

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Dominik SEDONJA

**RAZVOJ IN IZDELAVA STROJNE OPREME LOKALNEGA
SISTEMA ZA DOLOČANJE POLOŽAJA**

Magistrsko delo
študijskega programa 2. stopnje
Meatronika

Maribor, junij 2020



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Fakulteta za strojništvo

RAZVOJ IN IZDELAVA STROJNE OPREME LOKALNEGA SISTEMA ZA DOLOČANJE POLOŽAJA

Magistrsko delo

Študent:	Dominik SEDONJA
Študijski program:	študijski program 2. stopnje Mehatronika
Mentor FS:	izr. prof. dr. Tone LERHER
Mentor FERI:	doc. dr. Darko HERCOG

Maribor, junij 2020



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Fakulteta za strojništvo

Številka: M-BM0055

Datum in kraj: 19.03.2020, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Uradni list RS, št. 29/2017–UPB12, 32/2019 in 14/2020)
izdajam:

SKLEP O ZAKLJUČNEM DELU

DOMINIKU SEDONJI, študentu magistrskega študijskega programa druge stopnje **MEHATRONIKA**, se dovoljuje izdelati zaključno delo.

Tema zaključnega dela je pretežno s področja **Katedre za proizvodno strojništvo**.

Mentor FS: **izr. prof. dr. TONE LERHER**
Mentor FERI: **doc. dr. DARKO HERCOG**
Zunanji delovni somentor: /

Naslov zaključnega dela: **Razvoj in izdelava strojne opreme lokalnega sistema za določanje položaja**

Naslov zaključnega dela v angleškem jeziku: **Development and Manufacture of Hardware of a Local Positioning System**

Rok za izdelavo in oddajo zaključnega dela je: **19.03.2021**. Zaključno delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za pripravo magistrskega dela« in ga v treh izvodih oddati v pristojnem referatu članice. Hkrati se odda tudi izjava mentorjev o ustreznosti zaključnega dela ter poročilo o preverjanju podobnosti z drugimi deli.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat članice v roku 10 delovnih dni od dneva prejema sklepa.

Dekan:

red. prof. dr. Bojan Dolšek



Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- odložiti v arhiv.

FS

IZJAVA

Podpisani Dominik SEDONJA, izjavljam, da:

- je magistrsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- predloženo delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- so rezultati korektno navedeni,
- nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih,
- soglašam z javno dostopnostjo magistrsko dela v Knjižnici tehniških fakultet ter Digitalni knjižnici Univerze v Mariboru, v skladu z Izjavo o istovetnosti tiskane in elektronske verzije zaključnega dela.

Maribor, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorjema doc. dr. Darku HERCOGU in izr. prof. dr. Tonetu LERHERJU za strokovno pomoč in vodenje pri opravljanju magistrskega dela.

Zahvaljujem se tudi vsem ostalim, ki so na kakršenkoli način pomagali pri izdelavi diplomskega dela.

Posebna zahvala gre družini, ki mi je omogočila študij in me ves čas izobraževanja podpirala.

RAZVOJ IN IZDELAVA STROJNE OPREME LOKALNEGA SISTEMA ZA DOLOČANJE POLOŽAJA

Ključne besede: DWM1000, ESP32-WROVER, LPS, tiskano vezje

UDK: 621.3.049.75(043.2)

POVZETEK

V magistrskem delu je opisan potek izdelave prototipov strojnega dela lokalnega sistema za določanje položaja. Strojni del sestoji iz tiskanih vezij (napajalni in krmilni modul) in plastičnih s 3D tiskalnikom natisnjenih ohišij. Za delovanje sistema so potrebni vsaj štirje kompleti – 3x fiksni objekt (anchor) in 1x premikajoči objekt (tag), ki med seboj komunicirajo preko senzorskega modula DWM1000 in krmilnika ESP32-WROVER. Z uporabo metode trilateracije se na podlagi treh razdalj izračunava položaj premikajočega objekta v prostoru. Predstavljeni so tudi rezultati testiranja, ki je potekalo na poligonu brez ovir površine 4 m² (kvadratno polje 2x2 m – s točkami na razdalji 25 cm).

DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF HARDWARE OF A LOCAL POSITIONING SYSTEM

Key words: DWM1000, ESP32-WROVER, LPS, PCB

UDK: 621.3.049.75(043.2)

ABSTRACT

The master's thesis describes the process of development and manufacture prototypes of hardware of a local positioning system. Hardware consists PCBs (power supply and control modules) and plastic 3D printed housings. At least four sets are required for the system to work - 3x fixed object (anchor) and 1x moving object (tag), which communicate with each other via the DWM1000 sensor module and the ESP32-WROVER controller. The position of the tag in specific area is calculated on the basis of three distances using the trilateration method. At the end the results of the testing on a polygon without obstacles with an area of 4 m² (square field 2x2 m - with points at a distance of 25 cm) are presented.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	STANJE TEHNIKE AVTOMATSKO VODENIH VOZIL (AGV)	3
2.1	Avtomatsko vodena vozila z magnetnim trakom	6
2.2	Avtomatsko vodena vozila z 2D laserjem.....	8
2.3	Avtomatsko vodena vozila s strojnim vidom.....	10
2.4	Naravno avtomatsko vodena vozila.....	11
2.5	AGV rešitve na trgu	13
3	IDEJNA ZASNOVA LASTNEGA SISTEMA.....	17
3.1	Tehnologija.....	17
3.1.1	UWB.....	18
3.1.2	Določanje razdalje preko ToF	18
3.2	Algoritem računanja	20
3.3	Modularnost	21
4	RAZVOJ IN IZDELAVA SISTEMA.....	22
4.1	Napajalni del	24
4.2	24 V napajalnik.....	24
4.3	230 V napajalnik.....	25
4.4	Krmilni del.....	26
4.4.1	ESP32-WROVER	27
4.4.2	DWM1000.....	28
4.4.3	Zgradba krmilne enote	30
5	IZDELAVA OHIŠJA.....	35
5.1	3D modeliranje.....	35
5.2	3D tisk	37

5.3	Material in postopek	37
5.4	Generiranje kode.....	38
5.5	Tisk.....	39
6	STROŠKOVNA ANALIZA	41
6.1	Vežja	41
6.2	Ohišja in ostali stroški.....	43
6.3	Skupni stroški projekta	43
7	TESTIRANJE	44
7.1	Zajemanje podatkov z LabVIEW-om	45
7.2	Rezultati	47
8	PREGLED REZULTATOV IN DISKUSIJA	50
9	SKLEP	52
10	BIBLIOGRAFIJA	53

KAZALO SLIK

Slika 2.1: viličar, vozilo za prevažanje velikih bremen in vlečno vozila [1].....	4
Slika 2.2: tricikel, diferencialni tip, štirikolesni tip [1]	5
Slika 2.3: delitev glede na tip vodenja oz. navigacije AGV-ja [8].....	6
Slika 2.4: osnovni princip zaznavanja magnetnega traku za vodenje AGV-ja [11].....	7
Slika 2.5: pozicioniranje LGV-ja v prostoru [5]	9
Slika 2.6: zaznavanje okolice AGV-ja s strojnim vidom in dodatnimi senzorji [10]	11
Slika 2.7: princip merjenja razdelja do bližnjih objektov [15]	13
Slika 2.8: KUKA KmR iiwa [17].....	14
Slika 2.9: Raymond Courier 3010 v svojem delovnem okolju [18].....	15
Slika 2.10: TPV Optimatik 160 [19]	16
Slika 3.1: določanje časa preleta [21]	19
Slika 3.2: osnovni princip trilateracije v 2D prostoru [25].....	21
Slika 4.1: postopek izdelave vezja	23
Slika 4.2: shema vezja napajalnika 24 V	25
Slika 4.3: izdelan napajalnik 24 V.....	25
Slika 4.4: shema vezja napajalnika 230 V	26
Slika 4.5: izdelan napajnik 230 V	26
Slika 4.6: ESP32-WROVER.....	27
Slika 4.7: DWM1000	29
Slika 4.8: izdelan krmilni modul.....	30
Slika 4.9: napajani del krmilnega vezja.....	31
Slika 4.10: USB - programatorski del	32
Slika 4.11: stikalna logika.....	33
Slika 4.12: krmilnik s senzorskim modulom	34

Slika 5.1: 3D model ohišja.....	36
Slika 5.2: dimenzijska risba ohišja	36
Slika 5.3: lastnosti materiala PLA [22]	37
Slika 5.4: postopek FDM [23].....	38
Slika 7.1: testiranje sistema na poligonu 2x2 m	44
Slika 7.3: programski del.....	45
Slika 7.4: nastavitveno okno	46
Slika 7.5: čelna plošča uporabniškega vmesnika	46
Slika 7.6: primer shranjenih rezultatov v datoteki	47
Slika 7.7: rezultati v grafikonu - stolpična oblika	48
Slika 7.8: Meritev v točki	49
Slika 8.1: končni izdelek – napajalni in krmilni moduli v ohišju.....	50

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 5.1: čas tiskanja.....	40
Preglednica 6.1: seznam komponent in stroškovna analiza DC/DC pretvornika	41
Preglednica 6.2: seznam komponent in stroškovna analiza AC/DC pretvornika	41
Preglednica 6.3: seznam komponent in stroškovna analiza krmilnega modula	42
Preglednica 6.4: stroški tiska in dodatnih komponent za delovanje sistema	43
Preglednica 6.5: skupni stroški projekta	43

UPORABLJENI SIMBOLI

€	evro
°C	stopinja Celzija
A	amper (enota za tok)
c	centi (10^{-2})
F	farad
G	giga (10^6)
h	ura
Hz	hertz
k	kilo (10^3)
M	mega (10^9)
m	meter
m	mili (10^{-3})
min	minuta
n	nano (10^{-9})
s	sekunda
u	mikro (10^{-6})
V	volt (enota za napetost)
W	watt (enota za moč)
μ	mikro (10^{-6})
Ω	ohm

UPORABLJENE KRATICE

2D	two-dimensional	dvodimenzionalen
3D	three-dimensional	tridimenzionalen
ABS	acrylonitrile butadiene styrene	plastika akrilonitril butadien stiren
AC	alternating current	izmenični tok
AGV	automated guided vehicle	avtomatsko vodeno vozilo
BLE	bluetooth low energy	bluetooth z nizko porabo energije
DC	direct current	enosmerni tok
FDM	fused deposition modeling	modeliranje talilnih nanosov
GPIO	general purpose input/output	splošno namenski vhod/izhod
GPS	global positioning system	globalni sistem za določanje pozicije
LED	light emitting diode	svetleča dioda
LGV	laser guided vehicle	lasersko vodeno vozilo
LPS	local positioning system	lokalni sistem za določanje pozicije
MCU	microcontroller unit of product data	mikrokrminiška enota podatkov o izdelku
PCB	printed circuit board	tiskano vezje
PETG	polyethylene terephthalate	plastika polietilen tereftalat
PLA	polylactic acid	plastika poliaktid
RF	radio frequency	radijska frekvenca
RFID	radio frequency identification	radiofrekvenčna identifikacija
RTLS	real-time locating system	sistem za lociranje v realnem času
SDV	self driving vehicle	samovozeče vozilo
SLA	stereolithography	stereolitografija

STEP	standard for the exchange	standard za izmenjavo
TDoA	time difference of arrival	časovna razlika prihoda
ToF	time of flight	čas preleta
USB	universal serial bus	univerzalno serijsko vodilo
UWB	ultra-wideband	ultra širokopasovno
VGW	vision guided vehicle	vozilo vodeno s strojnim vidom
Wi-Fi	Wireless Network	brežžično omrežje

1 UVOD

Sodobna velikoserijska industrija stremi k zmanjševanju stroškov na vseh področjih. V industriji 4.0 se to kaže predvsem z vpeljevanjem inteligentnih omrežij, v katere je vključen praktično vsak člen določenega industrijskega obrata. Za vpeljevanje tovrstne tehnologije v t.i. pametne tovarne je potrebno biti inovativen in uporabljati najnovejše tehnološke rešitve na vseh področjih. Kljub visoki stopnji avtomatizacije so rezerve še vedno prisotne, kar se lepo kaže pri transportu znotraj proizvodnih in tudi drugih obratov. Kot vemo človek za tovrstno delo ni nujno potreben, zato ga ves čas izpodriva robot. Na ta način se uporabniki tovrstnih robotov »znebijo« človek, ki ni tako zanesljiv, hkrati pa so takšna dela pogosto zdravju škodljiva (pretežka, ponavljajoča se, monotona, ...) . Tako optimizirajo svoj sistem transporta znotraj lastnega objekta (izbiranje optimalnih poti in optimalno izbiranje delovnih nalog – skrajševanje časa transporta). Uporaba podobnih transportnih sistem ni revolucionarna novost, saj obstaja že kar nekaj časa, a do sedaj uporabljeni sistemi za vodenje tovrstnih transportnih sredstev za pravilno delovanje potrebujejo dodatne elemente (magnetni trak, vnaprej programirane transportne poti, ...). Evolucija torej narekuje izdelavo sistema, pri katerem transportna sredstva za svoje pozicioniranje uporabljajo poleg osnovnih senzorjev za zaznavanje bližnje okolice še brezžični lokalni sistem za določanje njihovega točnega položaja (local positioning system - LPS) v prostoru.

V sklopu magistrskega dela je bil razvit in izdelan strojni del napajalnega in krmilnega dela za lokalni sistem za določanje položaja. Tovrsten sistem je primeren za delovanje znotraj omejenega prostora, kjer GPS ne pride v poštev (zaprti prostori). V skladu z metodologijo raziskovanja je bil narejen pregled rešitev na trgu in izdelana rešitev, ki ima dodano vrednost napram že obstoječim sistemom. Prednosti je v bistvu več in sicer so to:

- uporaba USB tipa C za napajanje in nalaganje programa na krmilnik,
- modularna sestava napajalno krmilnega modula in
- nizka cena, saj se celotni krmilni modul z vključenim senzorsko aktuatorskim delom nahaja na eni tiskanini (PCB-ju).

Magistrska naloga je osredotočena na izdelavo strojne opreme potrebne za vgradnjo in testiranje v lastnem lokalnem pozicijskem sistemu.

Cilji magistrskega dela:

- razvoj in izdelava napajalnega modula,
- razvoj in izdelava krmilnega modula,
- izbira optimalnih elektronskih komponent,
- uporaba mikrokrmilnika ESP-WROOM-32,
- uporaba enote DWM1000 za merjenje razdalje,
- testiranje delovanja izdelanega sistema,
- preizkus delovanja sistema v resničnem okolju.

Raziskovalne hipoteze magistrskega dela:

- Z uporabo trenutnih komponent in tehnologij je mogoče izdelati nizkocenovni sistem za lokalno določitev položaja premičnih objektov.
- krmilni modul je možno nadgraditi oz. posodobiti z uporabo USB tip C za nalaganje programa na krmilnik,
- enotno napajalno platformo bo možno vgraditi v avtomatsko vodeno vozilo (AGV) in nanjo priključiti tudi ostalo periferijo, kakor tudi uporabiti za napajanje fiksno nameščenih postaj sistema.

Magistrsko delo je razdeljeno na 10 poglavij. V drugem poglavju so predstavljene tehnologije vodenja in pozicioniranja AGV-jev, ki se uporabljajo v realnih sistemih in so komercialno dobavljive. Tretje poglavje je namenjeno opisu ideje za izgradnjo lastnega sistema, ter uporabljenim tehnologijam in algoritmom. Sledi poglavje z opisom postopka zasnove, razvoja in izdelave lastnega sistema z opisi najpomembnejših komponent in stroškovno analizo. Peto poglavje opisuje modeliranje iz 3D tisk ohišij za posamezne module. Stroškovna analiza je opisna v šestem poglavju, testiranju in konfiguriranju izdelanega sistema je namenjeno sedmo poglavje. Magistrsko delo se zaključuje s pregledom opravljenega, sklepom in komentarjem.

2 STANJE TEHNIKE AVTOMATSKO VODENIH VOZIL (AGV)

Avtomatsko vodeno vozilo je sistem sestavljen iz enega ali več računalniško vodenih nosilcev bremen, ki lahko delujejo v različnih prostorih (skladišča, proizvodni obrat, ..) in se uporabljajo za industrijske aplikacije brez zahteve po operaterju (vozniku). Začetki avtomatsko vodenih vozil (AGV-jev) segajo v petdeseta leta prejšnjega stoletja, ko je bil izdelan prvi tovrstni sistem, ki je za svoje delovanje uporabljal princip sledenja žici, za razliko od do tedaj poznanih in na trgu dostopnih rešitev, ki so za svoje premikanje po prostorih potrebovali vodila (tračnice). Z razvojem industrije in v želji po zmanjševanju stroškov pri transportu znotraj večjih podjetij je zanimanje za AGV-je raslo, zato se je sčasoma na trgu pojavilo kar nekaj zanimivih med seboj različnih rešitev. Osnovno razliko predstavlja sklop, ki skrbi za navigacijo (določanje položaja). Navigacija za takšne sisteme se razlikuje glede na uporabljeno tehnologijo, ki je napredovala sočasno z razvojem elektronskih komponent. Seveda pa sama navigacija ne zadošča za delovanje tako kompleksnega sistema, zato morajo biti v celotni sistem vključeni še nekateri drugi parametri vodenja. Med najpomembnejše spadajo: nadzor okolice AGV-ja (preprečevanje nezgod), upravljanje s pogonom (hitrost vožnje in razni premiki) in izbira poti AGV-ja (mehanski način, algoritmi).

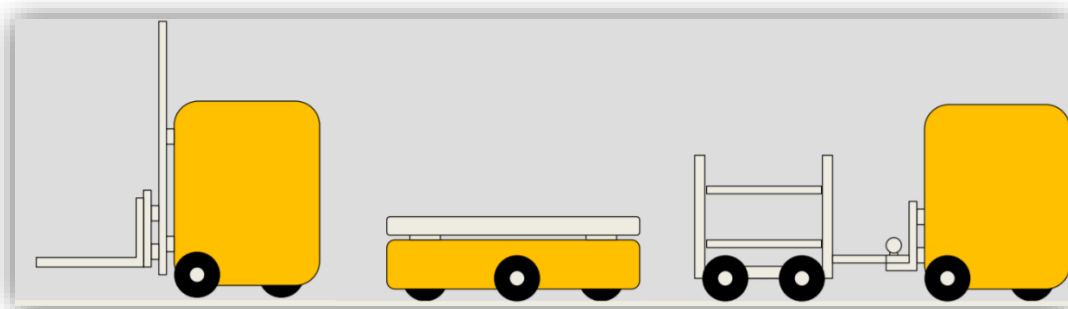
Praktično pri vseh sistemih tovrstnega vodenja ne glede na uporabljeno tehnično rešitev pa uporabnika zanima, kje se robot oz. AGV v določenem trenutku nahaja. Rešitev za ta problem se kaže v uporabi LPS-a (lokalni sistem za določanje položaja). Gre za sistem namenjen lociranju premikajočih se objektov v realnem času (podobno kot GPS). LPS se uporablja predvsem v območjih slabega signala GPS (notranjost stavb, skladišča, podzemlje, ...), kar pa seveda pomeni, da je sposoben lokacijo nekega objekta določiti samo znotraj specifično določenega prostora (lokalno). Za določanje položaja se uporablja postopek trilateracije, pri katerem moramo poznati več točno določenih točk - sidrišč (vsaj tri), ki omejujejo prostor znotraj katerega lahko določimo položaj premikajočega se objekta. Preko njih je potrebno z meritvijo pridobiti podatke o oddaljenosti objekta do posameznega sidrišča, saj lahko preko teh razdalj natančno izračunamo položaj objekta, ki se premika po prostoru. Na ta način ne le uporabnik temveč tudi AGV nenehno pridobiva podatke o svojem položaju in lahko na podlagi tega sam pomaga pri odločitvah izbire optimalne poti.

VRSTE DELITEV AGV-JEV

V svetu AGV-jev poznamo več vrst delitev. Med najbolj prepoznavne sodijo delitve glede na:

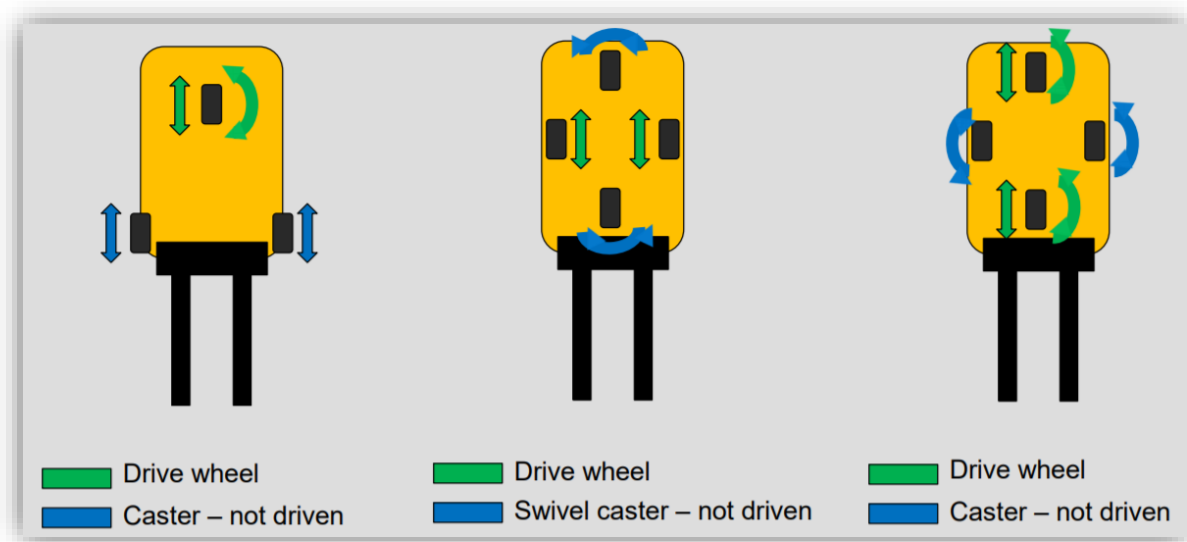
- tip vozila,
- način manevriranja v prostoru,
- navigacijo v prostoru,

Pri delitvi glede na tip vozila se AGV-ji med seboj razlikujejo zaradi različnih nalog, ki jih morajo opravljati. Takšna vozila se razlikuje že na prvi pogled po obliki in vrsti pogona, hkrati pa so razlike velike predvsem v drobovju vozil, saj so vgrajeni senzorji povsem drugačni. Prvi tip vozila je vsem dobro znani viličar, ki je najbolj vsestransko uporaben izmed vseh tipov AGV-jev. Njegove prednosti so: delovanje s tovorom na različnih višinah, zmožnost opravljanja različnih nalog (prevoz tovora, manipuliranje s tovorom, ...) in možnost nadgraditve (dodelava različnih prijemal). Drugi tip vozil so vozila za prevažanje velikih bremen. Odlikuje jih kompakten dizajn (praktično celotno vozilo neposredno pod bremenom), hkrati pa morajo sodelovati predvsem z valjčnimi transporterji in žerjavi - nalaganje/razlaganje tovora, saj sami te zmožnosti nimajo. Tretji tip vozil so vlečna vozila, saj za sabo vlečejo več vozičkov. Izkoriščajo idejo o čim manjšem številu tovrstnih naprav v tovarni (ekonomski vidik), a to pomeni, da je potrebno vozičke na ta vlečna vozila priklapljati in odklapljati (ročno ali avtomatizirano). Poznamo še četrti tip vozil, katerega pa ne moremo prosto opisati, saj gre za namenska vozila, ki so dizajnirana za premikanje specifičnih bremen in se od aplikacije do aplikacije razlikujejo.



Slika 2.1: viličar, vozilo za prevažanje velikih bremen in vlečno vozila [1]

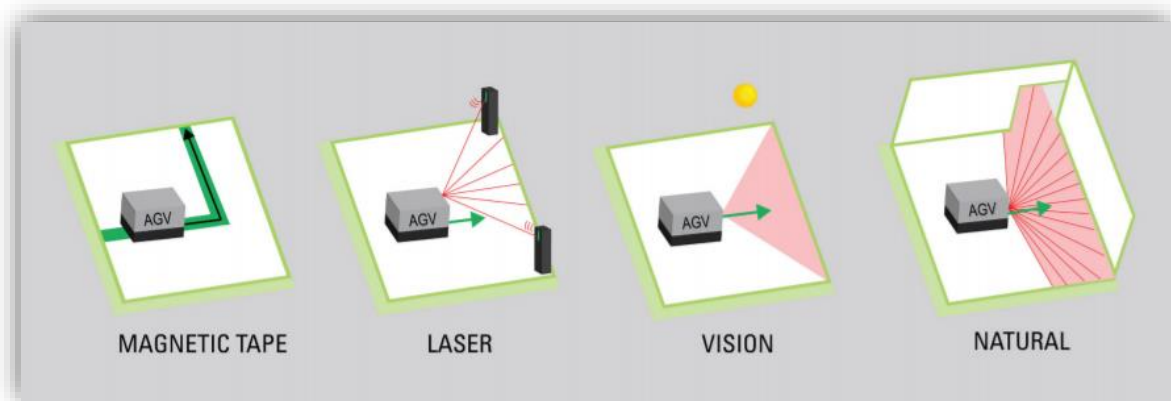
Način manevriranja po prostoru je drugi tip delitve AGV-jev. V tem primeru gre za različne načine pogonov oz. pogonskih koles in različne načine zavijanja oz. manevriranja. Najznačilnejši predstavnik tega tipa vozil je tricikel. Iz imena lahko sklepamo, da ima ta tip vozila tri kolesa, pri čemer pa je gnano le eno in ravno gnano kolo skrbi tudi za rotacijsko gibanje. Takšen način zadovolji veliko večino potreb v industriji. Naslednji je diferencialni tip. Največja prednost takšnih vozil je, da se lahko rotirajo okoli svoje osi praktično na mestu (majhen obračalni krog), so pa zato manj natančni pri kotnem pozicioniranju vozila in se uporabljajo predvsem pri starejših izvedenkah AGV-jev. Tretji tip manevriranja se imenuje štirikolesni. Gre za najkompleksnejši tip izmed predstavljenih, saj poleg vseh osnovnih gibaj ponuja tudi vrtenje okoli svoje osi. Obstajajo seveda tudi AGV-ji, ki ponujajo še bočne pomike, a v tem primeru potrebujejo dodatne rešitve (npr. mecanum wheel). Po navadi so namenjeni za specialne aplikacije in imajo nekakšne omejitve (zmožnost delovanja v specifičnem okolju, cena, ..) [1].



Slika 2.2: tricikel, diferencialni tip, štirikolesni tip [1]

Iz vidika magistrskega dela je vsekakor najprivlačnejša delitev glede na lokalizacijo v prostoru. Delitev je v tem primeru lahko zelo široka, saj obstaja veliko različnih principov določanja položaja v prostoru, a nekateri uporabljajo isto tehnologijo. Najočitnejši primer je uporaba magnetizma, kjer poznamo sledenje sledilnemu traku, sledenje sledilni žici in inercialne

sisteme (sledenje magnetnim točkam). V nadaljevanju bodo podrobneje opisane navigacija s pomočjo magnetnega traku, laserske triangulacije, navigacije s strojnim vidom in naravna navigacija.



Slika 2.3: delitev glede na tip vodenja oz. navigacije AGV-ja [8]

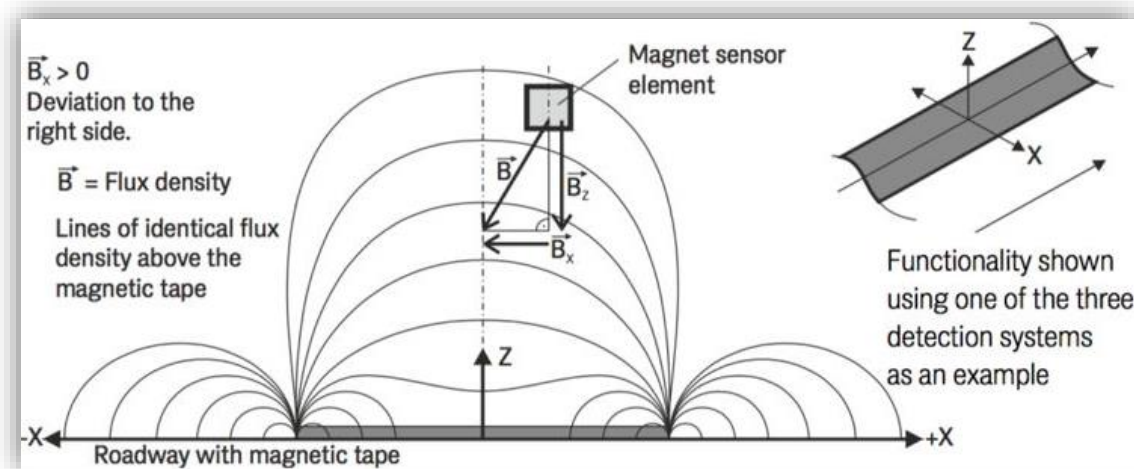
Omeniti velja še en tip delitve, ki pa se še ni uveljavil. Gre za delitev na avtomatizirane in avtonomne AGV-je. Velika večina trenutno vgrajenih AGV-jev spada v kategorijo avtomatiziranih, saj so sposobni opravljati le vnaprej predvidene in ustaljene poti, pri čemer se ob pojavitvi določene napake ali ovire sistem ustavi in miruje dokler se napaka ne odpravi. Pri novejših sistemih pa lahko opazimo, da spadajo med avtonomne, pri čemer so sposobni s pomočjo umetne inteligence sprejemati odločitve, ki rešijo nastalo situacijo (npr. AGV- se izogne oviri in nadaljuje pot do zelenega cilja, brez izgube časa). V literaturi je za avtonomne AGV-je moč zaslediti tudi izraz SDV (angl. self-driving vehicle) [8],[16].

2.1 Avtomatsko vodena vozila z magnetnim trakom

Iz imena lahko razberemo, da gre za AGV-je, ki za svoje delovanje oz. vodenje potrebujejo magnetni trak. Takšne sisteme pogosto srečamo v podjetjih avtomobilske industrije in v večji sistemih, kjer mora biti notranja logistika rešena natančno in hitro. Namestitev magnetnega traku je enostavna, saj se uporabljajo samolepilni magnetni trakovi, ki jih je mogoče na enostaven način tudi odstraniti in premestiti, če je potrebno poti spremeniti. Na delovanje magnetnih trakov ne vplivajo zunanji pogoji kot so svetloba, umazanija, ipd., s čimer spadajo

med robustne sisteme. Je pa po drugi strani za trajno in stabilno delovanje potrebno upoštevati teoretične osnove magnetizma, kar v praksi pomeni, da se magnetni trakovi uporabljajo na nekovinskih tleh, hkrati pa je potrebno zagotoviti okolje, kjer ni možnosti, da bi prišlo do razmagnetjenja traku.

Vsak tovrsten AGV ima vgrajen digitalni magnetometer, ki skrbi za merjene/zaznavanje magnetnega polja ustvarjenega s strani magnetnega traku. Način merjenje gostote magnetnega polja je prikazan na spodnji sliki in je odvisen od višine namestitve senzora na AGV-ju (razdalja med sensorjem in magnetnim trakom) in vrste magnetnega traku. Preko teh podatkov lahko izračunamo odklon oz. odmik sensorja in posledično celotnega AGV-ja od sredine magnetnega traku. Maksimalna oddaljenost vozila od sredine magnetnega traku je določena programsko in se lahko razlikuje glede na zahteve določene aplikacije [11], [4], [15].



Slika 2.4: osnovni princip zaznavanja magnetnega traku za vodenje AGV-ja [11]

V industriji lahko srečamo kar precej takšnih sistemov aktivno vključenih v proizvodnjo, saj ponujajo številne prednosti napram transportu v katerega je vključen človek. Zagotavljajo varno in natančno delovanje pri čemer so možnosti napak praktično zelo majhne, hkrati pa je tveganje za nastanek nesreč minimalno. Uporabljena tehnologija je do potankosti preučena in zato zelo zanesljiva.

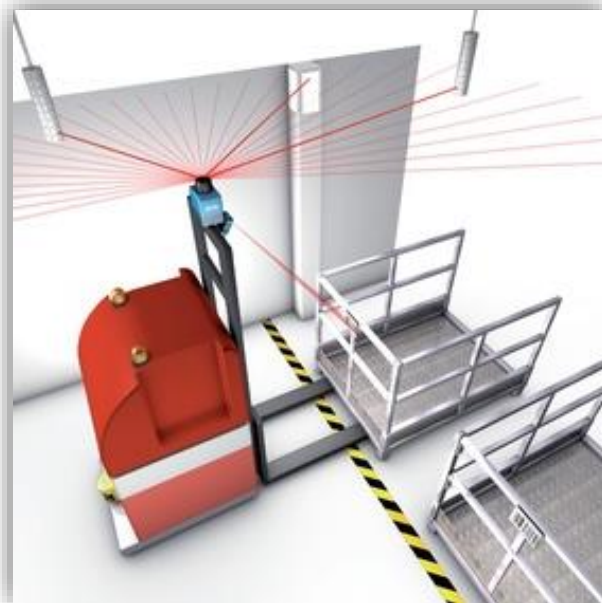
Sistem ima tudi nekaj pomanjkljivosti oz. omejitve med katerimi sta najbolj očitni dve:

- poti morajo biti vnaprej definirane s čimer je omejena fleksibilnost toka materiala oz. mora biti tok procesov logistično zasnovan,
- če se pred AGV-jem pojavi kakšna koli ovira se AGV ustavi in počaka, da se težava odpravi preden nadaljuje z delovanjem.

2.2 Avtomatsko vodena vozila z 2D laserjem

Avtomatsko vodena vozila, ki se v prostoru orientirajo in navigirajo s pomočjo laserjev so bolj znana pod kratico LGV (lasersko vodena vozila). Lasersko vodena vozila predstavljajo višji nivo AGV-jev, saj napram starejšim oblikam (sledilni trakovi,, sledilna žica) ponujajo večjo stopnjo prilagodljivosti. Največja prednost je ta, da se LGV-ji lahko premikajo znotraj prostora po več poteh in le-te se lahko po potrebi spremenijo, a te spremembe mora še vedno opraviti človek. Navigacija vozil z lasersko tehniko se od proizvajalca do proizvajalca nekoliko razlikuje, a osnovni princip je pri vseh podoben.

Za delovanje lasersko vodenih vozil mora biti v prostoru, kjer se izvršuje navigacija nameščeno zadostno število odsevnih trakov. Le-ti so lahko nameščeni neposredno na steno objekta, na posebne drogove ali na kateri koli nepremičen objekt v prostoru. AGV ima nameščen rotirajoč laserski oddajno sprejemni modul, ki je nameščen v isti ravnini (na isti višini - ± 30 cm) kot so pritrjeni odsevni trakovi. Izbrani laserski modul zajema dva podatka: kot in razdaljo do vseh odsevnih trakov v »vidnem polju« tega senzorja. Iz pridobljenih podatkov se s pomočjo mape odsevnih trakov, ki so shranjene v pomnilniku, izračuna trenutni položaj AGV-ja v prostoru. Le-ta se nato primerja z vnaprej programirano potjo, krmilnik pa poskrbi, da se vozilo pomika vzdolž zelene poti. Krmilnik mora tako ves čas preračunavati naslednje položaje vozila v odvisnosti od trenutnega položaja AGV-ja. Omejitev oz. zahteva za takšen izračun je ta, da so pridobljeni podatki o razdalji in/ali kotu do vsaj treh odsevnih trakov. Pomembna omejitev, ki se nanaša na sprejemanje odbitih laserskih žarkov je ta, da morajo biti odsevni trakovi nameščeni na dokaj kratkih razdaljah (maksimalna doseg omejen na 30-40m) .



Slika 2.5: pozicioniranje LGV-ja v prostoru [5]

V splošnem na AGV-je nameščene laserske module delimo v dve skupini: modulirani in impulzni laserji. Modulirni laserji omogočajo pokrivanje večjega območja in so bolj natančni (dosežejo lahko ločljivost do $0,006^\circ$ pri 8 obratih laserja na sekundo), a so po drugi strani tudi dražji od nekoliko manj natančnih ($0,2^\circ$ pri 8 obratih laserja na sekundo) impulzih laserjev [5],[4],[14].

Metoda laserske navigacije ima številne dobre lastnosti, zaradi katerih postaja na trgu vse bolj popularna:

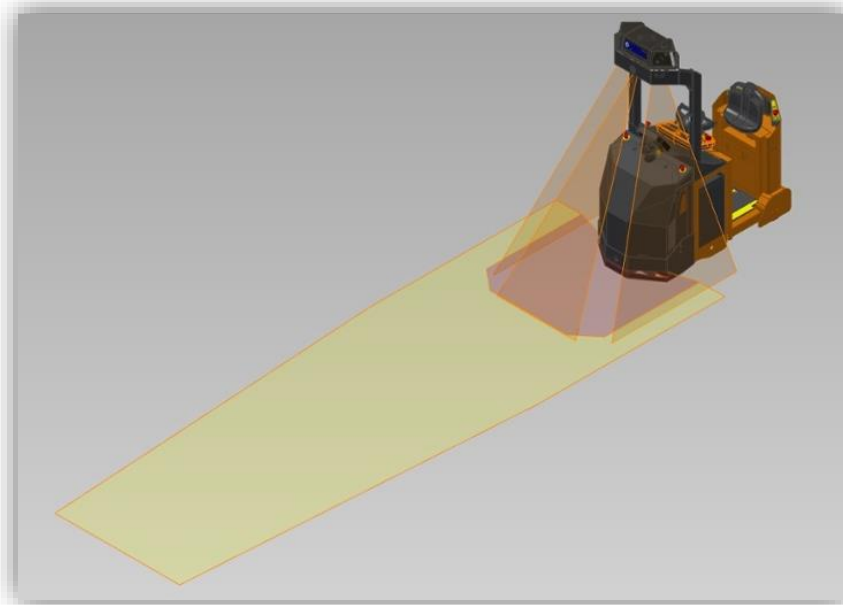
- enostavna namestitev brez večjih posegov v prostor,
- visoka natančnost senzorjev,
- izpopolnjenost algoritmov za pozicioniranje s katerimi lahko dosegamo natančnost v rangu $\pm 5\text{mm}$,
- možnost doseganja relativno visokih hitrosti AGV-jev (do 2 m/s),
- praktično ni stroškov vzdrževanje – edina zahteva je čistost odsevnih trakov.

Navkljub naštetim prednostim tovrstni sistem zaradi visokih investicijskih stroškov še ne dosega zelenega tržnega deleža, a se bo to po napovedih strokovnjakov spremenilo. Pričakuje se postopen prehod iz nekaterih bolj tradicionalnih sistemov (žica, magnetni trak, ...) na veliko bolj sofisticiran in kvalitetnejši laserski sistem za določanje položaja. Ne gre pa pozabiti, da so ti sistemi bolj primerni za visoke platforme (viličarji, ipd.), saj premični objekti (npr. človek) ne vstopajo v območje delovanja laserja.

2.3 Avtomatsko vodena vozila s strojnim vidom

Osnovo za avtomatsko vodenje vozil s strojnim vidom (VGV – vision guided vehicles) predstavljajo optični senzorji – stereo kamere. Kameram so dodani še nekateri drugi senzorji npr. laserji, žiroskopi, ... Za procesiranje zajete slike je potrebna še dodatna dovolj zmogljiva strojna in programska oprema. Celoten sistem deluje na osnovi 3D mape, katero si AGV sestavlja sam, glede na okolje v katerem se nahaja. Jasno je, da na začetku te mape nima vgrajene zato je potrebno AGV-je s tem sistemom najprej voditi v ročnem načinu.

Vsako takšno vozilo mora biti naučeno s strani operaterja, ki mora želeno pot opraviti kar nekajkrat, med tem pa vozilo s pomočjo kamere in senzorjev nenehno zajema slike in razne dodatne podatke s pomočjo katerih sestavi svoj 3D zemljevid okolice. Takšnih poti, ki želimo da jih AGV opravlja je lahko več, a morajo vse biti shranjene v pomnilnik. Med naučenimi potmi in nalogami AGV-ja lahko glede na potrebe izbiramo. Velika prednost takšnega sistema je ta, da lahko upravljalci nenehno poti dodajajo ali spreminjajo, pri čemer ni nujno novo učenje, če lahko uporabijo del katere izmed že naučenih poti (upravljanje in nadzor križišč). V nasprotnem primeru, torej če želimo uporabiti popolnoma novo pot, je potrebno ponovno učenje. V katerem koli trenutku je mogoče izklopiti avtomatski način vodenja in s takšnim vozilom upravljati ročno, kar se v nekaterih primerih izkaže za zelo uporabno. Dodatno k zajemanju slike, katera ne zagotavlja varnosti, takšni AGV-ji zajemajo še podatke o svoji bližnji okolici s pomočjo ostalih senzorjev. Na ta način je zagotovljeno, da v nobenem primeru ne bo prišlo do trka (nenadno, a nadzorovano zaustavljanje) ali celo, da bo takšna naprava sposobna kolaboracije s človekom.



Slika 2.6: zaznavanje okolice AGV-ja s strojnim vidom in dodatnimi senzorji [10]

Izkaže se, da ima tudi ta način vodenja AGV-jev nekatere slabosti, zaradi katerih tovrstni sistemi ne morejo biti vključeni v precejšnje število aplikacij:

- čas potreben za vzpostavitev in zadovoljivo delovanje,
- potrebna je dokaj visoka namestitev kamere (relativno velika oddaljenost od tal),
- zahtevani so dokaj konstantni zunanji pogoji v prostoru delovanja – predvsem svetloba,
- za natančnejše delovanje so potrebni dodatni senzorji.

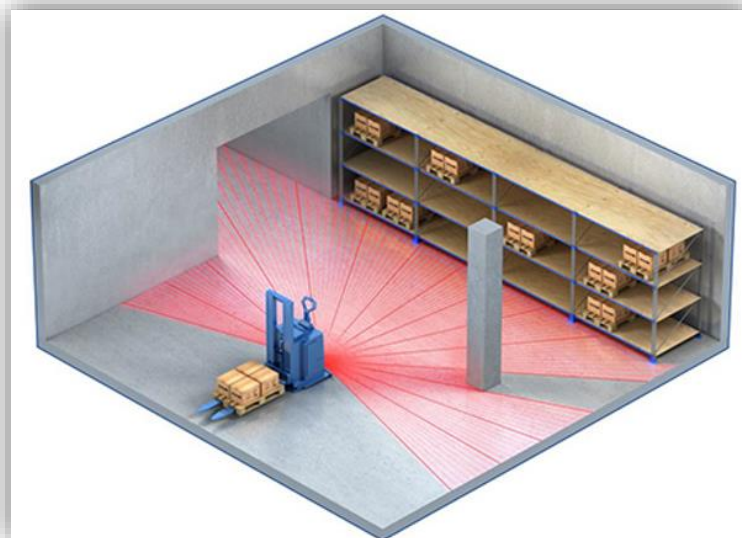
2.4 Naravno avtomatsko vodena vozila

Podobno kot pri lasersko avtomatiziranih vozilih se tudi v tem primeru za določanje položaja v prostoru kot senzor uporablja laserski modul. Za razliko od zgoraj opisanega sistema se v primeru naravno avtomatsko vodenih vozil z laserjem določa razdalja do vseh predmetov/ovir v okolici AGV-ja, kar pomeni, da odsevni trakovi in njihova točno določena pozicija v prostoru nista potrebna (uporabi se jih lahko v želji po večji natančnosti).

Za dotičen sistem vodenja se uporablja tehnologija imenovana LIDAR (angl. light detection and ranging). Iz imena lahko razberemo, da gre za svetlobno zaznavanje in merjene. Tehnologija izhaja iz geodezije, a se čedalje bolj uveljavlja tudi na vseh področjih avtomatskega in avtonomnega vodenja. Osnovni princip delovanja temelji na merjenju časa od trenutka sprožitve laserske žarka, do trenutka, ko se le-ta po odboju vrne. Iz znanega podatka o hitrosti se nato izračuna razdalja do objekta. Pri sistemu LIDAR se laserski sprejemno/oddajni modul vrti okoli svoje osi (2D laser), hkrati pa se pomika navzgor in navzdol (3D laser), s čimer pridobi podatke o veliki količini točk. Vsaka od teh točk (katerih celota se imenuje točkovni oblak) se postavi v 3D zemljevid, pri čemer koordinatno izhodišče predstavlja laserski modul, točke pa predstavljajo izjemno podroben prikaz konture okolice. Za dovolj natančno in ažurno lociranje je potrebno zagotoviti dovolj visoko hitrost vrtenja laserja in hkrati zadostno število oddanih in sprejetih laserskih impulzov [2].

Takšen sistem je s stališča vodenja zahtevnejši od lasersko vodenega, saj omogoča visoko stopnjo fleksibilnosti. To pomeni, da se poleg vodenja za opravljanje osnovnih nalog AGV hitro prilagodi in izračuna najhitrejšo pot za izvedbo dodatne naloge (prijod na zeleno lokacijo na ukaz). Dodatno k omenjeni lastnosti se takšni sistemi ponašajo še z nekaterimi drugimi kot so:

- hitra in enostavna vključitev v celovit sistem upravljanja s tovarno/skladiščem, pri čemer je čas ne-obratovanja dejavnosti podjetja zaradi namestitve zanemarljiv,
- dejanski oz. absolutni položaj AGV-ja v prostoru se izračuna glede na njegov relativni položaj/oddaljenost od objektov v okolici,
- enostavno upravljanje – ne le z enim AGV-jem temveč s celotnim voznim parkom,
- nizka namestitev senzorja (praktično na tleh), kar daje možnost uporabe tega sistema pri praktično vseh vrstah AGV-jev.



Slika 2.7: princip merjenja razdelja do bližnjih objektov [15]

Največja slabost sistema naravne navigacije je v specifičnih primerih nekoliko slabša natančnost, a to še zdaleč ne pomeni, da sistem tudi v teh specifičnih primerih ne deluje dobro. Do težav z natančnostjo pride v primerih nenadne velike spremembe obrisa okolice AGV-ja (prehod med prostori), saj celotna navigacija temelji le na konturi okolice (odvisnosti razdalje med AGV-jem in okoliškimi objekti). Ti sistemi imajo trenutno še relativno visoko ceno, kar je eden glavnih razlogov, da razširjenost AGV-jev z naravno navigacijo ni tako velika kot bi pričakovali.

2.5 AGV rešitve na trgu

Velika večina rešitev na področju AGV-jev je projektnih, kar pomeni, da se rešitve od aplikacije do aplikacije razlikujejo in prilagajajo željam kupca. Prav iz tega razloga je do konkretnih podatkov o posameznih AGV-jih, ki se prodajajo zelo težko priti, se pa proizvajalci radi pohvalijo z nekaterimi najbolj naprednimi tehnološki rešitvami, ki jih ponujajo. Te rešitve se med seboj močno razlikujejo, saj proizvajalci iščejo razne tržne niše. V nadaljevanje bodo izpostavljene tri rešitve, ki so name naredile vtis in se mi zdi, da jih je vredno omeniti.

KUKA - KMR iiwa

KUKA KMR iiwa je v bistvu kombinacija AGV-ja in majhnega industrijskega robota. Na ta način robot postane zelo uspešen, lokacijsko praktično neodvisen asistent za proizvodnjo s tako rekoč neomejenim delovnim prostorom. To pa pomeni, da predstavlja idealno zasnovanega »sodelavca« v industriji 4.0. Ta naprava je primerna tako za popolnoma avtonomno delovanja (vožnja in robot) kot tudi za kolaborativno delovanje oz. za delovanje v načinu kjer pride do sodelovanja med človekom in robotom.



Slika 2.8: KUKA KMR iiwa [17]

Proizvajalec v predstavitvi dotičnega modela izpostavlja naslednje lastnosti [17]:

- Združljivost - na voljo številne kombinacije robotske tehnologije, mobilnih platform in industrijskih komponent,
- Občutljivost - sedem posebnih senzorjev navora na vsaki osi lahkega kolaborativnega robota LBR iiwa je zelo občutljivih na svoje okolje. Pomika se varno in brez zaščitnih ograj - zunanji stik takoj zaustavi vozilo,

- Avtonomnost - zahvaljujoč varnostnim laserskim skenerjem lahko tudi mobilna platforma popolnoma avtonomno krmili in neprestano spremlja svoje okolje, ter reagira v primeru, če je oseba ali predmet preblizu želeni poti AGV-ja,
- Natančnost – pozicioniranje natančno do ± 5 mm,
- Agilnost – mecanum kolesa omogočajo, da se mobilna platforma premika v vse smeri in izvaja 360-stopinjska vrtenja okrog svoje osi.

Raymond Courier 3010

Podjetje je eno najpomembnejših na področju izdelave paletnih vozil. Trenutno se na trgu pojavljajo s hibridno izvedenko (ročni in avtomatski način) upravljanja. Po njihovih navedbah je tovrsten način uporabe optimalen, saj lahko vozilo ponudi najboljše lastnosti tako iz enega kot iz drugega načina delovanja in s tem zagotavlja največjo produktivnost.



Slika 2.9: Raymond Courier 3010 v svojem delovnem okolju [18]

Omenjen model ima nosilnost do 3600 kilogramov, pri čemer se lahko s tem tovorom v avtomatskem načinu delovanja premika s hitrostjo 1,2 m/s. Poleg standardnih prednosti, ki jih ponujajo tovrstna vozila (en posluževalec za več AGV-jev, sodelovanje z ostalimi AGV-ji, ...) se pri Raymond Courier 3010 lahko pohvalijo z dodatnimi značilnostmi, ki so jih dodali temu

modelu vozila. Med te lastnosti spadajo: prilagajanje hitrosti pri vožnji skozi ovinek, nastavljanje programskih poti za različne časovne okvirje (izmene, zmanjšan obseg dela, ...), spremljanje položaja vozila v realnem času, pomnilnik omogoča shranjevanje do 25 km programiranih poti in še mnoge druge [18].

TPV - Optimatik 160

TPV Optimatik 160 gre omeniti predvsem zato, ker je plod slovenskega znanja. Razvit in izdelan je bil v podjetju TPV iz Novega mesta, kjer so AGV-ji eden ključnih produktov s katerim nastopajo na trgu. Model Optimatik 160 po načinu vodenja ni nič kaj posebnega, saj uporablja vodenje s pomočjo magnetnega traku, za odločanje pri izbiri poti v križiščih pa se odloča s pomočjo RFID čipov, ki jih je potrebno ob implementaciji sistema montirati na tla. Posebnost tega modela se skriva v njegovih dimenzijah predvsem višini, ki znaša le 160 mm. Na ta način je prilagojena standardnim vozičkom, ki se uporabljajo v industriji.



Slika 2.10: TPV Optimatik 160 [19]

Proizvajalec navaja, da je takšen AGV z pripadajočo programsko opremo mogoče popolnoma avtomatizirati v povezavi z že obstoječimi sistemi in opremo nameščeno v podjetju preko centralno nadzornega logističnega sistema. Optimatik 160 dopušča uporabniku, da ga glede na svoje želje in potrebe prilagaja in nadgrajuje.

3 IDEJNA ZASNOVA LASTNEGA SISTEMA

Lasten RTLS (lokalni sistem za določanje položaja v realnem času) temelji na ideji, ki je v osnovi precej podobna laserskemu pozicioniranju v prostoru, a za svoje delovanje ne potrebuje dragih komponent in pri tem vseeno dosega zadovoljivo natančnost določanja položaja. Motivacija oz. namen izvedbe tega projekta je široka možnost uporabe tovrstnih sistemov, ki pa se zaradi relativno visokih investicijskih stroškov ne uporabljajo v tolikšni meri kot bi si to želeli. Uporaba sistemov za določanje lokalnega položaja je trenutno v večini primerov omejena zgolj na skladišča, tovarne in ostale industrijske prostore – torej za potrebe logistike, pa čeprav so ti sistemi uporabni tudi na raznih drugih področjih (kmetijstvo, medicina, šport, ...). V prihodnje, ko se bosta IoT in način obdelave podatkov ter shranjevanja (big data) še bolj povezala, bodo tovrstni sistemi uporabni tako rekoč povsod.

Že pred začetkom snovanja lastnega sistema je bilo jasno, da obstajajo določene omejitve na področju tehnologije (senzorji, krmilniki, ...) in algoritmov za določanje položaja. Te omejitve je potrebno združiti z nekaterimi lastnimi željami o lastnostih, ki bi jih naj izdelan sistem imel. Ob upoštevanju, da želimo projekt izpeljati z relativno nizkimi stroški so se že pokazali prvi obrisi kako bi naj končni izdelek izgledal.

3.1 Tehnologija

Ob izbiri senzorja (DWM1000) je bila praktično določena tehnologija, ki bo skrbela za določanje razdalj med baznimi postajami (anchor-ji) in premikajočim se objektom (tag-om). Tehnologija za komunikacijo med dvema senzorjema DWM1000 se imenuje UWB (angl. ultra widthband), in v tem primeru za določanje razdalje med njima uporablja metodo ToF (angl. time of flight).

3.1.1 UWB

Uporaba UWB tehnologije se izkazuje za zelo učinkovito, saj za svoje delovanje porablja zelo malo energije, hkrati pa se uporablja predvsem za zbiranje podatkov iz senzorjev in natančno lociranje. Ob uporabi tovrstne tehnologije, bi naj bilo mogoče določiti položaj na manj kot 30 cm natančno, pri velik hitrostih osveževanja (do 100 krat na sekundo). Za razliko od nekaterih drugih tehnologij (BLE, WiFi, ...), ki razdaljo določajo glede na jakost signala, se pri UWB le-ta določa glede na ToF (čas preleta) [20].

Najpomembnejše tehnične lastnosti UWB-ja so:

- uporaba izjemno širokih frekvenčnih pasov s pasovno širino vsaj 500 MHz,
- frekvenčna pasovna širina znaša 3,1 - 10,6 GHz,
- doseg se giblje v razponu od 10 m do 150 m odvisno od primera uporabe,
- praktično brez motenj – izjema je pojav večpotja (multipath), ki vnaša določen pogrešek v meritev.

3.1.2 Določanje razdalje preko ToF

Metoda imenovana ToF (angl. Time of flight) se uporablja za merjenje razdalje med senzorjem in določenim objektom in temelji na časovni razliki med trenutkom oddaje signala in trenutkom povratka odbitega signala. Pri merjenju razdalj z metodo ToF se kot nosilci lahko pojavljajo različni signali (najpogosteje svetloba in zvok). Takšen način nam merjenja razdalja nam omogoča natančnost v rangu nekaj centimetrov.

V našem primeru je nosilec signala za ultra široko pasovno valovanje, ki se širi po prostoru s svetlobno hitrostjo. Za oddajanje in sprejemanje signala skrbi izbrani senzor DW1000 v povezavi s krmilnik ESP32. Iz znanih podatkov - čas preleta (pridobljen podatek s pomočjo krmilnika in senzorja) in hitrost svetlobe (konstanta) je izračun razdalje povsem trivialen:

$$ToF = \frac{T_{loop} - T_{reply}}{2} \quad (3.1)$$

$$r_i = ToF \cdot v_s \quad (3.2)$$

Kjer je:

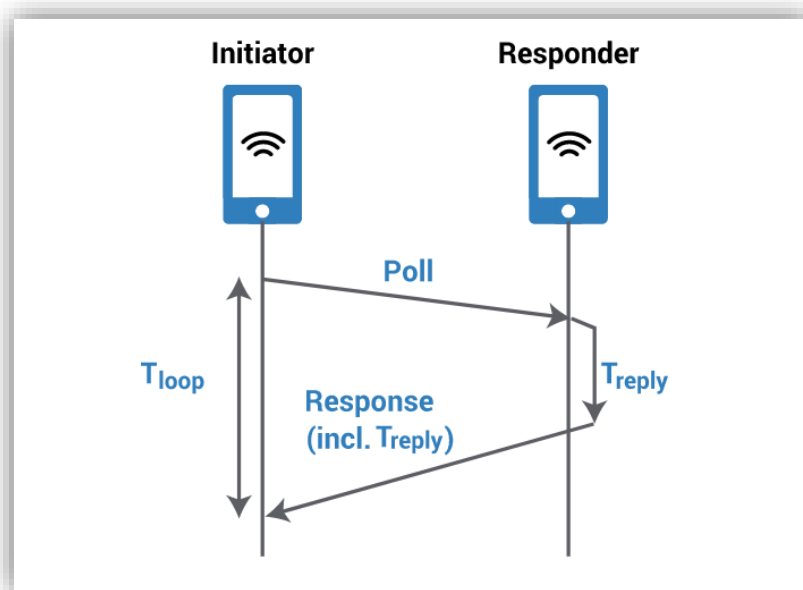
ToF [s] – čas preleta

T_{loop} [s] – celoten čas meritve

T_{reply} [s] – čas od prejema sporočila do odgovora bazne postaje (anchor-ja / responder-ja)

r_i [m] – razdalja med premikajočim se objektom (tag-om) in bazno postajo (anchor-jem) i

Za lažjo predstavo je na spodnji sliki prikazan osnovni princip delovanja metode ToF.



Slika 3.1: določanje časa preleta [21]

- Podobna metoda, ki bi se lahko uporabila se imenuje TDoA (angl. time difference of arrival). Metoda je v svojem osnovnem princpu zelo podobna zgoraj opisani metodi ToF, a se od nje razlikuje po načinu pošiljanja zahtev premikajočega se objekta do baznih postaj. Premikajoči se objekt v nekem časovnem intervalu pošlje sporočilo (podatkovni paket), ki ga bazne postaje sprejmejo in se za razliko od ToF nanj ne odzovejo. Iz

prejetega paketa, ki na posamezno bazno postajo pride zaradi različne oddaljenosti ob različnem času, lahko bazne postaje z medsebojno usklajenim delovanjem določijo položaj premikajočega se objekta. V primerjavi z ToF ima določene specifične značilnosti: zahteva dodatno strojno opremo

- težje vzpostaviti stabilno delovanje
- baterijsko napajanje modul zdrži dlje časa (boljša učinkovitost porabe električne energije)
- omogočeno nadzorovanje položaja več premikajočih se objektov v relativno kratkih časovnih intervalih

3.2 Algoritem računanja

V izdelanem sistemu uporabljen algoritem računanja se imenuje trilateracija. Gre za metodo s pomočjo katere lahko določimo položaj objekta na podlagi sočasnega merjenja razdalj med objektom in vsaj tremi baznimi postajami, katerih lokacija je znana. V primeru uporabe treh baznih postaj je možno določiti položaj premikajočega se objekta v 2D prostoru, medtem ko pri uporabi štirih baznih postaj lahko določimo položaj objekta v 3D prostoru (določimo lahko tudi višinski razliko), poleg tega pa četrta bazna postaja doda zanesljivost (natančnejša meritev). Poenostavljeno povedano gre pri trilateraciji za iskanje preseka vsaj treh sfer, katerih radiji predstavljajo razdalje med baznimi postajami in premikajočim se objektom. Algoritem za iskanje neznank se tako lahko izrazi s sistemom kvadratnih enačb:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2 \quad (3.1)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2 \quad (3.2)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_3^2 \quad (3.3)$$

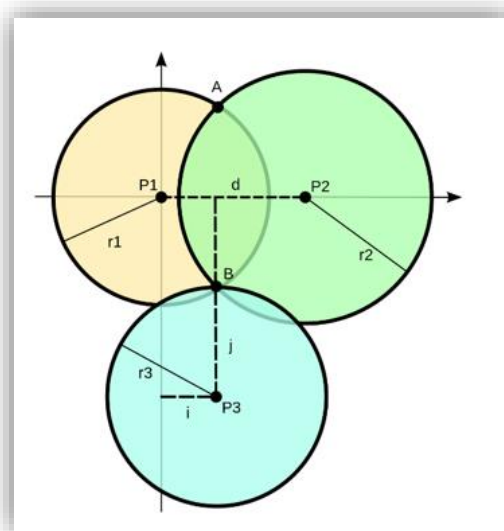
Kjer je:

x, y, z [m] – koordinate premikajočega se objekta (tag-a)

$P_i (x_i, y_i, z_i)$ [m] – koordinate bazne postaje i (anchor-ja)

r_i [m] – razdalja med premikajočim se objektom (tag-om) in bazno postajo (anchor-jem) i

Za lažjo predstavo je na spodnji sliki prikazan osnovni princip trilateracije v 2D prostoru.



Slika 3.2: osnovni princip trilateracije v 2D prostoru [25]

3.3 Modularnost

Definicija besede modul iz SSKJ je sledeča: sestavljivi del kake naprave. Ideja, da bi izdelali sistem, ki bi bil modularen se je porodila iz čisto praktičnih razlogov, saj lahko iz različnih modulov sestavimo delujočo napravo in ji določene module lahko zamenjujemo. V praktičnem smislu to pomeni, da mora biti celota smiselno razdeljena na več različnih sklopov, ki morajo opravljati vsak svojo nalogo. V primeru izdelave strojnega dela lokalnega sistema za določanje položaja je celota razdeljena na 3 dele in sicer: napajalni ter krmilni modul, ki sta nujno potrebna za delovanje in opcijsko je mogoče dodati senzorsko aktuatorski. V odvisnosti od kombinacij izbranih modulov se prilagaja tudi ohišje, ki je prav tako modularno.

4 RAZVOJ IN IZDELAVA SISTEMA

Strojni del predstavlja vsa vezja z vsemi pripadajočimi komponentami potrebnimi za stabilno delovanje sistema. V prejšnjem poglavju je omenjena modularnost, ki je predstavljala dodatno omejitev pri izdelavi vezij. Kot omenjeno se modularnost kaže v obliki namembnosti posameznih vezij, ki so med seboj kompatibilna in jih je mogoče med seboj kombinirati, pri čemer mora biti uporabljen en napajalni in en krmilni modul (po potrebi pa se lahko doda še senzorsko aktuatorski modul).

Razvoj in izdelava vseh modulov sta potekala po podobni poti in sicer:

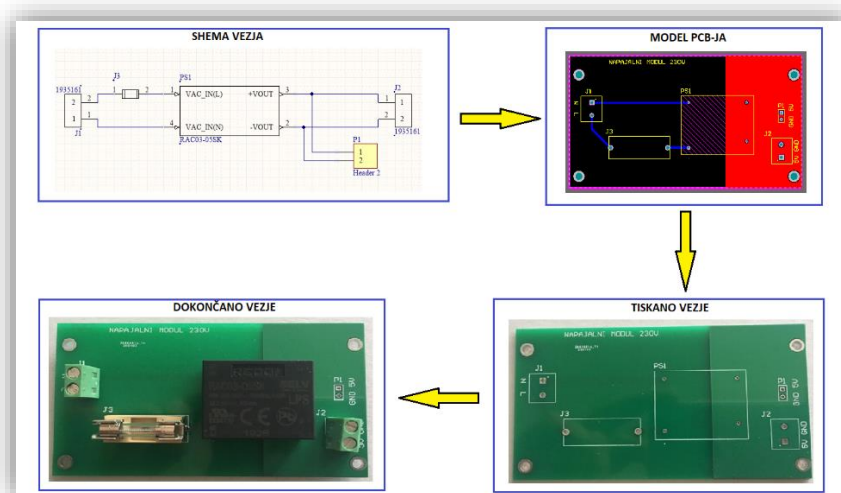
- preučevanje zahtev posameznega vezja,
- izbira komponent,
- izdelava sheme vezja (.schdoc),
- izdelava PCB modela (.pcbdoc),
- izvoz datotek za izdelavo in naročilo,
- spajkanje oz. lotanje komponent na tiskanino (PCB).

Delo, ki je povezano z izdelavo sheme in tiskanine (PCB-ja) je potekalo v programskem okolju Altium Designer. Altium Designer poleg osnovnih funkcij omogoča tudi izdelavo lastnih knjižnic elektronskih komponent ter uvoz knjižnic in 3D modelov (STEP datoteke). Poleg že dostopnih in lastno ustvarjenih knjižnic so za potrebe projekta uporabljene tudi prosto dostopne knjižnice iz spletnega mesta <https://www.snapeda.com/>.

Osnovo za izdelavo vezij predstavlja shema vezja, ki jo je znotraj projekta potrebno shraniti v datoteko s končnico .schdoc. V tej datoteki so elementi predstavljeni s simboli in med seboj povezani s črtami, ki ponazarjajo vodnik (povezave) med komponentami. Iz omenjene datoteke se ob kreiranju datoteke .pcbdoc samodejno ustvari povezava med njimi, kar uporabniku omogoča lažjo kreiranje PCB modela. Pri izdelavi PCB modela je potrebno izbrati

obliko in dimenzije želenega vezja. Sledi uvoz vezja iz datoteke .schdoc in razvrščanje komponent na vezje. Preden se lotimo povezovanja komponent (ustvarjanje bakrenih povezav) je potrebno v pravilih nastaviti vsaj širino povezav in minimalne odmike med povezavami. Orodje Altium Designer omogoča izdelavo večplastnih PCB-jev, a v primeru izdelave vezij za lokalni sistem za določanje položaja gre zaradi stroškovnih omejitev in dimenzijske neomejenosti (relativno veliko vezje) le za klasično dvoplastno vezje. Ustvarjanja bakrenih povezav se lahko lotimo sami ali to prepustimo programskemu paketu Altium Designer. Osnovne in najpomembnejše povezave so bile narejene ročno, medtem ko so preostale bile ustvarjene s pomočjo programa in nato predelane ročno (položaj povezav med zgornjim in spodnjim delom vezja ni bil najprimernejši).

Tiskana vezja (PCB) so bila naročena pri podjetju JLCPCB (<https://jlcpcb.com/>), ki se ukvarjajo z izdelavo prototipov in manjših serij tiskanih PCB-jev. Za naročilo izdelave je potrebno pripraviti dve datoteki, ki se izvozita iz prej pripravljenega PCB modela (.pcbdoc). To sta .cam datoteki, pri čemer se prva nanaša na zgornjo in spodnjo stran bakrenih površin (vključno z obliko in dimenzijami vezja), medtem ko druga določa položaja lukenj in povezave med zgornjim in spodnjim delom vezja (via). Ti datoteki sta seveda med seboj povezani (isto koordinatno izhodišče).



4.1 Napajalni del

Napajalni del skrbi za zagotavljanje električne napetosti 5V, ki je zahtevana na vhodu krmilnega modula. Napajalni moduli so izdelani v povezavi s krmilnim in sicer tako, da v tlorisu izhodni pini napajalnega modula sovpadajo z vhodnimi napajalnimi pini krmilnega modula. Na ta način je zagotovljena relativno visoka stopna modularnosti. V nadaljevanju sta podrobneje predstavljena dva napajalnika, ki sta vključena v sistem, hkrati pa predstavljata osnovo za morebitne dodatne napajalnike v primeru želje po uporabi drugačnih vhodno napetostnih paketov.

Napajalni del je bilo po karakteristikah potrebno prilagoditi zahtevam krmilnega modula. Kot že omenjeno je osnovna zahteva 5 V DC (enosmerna napetost) na izhodu iz napajalnega modula, pri čemer je potrebno za nemoteno delovanje krmilnika in senzorja na krmilnem modulu zagotoviti vsaj 500 mA toka.

4.2 24 V napajalnik

24 V napajalnik je izdelan za potrebo napajanja premikajočega se modula v lokalnem sistemu za določanje položaja. Gre za DC/DC pretvornik, katerega lastnosti so določene iz prej omenjenih zahtev:

$$U_o = 5 \text{ V}$$

$$i_o = 0,5 \text{ A} = 500 \text{ mA}$$

$$P = U_o \cdot i_o = 5 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 2,5 \text{ W} \quad (4.1)$$

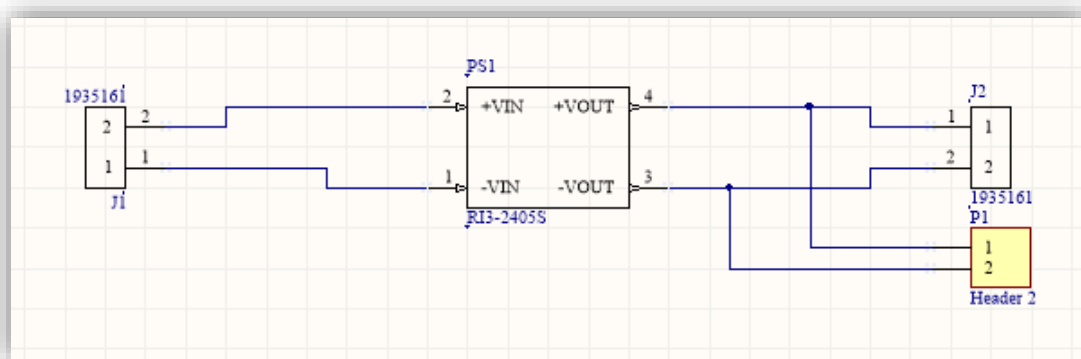
Kjer je:

U_o [V] – izhodna napetost

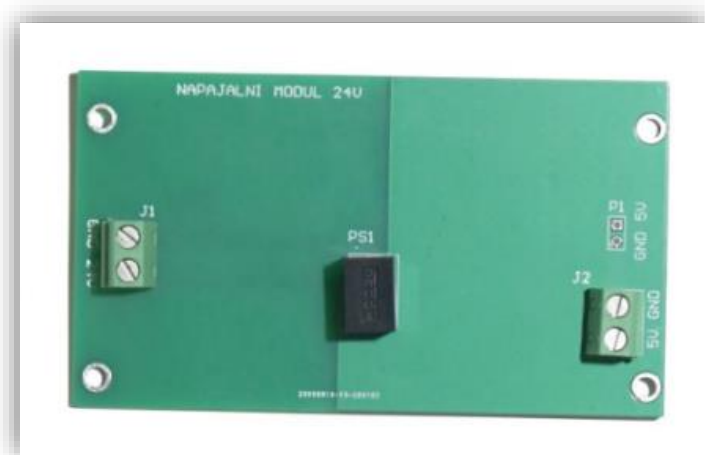
i_o [A] – izhodni tok

P [W] – nazivna moč

Iz izračuna lahko razberemo, da potrebujemo vsaj 2,5 W napetostni pretvornik. Ob upoštevanju 20 % varnostnega faktorja je smiselno izbrati 3 W pretvornik.



Slika 4.2: shema vezja napajalnika 24 V

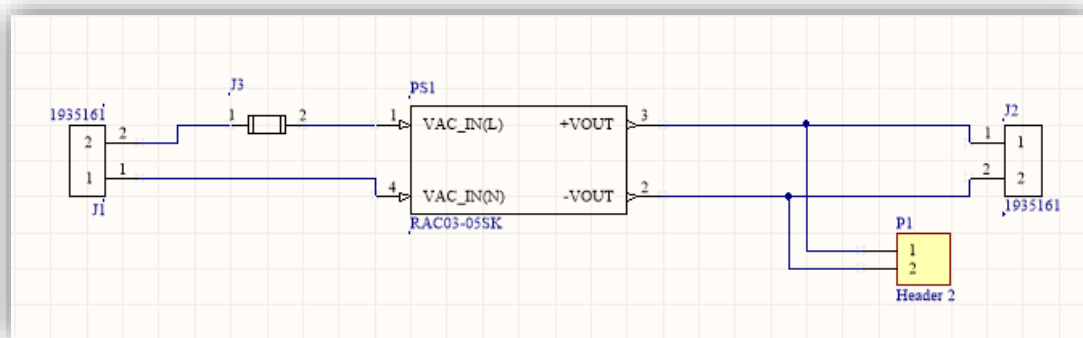


Slika 4.3: izdelan napajalnik 24 V

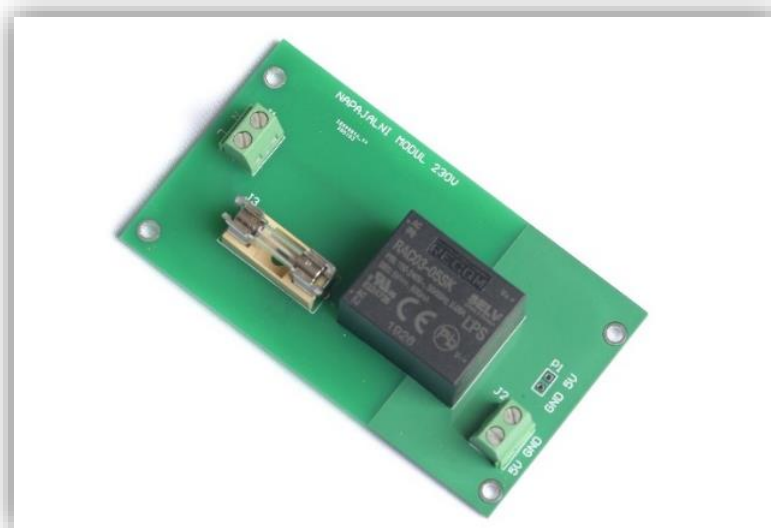
4.3 230 V napajalnik

Podobno kot v poglavju 4.1.1 24 V napajalnik je bil narejen izračun tudi za 230 V AC/DC napetostni pretvornik. Izhodni parametri napajalnika oz. vhodni parametri krmilnega modula so enaki zato izračun pokaže identično situacijo. Izbrati je potrebno 3 W AC/DC pretvornik. Izbran pretvornik ima široko področje vhodne napetosti (85-264 VAC) in frekvenčno območje

delovanja (47-63 Hz), kar pomeni, da je primeren tudi za uporabo v ameriškem električnem distribucijskem sistemu.



Slika 4.4: shema vezja napajalnika 230 V



Slika 4.5: izdelan napajnik 230 V

4.4 Krmilni del

Krmilni modul predstavlja najpomembnejšo enoto v lokalnem sistemu za določanje položaja. Na tej enoti se izvaja programski del, ki je podrobneje zapisan v magistrskem delu z naslovom Razvoj lokalnega sistema za določanje položaja (avtor Blaž Recek). Krmilna enota je s stališča izdelave predstavljala najzahtevnejši del, saj sta vnaprej določeni osnovni komponenti

postavili nekakšen okvir, ki je narekoval zgradbo modula, hkrati pa je bilo potrebno poskrbeti za določeno dodano vrednost te enote.

4.4.1 ESP32-WROVER

Krmilnik, ki predstavlja srce krmilnega modula se imenuje ESP32-WROVER. Izbran je bil zaradi njegovih lastnosti in razmerja zmogljivost/cena, ki ga odlikuje. V osnovi gre za močan, splošen WiFi-BT-BLE MCU modul namenjen najrazličnejšim aplikacijam. Uporablja se za najpreprostejše senzorske aplikacije z majhno močjo, sposoben pa je izvajati tudi najzahtevnejša opravila (aplikacije povezane z zvokom – kodiranje in dekodiranje zvočnih zapisov). ESP32-WROVER je na trgu prisoten v različnih verzijah, ki se med seboj malenkostno razlikujejo a so v svojem bistvu praktično enaki. Za potrebe naše aplikacije smo izbrali verzijo ESP32-WROVER-B, ki poleg klasične antene na PCB-ju omogoča priključitev dodatne IPEX antene.



Slika 4.6: ESP32-WROVER

Osnovne lastnosti krmilnika ESP32-WROVER-B:

- priporočena napajalna napetost:
 - od 2,2 V do 3,6 V

- procesor:
 - CPU: Xtensa dual-core 32-bit LX6 mikroprocesor,
 - ULP (ultra low power) ko-procesor
- pomnilnik:
 - 520 kB SRAM
- brezžična povezljivost:
 - Wi-Fi: 802.11 b/g/n
 - Bluetooth: v4.2 BR/EDR in BLE
- Periferne enote:
 - 12-bit SAR ADC do 18 kanalov, 2 × 8-bit DAC, 4 × SPI, 2 × I²C, 3 × UART
 - SD/SDIO/CE-ATA/MMC/eMMC host controller
 - SDIO/SPI kontroler
 - CAN bus 2.0
 - Motor PWM, LED PWM (do 16 kanalov)
 - Senzor hall-ovega efekta
- poraba energije:
 - Interni nizko osipni regulator
 - individualna napajalna domena za RTC
 - 5 μA toka (globoko spanje)
- temperaturno območje delovanja
 - -40 °C do +85 °C

4.4.2 DWM1000

Senzorski modul DWM1000 temelji na širokopasovnem oddajniku Decawave DW1000. Na modulu je poleg oddajnika zgrajeno celotno vezje, ki vključuje upravljanje napajanja, RF vezje,

anteno in ostalo periferijo potrebno za delovanje. Modul je namenjen za uporabo v aplikacijah lociranja objektov v realnem času (RTLS).

Ključne prednosti, ki jih pri omenjenem modulu velja izpostaviti so: visoka natančnost določanja razdalje, velik komunikacijski doseg – do 300 m (potrebni manj senzorskih enot za vzpostavitev delujočega sistema – nižanje stroškov), omogočeno delovanje z velikim številom premikajočih se objektov (tag-ov), nizki stroški (dobro razmerje med ponujenimi lastnostmi in ceno) in dobra imunost na motnje znotraj polja fiksnih objektov (anchor-jev)



Slika 4.7: DWM1000

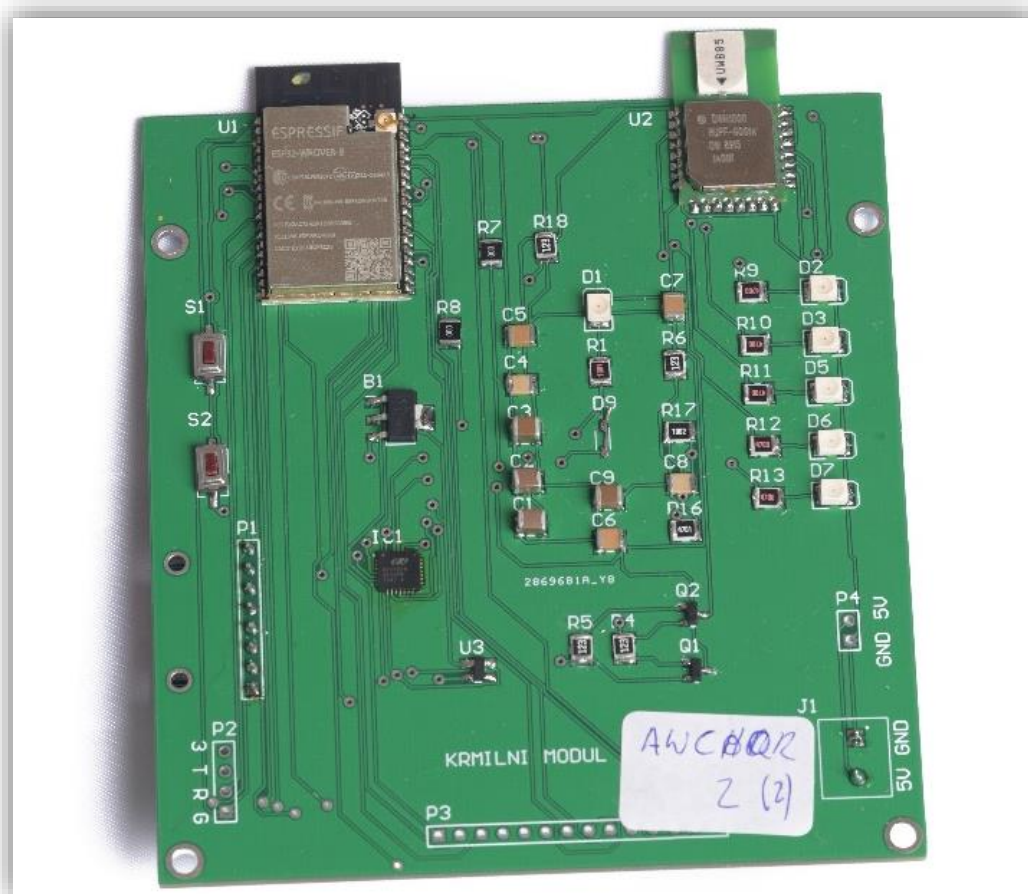
Osnovne lastnosti senzorskega modula DWM1000:

- priporočena napajalna napetost:
 - od 2,8 V do 3,6 V
- omogoča enostavno integracijo s široko paleto MCU-jev
- podpira lokacijske sheme ToF in TDoA
- nizka poraba energije
- hitrosti prenosa podatkov:
 - 110 kbps, 850 kbps in 6,8 Mbps

- dimenzije:
 - 23 mm x 13 mm x 2,9 mm
 - 24 stranskih utorov (priključni pini)

4.4.3 Zgradba krmilne enote

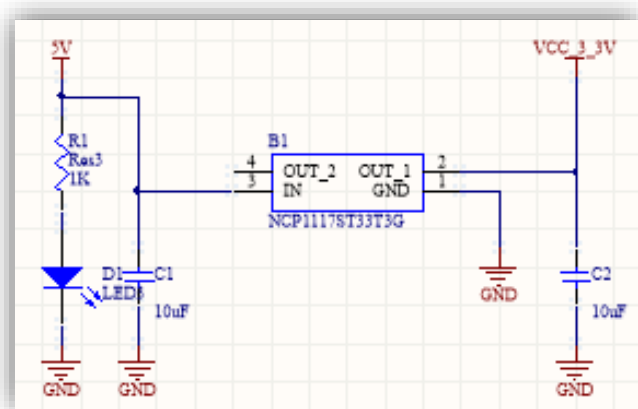
Krmilna enota predstavlja najkompleksnejši in najzahtevnejši del lokalnega sistema za določanje položaja. Zaradi lažje predstave in večje preglednosti je krmilna enota razdeljena na več podsuklopov glede na funkcijo, ki jo določen podsuklop opravlja (za optimalno delovanje so potrebni praktično vsi sklopi, ki morajo biti povezani v smiselno celoto). Krmilni modul je razdeljen na naslednje podsuklope: napajalni del, USB – programatorski del, stikalni del (stikalna logika), krmilnik s senzorjem, signalni del in ostali GPIO pini.



Slika 4.8: izdelan krmilni modul

NAPAJALNI DEL

Napajalni del je povezan z napajalnim modulom in skrbi za zagotavljanje konstantne napajalne napetosti, ki mora za izdelano vezje znašati 3,3 V. V poglavju 4.1 je navedeno, da izhod iz napajalnega modula znaša 5 V. Za zagotavljanje stabilne napetosti 3,3 V je torej potreben še en element, ki bo znižal napetost iz krmilnega modula na želeno napetost za potrebe izdelanega vezja. V vezju je to LDO regulator, ki za svoje delovanje potrebuje še nekaj dodatnih elementov (2 kondenzatorja) s katerimi je določena želena izhodna vrednost napetosti.



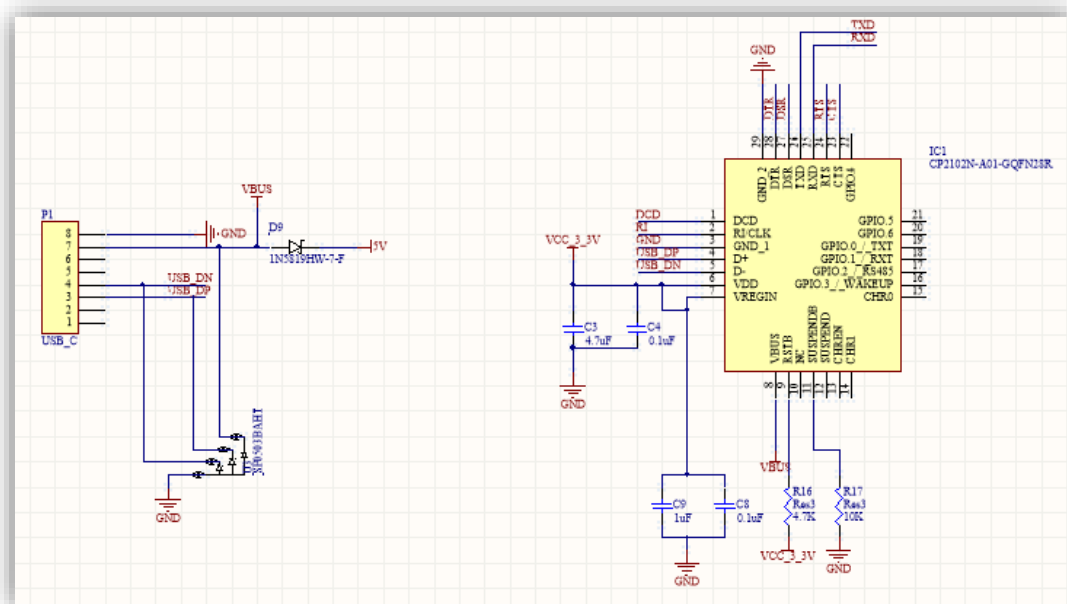
Slika 4.9: napajalni del krmilnega vezja

USB – PROGRAMATORSKI DEL

USB – programatorski del ima poleg osnovne naloge, ki je skrb za nalaganje programa iz računalnika preko USB vhoda in programatorja na krmilnik ESP32-WROVER, lahko tudi funkcijo napajanja vezja. Programator na vezju predstavlja čip CP2102N podjetja Silicon Labs, ki za svoje delovanje potrebuje nekaj perifernih elementov (upori in kondenzatorji). Za nalaganje programa mora biti v točno določenem načinu delovanja, v katerega pride s pomočjo dveh signalov iz stikalnega dela (stikalna logika).

Povezava med računalnikom in čipom CP2102N je izvedena preko konektorja USB tip C, kar pri razvojnih ploščicah ni običajno. Z izbiro tega konektorja smo pridobili čas potreben za nalaganje programa (hitrejši prenos podatkov) in hkrati pridobili nekakšno dodano vrednost napram ostalim na trgu dostopnim razvojnim kompletom. Izbran USB tip C je na izdelanem

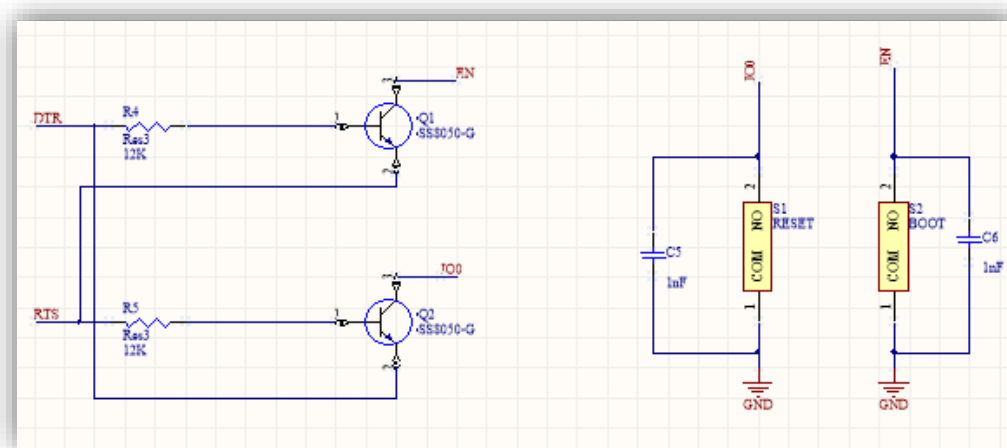
vezju na posebni ploščici in povezan preko moških pinov, saj je bila tovrstna izdelava cenejša in bolj praktična. Dodati pa je potrebno, da je v prihodnosti možna izboljšava na način, da se USB tip C konektor namesti neposredno na ploščo krmilnega modula.



Slika 4.10: USB - programatorski del

STIKALNI DEL (STIKALNA LOGIKA)

Stikalni del skrbi za opravljanje dveh funkcij: zagotovite prehoda programatorja v način delovanja za nalaganja programa in resetiranje celotnega krmilnega modula. Stikalni del je sestavljen iz dveh tranzistorjev, dveh stikalnih tipk in nekaj periferije. Ideja stikalnega dela je ta, da lahko programator preide v ustrezen način delovanja avtomatsko ob zahtevi za nalaganje programa preko USB-ja brez posredovanja uporabnika. Dodatna možnost za prehod v ustrezen način delovanja je uporaba točno določene kombinacije pritiska stikal (ročni način), ki služi kot nekakšna varovalka v primeru odpovedi avtomatskega prehoda v način za nalaganje programa. Nameščena stikalna tipka RESET poleg skrbi za prehod v način za nalaganje programa omogoča tudi ponovni zagon celotnega krmilnega modula (resetiranje krmilnika ESP32-WROVER).

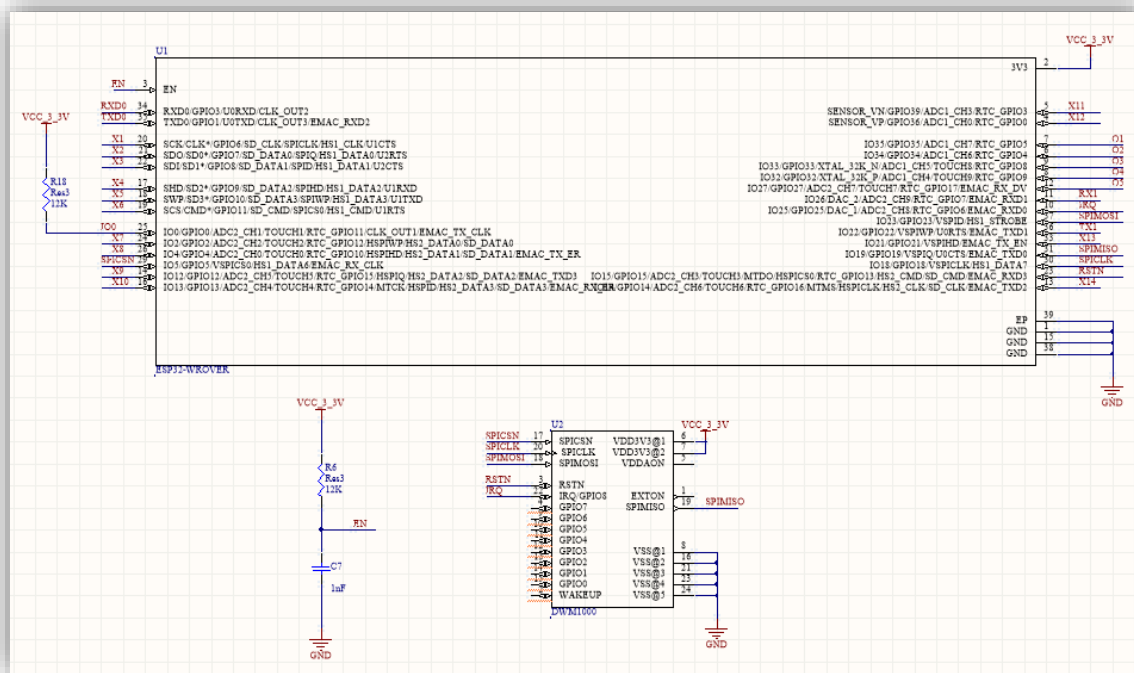


Slika 4.11: stikalna logika

KRMILNIK S SENZORJEM

Kot že omenjeno sta krmilnik ESP32-WROVER in senzorski modul DWM1000 najpomembnejša elementa na krmilniku. Krmilnik skrbi za izvajanje programa, ki se izvaja ciklično v neskončni zanki in v sodelovanju s senzorskim modulom nenehno zagotavlja informacije o razdalji med posamezno bazno postajo (anchorjem) in premikajočim se objektom (tagom). V želji po čim boljši izkoriščenosti krmilnika so vsi vhodno/izhodni pini povezani na moške pine, ki omogočajo priključitev dodatnih senzorjev ali aktuatorjev (več o tem v nadaljevanje – signalni del in ostali GPIO pini).

Povezave med krmilnikom in senzorskim modulom so izvedene neposredno (brez dodatnih elementov), pri čemer je potrebno biti pozoren na lastnosti posameznih izhodnih pinov. Med krmilnikom in senzorskim modulom je potrebno ustvariti serijsko povezavo (SPI), preko katere bosta lahko komunicirala. V praksi to pomeni, da ne moremo izbrati kateregakoli GPIO pina za povezavo do senzorskega modula DWM1000, temveč moramo upoštevati kakšen signal se bo prenašal po določeni povezavi. Gre namreč za to, da recimo poljuben GPIO ne more generirati izhodnega signala za sinhronizacijo ure med krmilnikom in senzorskim modulom, ki pa je nujno potreben za vzpostavitev serijske komunikacije.



Slika 4.12: krmilnik s senzorskim modulom

SIGNALNI DEL IN OSTALI GPIO PINI

Signalni del predstavljajo signalne LED diode s pripadajočimi upori. Uporabnik ima na voljo 5 LED diod, ki jih lahko uporablja za signaliziranje določenih dogodkov. Zaradi lažje in boljše predstavitve posameznih dogodkov so LED diode v različnih barvah in sicer sta 2 zeleni in 3 rdeče.

Ostali GPIO pini so pini, ki so uporabniku na voljo za prosto uporabo. V konkretnem sistemu bi na njih lahko priključili dodatne senzorce in z njimi zajemali podatke prostor (temperatura, vlaga, svetloba, itd.) v katerem se izvaja lokalno pozicioniranje. Prav tako je na GPIO pine možno priključiti aktuatorje, ki izvajali določene akcije (preklopi relejev, pogon motorčkov, itd.).

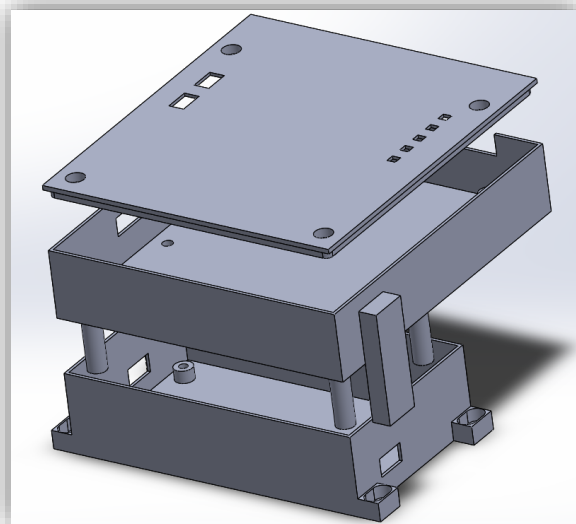
5 IZDELAVA OHIŠJA

V razvojni fazi produkta je podobno kot pri vseh ostalih komponentah tudi pri ohišju potrebno iti skozi več stopenj prototipov, jih izboljševati in optimizirati. Na srečo v sodobnem svetu poznamo tehnologije, ki nam pot skozi to fazo olajšajo in pohitrijo. V projektu smo se poslužili 2 nepogrešljivih tehnologij in sicer 3D modeliranja in 3D tiska. Na ta način smo v relativno kratkem času prišli do zadovoljivih izdelkov ob minimalni porabi sredstev.

5.1 3D modeliranje

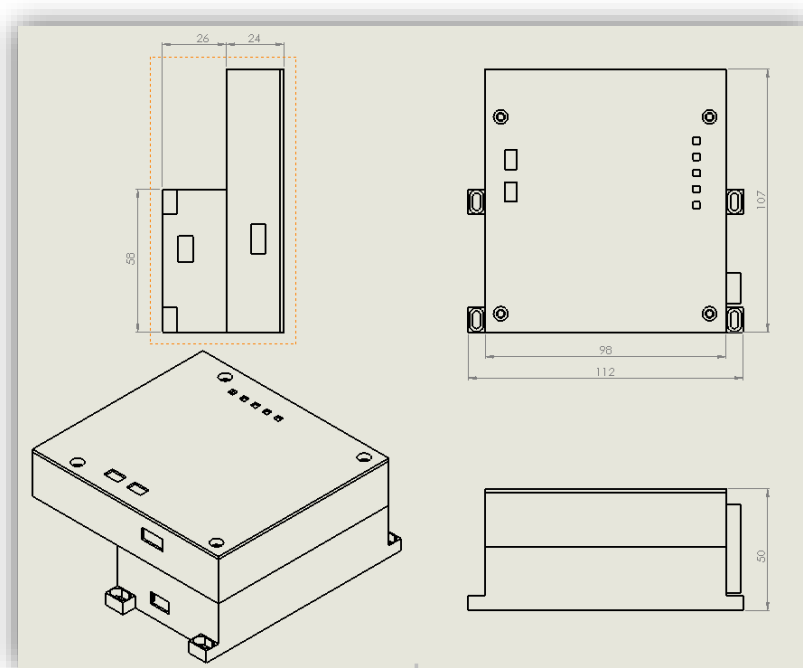
3D modeliranje je bilo izvedeno v programskem okolju Solidworks. Glede na zahtevo po modularnosti so izdelani modeli morali zadosti temu pogoju. Posamezno ohišje je sestavljeno iz 3 podenot (ohišje napajalnika, ohišje krmilnik in pokrov krmilnika). Glede na to, da se napajalnika med seboj razlikujeta se med seboj razlikujeta tudi ohišji napajalnika. Zgornja kosa (ohišje in pokrov krmilnika) se zaradi opravljanja iste funkcije in istih vgradnih elementov med seboj ne razlikujeta ne glede na to kakšen je napajalnik in ne glede na to ali je vanj vgrajen krmilnik za premikajoči se objekt (tag) ali fiksni objekt (anchor).

Glavni namen ohišja je varovanje izdelka in uporabnika. Sistem je lahko priključen na visoko napetost, kar predstavlja potencialno nevarnost za uporabnika, a zasnova ohišja onemogoča uporabniku, da bi ga električni tok lahko poškodoval. Tiskane vezje so najbolj občutljive komponente sistema, ko govorimo o mehanski poškodbi pred katerimi jih varuje ohišje, hkrati pa je preprečena možnost kratkega stika zaradi neprevidnosti uporabnika. Poudariti velja, da je zasnova ohišja potekala vzporedno z razvojem tiskanih vezij, saj je le na ta način bilo mogoče zagotoviti uporabo poka-yoke metode. Gre za metodo, ki se jo uporablja za preprečevanje nenamernih napak. V tem primeru gre za preprečevanje napačne montaže, saj je celoten sklop nastavljen tako, da napačna montaža ni mogoča. Posamezne komponente je praktično nemogoče namestiti na napačno mesto oz. jo napačno orientirati, saj v tem primeru eno izmed naslednjih komponent ne bo mogoče namestiti na njeno mesto.



Slika 5.1: 3D model ohišja

Do končne verzije je bilo potrebnih kar nekaj modifikacij, saj so se med tiskom in montažo pojavljale določene težave, ki jih je bilo potrebno s predelavo odpraviti. Vsekakor obstajajo ideje kako ohišje še izboljšati, a uporabljena oprema vseh kozmetičnih popravkov žal ne omogoča.



Slika 5.2: dimenzijska risba ohišja

5.2 3D tisk

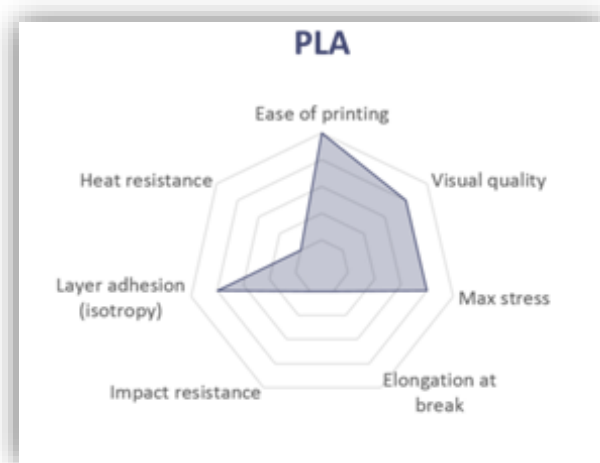
3D tisk se je izkazal kot nepogrešljiva tehnologija pri izdelavi prototipov ohišij, saj so rezultati več kot zadovoljivi in bi bili ob uporabi drugačnih metod (rezkanje, brizganje, ...) in materialov primerljivi, za njihovo izdelavo pa bi porabili neprimerno več časa in sredstev.

5.3 Material in postopek

V sodobnem svetu na trgu obstaja veliko različnih materialov (PLA, PETG, ABS, itd.) in nekaj različnih postopkov (FDM, SLA, itd.), ki se uporabljajo za izdelavo plastičnih prototipov. Zaradi izdelave prototipov z najmanjšimi stroški so prototipi izdelani iz materiala PLA in s postopkom FDM.

MATERIAL

Za 3D tisk ohišij je bil uporabljen PLA filament slovenskega podjetja Azurefilm. Izbran material ima napram ostalim, kar nekaj prednosti ko gre za izdelavo prototipov. Najpomembnejša je preprostost uporabe, saj se v primerjavi z drugimi ne viha na robovih, ne oddaja neprijetnega vonja in ne potrebuje tako konstante temperature okolice za sorazmerno dobro kakovost tiska.



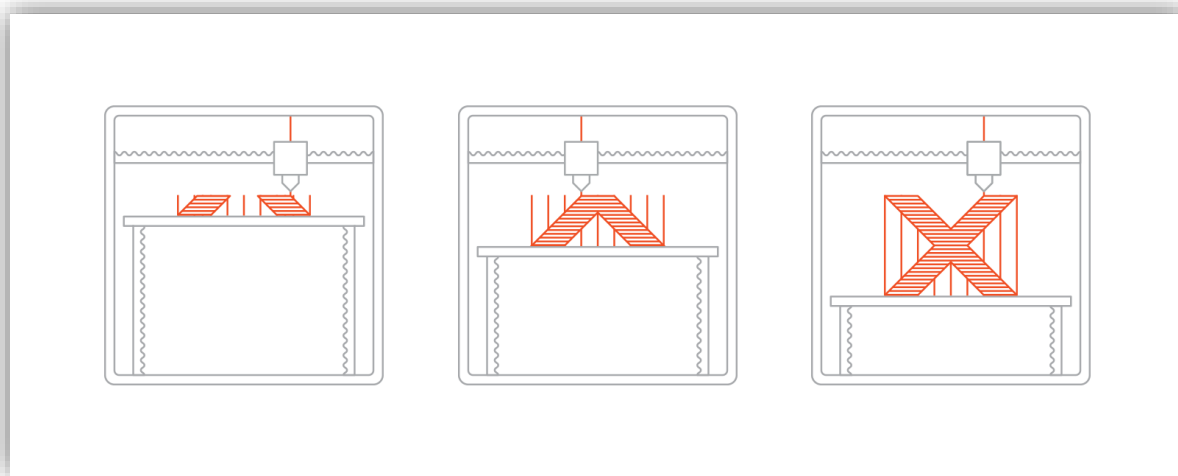
Slika 5.3: lastnosti materiala PLA [22]

POSTOPEK FDM

FDM postopek za svoje delovanje potrebuje termoplastični material (ponavadi navit na kolut), ki se dozira v grelno šobo, kjer se stopi v »pol tekoče« stanje. Na ta način je plastika primerna za spajanje z grelno mizo oz. z prejšnjo plastjo plastike. Spajanje materiala med posameznimi layer-ji poteka v treh korakih in sicer:

- vzpostavitev površinskega kontakta,
- povečanje površinskega stika med nanesenim in obstoječim materialom zaradi termične difuzije,
- notranja difuzija polimernih vezi.

Ko je celotna plast zaključena se grelna šoba pomakne za izbrano višino se postopek ponovi in se ponavlja vse dokler se tiskanje ne zaključi [24].



Slika 5.4: postopek FDM [23]

5.4 Generiranje kode

Glede na to, da je tiskalnik voden s pomočjo krmilnika je jasno, da za svoje delovanje potrebuje kodo preko katere krmili posamezen servo motorček. Podobno kot pri CNC strojih gre tudi

tukaj za G kodo. Generiranje G kode je pri enostavnih modelih zelo preprosto, saj je na spletu veliko prosto dostopnih generatorjev kode za 3D tiskalnike (t.i. slicer-jev). Glede na to, da je bil uporabljen 3D tiskalnik češkega podjetja Prusa se je kot najboljša opcija ponudila uporaba njihovega »slicer-ja«.

Generiranje kode je pri enostavnih modelih preprost postopek, saj programsko okolje uporabnika pripelje do G-kode z samo nekaj kliki (vse hitrosti in temperature so že vnaprej definirane), medtem ko pri kompleksnejših modelih postopek ni tako trivialen. V poglavju 5.1 3D modeliranje je prikazano, da sta 2 modela zelo preprosta oz. ju kot takšna obravnavamo (previsi so kratki, zato se tega lahko poslužimo), medtem ko je en model praktično v celoti dvignjen in nima stične površine na katero bi tiskalnik lahko začel nanašati filament. Glede na to, da gre pri vseh primerih za tanko stenske objekte jih tiskamo polne (brez notranjih mrež). V primeru kosa s previsi je generator G kode potrebno konfigurirati in nastaviti dodatne parametre za podporni material, ki se bo po koncu tiska odstranil (podporni material se tiska z drugačno hitrostjo in na drugačnih višinah plasti).

5.5 Tisk

Tisk s 3D tiskalnikom je dokaj preprosto opravilo, a vseeno je potrebno poznati svoj tiskalnik in filament katerega tiskamo, saj je le na ta način možno nastaviti optimalne parametre in dobiti kar se da kvaliteten izdelek. Poleg nastavitvev je pomembno, da se tiskalnik nahaja v stabilnem okolju, kjer ne prihaja do nihanj temperature in kjer ni prisotno gibanje zraka (prepih).

Vsi modeli so natisnjeni s tiskalnikom Original Prusa i3 MK2.5, pri čemer je višina posameznega sloja znaša 200 μm . Grelna miza na katero se nanaša prva plast je bila ogreta na 55 °C, temperatura taljenja materiala je znašala 215 °C.

3D tisk je relativno počasen postopek in zato ni primeren se serijsko proizvodnjo temveč le za prototipne izdelke. V tabeli so prikazani časi tiska posameznih in skupni čas tiskanje vseh kosov. Vidimo lahko, da je bilo za 4 ohišja potrebnih slabih 32,5 ure. Navedeni so neto časi tiskanja brez ogrevanje ter čiščenja mize in ogrevanja šobe.

Preglednica 5.1: čas tiskanja

#	Komponenta	Čas tiska kosa [h:m]	Št. kosov	Čas tiska [h:m]
1	ohišje 24 V napajalnika	1:38	1	1:38
2	ohišje 230 V napajalnika	1:49	3	5:27
3	Ohišje krmilne enote	4:54	4	19:36
4	Pokrov krmilne enote	1:26	4	5:44
			SKUPAJ:	32h 25min

6 STROŠKOVNA ANALIZA

Glede na željo oz. zahtevo po čim manjših stroških je v nadaljevanju predstavljena stroškovna analiza izdelave posameznih modulov v primeru izdelave posameznega kosa oz. manjšega števila kosov (do 5 kosov). Pri velikoserijski proizvodnji se ti stroški drastično znižajo, saj so marže posrednikov pri nakupu le nekaj kosov velike. Poudariti velja, da pri nobenem od izdelkov v stroške niso vštete cene dela in licenc programske opreme, temveč izključno stroški nakupa komponent potrebnih za izdelavo sistema.

6.1 Vezja

Cena izdelave vezij je pričakovano najvišja, saj so cene posameznih komponent uporabljenih relativno visoke. Iz preglednice 1 in 2 lahko razberemo, da pri napajalnih moduli največji strošek predstavljata pretvornik, ki sta najpomembnejši enoti na napajalnikih.

Preglednica 6.1: seznam komponent in stroškovna analiza DC/DC pretvornika

#	Komponenta	Cena na kos [€]	Št. kosov	Cena [€]
1	Tiskano vezje	1,60	1	1,60
2	DC/DC pretvornik RI3-2405S	8,88	1	8,88
3	Vključna sponka 2 pinska	1,40	2	2,80
4	Moški pin (opcijsko)	0,10	2	0,20
SKUPAJ:				13,48 €

Preglednica 6.2: seznam komponent in stroškovna analiza AC/DC pretvornika

#	Komponenta	Cena na kos	Št. kosov	Cena
1	Tiskano vezje	1,60	1	1,60
2	AC/DC pretvornik RAC03-05SK	5,33	1	5,33
3	Nosilec varovalke	0,52	1	0,52
4	Varovalka	0,54	1	0,54
5	Vključna sponka 2 pinska	1,40	2	2,80
6	Moški pin (opcijsko)	0,10	2	0,20
SKUPAJ:				10,99 €

Skupni stroški napajalnih modulov (trije 230 V in en 24 V napajani modul) znašajo 46,45 €.

Stroškovno največji zalogaj celotnega projekta predstavlja krmilni modul. K temu botrujeta predvsem ceni senzorskega modula DWM1000 in krmilnika ESP32-WROVER. V primerjavi z nekaterimi ostalimi senzorji za merjenje razdalje, ki delujejo na podobnem principu (npr. ultrazvočni senzor) je DWM1000 zaradi svojih precej boljših lastnosti dražji približno za faktor 10, kar pojasni visoke cene komercialno dobavljenih sistemov.

Preglednica 6.3: seznam komponent in stroškovna analiza krmilnega modula

#	Komponenta	Cena na kos [€]	Št. kosov	Cena [€]
1	Tiskano vezje	1,60	1	1,60
2	LDO 5V na 3.3V	0,34	1	0,34
3	Vključna sponka 2 pinska	1,40	1	1,40
4	Stikalo - tipka	0,11	2	0,22
5	USB tip C	2,95	1	2,95
6	Programator CP2102N	1,26	1	1,26
7	LED - rdeča	0,17	3	0,51
8	LED - zelena	0,28	3	0,84
9	Tranzistor SS8050-G	0,13	2	0,26
10	Schottky dioda	0,26	1	0,26
11	ESD	0,56	1	0,56
12	ESP32-WROVER	4,32	1	4,32
13	DWM1000	25,35	1	25,35
14	Upor - 0 Ω	0,18	2	0,36
15	Upor - 470 Ω	0,29	5	1,45
16	Upor - 1 k Ω	0,17	1	0,17
17	Upor - 4,7 k Ω	0,13	1	0,13
18	Upor - 10 k Ω	0,24	1	0,24
19	Upor - 12 k Ω	0,06	4	0,24
20	Kondenzator - 1nF	0,30	3	0,90
21	Kondenzator - 0,1 uF	0,21	2	0,42
22	Kondenzator - 1 uF	0,20	1	0,20
23	Kondenzator - 4,7 uF	0,31	1	0,31
24	Kondenzator - 10 uF	0,75	2	1,50
SKUPAJ:				45,79 €

Za izvedbo projekta so potrebni štiri krmilni moduli, tako da skupni stroški krmilnih modulov znesejo 183,16 €.

6.2 Ohišja in ostali stroški

Poleg stroškov vezij je potrebno upoštevati še stroške ohišij in ostalih perifernih elementov, ki so potrebni za delovanje sistema. K stroškom ohišij so všteti izključno stroški materiala brez stroškov amortizacije 3D tiskalnika in stroškov porabe električne energije.

Preglednica 6.4: stroški tiska in dodatnih komponent za delovanje sistema

#	Komponenta	Cena na kos [€]	Št. kosov	Cena [€]
1	Ohišje 24V napajalnika	0,45	1	0,45
2	Ohišje 230V napajalnika	0,44	3	1,32
3	Ohišje krmilne enote	1,72	4	6,88
4	Pokrov krmilne enote	0,41	4	1,64
5	USB C kabel	5,63	1	5,63
6	Kabel za vtičnico	3,29	3	9,87
SKUPAJ:				25,79 €

6.3 Skupni stroški projekta

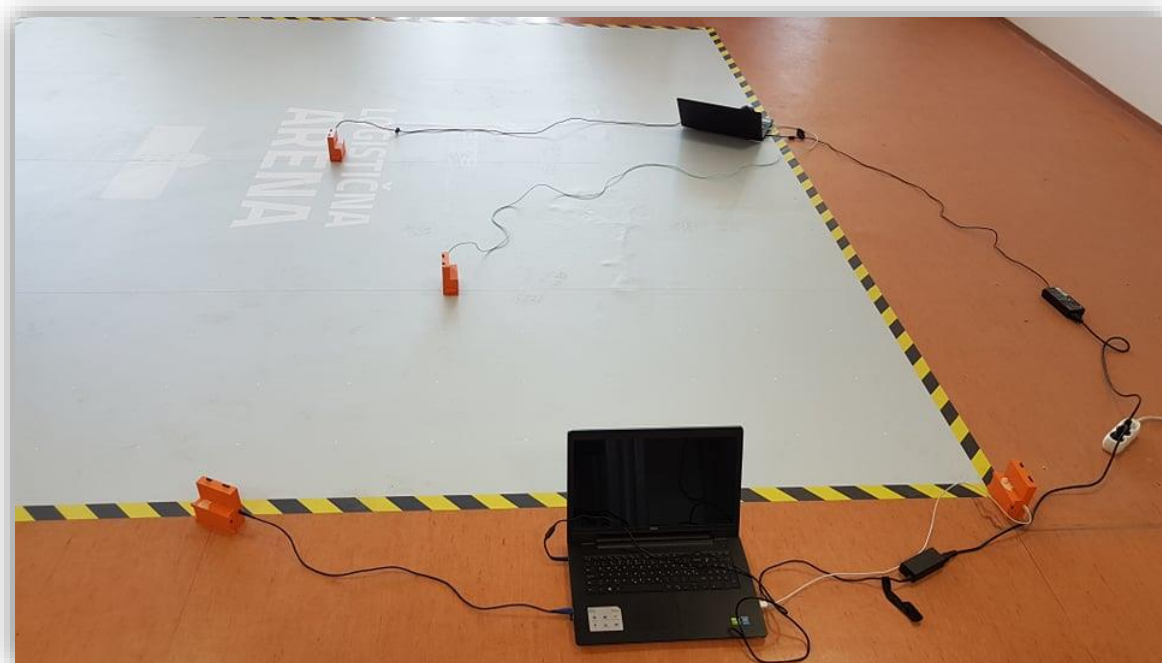
Skupni stroški projekta brez stroškov amortizacije opreme, vloženega časa in porabljene električne energije znašajo 255,40 €. V to ceno so vštete komponente za en komplet sistema za določanje položaja, pri čemer je potrebno omeniti, da je za povečanje natančnosti ali povečevanje merilnega območja potrebno dodati krmilne in napajalne module. Glede na to, da so vse komponente bile kupljene v manjših količinah lahko predpostavljamo, da se da strošek še znižati, saj proizvajalci ponujajo relativno velike rabate pri nakupu večjih količin posameznega produkta.

Preglednica 6.5: skupni stroški projekta

#	Komponenta	Cena na kos [€]	Št. kosov	Cena [€]
1	Napajalni modul 24V	13,48	1	13,48
2	Napajalni modul 230V	10,99	3	32,97
3	Krmilni modul	45,79	4	183,16
4	Ohišja in ostali stroški	25,79	1	25,79
SKUPAJ:				255,40€

7 TESTIRANJE

Testiranje predstavlja zadnjo stopničko pred zaključkom projekta. Testiranje je bilo izvedeno na Fakulteti za logistiko Univerze v Mariboru in sicer na poligonu velikosti 2x2 m s točkami na vsakih 25 cm. V treh skrajnih točkah poligona so bili postavljeni fiksni objekti (koordinate fiksni objektov – $[0;0]$, $[0;2]$, $[2;0]$), premikajoči objekt pa je bil za potrebe meritev premaknjen po vsaki meritvi. V vsaki točki je bilo zaradi želje po večji verodostojnosti meritev zajetih več izmerjenih vrednosti.

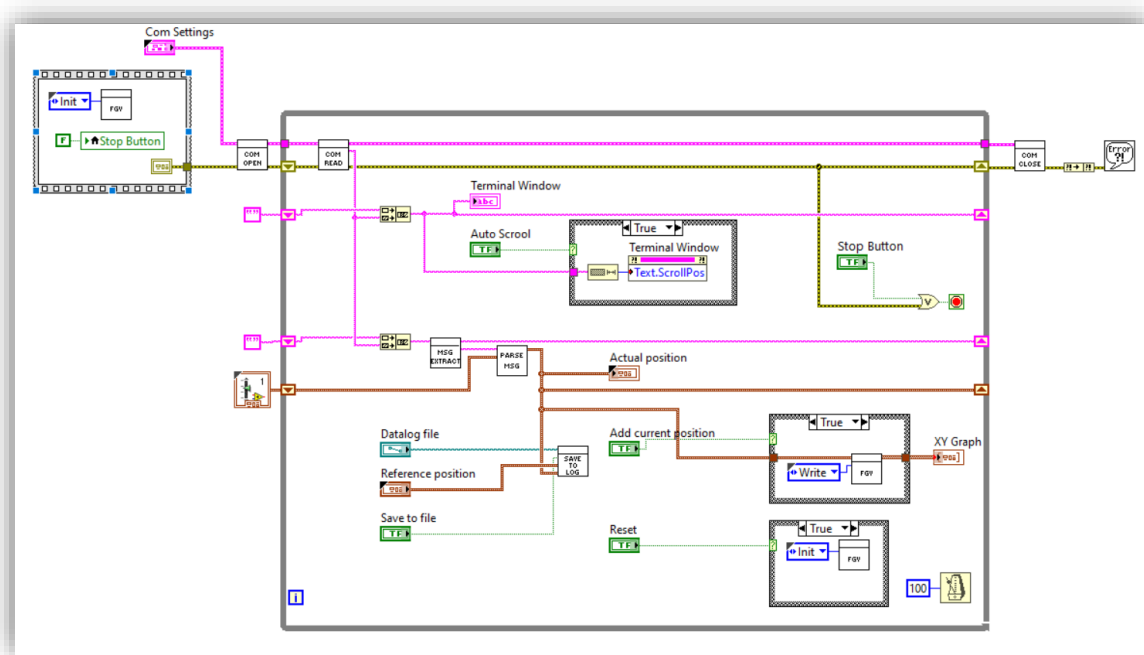


Slika 7.1: testiranje sistema na poligonu 2x2 m

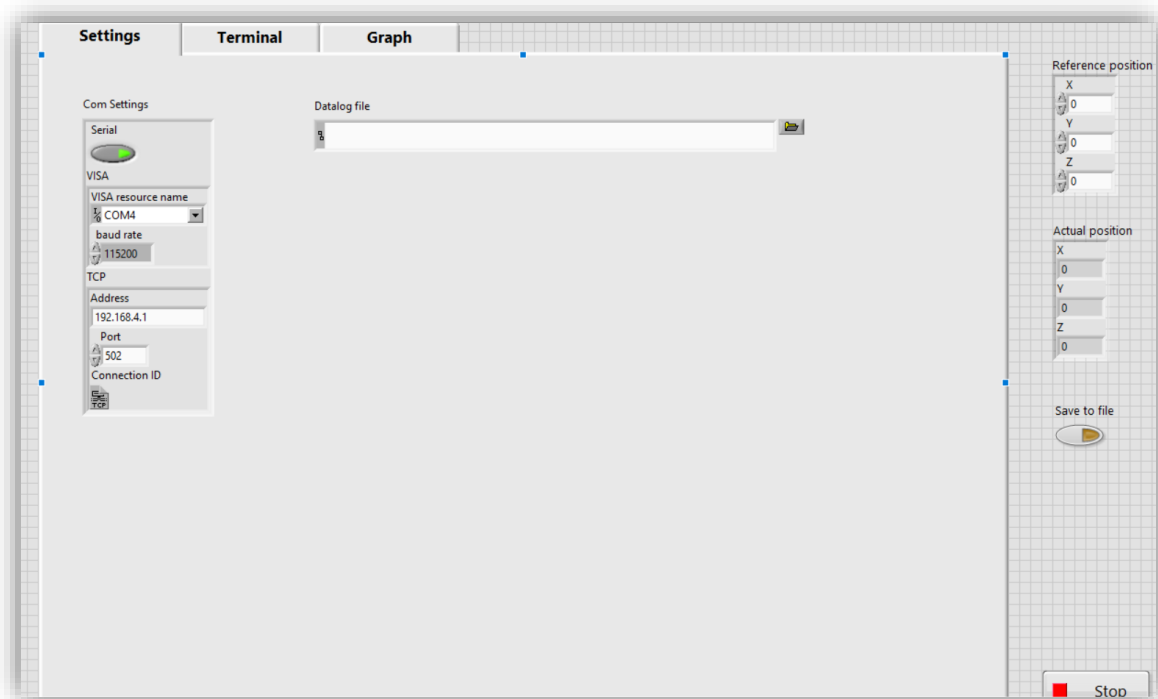
Pred začetkom izvajanja meritev je potrebno vse merilne naprave (krmilne module) povezati v isto omrežje, saj je le na ta način možno vzpostaviti komunikacijo med moduli – pošiljanje razdalje iz fiksnega objekta na premikajoči se objekt. Za določanje položaja premikajočega se objekta je posameznemu fiksному objektu preko posebne aplikacije potrebno vpisati njegove koordinate v prostoru (s tem se določi lokalni koordinatni sistem). Pravilno določanje položaja je možno šele po vzpostavitvi sistema, ki je pogojena s prejemanjem vseh treh izmerjenih razdalj med premikajočim se objektom in posameznim fiksnim objektom.

7.1 Zajemanje podatkov z LabVIEW-om

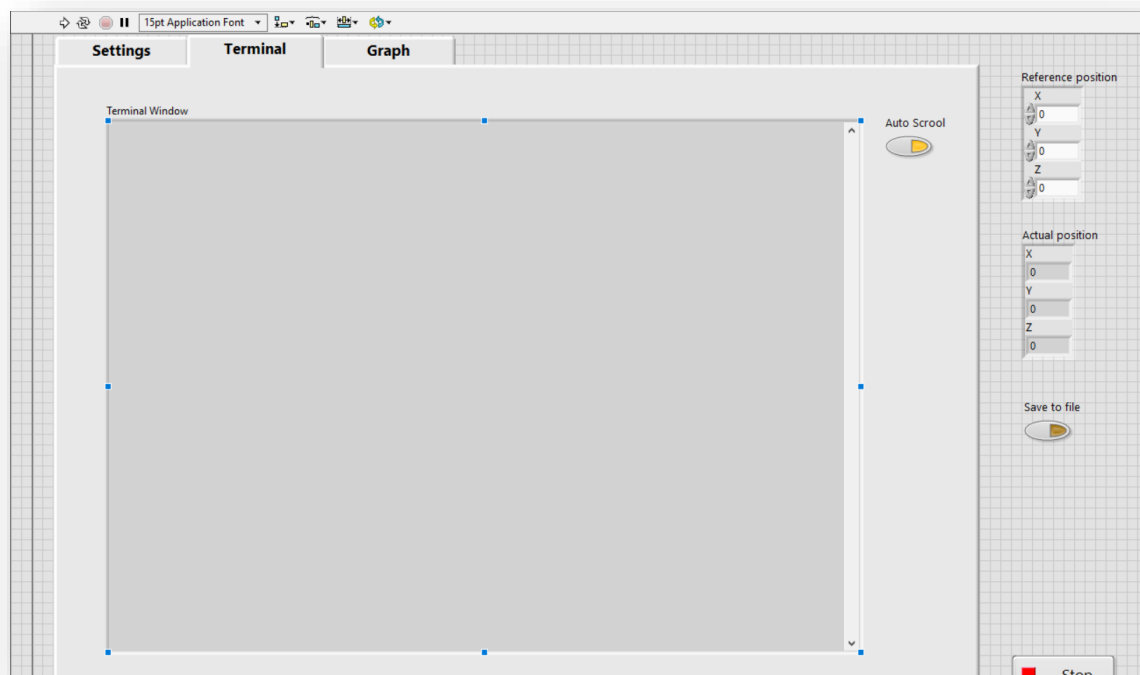
Za potrebe testiranja in lažjega spremljanja trenutnega položaja premikajočega objekta je bil izdelan uporabniški vmesnik v programskem okolju LabVIEW. Osnovni namen izdelave programa je bila želja po možnosti shranjevanja meritev v datoteko, saj to omogoča kasnejšo obdelavo pridobljenih rezultatov. Poleg funkcije shranjevanja program omogoča spremljanje izmerjenih vrednosti v realnem času.



Slika 7.2: programski del

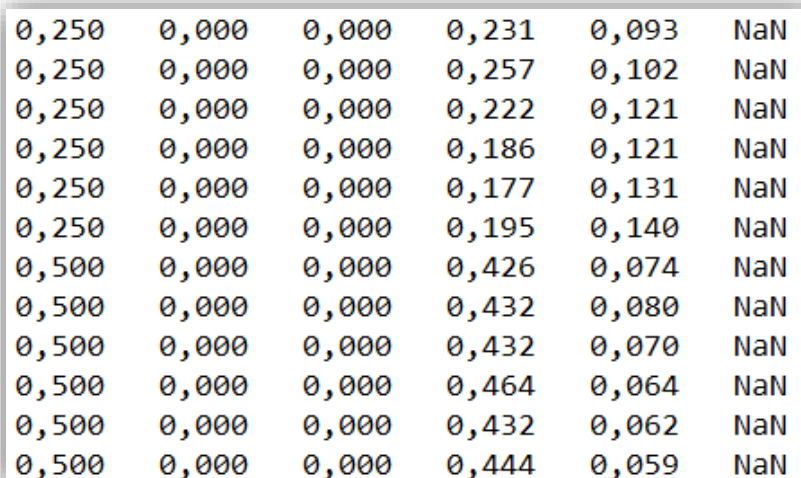


Slika 7.3: nastavitveno okno



Slika 7.4: čelna plošča uporabniškega vmesnika

Za zajemanje podatkov iz premikajočega objekta je med programom (oz. računalnikom na katerem se program izvaja) in krmilnim modulom potrebno vzpostaviti komunikacijo. Ta je izvedena preko USB kabla, v programu LabVIEW pa z uporabo VISA funkcij (VISA Open, VISA Read, VISA Write, VISA Close). Prikazovanje podatkov je identično prikazovanju v terminalnem oknu, sočasno pa se iz teh podatkov izluščijo 3 spremenljivke (koordinate X, Y in Z), ki se zaradi boljšega pregleda prikazujejo v ločenih oknih na desnem robu čelne plošče. Za shranjevanje podatkov je bil kreiran podprogram (SubVI), ki 6 podatkov (3 referenčne in 3 izmerjene koordinate) shrani v tekstovno datoteko. Referenčne koordinate na katere je postavljen premikajoči objekt je potrebno vnesti ročno v vnosna polja na čelni plošči LabVIEW programa (odvisno od položaja na katerega je postavljen krmilni modul). Shranjevanje podatkov je bilo za potrebe testiranja izvedeno ročno in sicer je za zapis v datoteko potreben klik na gumb »Save to file«. V prihodnje je možno program relativno preprosto nagraditi in shranjevanje podatkov avtomatizirati.



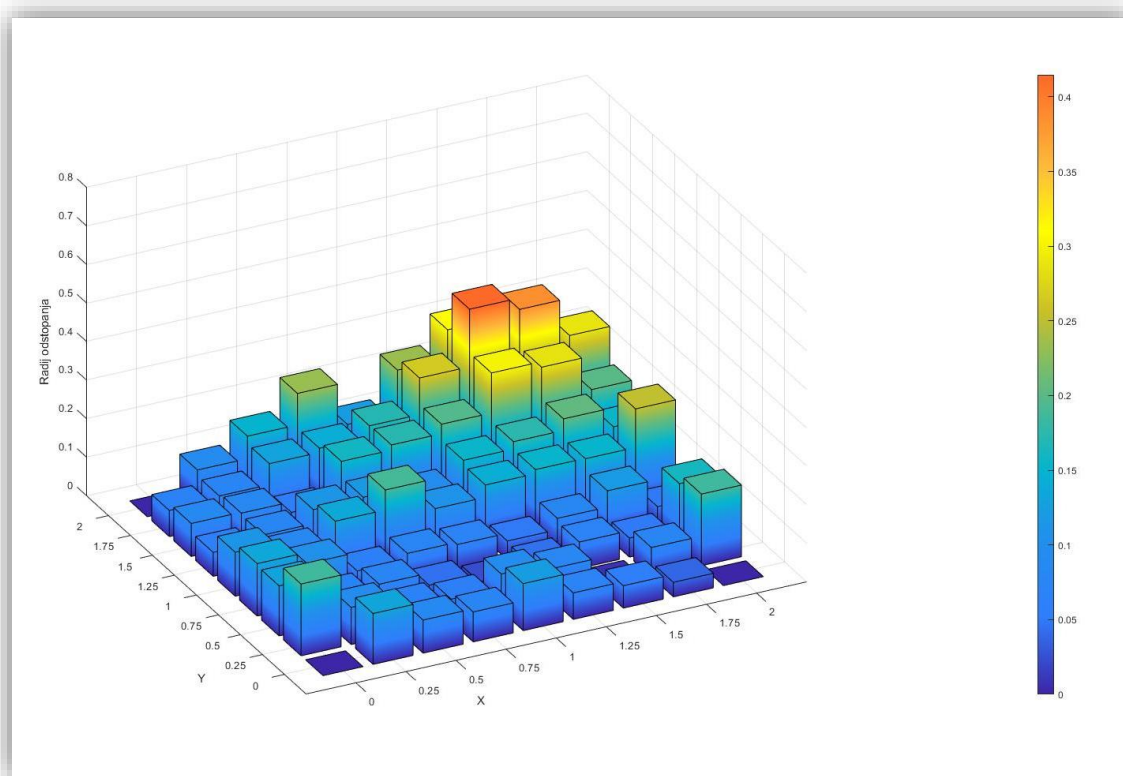
0,250	0,000	0,000	0,231	0,093	NaN
0,250	0,000	0,000	0,257	0,102	NaN
0,250	0,000	0,000	0,222	0,121	NaN
0,250	0,000	0,000	0,186	0,121	NaN
0,250	0,000	0,000	0,177	0,131	NaN
0,250	0,000	0,000	0,195	0,140	NaN
0,500	0,000	0,000	0,426	0,074	NaN
0,500	0,000	0,000	0,432	0,080	NaN
0,500	0,000	0,000	0,432	0,070	NaN
0,500	0,000	0,000	0,464	0,064	NaN
0,500	0,000	0,000	0,432	0,062	NaN
0,500	0,000	0,000	0,444	0,059	NaN

Slika 7.5: primer shranjenih rezultatov v datoteki

7.2 Rezultati

Iz relativno velikega števila meritev je bilo potrebno odstraniti napačne meritve, ki so se pojavile zaradi različnih vzrokov (največji vzrok je slaba povezava). Sledilo je povprečenje rezultatov in izračun absolutnih odstopanj od točke merjenja. Na ta način je možno rezultate

prikazati v obliki radija odstopanja napram točki merjenja. Iz dobljenih vrednosti je bil izdelan graf, ki je za tovrstno predstavitev rezultatov primernejši od same tabele z vrednostmi.

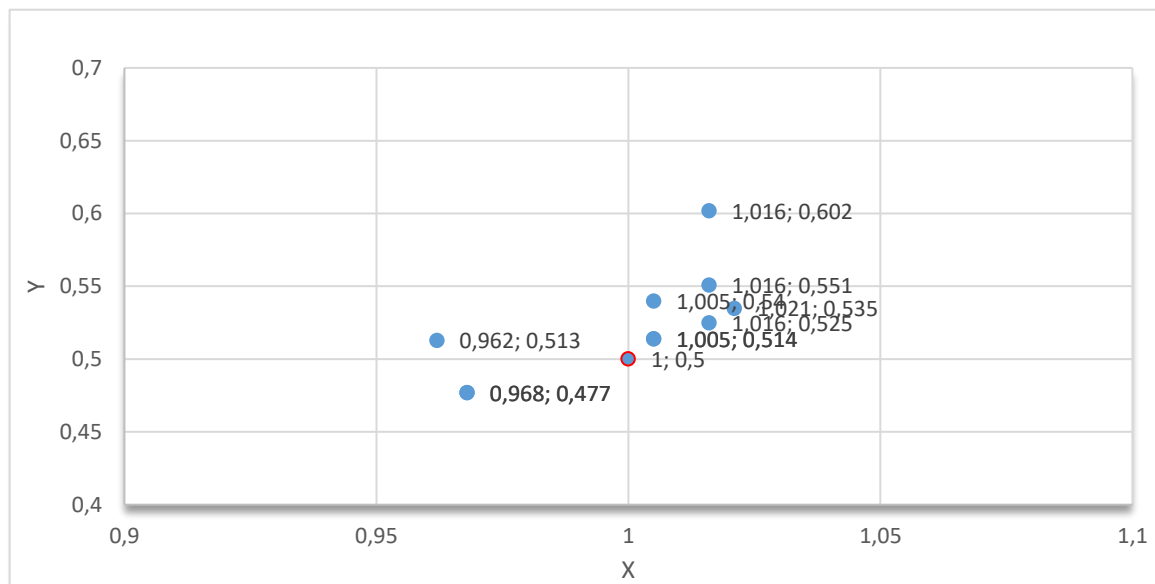


Slika 7.6: rezultati v grafikonu - stolpična oblika

Kljub majhni površini na kateri so bile izvedene meritve lahko pridemo do kar nekaj zaključkov. Ob vzorcu 10 meritev na 78 različnih točkah poligona brez ovir velja izpostaviti naslednje:

- Na koordinatah $[0;0]$, $[2;0]$ in $[0;2]$ so postavljeni fiksni objekti (tag-i), zato rezultatov na teh točkah ni.
- Povprečno odstopanje izmerjene napram dejanski vrednosti na celotni površini poligona znaša 13,34 %, kar pomeni 26,7 cm.
- Povprečna vrednost na kar 35 od 78 merilnih točkah je bila znotraj radija odstopanja 10 cm, kar predstavlja natančnost na 5 %.
- V trikotniku katerega stranice so daljice med fiksnimi objekti so rezultati v povprečju precej boljši od rezultatov zunaj navideznega trikotnika.

- Najboljša povprečna meritev se je pojavila na koordinati [1,5;0,25] in znaša 0,8 cm, najslabša povprečna meritev pa na koordinati [1,5;1,75] in znaša 41,5 cm.



Slika 7.7: Meritev v točki

Ob pogledu na primer rezultatov meritve v posamezni točki vidimo, da rezultati ne odstopajo v vse smeri enakomerno. To lahko pripišemo karakteristiki senzora in orientaciji senzora (rotacija okrog z osi). Kljub temu so rezultati zadovoljni, saj večjih odstopanj v izbrani točki ni opaziti.

8 PREGLED REZULTATOV IN DISKUSIJA

Končni izdelek, ki predstavlja rezultat dela sestoji iz napajalnega in krmilnega modula, ter iz treh ločenih delov sestavljenega ohišja. Izdelani so bili 4 moduli, ki predstavljajo zaključeno enoto lokalnega sistema za določanje položaja. Moduli delujejo zanesljivo in smo lahko z funkcionalnostjo, ki jo ponuja zelo zadovoljni. Potencial za nadaljnje delo vsekakor ostaja, saj je kar nekaj stvari mogoče še izboljšati. Največ maneverskega prostora za izboljšave je vsekakor v dimenzijah modula, ki jih je mogoče močno zmanjšati. Hkrati je smiselno dodati senzorje za zaznavanje dogajanja v okolici (temperatura, vlaga, ...), s čimer z nizkimi stroški pridobi na uporabnosti sistema.



Slika 8.1: končni izdelek – napajalni in krmilni moduli v ohišju

Ob pogledu na cilje magistrskega dela je moč sklepati, da je opravljeno delo uspešno, saj so vsi cilji magistrskega dela uspešno opravljeni. Hipoteze podane pred začetkom lahko v glavnem potrdimo saj je v projektu dokazano, da je:

- Z uporabo trenutnih komponent in tehnologij mogoče izdelati nizkocenovni sistem za lokalno določitev položaja premičnih objektov.

- Možno izdelati modul na katerega se program nalaga preko USB tipa C (čeprav je cenovna upravičenost vprašljiva).

Potrditi ne moremo edino hipoteze, ki pravi: enotno napajalno platformo bo možno vgraditi v avtomatsko vodeno vozilo (AGV) in nanjo priključiti tudi ostalo periferijo, kakor tudi uporabiti za napajanje fiksno nameščenih postaj sistema, saj je nesmiselno napajati vse module iz enotne napajalne platforme.

Rezultati meritev prikazani v prejšnjem poglavju so pokazali, da je s tovrstnim sistem mogoče relativno natančno določiti položaj objekta v zaprtem prostoru. Iz dobljenih rezultatov, s katerimi smo sicer zadovoljni, lahko podamo nekaj opažanj in predlogov za še dodatno izboljšanje rezultatov:

- Najbolj motijo slabši rezultati v območju, ko je premikajoči se objekt najbolj oddaljen od vseh treh fiksnih objektov. Iz tega lahko sklepamo, da bi dodaten fiksni objekt ta odstopanja močno izboljšal, hkrati pa omogočil tudi merjenje po z osi.
- Izvajanje meritev na večji površini izboljša dobljene rezultate.
- Z boljšim Wi-Fi omrežjem dobimo bolj zanesljiv, hitrejši in stabilnejši lokalni sistem za določanje položaja.

9 SKLEP

Magistrsko delo predstavlja v en projekt zajet skupek nabranih znanj skozi celotno visokošolsko izobraževanje iz področja mehatronike, ki je kombinacija strojništva in elektrotehnike oz. elektronike. Pregled stanja na trgu je pokazal, da določene rešitve na področju lokanega pozicioniranja že obstajajo, a se jih ne uporablja v tolikšni meri, kot bi pričakovali. K temu botrujejo relativno visoki investicijski stroški, ki si jih privoščijo le nekaj podjetij. To je bil povod za izdelavo lastnega sistema, ki ga je mogoče izdelati in namestiti v objekt z relativno nizkimi stroški pri dovolj dobri kakovosti in zanesljivosti. Izdelani moduli bazirajo na merjenju razdalje med dvema DWM1000 senzorskima moduloma, ki delajo na osnoviToF. Pozornost posvečena varnosti uporabnika in samega sistema rezultira v izdelanih ohišjih. Izdelan prototipni sistem je pripravljen za uporabo, a vseeno ponuja še kar nekaj možnosti za izboljšave (velikost tiskanega vezja, kakovost in oblika ohišij, ...).

Skozi projekt sem dopolnil znanje in dobil nov pogled na vse prednosti in pasti projektne delo. Hkrati sem krepil sposobnost dela v ekipi, saj je bilo za izdelavo končnega izdelka potrebno veliko sodelovanja in prilagajanja. Pridobljena znanja mi bodo koristila na karierni poti in jih bom poskušal kar se da dobro prenesti v industrijsko okolje.

10 BIBLIOGRAFIJA

- [1] MHI, „How do the vehicles work in an AGV system?“, [Elektronski]. Available: <http://www.mhi.org/downloads/industrygroups/agvs/elessons/vehicles-work-agv.pdf>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [2] D. Coldewey, februar 2017. [Elektronski]. Available: <https://techcrunch.com/2017/02/12/wtf-is-lidar/>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [3] „agvblog“, julij 2019. [Elektronski]. Available: <http://www.agvblog.com/233.html>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [4] „wikipedia“, [Elektronski]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle. [Poskus dostopa januar 2020].
- [5] „agvnetwork“, [Elektronski]. Available: <https://www.agvnetwork.com/types-of-navigation-systems-automated-guided-vehicles>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [6] „ISA“, avgust 2018. [Elektronski]. Available: <https://www.isa.org/intech/20180803/>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [7] „robotic automation P/L“, [Elektronski]. Available: <http://www.roboticautomation.com.au/agvs>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [8] A. B. - S. Technologies, „HOW SENSORS ARE MOVING MATERIALS HANDLING TOWARDS“, [Elektronski]. Available: https://www.automation.com/pdf_articles/sensata/sensata-material-handling-agv-white-paper_final.pdf. [Poskus dostopa januar 2020].
- [9] M. Goehner, julij 2019. [Elektronski]. Available: <https://www.eenewseurope.com/news/agv-navigation-what-are-possibilities>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [10] goetting, [Elektronski]. Available: <https://www.goetting-agv.com/components/19600>. [Poskus dostopa januar 2020].

- [11] „ima magnets,“ [Elektronski]. Available: <https://www.imamagnets.com/en/blog/agv-magnetic-tape-and-its-advantages/>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [12] seegrid, [Elektronski]. Available: <https://seegrid.com/blog/vgv-agv-safety-is-and-will-always-be-in-the-driver-s-seat/>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [13] H. Fazlollahtabar in M. Saidi-Mehrabad, *Autonomous Guided Vehicles*, springer, 2015.
- [14] G. Ullrich, *Automated Guided Vehicle Systems*, springer, 2015.
- [15] mhl news, „mhlnews,“ junij 2016. [Elektronski]. Available: <https://www.mhlnews.com/new-products/article/22051550/natural-navigation-capability-for-agvs-new-products>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [16] „supplychain247,“ [Elektronski]. Available: https://www.supplychain247.com/paper/automated_guided_vehicles_vs_self_driving_vehicles. [Poskus dostopa januar 2020].
- [17] KUKA, „KUKA,“ [Elektronski]. Available: <https://www.kuka.com/en-gb/products/mobility/mobile-robots/kmr-iiwa>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [18] Bastian solutions, „www.bastiansolutions.com,“ [Elektronski]. Available: <https://www.bastiansolutions.com/solutions/technology/automated-guided-vehicles/raymond-courier-3010-pallet-truck/>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [19] TPV d.o.o., „TPV,“ [Elektronski]. Available: <https://www.tpv.si/si/pametne-tovarne/avtomatsko-vodena-vozila/>. [Poskus dostopa januar 2020].
- [20] infsoft GmbH, „infsoft,“ [Elektronski]. Available: <https://www.infsoft.com/technology/positioning-technologies/ultra-wideband>. [Poskus dostopa februar 2020].
- [21] FiRa Consortium, „fira,“ [Elektronski]. Available: <https://www.firaconsortium.org/discover/how-uwb-works>. [Poskus dostopa februar 2020].
- [22] 3D hubs, [Elektronski]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>. [Poskus dostopa marec 2020].

- [23] „3D hubs,“ [Elektronski]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#what>. [Poskus dostopa april 2020].
- [24] T. Muck in I. Križanovskij, 3D-TISK, Pasadena, 2015.
- [25] „Wikimedia Commons,“ [Elektronski]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trilateration.svg>. [Poskus dostopa marec 2020].