

# Vodenje merilne robotske platforme za ocenjevanje karakteristik hladilnih stolpov

Jure Javornik<sup>1</sup>, Anže Kumer<sup>1</sup>, Klemen Niedorfer Horvat<sup>1</sup>

Mentorja: doc.dr. Andrej Sarjaš<sup>1</sup>, dr. Jure Smrekar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Laboratorij za obdelavo signalov in daljinskega vodenja, Koroška cesta 46, 2000, Maribor, Slovenija

<sup>2</sup>JS Energija d.o.o., Stegne 35, 1000, Ljubljana, Slovenija

jure.javornik@student.um.si, klemen.horvat@student.um.si, anze.kumer@student.um.si,  
andrej.sarjas@um.si

## *Networked Control System of the Measuring Robotic Platform for the Cooling Tower Performance Testing*

Cooling towers are used to cool water in industrial plants, especially in electrical industry, where they are an important part of efficient power generation. They are used in a variety of thermal power plants, where we must cool the steam that we use to drive turbines for generating electricity.

The performance of cooling towers is measured by standardized tests for which air velocity and temperature measurements are performed inside the tower. Previous solutions in this area were based on manual measurement, which can be very dangerous for the measurer due to the possibility of bacterial infection, slipping or falling into depth.

In this article we present a more advanced solution for capturing measurements of a cooling tower based on a measuring robot platform. The advantage of the robot platform is complete autonomy, which excludes the presence of a person and speeds up the measurement. In an article, we will focus exclusively on a regulation of a robot inside a tower. The regulation for robot runs on a server that communicates with a robot via a Wi-Fi network, navigation is based on the signal time of flight between the robot and the reference anchor.

### *Kratek pregled prispevka*

Hladilni stolpi se uporabljajo za hlajenje vode v industrijskih obratih, še posebej v elektroindustriji, kjer so pomemben člen v verigi učinkovitega pridobivanja električne energije. V uporabi so pri vseh tipih termo-elektrarn, kjer moramo hladiti paro, s katero poganjamo turbine za proizvodnjo elektrike.

Učinkovitost hladilnih stolpov se meri s standardiziranimi garancijskimi testi, pri katerih se opravljajo meritve hitrosti zraka ter temperature znotraj stolpa. Dosedanje rešitve na tem področju so temeljile na ročnem merjenju, ki je lahko zelo nevarno za merilca zaradi možnost bakterijske okužbe, zdrsov ali padcev v globino.

V članku je predstavljena napredna rešitev zajemanja meritev hladilnega stolpa na osnovi merilne robotske platforme. Prednost robotske platforme je popolna avtonomija, kar izključuje prisotnost človeka ter pohitri merjenje. V članku se bomo izključno osredotočili na zaprto-zančno vodenje robota znotraj stolpa. Vodenje robota poteka preko serverja, ki z robotom komunicira preko Wi-Fi omrežja ter notranje navigacije.

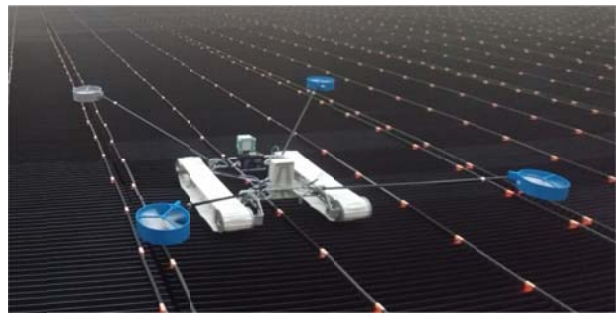
## 1 Uvod

Hladilni stolpi se uporabljajo za hlajenje vode v industrijskih obratih. Najdemo jih v elektroindustriji, proizvodnji železa in cementa, rafinerijah ter kemični industriji. V elektroindustriji, so hladilni stolpi pomembni člen v verigi učinkovitega pridobivanja električne energije [1]. Ti so tako rekoč prisotni pri vseh tipih termo-elektarn, katere za gorivo najpogosteje uporabljajo premog, jedrsko gorivo, zemeljski plin, nafto, odpadke ali biomaso. Glavna naloga hladilnega stolpa v termo elektrarnah je hlajenje hladilne vode, ki je del zaprtega procesa in se neposredno ne uporablja pri pridobivanju energije. Hladilna voda iz stolpa po ločenih dovodih hladi kondenzator ter se ne meša s pridobljeno paro. Para je nadalje potrebna za pogon turbine in posledično električnega generatorja.

Učinkovitost hladilnih stolpov se meri s standardiziranimi garancijskimi testi. Garancijski testi podajajo učinkovitost bodisi novega stolpa ali degradacijo stolpa tekom delovnega obdobja, glede na prvotno stanje. Za izvedbo garancijskega testa je potrebno opraviti meritve hitrosti zraka ter temperature znotraj stolpa. Dosedanje rešitve na tem področju so izključno orientirane na manualne meritve, ki zahtevajo prisotnost človeka. Ročno izvajanje meritev je zelo dolgotrajno, lahko traja tudi nekaj dni, pri čemer predolgo zajemanje podatkov lahko privede tudi do nepopolnih analiz ter napačnih zaključkov. Ročno merjenje je lahko nevarno za človeka. Merilec se mora gibati v delujočem stolpu, kar povečuje možnost bakterijske okužbe, zdrsov in padcev v globino.

V članku je predstavljena naprednejša rešitev zajemanja meritev stolpa na osnovi merilne robotske platforme, slika 1. Robotska platforma izvaja meritve temperature ter hitrosti zraka na točno določeni lokaciji znotraj stolpa. Postopek zajemanja meritev je avtomatiziran. Prednost robotske platforme je popolna avtonomija, kar izključuje prisotnost človeka ter pohitri merjenje. V članku se bomo izključno osredotočili na vodenje robota znotraj stolpa. Za vodenje robota smo uporabili UWB (ultra

širinsko-pasovni) navigacijski sistem, ki na osnovi preleta visoko frekvenčnega signala določi oddaljenost objekta od referenčnega sira. Zaprt-zančno vodenje robota poteka preko Wi-Fi omrežja ter serverja, ki skrbi za merjenje, lokalizacijo ter izračun algoritmov vodenja robotske platforme. V nadaljevanju bomo predstavili princip in način zaprt-zančnega vodenja robotske platforme. Izvedba robota:



Slika 1: Merilna robotska platforma.

## 2 Model robotske platforme

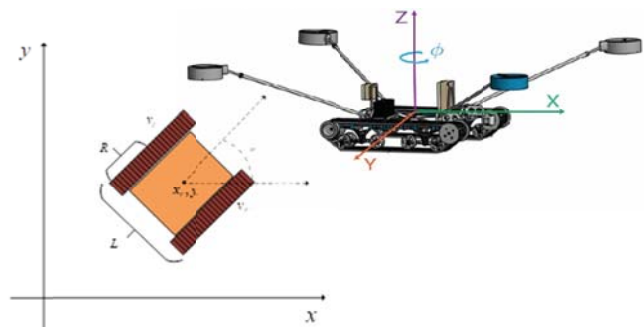
Za določitev regulacijske strukture ter regulatorjev smo uporabili naslednji kinematični model robota [1]-[4],

$$\dot{x} = \frac{R}{2}(v_r + v_l) \cos \varphi \quad (1)$$

$$\dot{y} = \frac{R}{2}(v_r + v_l) \sin \varphi \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{R}{L}(v_r - v_l) \quad (3)$$

Model opisuje gibanje robotskega sistema v dvodimenzionalnem prostoru  $x$  in  $y$ , kjer sta  $\dot{x}$  in  $\dot{y}$  hitrosti robota v ločenih koordinatah. Vhod modela sta hitrosti levega in desnega pogona  $v_r$  in  $v_l$ ,  $\varphi$  je orientacija robota x-y ravnini, slika 2.



Slika 2: Robotska platforma v referenčnem koordinatnem sistemu.

## 2.1 Poenostavljen model robota z diferencialnim pogonom

Zaradi potrebe po zaprto-zančnem vodenju in načrtovanju sistema, model robota (1)-(3) predstavimo, kot model mono-kolesa [4].

$$\dot{x} = v \cos \varphi, \quad (4)$$

$$\dot{y} = v \sin \varphi, \quad (5)$$

$$\dot{\varphi} = \omega. \quad (6)$$

kjer je,

$$v = \frac{R}{2}(v_r + v_l), \quad (7)$$

$$\omega = \frac{R}{L}(v_r - v_l). \quad (8)$$

Poenostavljen model opisuje hitrosti sistema v treh prostostnih stopnjah. Tri prostostne stopnje predstavljajo gibanje sistema po koordinatah  $x$  in  $y$  ter orientacijo robota  $\varphi$ .

## 3 Lokalizacija robotske platforme

### 3.1 Referenčne točke

Za referenčne točke v prostoru uporabljamo tri tako imenovana referenčna sidra z vgrajenim komunikacijskim modulom DW1000 [Slika 3]. Sidra so stacionarna in za fiksno dolžino oddaljena drug od drugega. Sidra s pomočjo tehnike razlike časov preleta UWB signala – TDOA 'Time Difference Of Arrival', v frekvenčnem razponu od 3.5-6.5 GHz določijo oddaljenost robota. Natančnost meritve razdalje je ocenjena na  $\pm 10$  cm. Podatke o oddaljenosti robot pošlje preko brezžične komunikacije Wi-Fi na strežnik, kjer se podatki obdelajo.



Slika 3: Navigacijski modul DW1000.

### 3.2 Lociranje robotskega sistema v prostoru

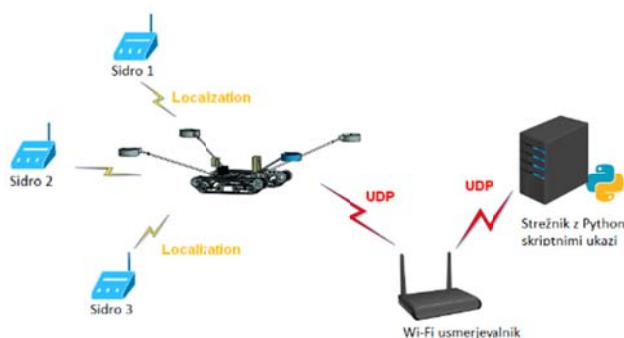
Lokacijo robotskega sistema določimo s pomočjo razdalje med robotom in referenčnimi točkami.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \quad (9)$$

Kjer  $x_1$  in  $y_1$  predstavljata pozicijo posameznega sidra v ravnini,  $r_1$  pa predstavlja oddaljenost robota od sider. Pozicija robota  $(x, y)$  se po izračunu triangulacije filtrira z nizko-pasovnim sitom. S filtrom odstranimo visoko frekvenčne motnje, ki so posledica meritve časa preleta, tresenja platforme in omejene natančnosti sistema. Podatek o orientaciji robota v prostoru  $\varphi$  pridobimo iz inercialne merilne enote BNO080 proizvajalca Bosch.

### 3.3 Arhitektura zaprto-zančnega vodenja preko Wi-Fi omrežja.

Vodenje robota je potekalo preko Wi-Fi omrežja, kjer je server skrbel za lokalizacijo robota, shranjevanje meritev ter zaprto-zančno vodenje. Podatke na server je pošiljal robot, ki je v omrežju imel svoj fiksni IP-naslov. Komunikacija med robotom in serverjem je potekala tako, da je server poslal zahtevo za prejemanje podatkov. Robot je glede na zahtevo serverja lahko poslal naslednje podatke, bodisi vrednost meritev, oddaljenost robota od sider, naklon robota, stanje baterije itd.



Slika 4: Arhitektura vodenja robotskega sistema preko Wi-Fi omrežja.

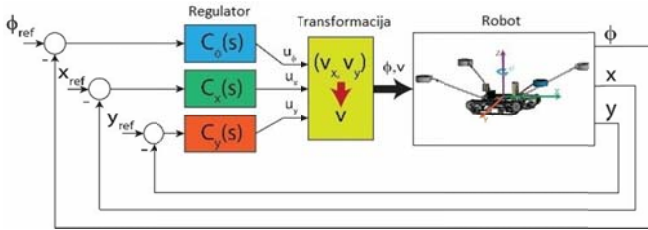
Največja zakasnitev preko omrežja je znašala približno 100ms, kar pomeni, da zakasnitev ni bistveno vplivala na zaprto-zančno vodenje ter posledično na stabilnost sistema [4],[5].

## 4 Zaprto-zančno vodenje

### 4.1 Struktura regulatorja

Vodenje robota se izvaja na strežniku in je sestavljeno iz dveh regulacijskih zank. Prva zanka vodi orientacijo robota. Ta zanka skrbi za

ohranjanje smeri vožnje proti referenčni točki. Drugi dve regulacijski zanki vodita hitrosti pogonov, glede na razdaljo med robotom in referenčno točko. Vodenje robota je razdeljeno na osi  $x$  in  $y$ .



Slika 5: Zaprto-zančna struktura merilne robotske platforme.

## 4.2 Vodenje orientacije

Za regulator orientacije smo glede na integralno delovanje modela rotacije izbrali preprosto strukturo prehitevalnega kompenzatorja. S pravilno izbiro koeficientov prehitevalnega kompenzatorja smo odpravili prenihaj odziva na stopnični referenčni signal ter zagotovili zadovoljivo dinamiko odziva. Struktura prehitevalnega regulatorja je :

$$C_{\varphi}(s) = k_{\varphi} \frac{s+b_{\varphi}}{s+a_{\varphi}}, \quad a_{\varphi}, b_{\varphi} \in -\mathbb{R}, |a_{\varphi}| > |b_{\varphi}|. \quad (10)$$

Koeficiente regulatorja smo določil na osnovi poenostavljenega modela orientacije.

$$H_{\varphi}(s) = \frac{\varphi(s)}{V(s)} = \frac{k_{\varphi}}{s}, \quad k_{\varphi} = 42.3^{\circ}/V. \quad (11)$$

Kjer je  $\varphi$  orientacija platforme in  $V$  napetost na levi in desni pogonski sklop. Koeficient  $k_{\varphi}$  je eksperimentalno določen glede na meritve časa pri zasuku platforme za  $360^{\circ}$  pri konstantnem vzburjanju. Izbrani koeficienti  $a = -1.32$ ,  $b = -0.65$ ,  $k_{\varphi} = 0.047$  so bili določeni tako, da sistem nima prenihaja in čas umiritve zaprte zanke za  $360^{\circ}$  znaša  $t_s \approx 8$  s.

## 4.3 Vodenje pozicije

Za regulacijsko strukturo vodenje pozicije robota v prostoru po koordinatah predstavljenih na sliki 1, smo prav tako izbrali prehitevalni kompenzator. Poenostavljen model robota pomika po  $x$  in  $y$  je podoben, kot model rotacije okrog osi  $z$ , (11). Model pomika je :

$$H_x(s) = \frac{x(s)}{V(s)} = \frac{k_x}{s}, \quad k_x = 0.42 \text{ m}/V \quad (12)$$

$$H_y(s) = \frac{y(s)}{V(s)} = \frac{k_y}{s}, \quad k_y = 0.42 \text{ m}/V \quad (13)$$

Koeficienta  $k_x$  in  $k_y$  sta bila določena eksperimentalno na osnovi meritve časa in prevožene razdalje pri konstantnem vzburjanju. Prehitevalni kompenzator je :

$$C_x(s) = K_x \frac{s+b_x}{s+a_x}, \quad a_x, b_x \in -\mathbb{R}, |a_x| > |b_x|, \quad (14)$$

$$C_y(s) = K_y \frac{s+b_y}{s+a_y}, \quad a_y, b_y \in -\mathbb{R}, |a_y| > |b_y|. \quad (15)$$

Koeficienti regulatorja so bili določeni na osnovi načrtovalskih kriterijev; prenihaj manjši od 1% ter čas umiritve  $t_s \approx 4$  s na 1 m, kar je približno enako hitrosti 1 km/h. Določeni koeficienti pri predpostavki, da sta regulatorja enaka  $C_x = C_y$  so:  $a_x, a_y = -3.82$ ,  $b_x, b_y = -0.889$ ,  $K_x, K_y = 1.23$ .

## 4.4 Izvajanje regulacijskega algoritma

Algoritem regulacije se izvaja s časom tipanja 0.2 s. Na sistemu realnega časa smo implementirali diskretno obliko regulatorjev (10), (14), (15), [2], [7]. Pri nastavitvi referenčne točke  $(x_{ref}, y_{ref})$  je izvajanje vodenja razdeljeno na vodenje orientacije in vodenje pozicije. Zaradi prostorske omejenosti robota znotraj stolpa, se v prvem koraku izvede samo regulacija orientacije, ki služi, da se robot na mestu usmeri proti referenčni poziciji. Ko se robot usmeri proti referenčni točki, se prične izvajati sočasno regulacija pozicije in regulacija orientacije. Pri sami vožnji proti referenčni točki, se željena orientacija sistema izračuna po enačbi,

$$\varphi_{ref} = \arctg\left(\frac{y_{ref}-y}{x_{ref}-x}\right). \quad (16)$$

Transformacija hitrosti  $v_x, v_y$  za model (4)-(7) se izračuna,

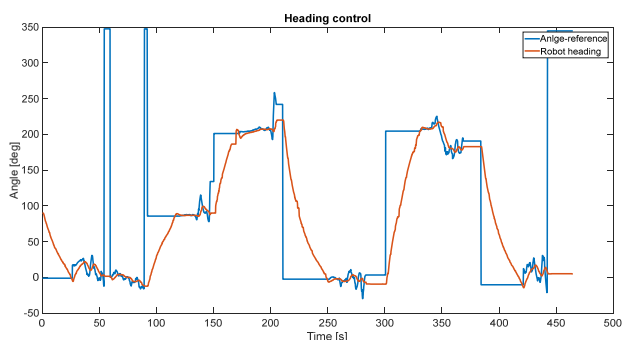
$$v = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}. \quad (17)$$

kjer sta  $u_x, u_y$  izhoda regulatorjev poti, slika 5.

## 5 Rezultati

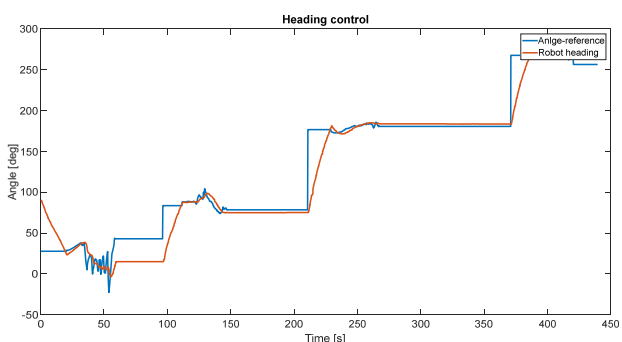
Testiranje regulatorjev smo izvedli v večih korakih. V prvem koraku smo testirali vodenje orientacije. Ker poznamo trenutno pozicijo robota ter željeno točko, lahko izračunamo

orientacijo, da bo robot pravilno usmerjen proti želeni točki. Zasuk robota izvedemo tako, da se ta zasučje za najkrajši možni kot. Ta del smo temeljito testirali z različnimi koti v različnih kvadrantih, da smo simulirali kar seda največ možnih kombinacij, na katere lahko robot naleti v realnih situacijah. Na začetku testiranja smo uporabili regulator, katerega parametri niso bili dobro nastavljeni, zato je robot velikokrat zgrešil pravilni kot zasuka ali pa je potreboval zelo veliko časa, da se je pravilno obrnil [Slika 6].



Slika 6: Vodenje orientacije robota z neustrezno nastavljenim regulatorjem.

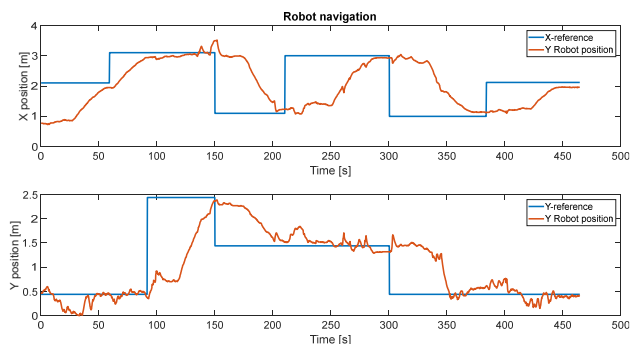
Z bolj optimalno nastavitvijo parametrov regulatorja je robot postal hitrejši ter bolj natančen pri zasukih, kar se lepo vidi v naslednjem grafu na sliki 7.



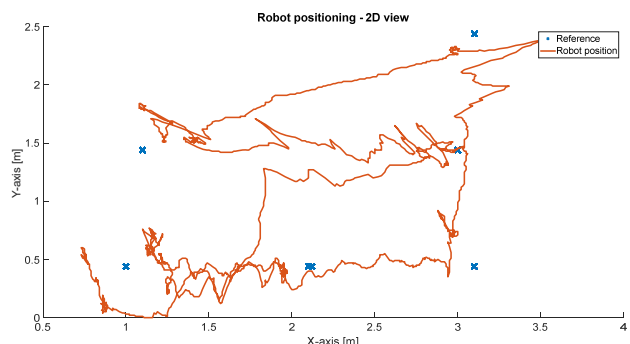
Slika 7: Vodenje orientacije robota z nastavljenim regulatorjem.

V drugem delu smo testirali regulator pozicije po  $x$  in  $y$  osi. Ta regulator popravlja orientacijo robota med vožnjo, odpravlja napake, ki nastanejo zaradi različnih hitrosti motorjev, kar je posledica diferenčnega pogona ter trenja. Pri ne nastavljenem regulatorju robot

ne doseže točke ali pa jo prevozi, kar je vidno iz naslednjih slik 8 in 9.

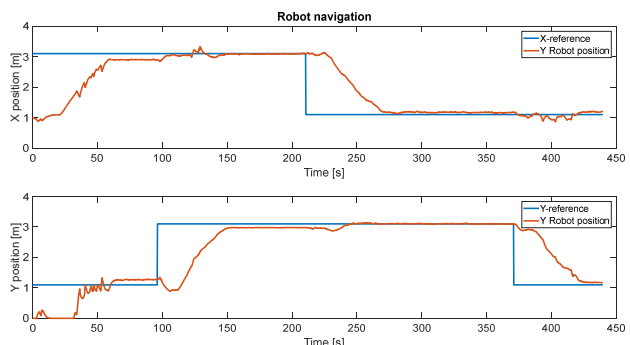


Slika 8: Vodenje pozicije robota z ne nastavljenim regulatorjem.

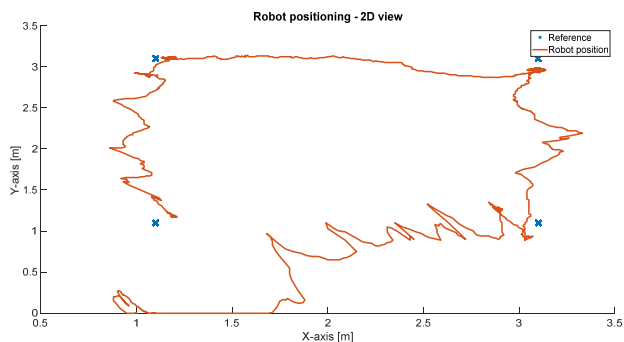


Slika 9: Vodenje pozicije robota v  $x, y$  ravnini z neustrezno nastavljenim regulatorjem.

Po uspešni nastavitvi obeh regulatorjev so testi vodenja prikazani v slikah 10 in 11. Za reference smo izbrali štiri naključne točke, do katerih se je robot zapeljal natančno, brez velikih popravkov in prenehajev.



Slika 10: Vodenje pozicije robota z nastavljenim regulatorjem.



Slika 11: Vodenje pozicije robota v  $x, y$  ravnini z nastavljenim regulatorjem pozicije.

Iz zadnjega grafa na sliki 11 vidimo, kako se je robot vozil glede na referenčne točke. Nihanje v poziciji robota je posledica napake v merilnem sistemu, saj se je robot zapeljal naravnost v točko z minimalnimi popravki.

## 6 Zaključek

Cilj projekta je bil voditi robota, ki bo namesto človeka izvedel meritve v hladilnem stolpu, saj so razmere v njem zelo neugodne oziroma škodljive za človeka. Naredili smo navigacijo v zaprtem prostoru, ki je ključni del avtonomije robota. Navigacija deluje preko treh radio-frekvenčnih oddajnikov, ki merijo čas preleta med oddanim podatkom ter prejetim in glede na to izračunamo, kje v prostoru se nahajamo. S tremi regulatorji smo nato izvedli regulacijo pozicije. Uporabili smo sekvenčno zaprto-zančno vodenje, ki je vključeval vodenje samo po orientaciji ter nato vožnjo proti izbrani točki, ki je vključeval vse tri regulatorje. Sekvenčno vodenje je bila nuja, saj je robot v hladilnem stolpu prostorsko omejen. Razvoj vodenja platforme je podrto iz strani projekta CTPProfile-r [<http://www.innoenergy.com/>].

## 7 Možne izboljšave

V prihodnjem delu na projektu želimo izvesti zaznavanje tal, ki niso ravna ali so poškodovana. V hladilnem stolpu je možnost, da je katera izmed plošč na katerih se robot premika uničena, kar lahko povzroči, da se robot zatakne ali celo pade v globino. Zaznavanje poškodovanih tal ter nagib robota lahko izvedemo z inercialnim senzorjem, ki je že vgrajen na robota. Prav tako želimo vgraditi tako imenovan »dead reckoning«, kar pomeni, da v primeru izgube komunikacije z enim izmed sider ali celo vsemi, robot vozi zgolj iz podatkov svojega matematičnega modela, ter implementiranimi senzorji na robotu, ki merijo relativni pomik sistema.

## 8 Literatura

- [1] Richard E. Putnam, Steam Surface Condensers: Basic Principles, Performance Monitoring, and Maintenance, ASME Press, 2001.
- [2] Svečko, R. Diskretni regulacijski sistemi, Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, 2015.
- [3] Dorf C.R., Bishop D., Modern Control System, Prentice Hall, 2008.
- [4] Nise S. Norman, Control System Engineering, John Wiley & Sons, 2008.
- [5] O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, Imperial College Press, 2006.
- [6] Rossiter, J. Introduction to Predictive control for beginners. The University of Sheffield. Dostopno na: <http://controleducation.group.shef.ac.uk/htmlformpc/introtoMPCbook.html>. [Poskus dostopa 8.1. 2019].
- [7] Rabbath, C.A., Léchevin, N. Discrete-Time Control System Design with Applications, Springer-Verlag New York, 2014.