

# ***PREDAVANJE NA TEMU:***

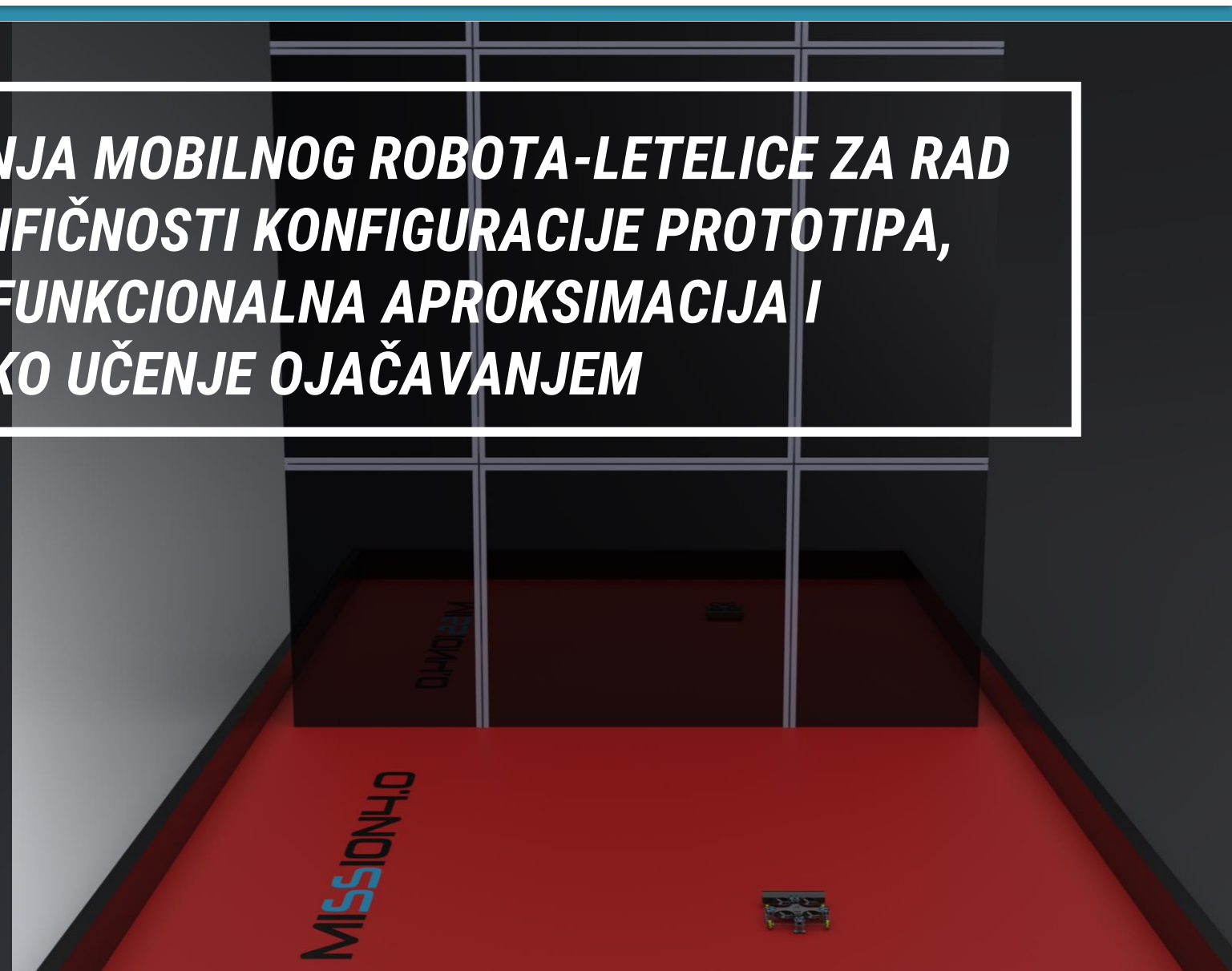
***AUTONOMNOST KRETANJA MOBILNOG ROBOTA-LETELICE ZA RAD  
NA VISINAMA – SPECIFIČNOSTI KONFIGURACIJE PROTOTIPA,  
MODELIRANJE, FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA I  
MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM***

## ***AUTORI PREDAVANJA:***

prof. dr Zoran Miljković  
Đorđe Jevtić, mast.inž.maš.  
vanr. prof. dr Jelena Svorcan



Univerzitet u Beogradu –  
Mašinski fakultet



## **ZAHTEVI ZA ROBOTSKI SISTEM**

1. Efikasno, bezbedno i pouzdano obavljanje zadatka čišćenja na različitim oblicima staklenih površina koje uključuju ravne i zakrivljene staklene površine, staklene površine postavljene pod nagibom u odnosu na tlo i sl.
2. Ostvariti pouzdano prianjanje i udaljavanje od staklene površine
3. Mogućnost dovoljno brzog čišćenja u svim pravcima po radnoj površini
4. Mogućnost lakog i brzog savladavanja prepreka različitih dimenzija i oblika
5. Autonomnost u kretanju tokom navigacije i izgradnje mapa okruženja

# 01 UVOD

ZAHTEVI ZA ROBOTSKI  
SISTEM

KLASIFIKACIJA

NOVI KONCEPT

## NAČIN OSTVARIVANJA KRETANJA:

Zahtevi	Noge	Točkovi	Gusenični kretač	Šine ili užad
Brzina	-	+	+	0
Upravlјivost	+	+	0	-
Kontinuitet u radu	-	+	+	+
Prilagodljivost	+	-	0	-
Bezbednost	+	0	0	+
Jednostavnost	-	+	0	+

## NAČIN OSTVARIVANJA PRIANJANJA:

Zahtevi	Magnetna sila	Vakuumski hvatač	Sila potiska	Mehanička sila	Elektrostatička sila	Hemijsko dejstvo
Materijali	-	0	+	+	+	0
Hrapavost	+	-	+	+	+	0
Nosivost	+	-	0	0	0	-
Pouzdanost	+	-	0	+	+	-
Potrošnja energije	+	0	+	0	+	-

ZAHTEVI ZA ROBOTSKI  
SISTEM

KLASIFIKACIJA

NOVI KONCEPT

## SIMBIOZA



**MALA BESPILOTNA LETELICA**



**HOLONOMNI SISTEM KRETANJA**

## NOVI IZAZOVI

- Potreba za bezbednim i pouzdanim ostvarivanjem procesa tranzicije
- Zadržavanje stabilnosti u uslovima izraženih vazдушnih strujanja
- Obezbeđivanje kontinuiteta u radu

# 02 IZAZOVI PRI KONFIG. MOBILNOG ROBOTA-LETELICE

## PROBLEMI OSTVARIVANJA PRIANJANJA

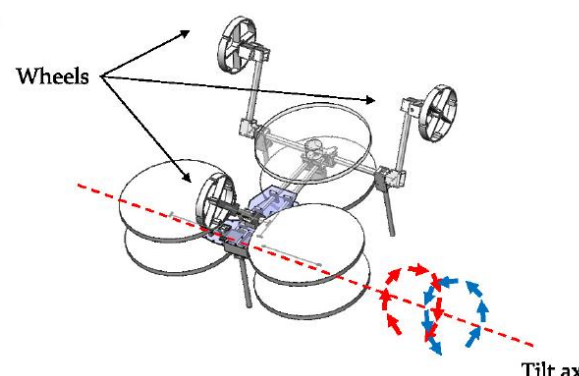
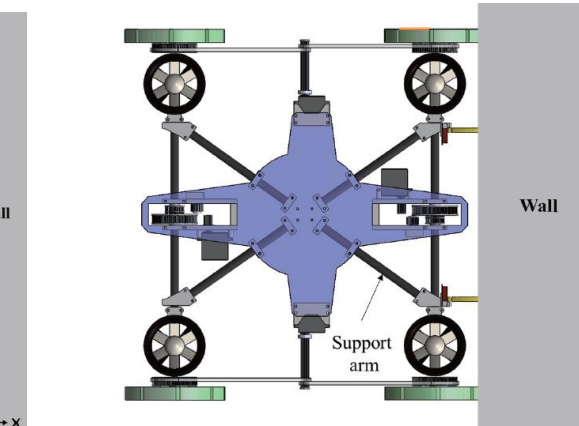
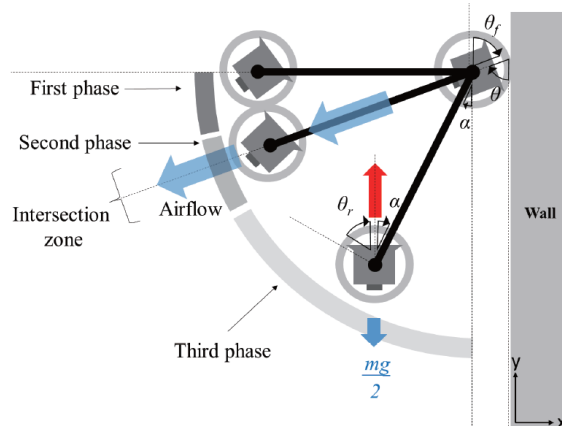
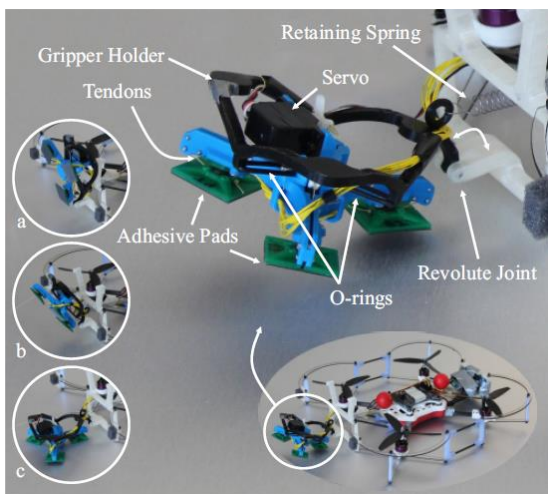
## ANALIZA UTICAJA VAZDUŠNIH STRUJANJA

## PROBLEM OSTVARIVANJA KONTINUITETA U RADU

1



2



3

4



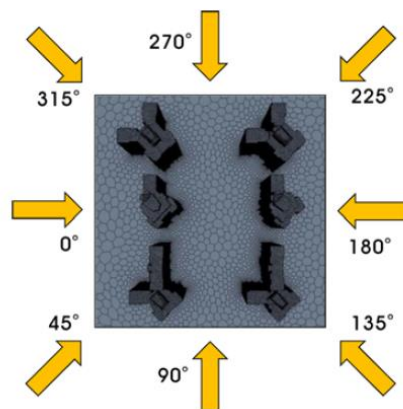
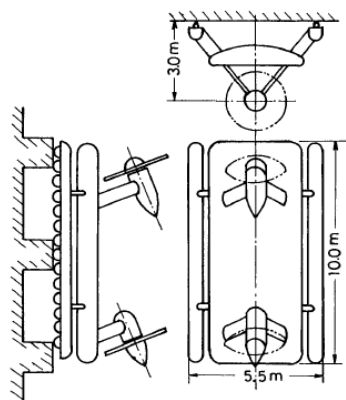
# 02 IZAZOVI PRI KONFIG. MOBILNOG ROBOTA-LETELICE

PROBLEMI OSTVARIVANJA  
PRIANJANJA

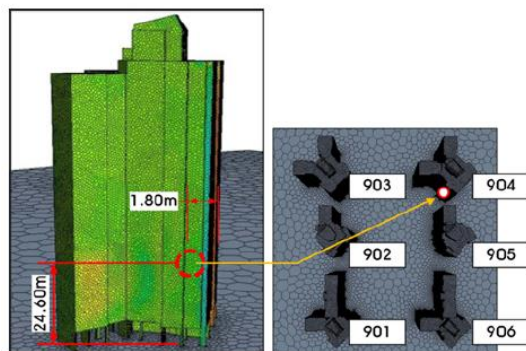
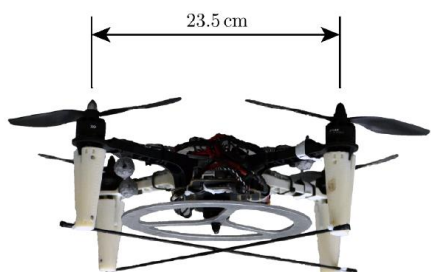
ANALIZA UTICAJA  
VAZDUŠNIH STRUJANJA

PROBLEM OSTVARIVANJA  
KONTINUITETA U RADU

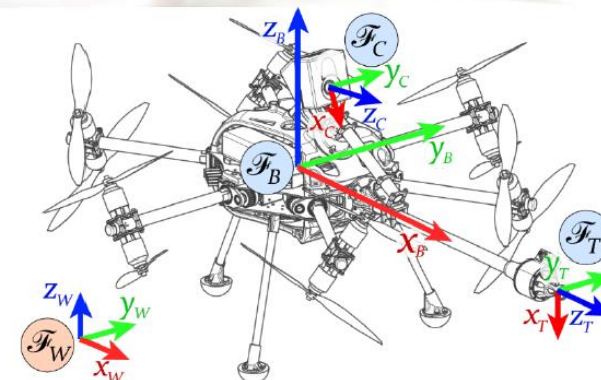
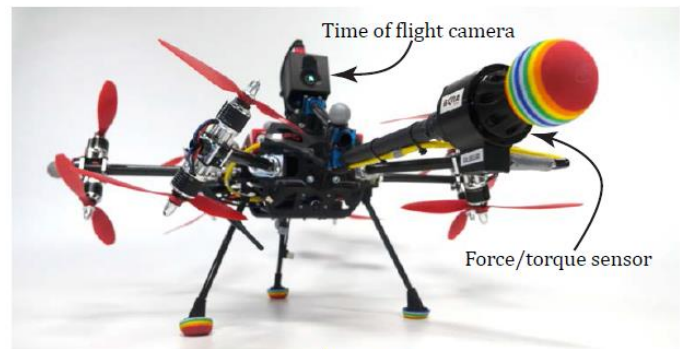
1



2



3



4

# 02 IZAZOVI PRI KONFIG. MOBILNOG ROBOTA-LETELICE

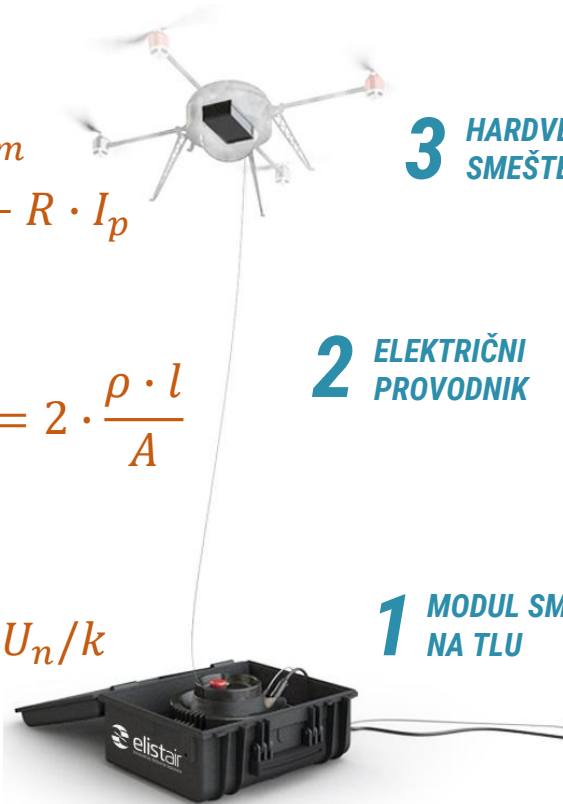
## PROBLEMI OSTVARIVANJA PRIANJANJA

$$I_u = n \cdot I_m$$

$$U_m = U_p - R \cdot I_p$$

$$R = 2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$U_p = U_n / k$$



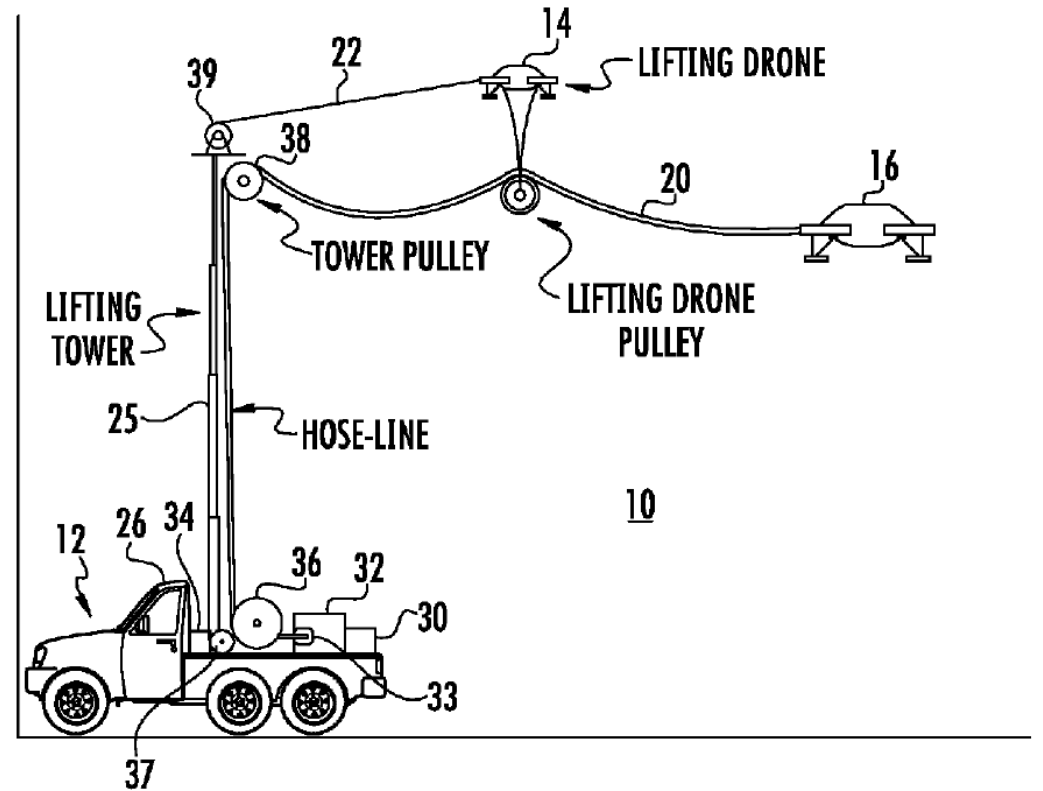
**3** HARDVERSKA JEDINICA  
SMEŠTENA NA LETELICI

**2** ELEKTRIČNI  
PROVODNIK

**1** MODUL SMEŠTEN  
NA TLU

## ANALIZA UTICAJA VAZDUŠNIH STRUJANJA

## PROBLEM OSTVARIVANJA KONTINUITETA U RADU



# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI

## **POSTAVLJENI PRIORITETI**

1. Napraviti sistem za čišćenje koji treba da omogući kvalitetno obavljanje ove namene
2. Ostvariti bezbednu, pouzdanu i laku tranziciju
3. Osmisliti sistem za prijanjanje koji će omogućiti robotu potrebnu mobilnost u svim pravcima pri izvršavanju zadatka na radnim površinama različitih oblika uz minimalni utrošak energije
4. Obezbediti robotu mogućnost savladavanja prepreka malih dimenzija radi izbegavanja potrebe za čestom tranzicijom
5. Ostvariti bezbednost u radu i u slučaju neplaniranog otkaza sistema za prijanjanje
6. Omogućiti bezbedno spuštanje robota na tlo usled otkaza nekog od motora namenjenih generisanju vučne sile



# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

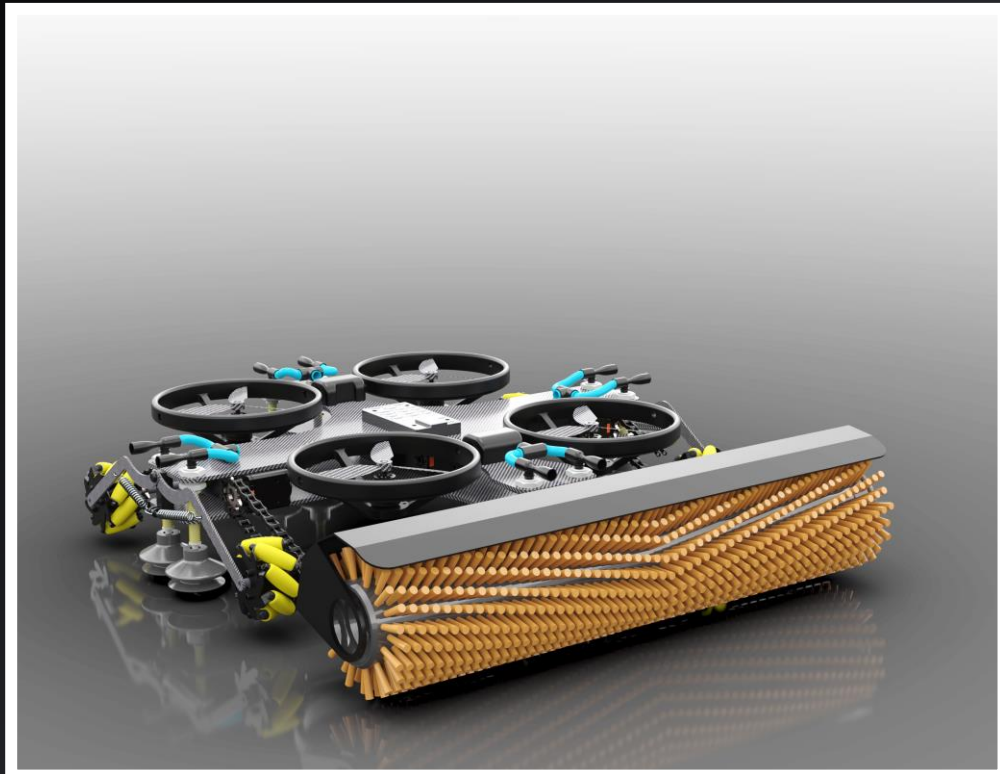
POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI



## KONCEPT ROBOTSKOG SISTEMA

Robotski sistem čine dva robota, odnosno mobilni robot-letelica čiji je osnovni zadatak čišćenje gabaritnih staklenih površina visokih zgrada i mala bespilotna letelica čija je namena sprovođenje napojnih vodova do mobilnog robota-letelice, kao i sprečavanje kolizije napojnih vodova sa objektima u okruženju.

# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

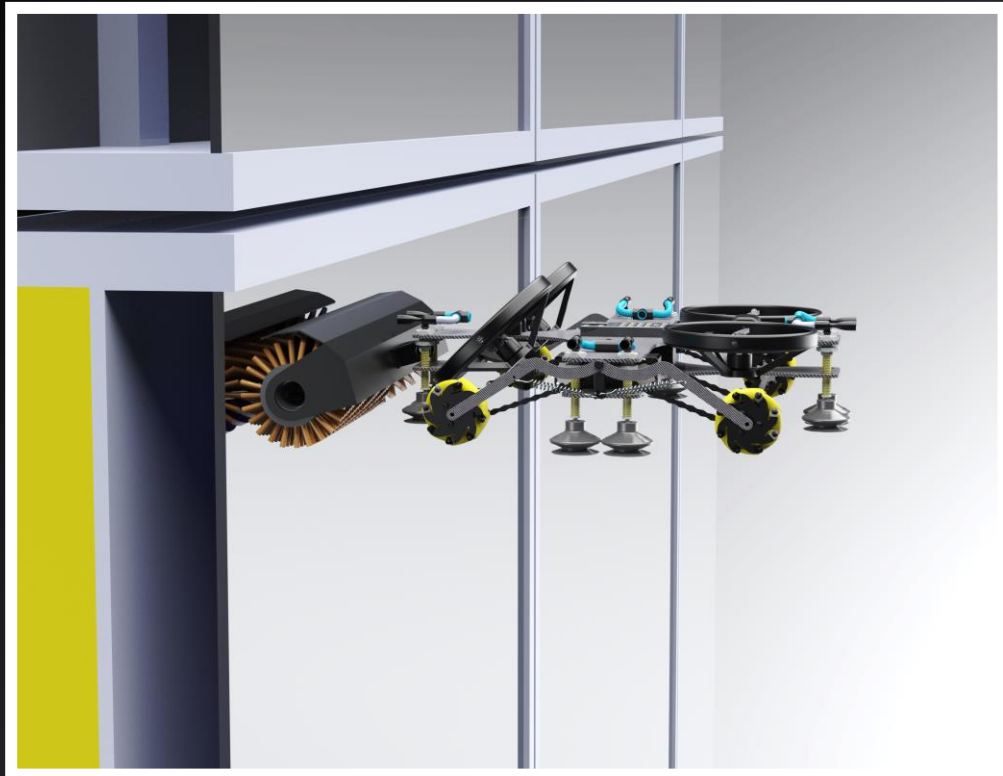
POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI



## 1. FAZA - STABILIZACIJA

Prednji propeleri menjaju svoju orijentaciju u odnosu na noseću konstrukciju kako bi se ostvarila potrebna sila prianjanja u dodiru sa podlogom. Ugao njihove rotacije zavisi od koeficijenta trenja koji se ostvaruje u dodiru sa podlogom.

# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

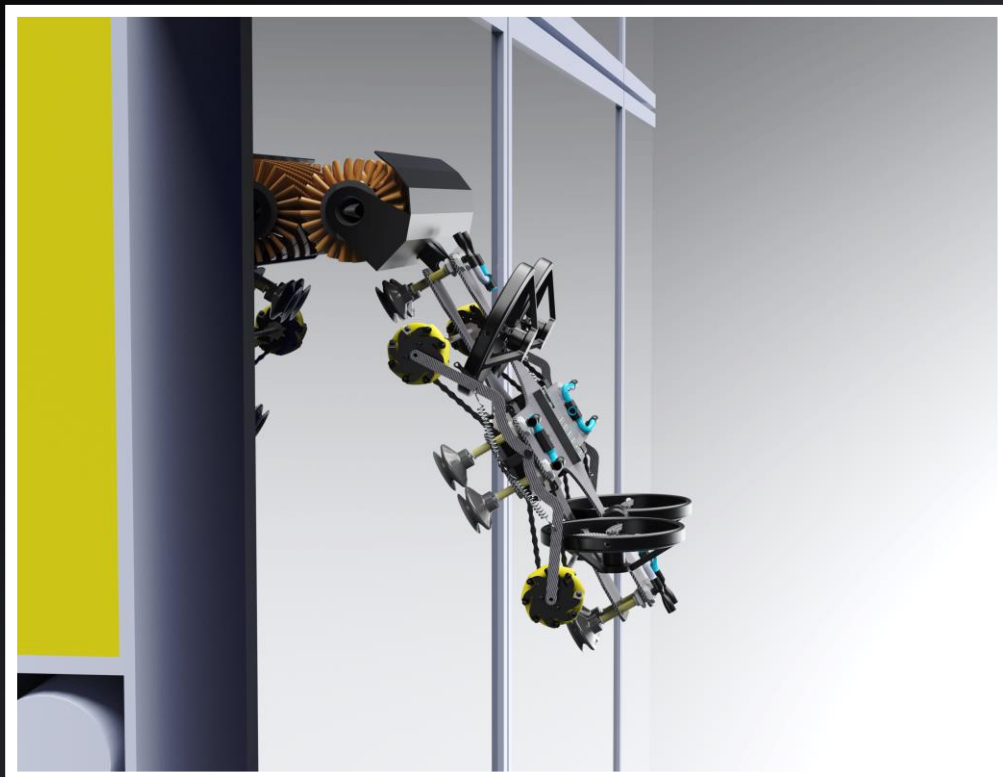
POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI



## 2. FAZA - TRANZICIJA

Da bi se zadržala potrebna stabilnost robota u zonama preseka toka vazdušnih strujanja propelera sa ostalim komponentama na mobilnom robotu-letelici, potrebno je da vreme provedeno u navedenoj zoni bude što manje, ili da ugao rotacije prednjih propelera bude manji.

# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

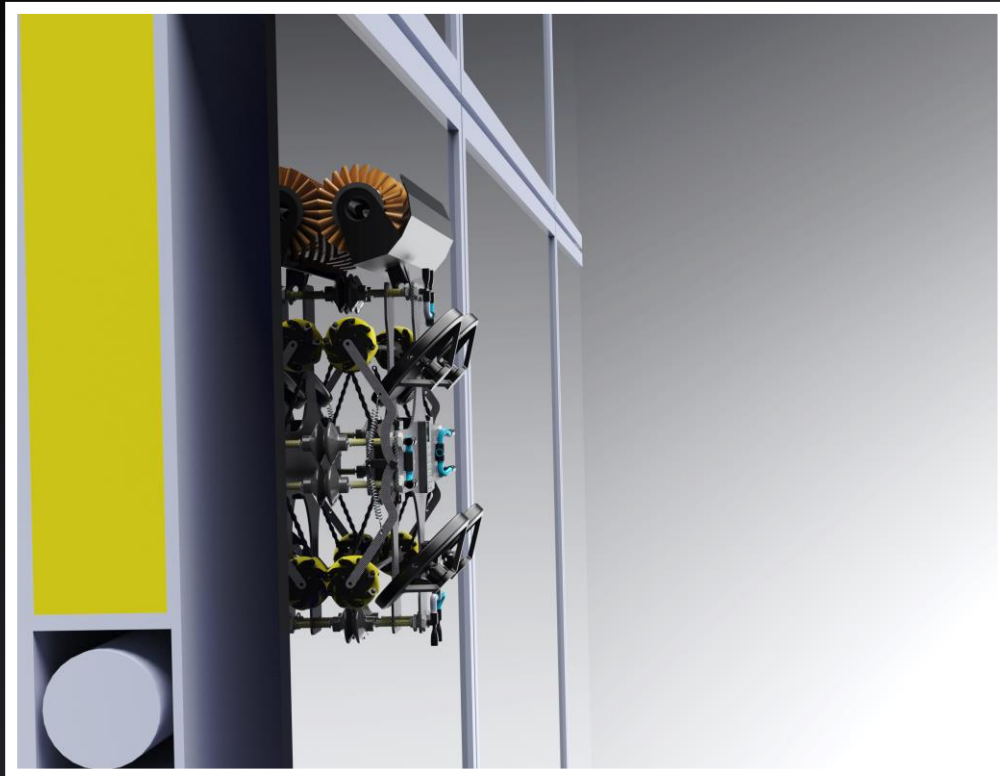
POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI



## 3. FAZA – PRIPREMA ZA KRETANJE

Da bi se obezbedilo zadržavanje robota u mestu uz minimalnu vučnu silu, prednji i zadnji propeleri su zarotirani ka radnoj površini.

# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

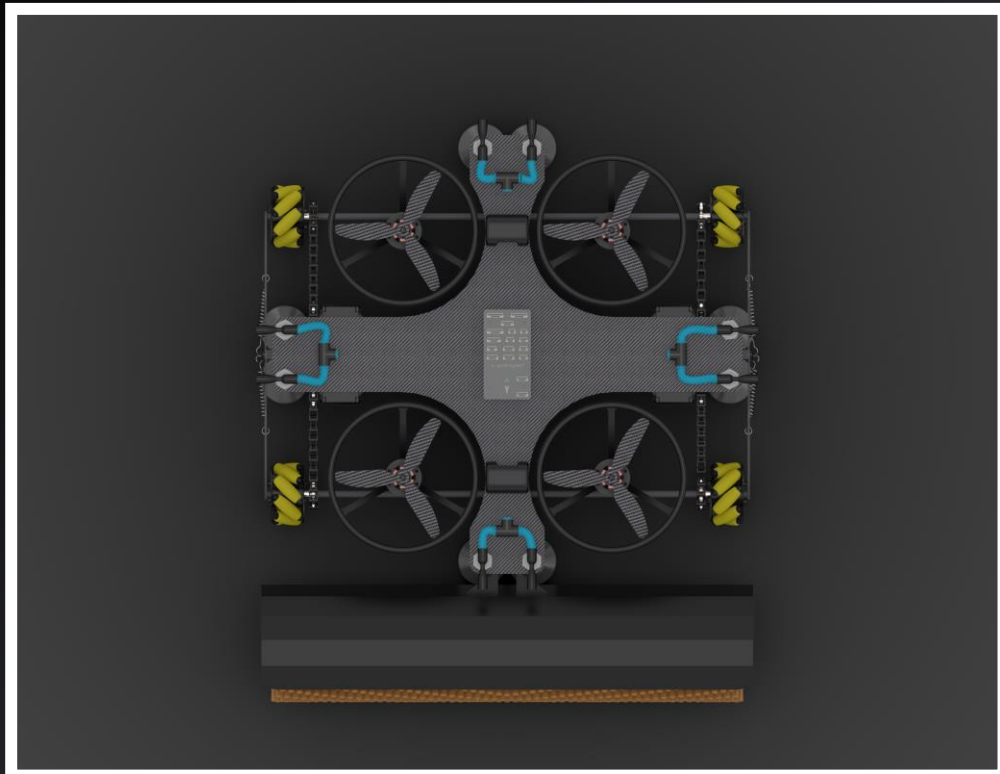
POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI



## **OPTIMALNE KARAKTERISTIKE PARA MOTOR-PROPELER**

Kako je jedan od osnovnih kriterijuma pri projektovanju mobilnog robota-letelice što manja masa kao i kompaktnost, usvojeni su propeleri sa tri lopatice. Odabir optimalnih karakteristika para motor-propeler se zasniva i na činjenici da oni moraju da budu otporni na spoljašnje uticaje kao što su voda i prašina.



# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

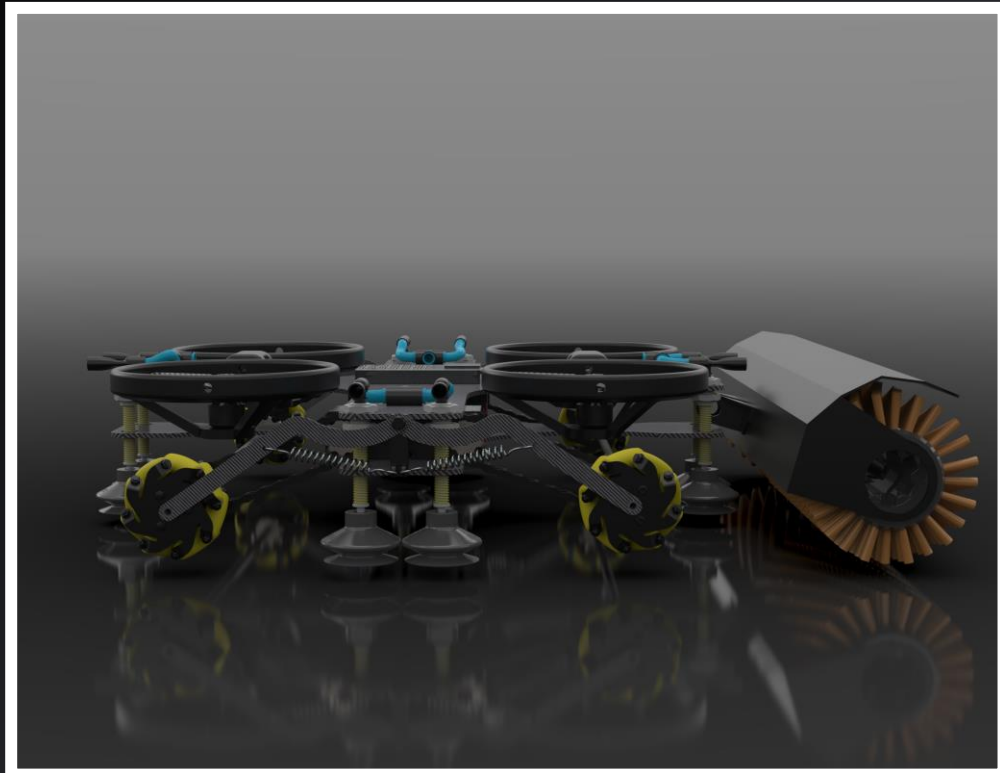
POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI



## **SISTEM ZA PRIANJANJE**

Sastoji se od oslonjenih vakuumskih hvatača na čijem su dnu postavljeni materijali koji obezbeđuju mali koeficijent trenja u dodiru sa podlogom. Na svaki od vakuumskih hvatača je postavljena Venturijeva pumpa čime se ostvaruje njihova funkcionalna nezavisnost. Sistem je izveden kao dvokružni.

# 03 KONFIGURACIJA SISTEMA ZA ČIŠĆENJE

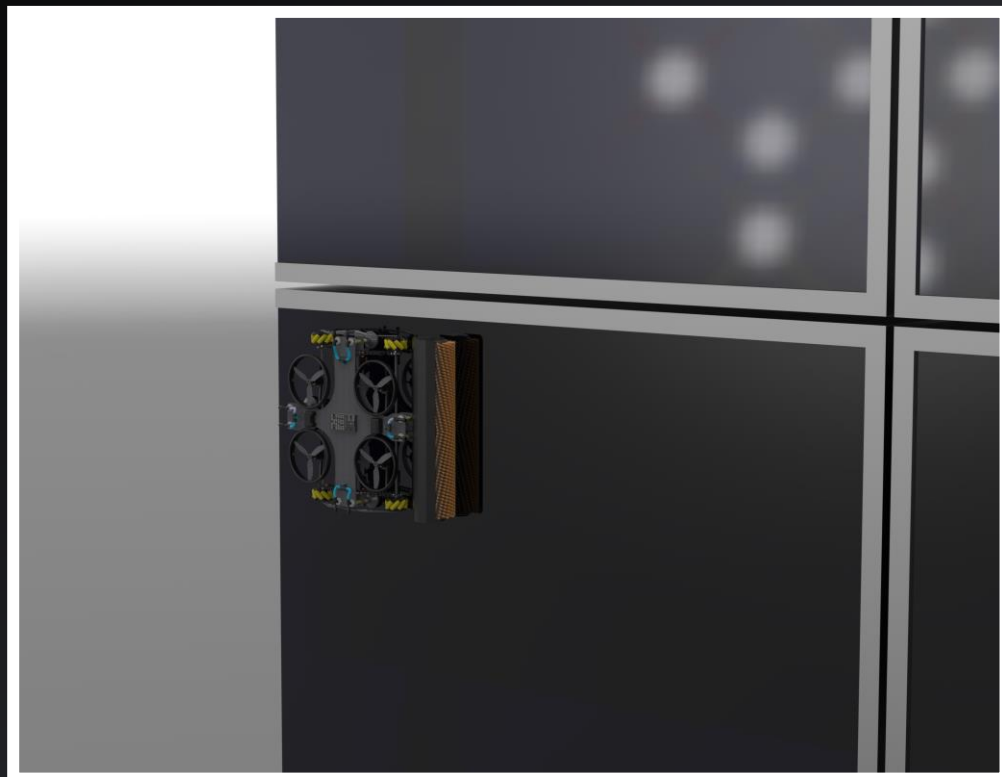
POSTAVLJENI PRIORITETI

KONCEPT ROBOTSKOG  
SISTEMA

SISTEM ZA OSTVARIVANJE  
TRANZICIJE

SISTEM ZA PRIANJANJE

SISTEM ZA LOKOMOCIJU  
PO RADNOJ POVRŠINI



## ***SISTEM ZA LOKOMOCIJU PO RADNOJ POVRŠINI***

Radi ostvarivanja potrebne mobilnosti pri obavljanju tehnološkog zadatka čišćenja usvojen je holonomni sistem kretanja. Prednji i zadnji par holonomnih točkova imaju mogućnost kretanja i u vertikalnom pravcu, dok im torzione opruge obezbeđuju zadržavanje potrebne sile priranja tokom prelaska preko prepreka.

# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

OPIS PROBLEMA

VEŠTAČKE NEURONSKE  
MREŽE

SKUP PODATAKA I  
ŠEMATSKI PRIKAZ

LEVENBERG-MARKEOV  
ALGORITAM OBUČAVANJA

OSTVARENI REZULTATI

**T-MOTOR U10 KV80**



**26x8,5" CF (3PCS)**



$$P = I_m \cdot U_m$$

$$U_m = I_m \cdot R + K_e \cdot \omega$$

$$K_e \triangleq \frac{U_{m0} - I_{m0} \cdot R}{K_v \cdot U_{m0}}$$

## OPIS PROBLEMA

Izraz za vučnu silu:

$$T = C_t \cdot \sum_{i=1}^4 \omega_i^2$$

$$n = f(I, U)$$

# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

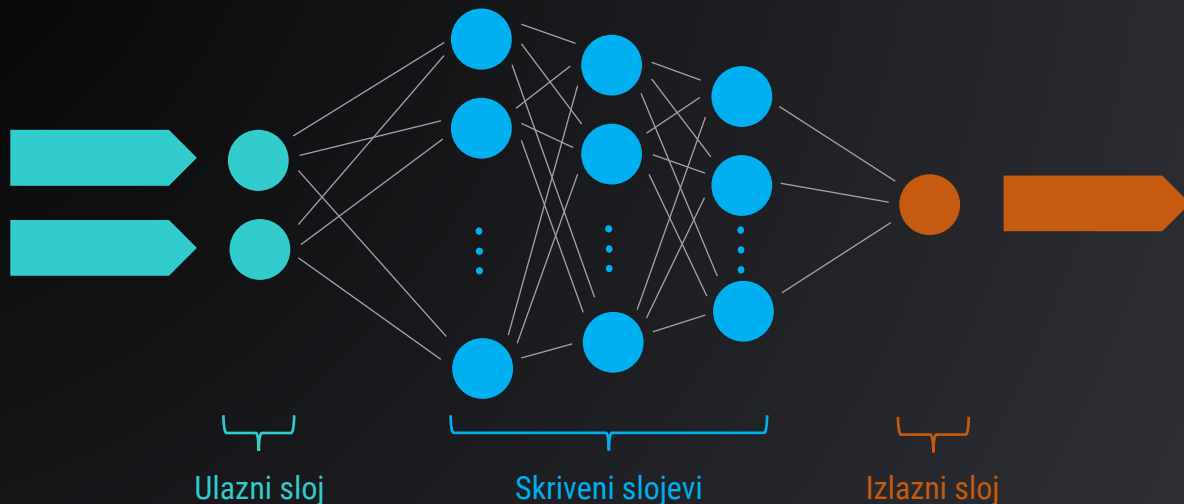
OPIS PROBLEMA

VEŠTAČKE NEURONSKE  
MREŽE

SKUP PODATAKA I  
ŠEMATSKI PRIKAZ

LEVENBERG-MARKEOV  
ALGORITAM OBUČAVANJA

OSTVARENI REZULTATI



Ulazni signali u neuron:

$$X = [x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(l)}]^T$$

Vektor težinskih odnosa:

$$W = [w_{1j}^{(1)}, \dots, w_{nj}^{(l)}]^T$$

Greška u odnosu na  $j$ -ti neuron u sloju  $l$ : 
$$\delta_j^{(l)} = -\frac{1}{2} \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial s_j^{(l)}}$$

Razlika između željene i generisane vrednosti na izlazu iz VNM: 
$$\varepsilon = Y^{(k)} - net(X^{(k)}, W)$$

Kriterijum performanse se najčešće predstavlja: 
$$J(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left( Y^{(k)} - net(X^{(k)}, W) \right)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\varepsilon^{(k)})^2$$

# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

OPIS PROBLEMA

VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

SKUP PODATAKA I ŠEMATSKI PRIKAZ

LEVENBERG-MARKEOV ALGORITAM OBUČAVANJA

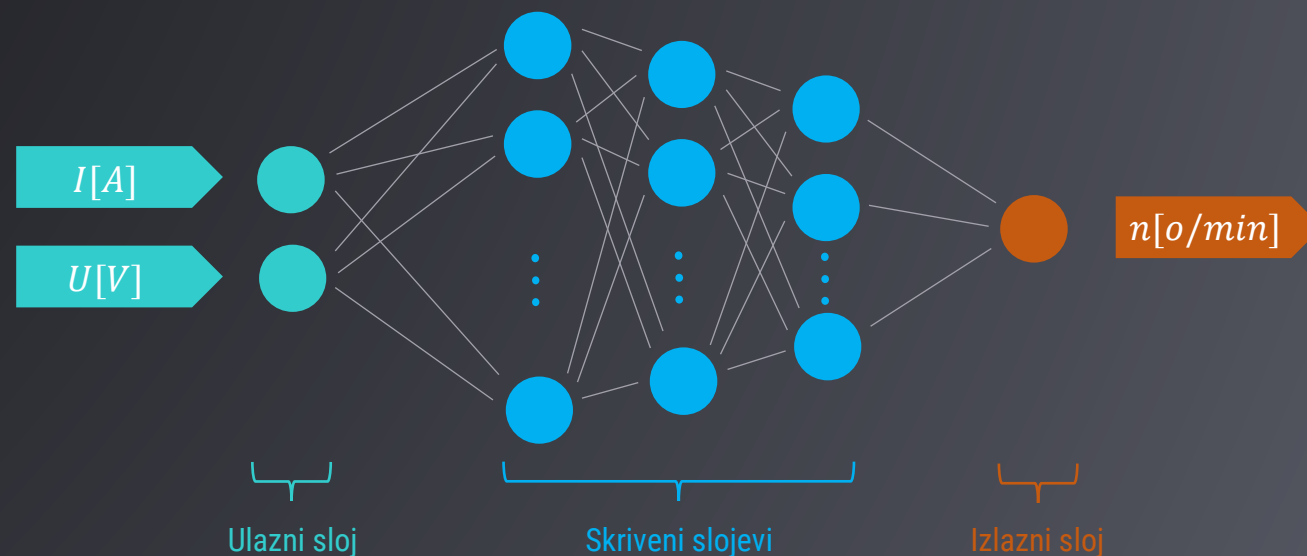
OSTVARENI REZULTATI

Ulaz 1 (jačina struje)
2,2 2,71 3,36 4,02 5,64 8,04 11,68 2,81 3,6 4,41 5,41 7,89 10,69 15,83 3,94 4,79 5,91 7,35 10,19 14,1 20,89
Ulaz 2 (napon)
32 32 32 32 32 32 40 40 40 40 40 40 48 48 48 48 48 48 48
Izlaz (broj obrta rotora u minuti)
1274 1400 1496 1616 1838 2091 2391 1541 1698 1832 1965 2240 2493 2830 1541 1698 1832 1965 2240 2493 2830

Predprocesiranje podataka se vrši prema sledećem izrazu:

$$x_{skal} = \bar{x}_{min} + \frac{x_{tren} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} (\bar{x}_{max} - \bar{x}_{min})$$

Dobijene veličine predstavljaju skup uređenih veličina.





# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

OPIS PROBLEMA

VEŠTAČKE NEURONSKE  
MREŽE

SKUP PODATAKA I  
ŠEMATSKI PRIKAZ

LEVENBERG-MARKEOV  
ALGORITAM OBUČAVANJA

OSTVARENI REZULTATI

## ALGORITAM LEVENBERG-MARKEA

**Ulazne veličine:** skup obučavajućih parova,  $\mu$ , dozvoljena greška

**Izlazne veličine:** vektor težinskih koeficijenata  $W$

**Usvojiti:**  $W$  = mala pozitivna vrednost,  $\Delta W = 0$ ,  $\lambda$  = pozitivna vrednost

*While*  $\varepsilon >$  dozvoljena greška *do*

*For*  $i = 1:n$ ; gde je  $n$  broj obučavajućih parova

$$H = G^T G$$

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} - \mu(H + \lambda \text{diag}(H))^{-1} \nabla J(W)$$

*end*

*end*

## LEVENBERG-MARKEOV ALGORITAM OBUČAVANJA

Inicijalna formulacija je data sledećim izrazom:

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} - \mu(H + \lambda I)^{-1} \nabla J(W)$$

Dalje se uvode dijagonalni elementi *Hesijan* matrice umesto jedinične matrice, odnosno:

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} - \mu(H + \lambda \text{diag}(H))^{-1} \nabla J(W)$$

# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

## OPIS PROBLEMA

## VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

## SKUP PODATAKA I ŠEMATSKI PRIKAZ

## LEVENBERG-MARKEOV ALGORITAM OBUČAVANJA

## OSTVARENI REZULTATI

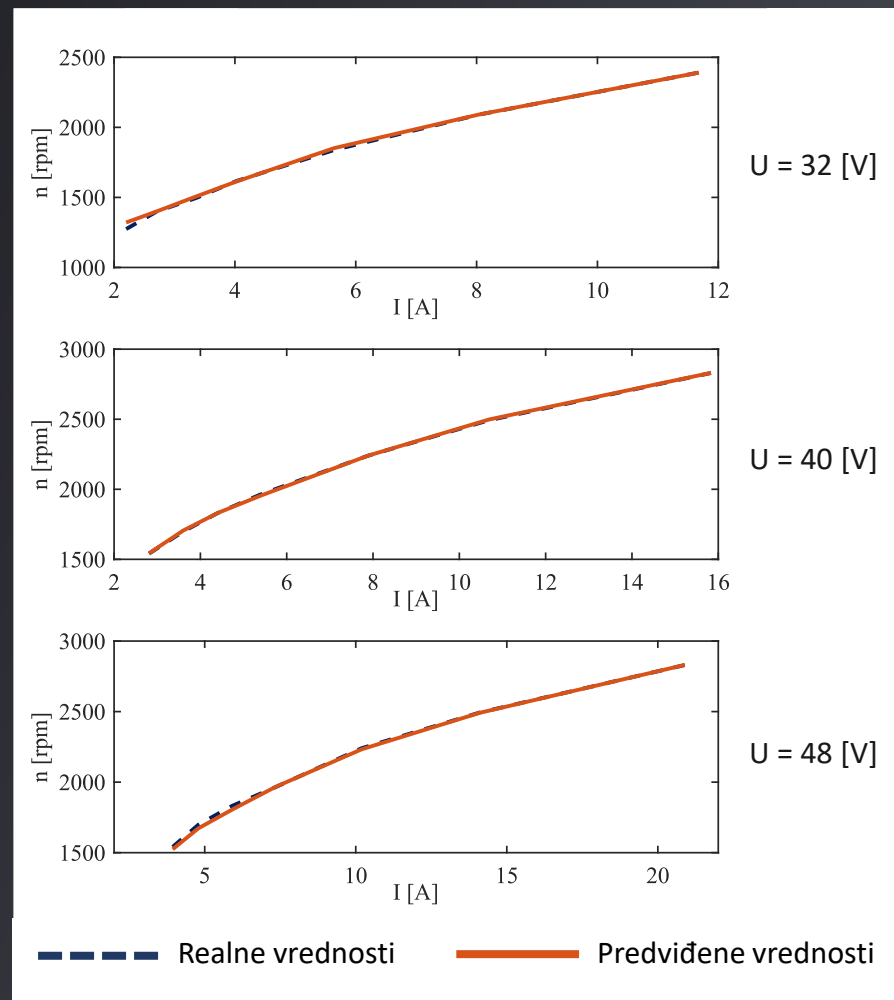
R. Br.	Arhitektura neuronske mreže	Broj epoha	Greška obučavanja	Greška testiranja
1.	2 [3] <sub>1</sub> 1	207	$3,72 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$
2.	2 [6] <sub>1</sub> 1	117	$8,41 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
3.	2 [10] <sub>1</sub> 1	13	$5,28 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
4.	2 [12] <sub>1</sub> 1	13	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$3,20 \cdot 10^{-4}$

## PARAMETRI OBUČAVANJA:

$$\mu = 0,1$$

$$\varepsilon = 1 \cdot 10^{-10}$$

Aktivaciona funkcija: Sigmoidna



# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

OPIS PROBLEMA I  
ŠEMATSKI PRIKAZ

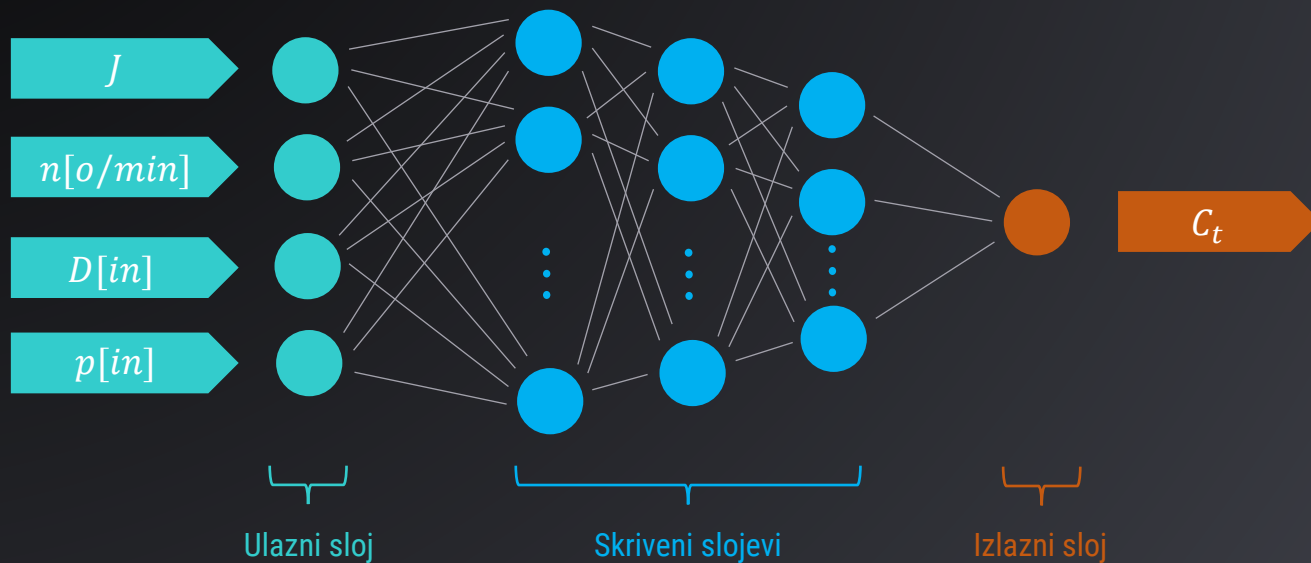
SKUP PODATAKA

ANALIZIRANE ARHITEKTURE  
I PARAMETRI OBUČAVANJA

OSTVARENI REZULTATI

$$c_t = f(J, n, D, p) \quad \text{gde je:} \quad J = \frac{V}{nD}$$

**OPIS PROBLEMA**



**ŠEMATSKI PRIKAZ**

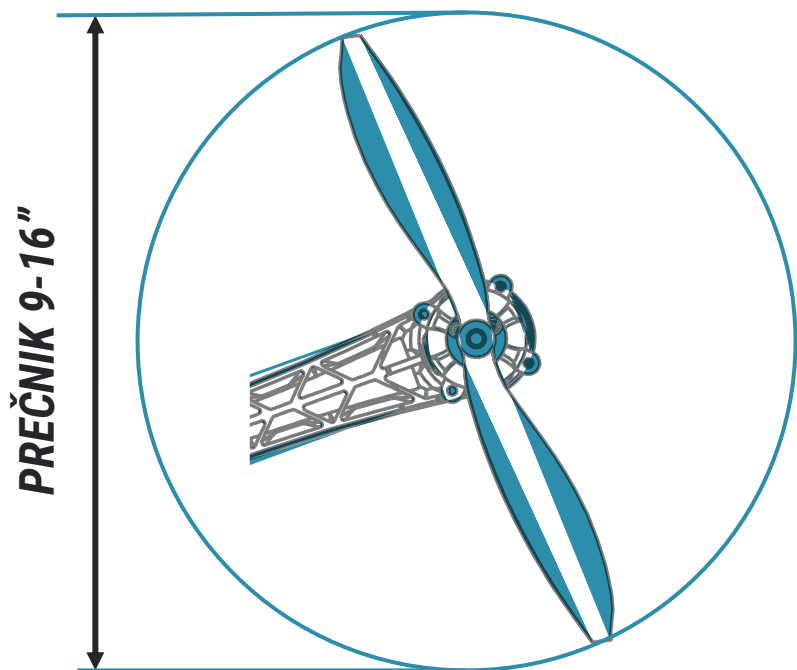
# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

OPIS PROBLEMA I  
ŠEMATSKI PRIKAZ

SKUP PODATAKA

ANALIZIRANE ARHITEKTURE  
I PARAMETRI OBUČAVANJA

OSTVARENI REZULTATI



**40 RAZLIČITIH PROPELERA**

**RAZLIČITE VREDNOSTI  
KOEFIJENTA RADA**

**5451 OBUČAVAJUĆI PAR**

Predprocesiranje podataka se vrši prema sledećem izrazu:

$$x_{skal} = \bar{x}_{min} + \frac{x_{tren} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} (\bar{x}_{max} - \bar{x}_{min})$$

# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

OPIS PROBLEMA I  
ŠEMATSKI PRIKAZ

SKUP PODATAKA

ANALIZIRANE ARHITEKTURE  
I PARAMETRI OBUČAVANJA

OSTVARENI REZULTATI

## ANALIZIRANE ARHITEKTURE:

1. jednoslojne neuronske mreže:

4 [6]<sub>1</sub> 1, 4 [8]<sub>1</sub> 1, 4 [10]<sub>1</sub> 1 i 4 [12]<sub>1</sub> 1;

2. dvoslojne neuronske mreže:

4 [2-2]<sub>2</sub> 1, 4 [3-2]<sub>2</sub> 1, 4 [5-2]<sub>2</sub> 1, 4 [8-4]<sub>2</sub> 1 i 4 [10-4]<sub>2</sub> 1;

3. troslojne neuronske mreže:

4 [2-2-2]<sub>3</sub> 1, 4 [4-3-2]<sub>3</sub> 1, 4 [6-4-2]<sub>3</sub> 1, 4 [8-5-2]<sub>3</sub> 1, 4 [10-6-3]<sub>3</sub> 1, 4 [12-8-4]<sub>3</sub> 1,

4 [14-8-5]<sub>3</sub> 1, 4 [16-10-6]<sub>3</sub> 1, 4 [20-12-6]<sub>3</sub> 1 i 4 [30-14-8]<sub>3</sub> 1.

## PARAMETRI OBUČAVANJA:

$$\mu = 0,1$$

$$\varepsilon = 1 \cdot 10^{-10}$$

Maksimalni broj epoha = 1.000



# 04 FUNKCIONALNA APROKSIMACIJA

OPIS PROBLEMA I  
ŠEMATSKI PRIKAZ

SKUP PODATAKA

ANALIZIRANE ARHITEKTURE  
I PARAMETRI OBUČAVANJA

OSTVARENI REZULTATI

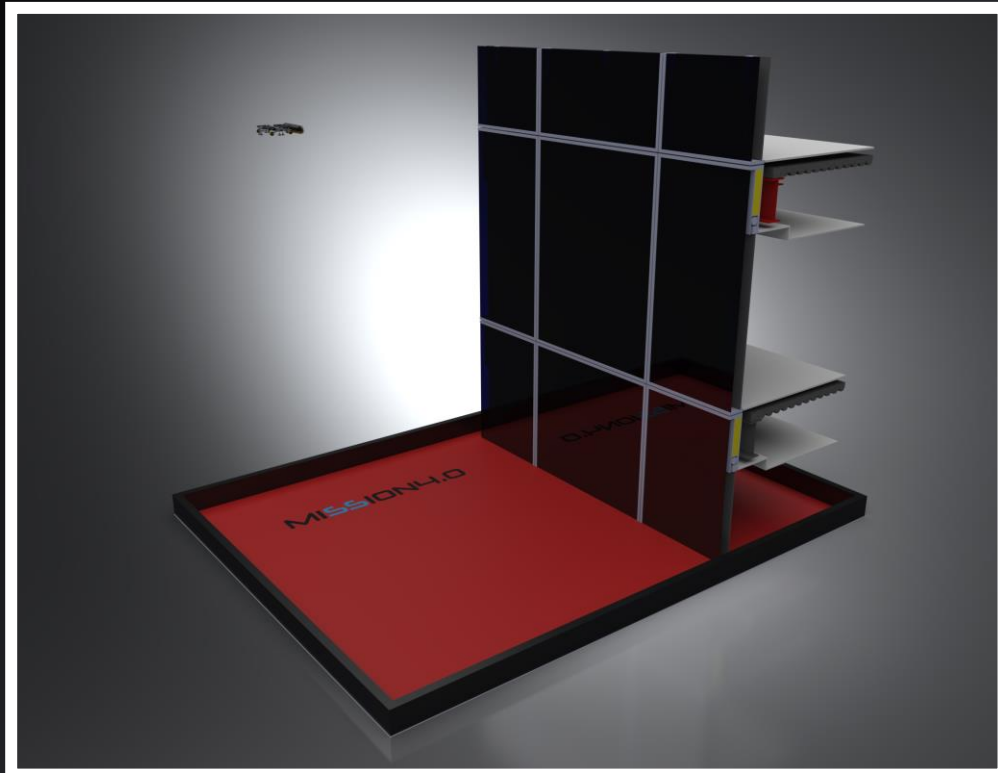
R. Br.	Arhitektura neuronske mreže	Algoritam obučavanja	Ciljna vrednost greške obučavanja	Broj epoha	Greška testiranja
1.	4 [10-6-3] <sub>3</sub> 1	Levenberg-Marke	10 <sup>-10</sup>	730	2,22·10 <sup>-6</sup>
2.	4 [10-6-3] <sub>3</sub> 1	Bajes	10 <sup>-10</sup>	740	1,66·10 <sup>-6</sup>
3.	4 [12-8-4] <sub>3</sub> 1	Levenberg-Marke	10 <sup>-10</sup>	756	9,48·10 <sup>-7</sup>
4.	4 [12-8-4] <sub>3</sub> 1	Bajes	10 <sup>-10</sup>	819	6,70·10 <sup>-7</sup>
5.	4 [14-8-5] <sub>3</sub> 1	Levenberg-Marke	10 <sup>-10</sup>	728	6,94·10 <sup>-7</sup>
6.	4 [14-8-5] <sub>3</sub> 1	Bajes	10 <sup>-10</sup>	1000	6,65·10 <sup>-7</sup>
7.	4 [16-10-6] <sub>3</sub> 1	Levenberg-Marke	10 <sup>-10</sup>	1000	4,02·10 <sup>-7</sup>
8.	4 [16-10-6] <sub>3</sub> 1	Bajes	10 <sup>-10</sup>	839	4,01·10 <sup>-7</sup>
9.	4 [20-12-6] <sub>3</sub> 1	Levenberg-Marke	10 <sup>-10</sup>	935	3,29·10 <sup>-7</sup>
10.	4 [20-12-6] <sub>3</sub> 1	Bajes	10 <sup>-10</sup>	685	2,70·10 <sup>-7</sup>
11.	4 [30-14-8] <sub>3</sub> 1	Levenberg-Marke	10 <sup>-10</sup>	403	1,65·10 <sup>-7</sup>
12.	4 [30-14-8] <sub>3</sub> 1	Bajes	10 <sup>-10</sup>	366	2,36·10 <sup>-7</sup>

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

OPIS PROBLEMA

MAŠINSKO GLEDANJE

MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM



## OPIS PROBLEMA

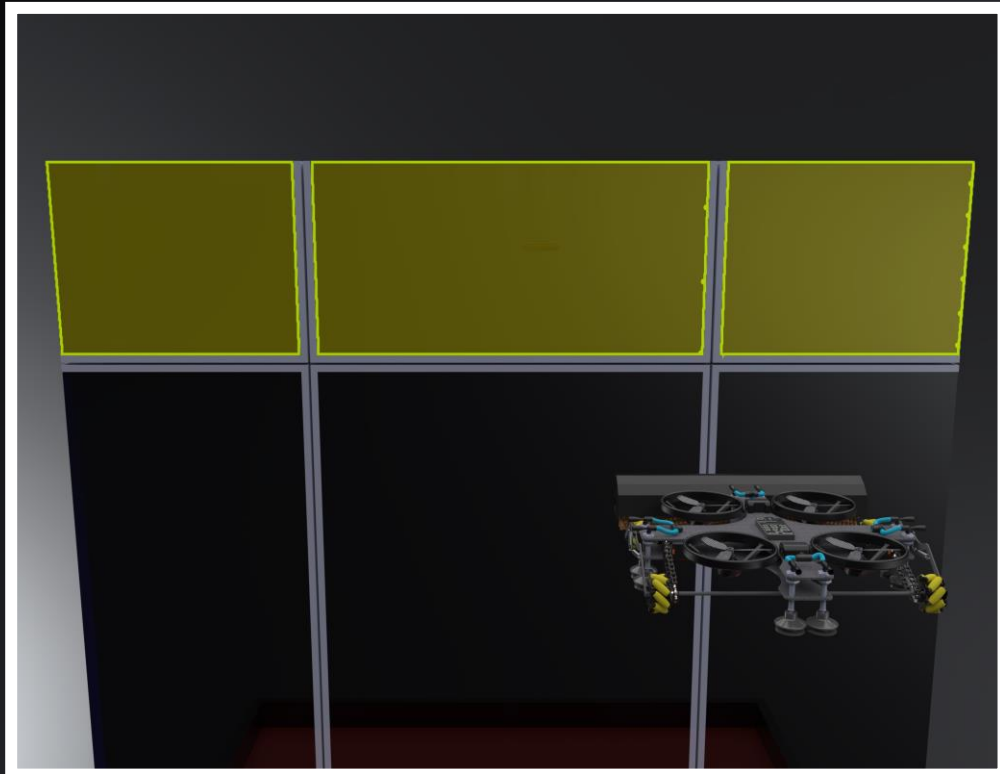
Zadatak koji se postavlja pred mobilni robot-letelicu je „učenje” optimalne putanje od početnog položaja (predstavlja položaj robota u neposrednoj blizini objekta) do ciljnog položaja (predstavlja položaj robota na radnoj površini).

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

OPIS PROBLEMA

MAŠINSKO GLEDANJE

MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM



## MAŠINSKO GLEDANJE

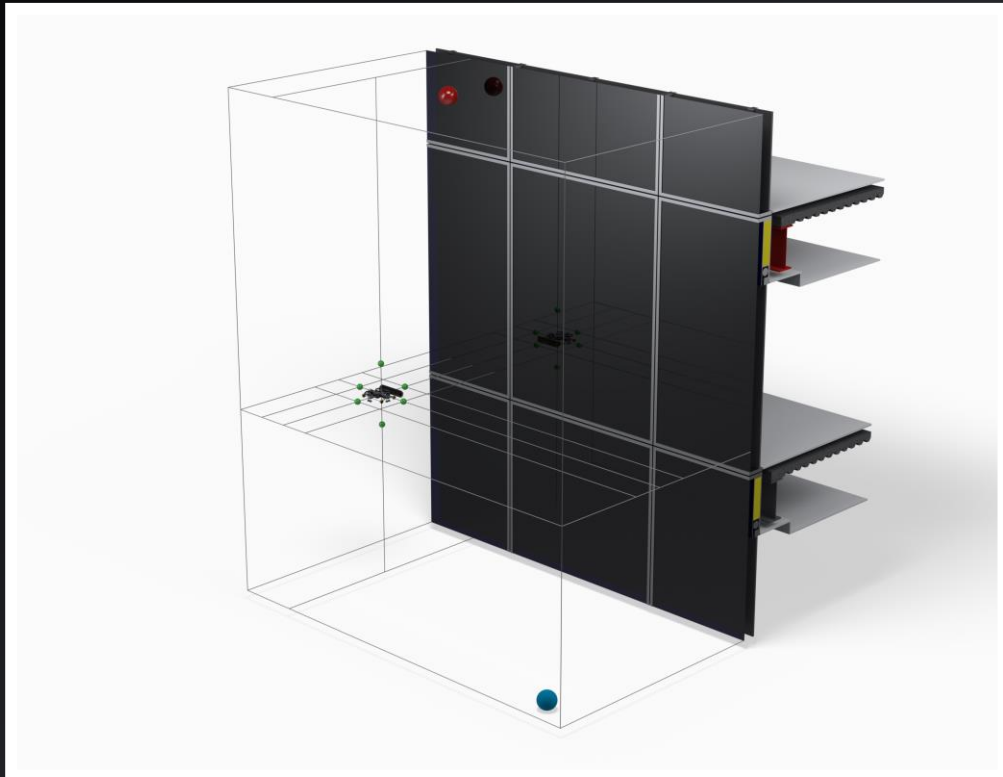
Određivanje ciljnog položaja se ostvaruje aktiviranjem kamere kao spoljašnjeg senzora koja uz pomoć metoda mašinskog gledanja omogućava mobilnom robotu-letelici detektovanje staklenih površina, kao i izdvajanje karakterističnih objekata.

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

OPIS PROBLEMA

MAŠINSKO GLEDANJE

MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM



## MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

Kako je u okviru navedenog problema nemoguće odrediti tačan matematički model kretanja mobilnog robota-letelice, odnosno okruženja, uvodi se pojam mašinskog učenja ojačavanjem (engl. *Reinforcement Learning*).

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

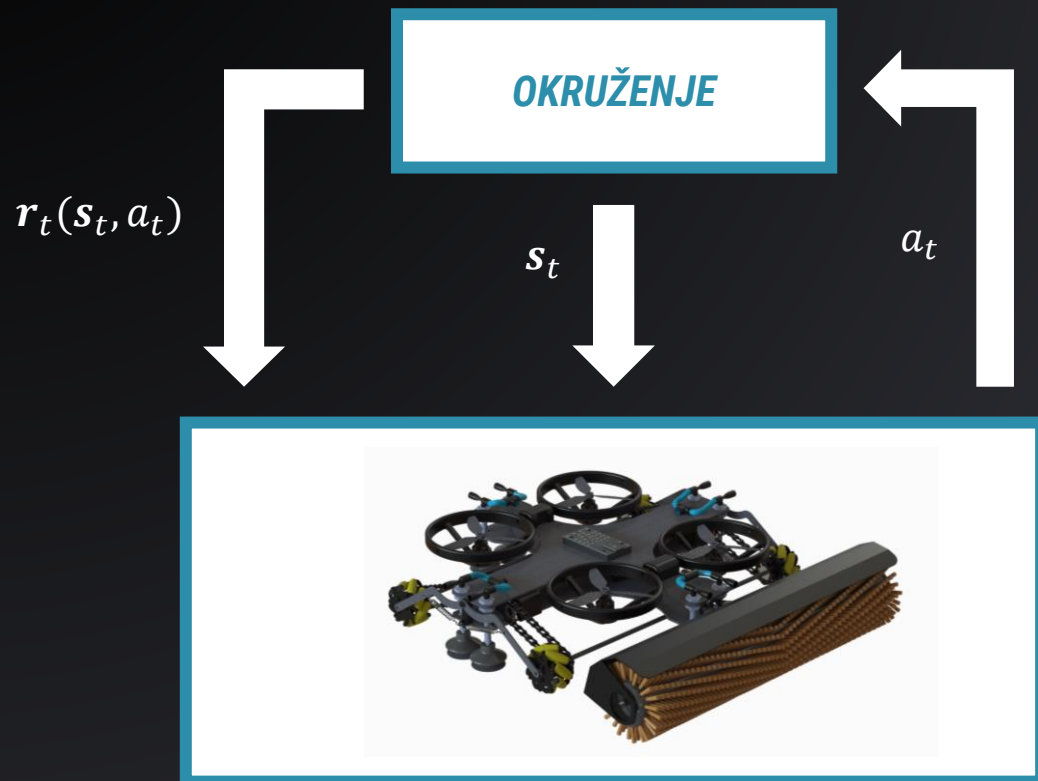
BLOK DIJAGRAM

STANJE SISTEMA

MARKOVLJEVA  
PRETPOSTAVKA

NAGRADNA OCENA  
STANJA

VREDNOSNA FUNKCIJA  
PARA STANJE-AKCIJA



## BLOK DIJAGRAM

Dva osnovna činioca koncepta mašinskog učenja ojačavanjem predstavljaju inteligentni agent i okruženje. Inteligentni agent ima zadatak da istraživanjem okruženja pomoću eksternih senzora kao i eksploatacijom stečenog znanja generiše optimalno ponašanje u cilju izvršavanja postavljenog tehnološkog zadatka.



# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

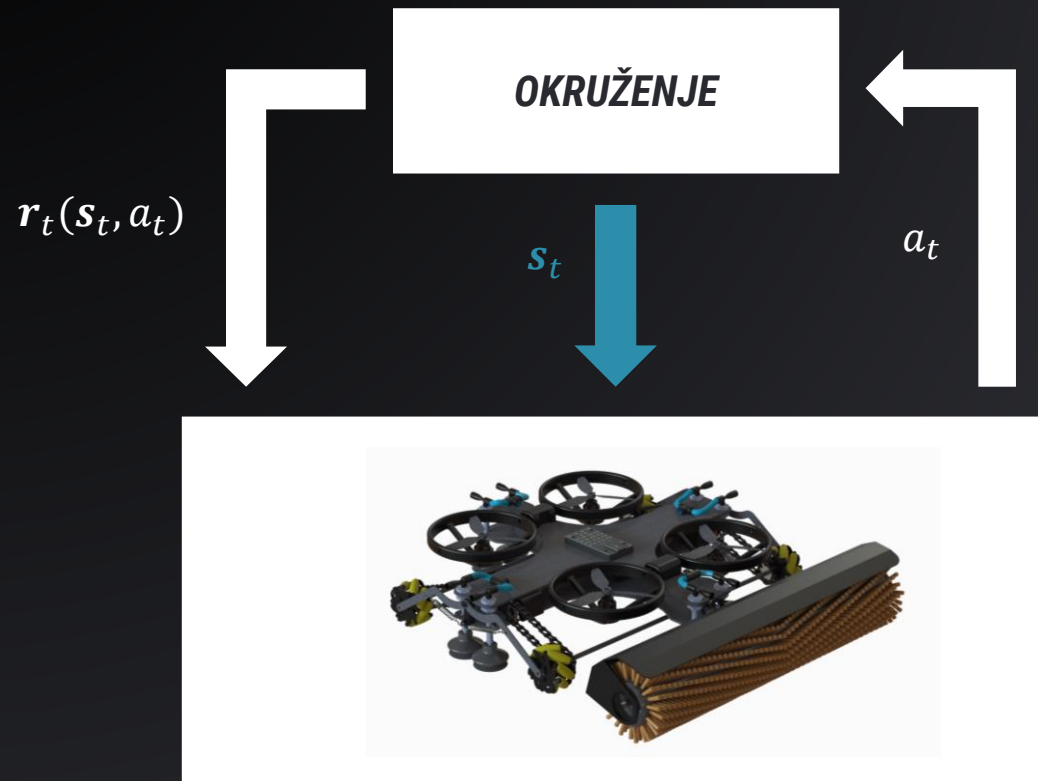
BLOK DIJAGRAM

STANJE SISTEMA

MARKOVLJEVA  
PRETPOSTAVKA

NAGRADNA OCENA  
STANJA

VREDNOSNA FUNKCIJA  
PARA STANJE-AKCIJA



## STANJE SISTEMA

Stanje sistema se može definisati kao skup komponenti nastalih kao rezultat akcija robota i/ili rezultat interakcije robot-okruženje. Stanja mogu činiti sledeći elementi: položaj robota u okruženju u odnosu na izabrani referentni koordinatni sistem, njegova brzina kretanja, položaj i brzina kretanja pokretnih objekata u okruženju i sl.

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

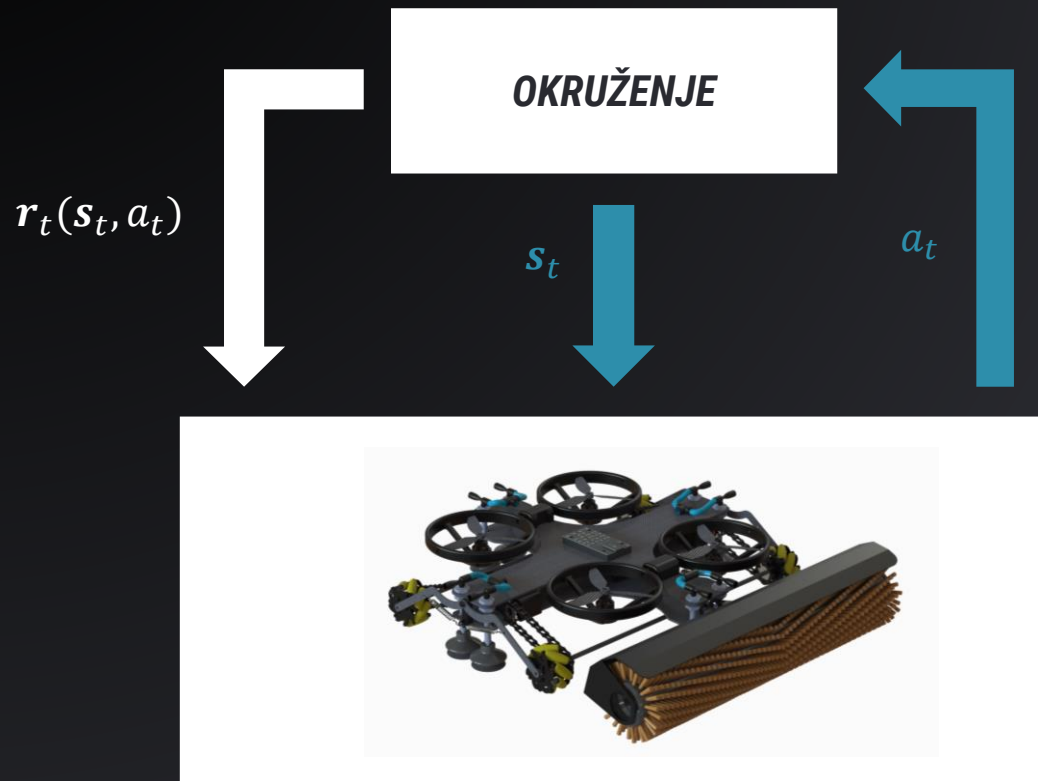
BLOK DIJAGRAM

STANJE SISTEMA

MARKOVLJEVA  
PRETPOSTAVKA

NAGRADNA OCENA  
STANJA

VREDNOSNA FUNKCIJA  
PARA STANJE-AKCIJA



## MARKOVLJEVA PRETPOSTAVKA

Markovljeva pretpostavka se može predstaviti pomoću sledećeg izraza:

$$s_{t+1} = f(s_t, a_t, \dots, z_t)$$

gde je:

$s_{t+1}$  - naredno stanje,

$s_t$  - trenutno stanje,

$a_t$  - akcija mobilnog robota-letelice i

$z_t$  - proizvoljni poremećaj.

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

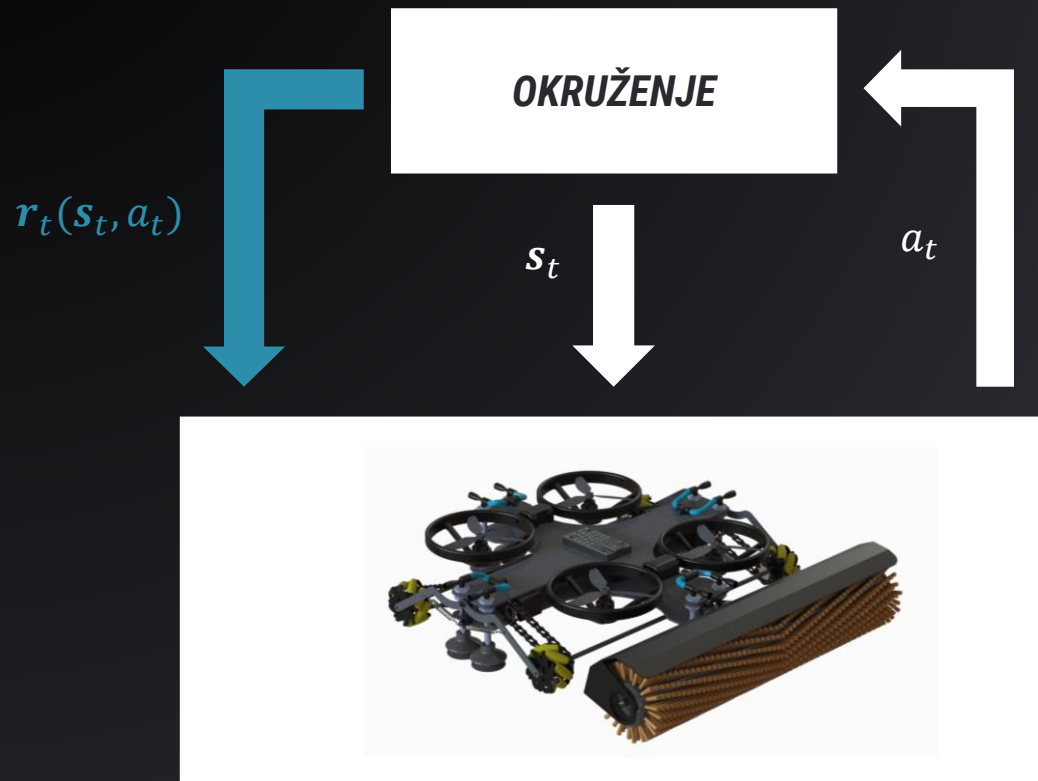
BLOK DIJAGRAM

STANJE SISTEMA

MARKOVLJEVA  
PRETPOSTAVKA

NAGRADNA OCENA  
STANJA

VREDNOSNA FUNKCIJA  
PARA STANJE-AKCIJA



## NAGRADNA OCENA STANJA

Nagrada stanja (engl. *Reward*) se definiše kao stepen uspešnosti odabrane akcije u prethodnom stanju sistema izražene u vidu numeričke vrednosti. Cilj agenta jeste da pronađe skup najpovoljnijih akcija u svim stanjima mobilnog robota-letelice pri njenom kretanju od početnog do ciljnog položaja.

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

BLOK DIJAGRAM

STANJE SISTEMA

MARKOVLJEVA  
PRETPOSTAVKA

NAGRADNA OCENA  
STANJA

VREDNOSNA FUNKCIJA  
PARA STANJE-AKCIJA

## VREDNOSNA FUNKCIJA PARA STANJE-AKCIJA

Vrednosna funkcije para stanje-akcija (engl. *Action-Value function*) se može odrediti prema sledećem izrazu:

$$V^\pi(s_0) = \lim_{M \rightarrow \infty} E \left[ \sum_{t=0}^M \gamma^t r(s_t, \pi(s_t)) \right]$$

$V^\pi$  - očekivana vrednosna ocena stanja,  
 $\pi$  - strategija donošenja akcija,  
 $r$  - nagradna ocena stanja,  
 $\gamma$  - faktor geometrijskog reda ( $0 \leq \gamma < 1$ ).

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

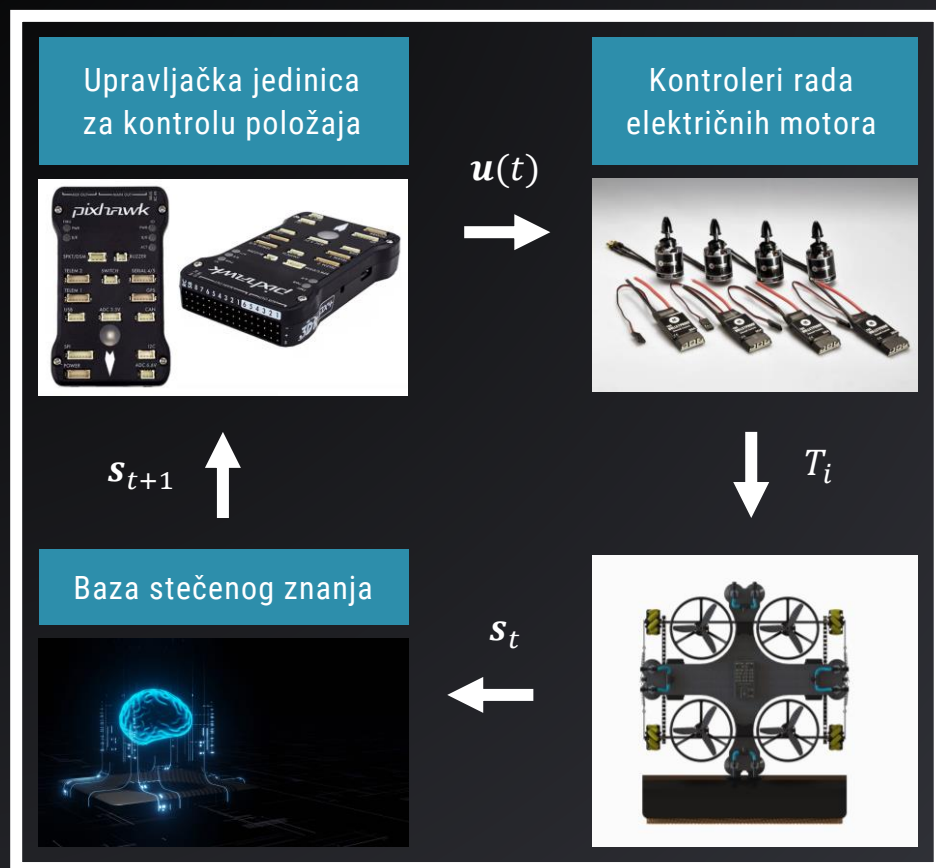
NAČIN RADA  
UPRAVLJAČKE JEDINICE

Q – UČENJE  
OJAČAVANJEM

DISKRETIZACIJA  
PROSTORA

MOGUĆE  
AKCIJE

ODREĐIVANJE NAGRADNE  
OCENE STANJA I PSEUDOKOD



## NAČIN RADA UPRAVLJAČKE JEDINICE

Na osnovu informacija o trenutnom stanju sistema kao i trenutnom stepenu obučenosti, inteligentni agent treba da odabere akciju koja će ga dovesti u naredni položaj. Ovaj položaj predstavlja ulaz u upravljačku jedinicu za kontrolu položaja koja treba da odredi signale na ulazu u kontrolere rada električnih motora kako bi se generisale odgovarajuće vučne sile.

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

NAČIN RADA  
UPRAVLJAČKE JEDINICE

Q – UČENJE  
OJAČAVANJEM

DISKRETIZACIJA  
PROSTORA

MOGUĆE  
AKCIJE

ODREĐIVANJE NAGRADNE  
OCENE STANJA I PSEUDOKOD

## Q – UČENJE OJAČAVANJEM

Ovaj algoritam predstavlja jedinstven način za određivanje strategije donošenja akcija, tj. vrednosne funkcije para stanje-akcija u svakoj iteraciji učenja. Može se predstaviti sledećim izrazom:

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + a_t \left[ r(s_t, a_t) + \gamma \min_a (Q(s_{t+1}, a)) - Q_t(s_t, a_t) \right]$$



# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

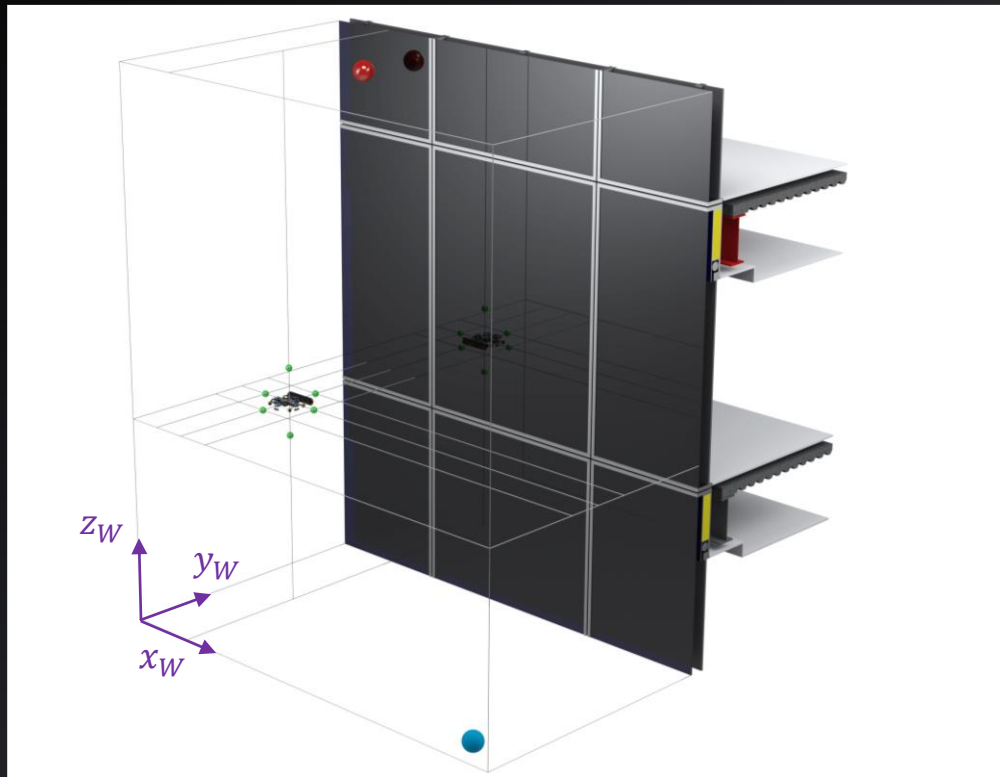
NAČIN RADA  
UPRAVLJAČKE JEDINICE

Q – UČENJE  
OJAČAVANJEM

DISKRETIZACIJA  
PROSTORA

MOGUĆE  
AKCIJE

ODREĐIVANJE NAGRADNE  
OCENE STANJA I PSEUDOKOD



## DISKRETIZACIJA PROSTORA

Stanje sistema u razmatranom primeru predstavlja položaj mobilnog robota-letelice u režimu lebdenja i može se predstaviti kao  $s_t = [s_x, s_y, s_z]^T$ . Okruženje je sastavljeno od sfera jednakih prečnika, čiji su centri moguća stanja sistema. U konkretnom primeru razmatrani prostor je dimenzija 9000x6000x4000mm, i ukupan broj stanja je 1728.

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

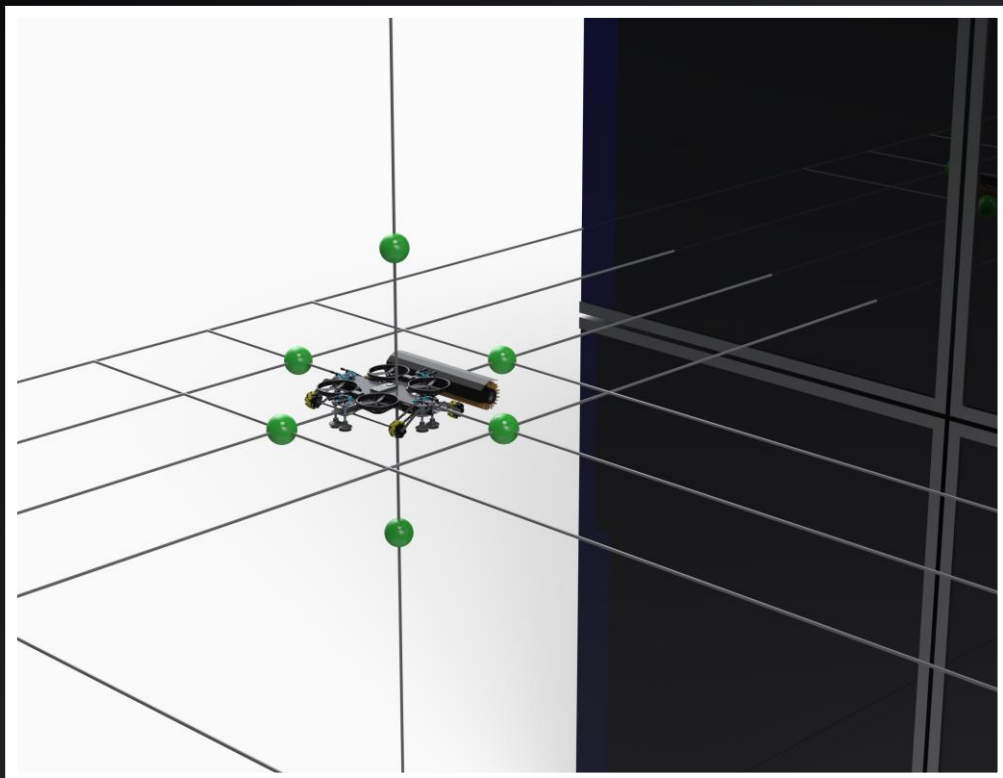
NAČIN RADA  
UPRAVLJAČKE JEDINICE

Q – UČENJE  
OJAČAVANJEM

DISKRETIZACIJA  
PROSTORA

MOGUĆE  
AKCIJE

ODREĐIVANJE NAGRADNE  
OCENE STANJA I PSEUDOKOD



## MOGUĆE AKCIJE

U svakom stanju sistema, inteligentni agent može da preduzme šest različitih akcija. Odabir akcija se vrši na osnovu „pohlepne” tehnike odabira akcija:

$$\pi(s) = \begin{cases} \text{slučajan broj iz skupa } \mathcal{A}(s), & \text{ako je } \xi < \varepsilon \\ \operatorname{argmax}_{a \in \mathcal{A}(s)} Q(s, a), & \text{ako je } \xi \geq \varepsilon \end{cases}$$

$\varepsilon$  – parametar koji reguliše odnos između istraživanja okruženja i eksploatacije steč. znanja  
 $\xi$  – slučajan broj koji podleže uniformnoj raspodeli

# 05 MAŠINSKO UČENJE OJAČAVANJEM

NAČIN RADA  
UPRAVLJAČKE JEDINICE

Q – UČENJE  
OJAČAVANJEM

DISKRETIZACIJA  
PROSTORA

MOGUĆE  
AKCIJE

ODREĐIVANJE NAGRADNE  
OCENE STANJA I PSEUDOKOD

## **PSEUDOKOD Q-UČENJA OJAČAVANJEM**

1. Inicijalizacija vrednosne funkcije para stanje akcija  $Q$
2. Očitavanje vrednosti sa senzora
3. Određivanje trenutnog stanja  $s_t$  na osnovu očitanih vrednosti sa senzora i odabir odgovarajuće akcije  $a_t$  shodno „pohlepnoj” metodi odabira akcija
4. Dodeljivanje nagradne ocene stanja  $r_t$  i određivanje narednog stanja  $s_{t+1}$
5. Ažuriranje vrednosne funkcije para stanje-akcija  $Q(s_t, a_t)$
6. Ponoviti korake od 2-5 sve dok mobilni robot-letelica ne dostigne ciljani položaj

## **ODREĐIVANJE NAGRADNE OCENE STANJA**

Ocena stanja zavisi od problema koji se razmatra. Za rešavanje konkretnog problema nagradna ocena stanja bi mogla imati dve vrednosti:

- „100” – ukoliko je naredni položaj ciljani ili
- „-1” – za bilo koji drugi položaj

# HVALA NA PAŽNJI!



*Rad je nastao u okviru istraživanja sprovedenog uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, evidencioni br: 6523109, VI-MISSION4.0, 2020-2022.*

**MISSION4.0**



**Фонд за науку**  
Републике Србије

