětů, viz obr. 4.27, jsou následující: papírová krabice vpravo s rozměry 110×110×200 mm, papírová krabice druhá zprava s rozměry 160×60×60 mm, kruhový magnet vlevo s průměrem 30 mm a výškou 10 mm, papírová krabice druhá zleva s rozměry 100×50×20 mm.



Obr. 4.27 – Snímání objektů na větší vzdálenost

Na obr. 4.28 došlo k odebrání předmětů ze zóny, ve které byly v šabloně označené. Rozdíl skutečné versus naměřené výšky objektů lze dopočítat odečtením hodnot z obr. 4.27 a 4.28 a porovnáním vypočtených hodnot s uvedenou výškou předmětů. U prvních dvou předmětů zleva se výška skutečná versus naměřená rovná. U třetího předmětu zleva se výška skutečná versus naměřená liší o 1 cm. U posledního předmětu zleva je výška skutečná versus naměřená rozdílná o 5 cm.



Obr. 4.28 – Posunutí objektů z referenčního umístění

4.10 Test snímání Swift-E v zadýmeném prostředí výrobníkem mlhy

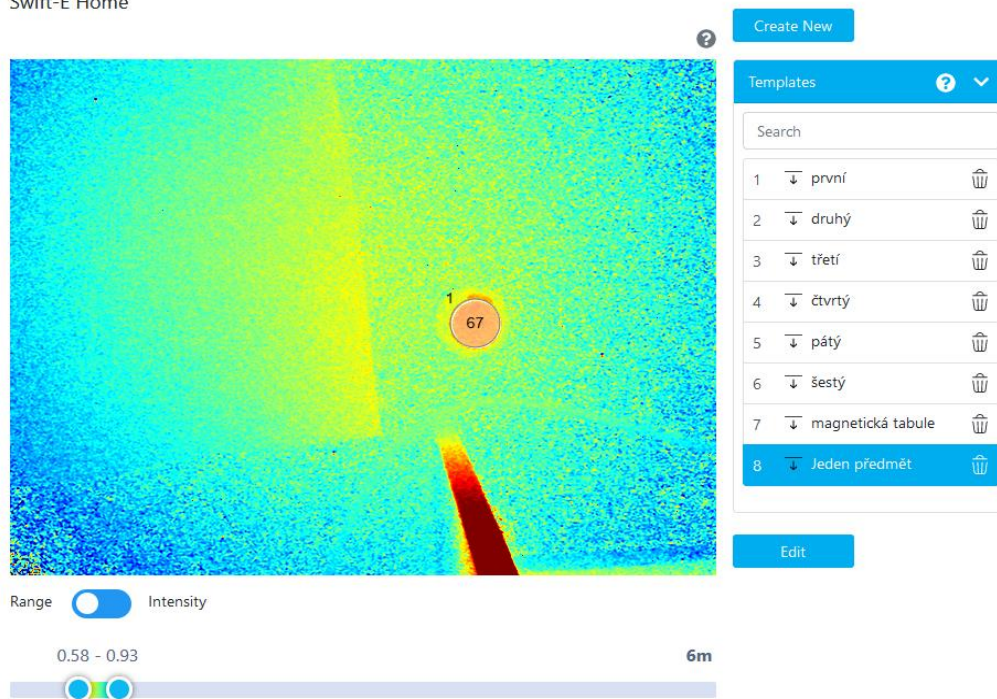
Na obr. 4.29 je zachyceno snímání v zamlženém prostředí. Jako výrobek pro vytvoření mlhy byl použit BeamZ Rage 600LED s výkonem topného tělesa 600 W a výstupním objemem páry až 65 m³ za minutu. Jako náplň do výrobníku mlhy byla použita kouřová kapalina BeamZ FSMF5L Smokefluid. Výrobník mlhy byl položen na druhou stranu místnosti od Swift-E. Poté byl spuštěn po dobu 20 s. Před započítáním snímání byla stanovena pauza o délce 2 min, aby se pára mohla rozšířit po celé místnosti. Výsledky z měření bez přítomnosti páry a za přítomnosti páry lze porovnat z obrázků 4.27 a 4.29. Provedení pokusu mělo za cíl vyzkoušet odolnost snímání vůči podmínkám, které mohou nastat i ve výrobním procesu. Výsledky snímání po zamlžení místnosti párou jsou neuspokojivé.



Obr. 4.29 – Test přesnosti snímání s párou v místnosti

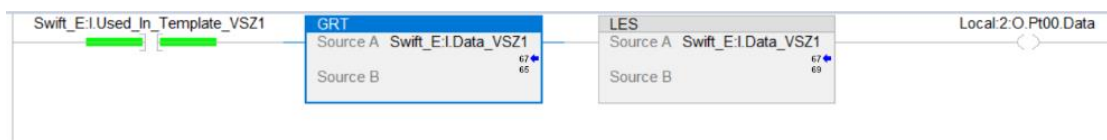
4.11 Jednoduchý program pro detekci předmětu v Studiu 5000

Na obr. 4.30 bylo jako snímáný předmět použito plastové balení od žvýkaček Orbit. Byla vytvořena nová šablona v prostředí Web Connect s názvem „Jeden předmět“. Naměřená vzdálenost objektu ze Swift-E činila 67 cm.



Obr. 4.31 – Snímaný předmět v rozhraní Web Connect

Obr. 4.31 obsahuje program napsaný v Ladder diagramu podle normy IEC 61 131 -3 (ČSN EN 61 131-3, 2013). Program nejprve zjistí, jestli se předmět vyskytuje v označeném prostoru na obr. 4.30. Následně jsou použity dva bloky pro porovnávání, zda je snímaná plocha předmětu rovna 67 cm s tolerancí ± 2 cm. Při splnění těchto podmínek je výstupní kanál 0 modulu 5069-OB16 nastaven na +24V.



Obr. 4.30 – Ladder diagram pro detekci jednoho objektu

5 ZÁVĚR

Přednostním úkolem práce bylo seznámit se s 3D snímacím senzorem Swift-E od společnosti Odos Imaging spadající pod Rockwell Automation a následně pomocí vybraného software zvládnout detekovat patřičný objekt. Vyhodnocení dat o poloze objektu následně provést v nadřazeném řídicím systému konkrétně v PLC CompactLogix™ 5380, model 5069-L310ER dodaném firmou SPEL a.s. k provedení práce.

Hlavním poznatkem práce byly způsoby komunikace Swift-E s jinými zařízeními jako jsou PC, PLC a možnosti vyhodnocování dat pro nadřazené řídicí systémy. V práci proběhla zároveň analýza zorného pole Swift-E.

Swift-E byl během práce důkladně otestován a získané poznatky zde byly zdokumentovány. Mezi zjištění možné problematiky patří nepřesnost měření vzdálenosti. Swift-E byl umístěn 3200 mm od plochy, na kterou byly umístěny i snímané předměty. Naměřená vzdálenost Swift-E od plochy s předměty se pohybovala mezi 3490 mm a 3530 mm. Přesnost výšky snímaných objektů versus jejich reálná velikost se také neshodovala, nicméně při opakovaném umístění objektu do snímané oblasti byla naměřená vzdálenost pokaždé stejná. Z tohoto poznatku lze konstatovat, že zobrazované hodnoty v prostředí Web Connect nelze použít pro určování reálné vzdálenosti. Ovšem naměřené hodnoty vzdáleností lze použít v projektu pro detekování patřičného objektu.

Mezi další poznatky patří citlivost snímání Swift-E vůči prostředí. Po lehkém zamlžení místnosti došlo k znatelným změnám při snímání. Světelné paprsky se od částic mlhy odrážely dřív, než dopadly na snímanou plochu, tím pádem bylo snímání značně zkreslené. Při použití Swift-E v reálném průmyslovém prostředí se musí dbát na čistotu prostředí, kdy prach, dým nebo jiné částice mohou znemožnit přesné snímání prostoru.

Swift-E má maximální výkon 60 W. Po 2 hodinách zapojení Swift-E k napájení v pokojové teplotě 20 °C dosahovala teplota šasi Swift-E kolem 50 °C. Při provozu 24/7 v prostředí, kde teplota dosahuje vyšších hodnot, by mohlo dojít k přehřátí senzoru. Jako řešení se nabízí umístění pasivního chladiče nebo v lepším případě na Swift-E umístit aktivní chlazení v podobě ventilátoru.

Swift-E je určený především ke snímání objektů do vzdálenosti 6 m. Ve vzdálenosti 6 m je vypočtené zorné pole 4726,926×3554,561 mm, což umožňuje detekovat objekty v poměrně velkém prostoru. Objekty je možné detekovat prostřednictvím Web Connect až v 255 šablonách, kdy do každé šablony lze detekovaný objekt zakreslit s jiným pootočením. Pokud

by ovšem objekt ve tvaru polygonu dojel nad polohu pro jeho detekci v jiném natočení, než by bylo v šablonách zhotoveno, mohlo by dojít k nepřesnému vyhodnocení přítomnosti objektu.

Se Swift-E je dále nemožné detekovat 2 stejné předměty s rozdílným obsahem. Například pokud by došlo k detekování PET lahev od společnosti Mattoni a PET lahev od společnosti Magnesia se stejným tvarem PET lahve, Swift-E by byl pro tento úkol nevhodným senzorem.

Pokud by společnosti SPEL a.s. Swift-E pro řešenou problematiku automatizovaný prostor Swift-E nevyhovoval, nabízí se zde ještě možnost výměny Swift-E za podobný výrobek od stejného výrobce – Swift-G. Swift-G nabízí výstup ve formátu Point Cloud s až 44 fps. Výstupní Point Cloud data z Swift-G je na rozdíl od Swift-E možné dál libovolně modifikovat.

Swift-E je vhodným snímacím senzorem pro prostory, kde jsou objekty vždy umístěny, např. pomocí průmyslového robota, na konkrétní místo s přesností v jednotkách μm . Předmětů může být průmyslovým robotem do konkrétního prostředí umísťováno tolik, aby se vešly do 255 šablon v prostředí Web Connect s tím, že v každé šabloně může být až 64 detekovatelných objektů. Jednotlivé šablony mohou obsahovat různé předměty nebo stejné předměty s různým natočením. Využití Swift-E pro tzv. „bin picking“, kdy jsou předměty libovolně umístěné v prostoru a robotické rameno má za úkol vyhodnotit aktuální polohu předmětu a patřičně jej uchopit, je nevhodné.

POUŽITÁ LITERATURA

- .XYZ Přípona souboru, © 2021. *AUTODESK* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z:
<http://docs.autodesk.com/ACD/2014/CSY/index.html?url=files/GUID-C0C610D0-9784-4E87-A857-F17F1F7FEEBE.htm,topicNumber=d30e160779>
- About, © 2021. *Point Cloud Library* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z:
<https://pointclouds.org/>
- BRABEC, Petr, © 2021. Vznik a druhy vlnění. *FYZIKA 007* [online]. [cit. 2021-05-10].
Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vznik-a-druhy-vlneni>
- ČSN EN 61 131-3. Programovatelné řídicí jednotky - Část 3: Programovací jazyky. Praha:
Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 238 s. Třídící
znak 187050.
- Dopplerův jev, © 2021. *Armáda České republiky* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z:
https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k14.htm
- GRAY, David, © 2021. *What are point clouds? 5 easy facts that explain point clouds*
[online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://info.vercator.com/blog/what-are-point-clouds-5-easy-facts-that-explain-point-clouds>
- HUGHES, Mark, 2019. How Do Time of Flight Sensors (ToF) Work? A Look at ToF 3D
Cameras. *ALL ABOUT CIRCUITS* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z:
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-do-time-of-flight-sensors-work-pmdtechnologies-tof-3D-camera/>
- CHAKRAVORTY, Dibya, 2018. OBJ File Format – Simply Explained. *All3DP* [online]. [cit.
2021-05-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/obj-file-format-3d-printing-cad/>
- CHAKRAVORTY, Dibya, 2019. STL File Format (3D Printing) – Simply Explained. *All3DP*
[online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- Jak fungují sonary, © 2021. *Deeper* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z:
https://deeperonar.com/cz/cs_cz/jak-to-funguje/jak-funguji-sonary
- KADLEC, Karel, 2013. Ultrazvukové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. *Automa*
[online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z:
https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10538.pdf
- KRÁLOVÁ, Magdaléna, © 2021. ODRAZ A LOM SVĚTLA. *Techmania Science Center*
[online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z:
<https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/odraz-lom-svetla>

- Mechanické vlnění* [online], 2013. SPŠ el-it Dobruška [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/friede/3%20Mechanicke%20vlneni.pdf>
- MICHALEC, Libor, 2020. EtherNet / IP versus PROFINET. *Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ethernet-ip-versus-profinet.html>
- O vytváření a připojení dat mračna bodů, © 2021. *REVIVERSOFT* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.reviversoft.com/cs/file-extensions/xyz>
- Piezoelektrické jevy, © 2021. *ČVUT* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf
- RIPKA, Pavel, 2003. *Master books on sensors*. Part A. BEN. ISBN 80-7300-129-2.
- RSLinx® Classic™, 2021. *ControlTech* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.controltech.cz/sk/produkty/item/1082-rslinx-classictm>
- RSLogix™ 500 a Studio 5000® Logix Designer, © 2021. *ControlTech* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.controltech.cz/cz/produkty/item/1075-rslogixtm-500-a-studio-5000-logix-designer>
- Snímače mechanického namáhání – piezoelektrický jev?, © 2021. *ELUC* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590>
- Stemmer Imaging to Distribute Odos Imaging TOF 3D Cameras, 2018. *Novus Light* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.novuslight.com/stemmer-imaging-to-distribute-odos-imaging-tof-3d-cameras_N8357.html
- Swift-E reconfigurable 3D Sensor, 2020. *Odos Imaging* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.odos-imaging.com/wp-content/uploads/2020/05/OIE1-UM001B-EN-P.pdf>
- Šíření zvuku. Rychlost zvuku, © 2021. *ELUC* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1670>
- The most disgusting voice of the sonar soldier, the active sonar hits the hull, and the submarine can't hide, 2021. *INEWS* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://inf.news/en/military/bebf96c7f31cad37bb21193cf7996b6.html>
- THOMSON, Charles, © 2021. Common 3D point cloud file formats & solving interoperability issues. *VERCATOR* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://info.vercator.com/blog/what-are-the-most-common-3d-point-cloud-file-formats-and-how-to-solve-interoperability-issues>
- TIME-OF-FLIGHT TECHNOLOGY, © 2021. *Odos Imaging* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.odos-imaging.com>
- Ultrazvuková diagnostika, 2013. *Lékařská fakulta Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.med.muni.cz/biofyz/zobrazovacimetody/files/Ultrazvuk.pdf>

What is an Ultrasonic Sensor?, © 2021. *KEYENCE* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z:
<https://www.keyence.com/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/info/>

PŘÍLOHY

A – CD

Příloha k bakalářské práci

Použití ToF senzoru pro detekci a lokalizaci předmětů ve výrobě

Václav Sháněl

CD

Obsah

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF.