

UDK 007.52:681.511.4:681.5.017:681.513.3

POBOLJŠANJE SLIJEĐENJA TRAJEKTORIJE ROBOTA UPOTREBOM POSTUPAKA NELINEARNOG UPRAVLJANJA IMPROVEMENT OF ROBOT TRAJECTORY TRACKING BY USING NONLINEAR CONTROL METHODS

Vesna KRAJČIĆ – Nino STOJKOVIĆ

Sažetak: U članku su predstavljene sljedeće metode nelinearnog upravljanja: neizravno upravljanje i različite varijante upravljanja s promjenjivom strukturom i kliznim režimom. Ti su postupci upravljanja korišteni u simulacijama za poboljšanje slijeđenja trajektorije troosne planarne rotacijske robotske ruke. Kvaliteta slijeđenja trajektorije robota provjeravana je u simulacijama s promjenom parametara robota, složenim vanjskim smetnjama i šumom mjerenja. Rezultati simulacija dokazali su robusnost svih predstavljenih nelinearnih metoda upravljanja robotima.

Ključne riječi:

- robotski sustav
- neizravno upravljanje
- upravljanje s kliznim režimom
- upravljanje s promjenjivom strukturom
- robusnost

Summary: This paper presents the following nonlinear control methods: fuzzy control and different variations on variable-structure control with a sliding mode. These control methods are used in simulations for improvement of trajectory tracking for the three-axis planar articulated robot arm. The quality of robot trajectory tracking is tested in simulations with robot parameter change, complex external disturbances and measurement noise. The simulation results proved robustness of all presented nonlinear methods for robot control.

Key words:

- robotic system
- fuzzy control
- sliding-mode control
- variable-structure control
- robustness

1. UVOD

Vrlo važno pitanje kod stvaranja sustava upravljanja jest robusnost rezultirajućega zatvorenog sustava. Usredotočenje na taj problem potaknulo je razvoj mnogih robusnih postupaka nelinearnog upravljanja koji kompenziraju različite nesigurnosti u sustavu, kao npr. promjene parametara sustava, ograničene vanjske smetnje i šum mjerenja. Neke su od tih nelinearnih upravljačkih metoda upravljanje s neizravnom logikom i upravljanje s promjenjivom strukturom i kliznim režimom. Primjena je upravljanja s neizravnom logikom u robotici vrlo korisna jer su roboti konstrukcijski teški za

1. INTRODUCTION

A very important issue in the design of control systems is the robustness of the resulting closed-loop system. Focus on this issue has driven the design of many robust nonlinear control techniques that compensate different system uncertainties, e.g. system parameter changes, bounded external disturbances and measurement noise. Some of these nonlinear control methods are fuzzy-logic control and variable-structure control with a sliding mode. The application of fuzzy-logic control in robotics is very useful because robots are structurally difficult to model due to their inherent nonlinearities and other modeling

modeliranje zbog svojih unutarnjih nelinearnosti i ostalih složenosti pri modeliranju [2]. U robotskom sustavu neizraziti regulator koristi neizrazite skupove i neizrazitu logiku kako bi primijenio skup pravila za upravljanje položajem i brzinom vrtnje osovine motora. Za vrijeme rada on određuje koja se pravila upravljanja koriste u aktualnoj situaciji i primjenjuje ih na sličan način kao i čovjek koji bi izravno upravljao sustavom [5], [12].

S druge strane, upravljanje s kliznim režimom ima nekoliko karakteristika koje ga čine atraktivnom tehnikom rješavanja problema slijeđenja u upravljanju gibanjem robotskih manipulatora. Bitna je karakteristika upravljanja s kliznim režimom njegova robusnost na promjene parametara i nemodeliranu dinamiku sustava te jednostavnost algoritma za računanje [6]. Jedan od najjednostavnijih načina upravljanja i održavanja ograničenja jest trenutna reakcija na bilo koje odstupanje sustava vraćajući ga natrag u ograničenja upotrebom dovoljne energije. Taj pristup vodi ka kliznom režimu koji je glavni način rada u sustavima s promjenjivom strukturom [6]. Kada se dosegne klizna površina, sustav se ponaša kao linearan vremenski nepromjenjiv sustav sa smanjenim redom i robusan je na pogreške modeliranja, promjene parametara i vanjske smetnje [10]. Činjenica da je robusnost sustava s promjenjivom strukturom postignuta trenutnom jakom reakcijom na najmanja odstupanja od izabranih ograničenja ima sljedeći glavni nedostatak: efekt trešnje, t.j. opasnih visokofrekvencijskih vibracija upravljanog sustava [10]. Kako bi se izbjegle oscilacije, predloženi su neki postupci [4], [8], [9], [10]. Glavna je ideja u promjeni dinamike u maloj okolini površine prekida kako bi se izbjegao realan prekid i istodobno zadržala glavna svojstva cijelog sustava. Međutim, prvobitna točnost i robusnost kliznog režima djelomično su izgubljene [10].

2. METODA NEIZRAZITOG UPRAVLJANJA

Neizraziti regulator koji je upotrijebljen u petlji slijednog upravljanja i -tog zgloba robota ima dva diskretna ulaza: signal pogreške položaja motora $e_i(k)$ i promjenu signala pogreške položaja motora $de_i(k)$:

$$e_i(k) = \theta_{r_i}(k) - \theta_i(k), \quad 1 \leq i \leq n, \quad (1)$$

$$de_i(k) = e_i(k) - e_i(k-1), \quad 1 \leq i \leq n. \quad (2)$$

Sedam neizrazitih skupova definirano je za obje ulazne varijable regulatora s neizrazitom logikom: veliko negativno, srednje negativno, malo negativno, nula, malo pozitivno, srednje pozitivno, veliko pozitivno [5]. Izabrane su funkcije pripadnosti ulaznih varijabli neizrazitog regulatora s trokutastim oblikom, pri čemu se samo dvije susjedne funkcije prekrivaju [4], [5], [12] (Slika 1).

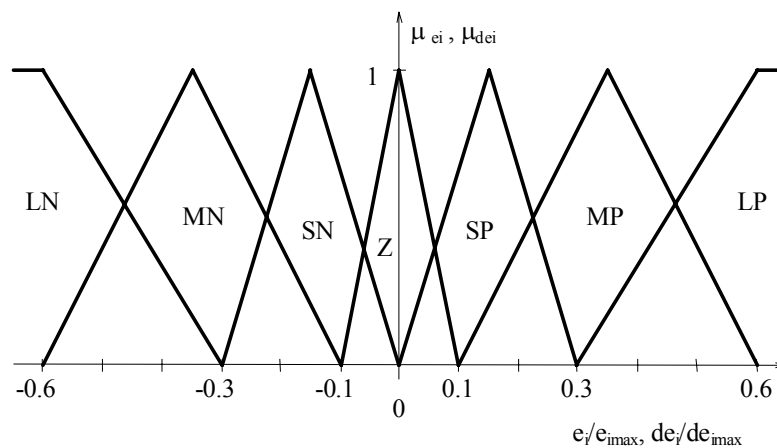
complexities [2]. In a robotic system, the fuzzy controller uses fuzzy sets and fuzzy logic to implement a set of rules about how to control the motor shaft position and speed. During operation, it determines which control rules apply to the current situation and applies these in an analogous way to how a human would if he were directly controlling the system [5], [12].

On the other hand, the sliding-mode control has several features that makes it an attractive technique for solving tracking problems with the motion control of robotic manipulators. One of the most important characteristics of sliding-mode control is its robustness with regard to parametric uncertainties and unmodelled system dynamics and the computational simplicity of the algorithm [6]. One of the simplest ways to control and keep a constraint is to react immediately to any deviation of the system, stirring it back to the constraint by a sufficiently energetic effort. This approach leads to the sliding mode, which is the main operational mode in variable-structure systems [6]. When the sliding surface is reached, the system behaves like a linear-time invariant system with a reduced order and it is robust against modelling error, parameters variations and environment perturbations [10]. The fact that the robustness of variable-structure systems is reached by immediate powerful reaction to the minutest deviation from the chosen constraint has the following main drawbacks: the chattering effect, i.e. dangerous high-frequency vibrations of the controlled system [10]. To avoid chattering, various approaches are proposed [4], [8], [9], [10]. The main idea is to change the dynamics within a small vicinity of the discontinuity surface in order to avoid real discontinuity and at the same time to preserve the main properties of the whole system. However, the ultimate accuracy and robustness of the sliding mode are partially lost [10].

2. FUZZY CONTROL METHOD

The fuzzy controller used in the i th robot joint servo control loop has two discrete inputs: motor position error signal $e_i(k)$ and change of motor position error signal $de_i(k)$:

Seven fuzzy sets are defined for both fuzzy-logic controller input variables: large negative, medium negative, small negative, zero, small positive, medium positive and large positive [5]. The fuzzy-logic controller input membership functions with a triangular form are chosen, where only two adjacent functions overlap [4], [5], [12] (Figure 1).



Slika 1: Raspodjele funkcija pripadnosti ulaznih varijabli i -toga neizrazitog regulatora.
Figure 1: The distributions of the i th fuzzy controller input membership functions.

Baza neizrazitih pravila strategija je upravljanja robotom. Dobivena je iz stručnog poznavanja robotskog sustava i izražena kao skup AKO-TADA pravila [4], [5]. Neizrazita pravila regulatora s dvije ulazne varijable dana su pomoću tablice neizrazitih pravila [4], [5], [12]. Za vrijeme stvaranja 7×7 tablice neizrazitih pravila [5], ograničenja momenata motora robota uzeta su u obzir. Vrijednost izlaza regulatora s neizrazitom logikom računa se po principu težišta neizrazitog skupa, što se često koristi u literaturi [5], [12], jer nije potrebno računati ukupnu funkciju pripadnosti izlaza, što pojednostavnjuje postupak računanja.

Isti neizraziti algoritam upotrijebljen je u svim petljama slijednog upravljanja robota, ali uz odgovarajuće skaliranje jezičnih varijabli [4], [5], [12]:

$$K_{e_i} = \frac{1}{e_{imax}}, \quad K_{de_i} = \frac{1}{de_{imax}}, \quad K_{u_i} = \frac{1}{u_{imax}}, \quad (3)$$

gdje je e_{imax} najveća pogreška kuta zakreta osovine i -tog motora, de_{imax} je najveća promjena te pogreške, u_{imax} je najveća vrijednost izlaza i -toga neizrazitog regulatora, $1 \leq i \leq n$. Ti su ulazni i izlazni parametri skaliranja neizrazitih regulatora izabrani po principu najveće dozvoljene pogreške slijeđenja željene trajektorije vrha alata robota i najmanje potrošnje energije.

3. UPRAVLJANJE S PROMJENJIVOM STRUKTUROM I KLIZNIM REŽIMOM

U slučaju postojanja glatke trajektorije vrha alata robota, pogreške kuta zakreta osovine $e_i(t)$ i brzine $de_i(t)/dt$ svakoga i -tog motora robota mogu se izabrati kao varijable stanja robotskog sustava:

The fuzzy rule base is the control strategy of the robot. It is obtained from the expert knowledge of the robotic system and expressed as a set of IF-THEN rules [4], [5].

Fuzzy rules of the controller with two input variables are given by fuzzy rule table [4], [5], [12]. During the creation of the 7×7 fuzzy rule table [5], the limits of robot motor torques are taken into account.

The fuzzy-logic controller output value is calculated according to the centre of gravity principle, which is often used in literature [5], [12], because it is not necessary to calculate the overall output membership function, which simplifies the calculation procedure.

The same fuzzy algorithm is used in all robot servo control loops but with a proper scaling of the linguistic variables [4], [5], [12]:

where e_{imax} is the maximal error of the i th motor shaft angle, de_{imax} is the maximal change of this error, u_{imax} is the maximal value of the i th fuzzy controller output, $1 \leq i \leq n$. These input and output scaling parameters of fuzzy controllers are chosen according to the principle of maximal allowed tracking error along the desired robot tool tip trajectory with a minimum of energy consumption.

3. VARIABLE-STRUCTURE CONTROL WITH SLIDING MODE

In the case of the existence of a smooth reference robot tool tip trajectory, the error of each i th robot motor shaft angle $e_i(t)$ and speed $de_i(t)/dt$ can be chosen as robot system state variables:

$$e_i(t) = \theta_{r_i}(t) - \theta_i(t), \quad 1 \leq i \leq n, \quad (4)$$

$$\dot{e}_i(t) = \dot{\theta}_{r_i}(t) - \dot{\theta}_i(t), \quad 1 \leq i \leq n. \quad (5)$$

Prema [11], sljedeća općenita pogreška može biti definirana za varijable sustava i -tog motora robota:

$$\sigma_i(e_i, \dot{e}_i) = K_{\sigma_i} \cdot [\lambda_i \cdot e_i(t) + \dot{e}_i(t)], \quad 1 \leq i \leq n. \quad (6)$$

Cilj je postupka upravljanja s promjenjivom strukturom i kliznim režimom uklanjanje svih pogrešaka motora robota $\sigma_i(t)$:

$$\sigma_i(e_i, \dot{e}_i) = 0, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (7)$$

što je moguće postići upotrebom sljedećeg zakona upravljanja (1. metoda upravljanja s promjenjivom strukturom) [1], [7]:

$$\begin{aligned} u_{R_i}(t) &= u_{1_i}(t) + u_{2_i}(t), \quad 1 \leq i \leq n, \\ u_{1_i}(t) &= \gamma_i \cdot \text{sgn}\{K_{\sigma_i} \cdot [\lambda_i \cdot e_i(t) + \dot{e}_i(t)]\}, \quad 1 \leq i \leq n, \\ u_{2_i}(t) &= K_{\sigma_i} \cdot \lambda_i \cdot \dot{e}_i(t), \quad 1 \leq i \leq n. \end{aligned} \quad (8)$$

Iz prethodne se jednadžbe može vidjeti da je vrlo često i brzo prekapčanje prvog dijela zakona upravljanja potrebno za kvalitetno slijeđenje trajektorije robota. Izravna su posljedica tog zahtjeva kvalitete visokofrekventne oscilacije signala upravljanja, kako je spomenuto u uvodu. Ta trešnja dovodi do jakog trošenja pokretnih mehaničkih dijelova i velikih gubitaka topline u električnim energetskim krugovima [10] i također rezultira velikim gubicima energije. Za smanjenje ili poništavanje opasnih oscilacija signala upravljanja, prvi dio zakona upravljanja (8) s funkcijom predznaka:

$$u_{1_i}(t) = \gamma_i \cdot \text{sgn}[\sigma_i(t)] = \gamma_i \cdot \frac{\sigma_i(t)}{|\sigma_i(t)|}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (9)$$

treba biti zamijenjen neprekidnim signalom danim u [4] (2. metoda upravljanja s promjenjivom strukturom):

$$u_{1_i}(t) = \gamma_i \cdot \frac{\sigma_i(t)}{|\sigma_i(t)| + \delta_i}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (10)$$

ili neprekidnom aproksimacijom s velikim nagibom, tj. funkcijom zasićenja, što je predloženo u [8], [9], [10] (3. metoda upravljanja s promjenjivom strukturom):

$$u_{1_i}(t) = \gamma_i \cdot \text{sat}[\sigma_i(t)] = \left. \begin{aligned} & -\gamma_i, & \sigma_i < -\delta_i \\ & \gamma_i \cdot \frac{\sigma_i}{\delta_i}, & -\delta_i < \sigma_i < \delta_i \\ & \gamma_i, & \sigma_i > \delta_i \end{aligned} \right\}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (11)$$

ili promijenjenom eksponencijalnom funkcijom (4. metoda upravljanja s promjenjivom strukturom):

$$u_{1_i}(t) = \gamma_i \cdot \text{sgn}[\sigma_i(t)] \cdot \left(1 - e^{-\frac{|\sigma_i|}{\delta_i}}\right) = \gamma_i \cdot \frac{\sigma_i(t)}{|\sigma_i(t)|} \cdot \left(1 - e^{-\frac{|\sigma_i|}{\delta_i}}\right), \quad 1 \leq i \leq n, \quad (12)$$

gdje δ_i označava debljinu graničnog sloja za i -ti motor robota, $1 \leq i \leq n$.

Sve navedene metode upravljanja s promjenjivom strukturom i kliznim režimom zajednički su prikazane na Slici 2.

According to [11], the following common error can be defined for state variables of the i th robot motor:

The goal of the variable-structure sliding-mode control method is the elimination of all robot motor errors $\sigma_i(t)$:

which can be achieved by using the following control law (the 1st variable-structure control method) [1], [7]:

From the previous equation it can be seen that there is very frequent and fast switching of the first part of the control law needed for quality robot trajectory tracking. Directly resulting from this quality demand are high-frequency oscillations of the control signal, as mentioned in the introduction. This chattering leads to high wear of moving mechanical parts and high heat losses in electrical power circuits [10] and it also results in great losses of energy. To reduce or eliminate dangerous chattering of the control signal, the first part of the control law (8) with a signum function:

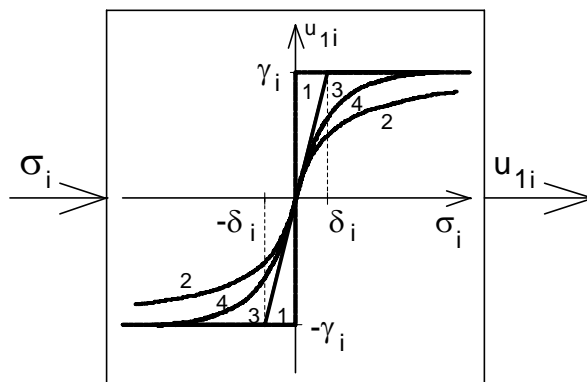
has to be replaced by a continuous signal given in [4] (the 2nd variable-structure control method):

or by a continuous approximation with a large slope, i.e. a saturation function, which is suggested in [8], [9], [10] (the 3rd variable-structure control method):

or by modified exponential function (the 4th variable-structure control method):

where δ_i denotes the thickness of the boundary layer for the i th robot motor, $1 \leq i \leq n$.

All presented variable-structure sliding-mode control methods are shown together on Figure 2.



Slika 2. Prvi dio zakona upravljanja u prvoj (linija br. 1), drugoj (linija br. 2), trećoj (linija br. 3) i četvrtoj (linija br. 4) metodi upravljanja s promjenjivom strukturom i kliznim režimom.

Figure 2. The first part of the control law in the 1st (polyline no. 1), the 2nd (polyline no. 2), the 3rd (polyline no. 3) and the 4th (polyline no. 4) variable-structure sliding-mode control methods.

Parametri regulatora za sve spomenute metode upravljanja s promjenjivom strukturom mogu biti podešeni prema sljedećim principima: maksimalno dozvoljena pogreška slijeđenja trajektorije robota, bez oscilacija i minimum energije.

Robusnost svih predstavljenih postupaka upravljanja robotom provjerena je simulacijama na računalu.

Controller parameters for all mentioned variable-structure control methods can be adjusted according to the following principles: maximum allowed robot trajectory tracking error, no chattering and minimum of energy.

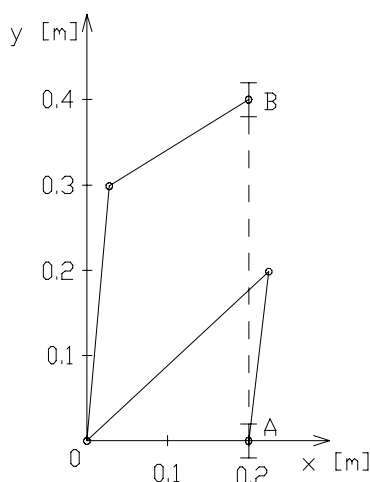
The robustness of all presented robot control methods is tested by computer simulations.

4. REZULTATI SIMULACIJA

Predstavljene postupci upravljanja s neizrakom logikom i promjenjivom strukturom i kliznim režimom provjereni su simulacijama na računalu u programskom jeziku C u slučaju kretanja vrha alata troosnoga električki pokretanoga rotacijskog robota u ravnini [11] po pravocrtnoj vertikalnoj trajektoriji prikazanoj na Slici 3, tj. od početne točke A do završne točke B (sa zaustavljanjem u točki B) i natrag od početne točke B do završne točke A (sa zaustavljanjem u točki A), što simulira postupak bojenja zida.

4. SIMULATION RESULTS

The presented fuzzy-logic and variable-structure sliding-mode control methods are tested by computer simulations in programming language C in the case of moving the tool tip of a three-axis electric driven articulated planar robot [11] along the straight-line vertical trajectory shown on Figure 3, i.e. from the starting point A and the ending point B (with a stop at point B) and backwards from the starting point B and the ending point A (with a stop at point A), which simulates the wall-painting procedure.



Slika 3. Zadana pravocrtna vertikalna trajektorija vrha alata robota.

Figure 3. The reference straight-line vertical robot tool tip trajectory.

Kinematički model izabranoga ravninskog robota na Slici 3 dobiven je pomoću Denavit–Hartenbergova algoritma pridruživanja koordinatnih sustava svakom segmentu robota [3], [6], [11]. Za rješavanje problema dinamike robota može se koristiti Lagrange–Eulerov [6], [10], [11], ili Newton–Eulerov [6], [11] postupak. U simulacijama na računalu upotrijebljen je realni dinamički model robota s viskozim, dinamičkim i statičkim trenjem [10], [11], zajedno s ograničenjima konstrukcije robota i aktuatora. Za analizu potrošnje energije po cijeloj trajektoriji vrha alata robota, sljedeća ukupna energija svih motora robota računata je prema [3]:

$$E = \sum_{i=1}^3 \left(\int_0^{T_s} U_{ai} \cdot I_{ai} \cdot dt, \quad U_{ai} \cdot I_{ai} > 0 \right), \quad (13)$$

gdje T_s označava vrijeme prijelaza cijele trajektorije robota, U_{ai} je napon armature i I_{ai} je armaturna struja i -tog motora robota ($1 \leq i \leq 3$).

U simulacijama je za sve metode upravljanja postavljena najveća dopuštena pogreška slijeđenja cijele trajektorije na vrijednost 0.5 [mm]. Cilj je postaviti vrijednosti parametara svih predloženih regulatora robota kako bi se dosegla željena pogreška s minimumom potrošnje energije. Kako se vrh alata robota zaustavlja u točki B, trajektorija robota može biti podijeljena na dva odvojena dijela: jedan od točke A do točke B i drugi od točke B do točke A. Na takav način, primjenom različitih vrijednosti parametara regulatora na tim dvama dijelovima trajektorije robota, može se postići minimalna ukupna potrošnja energije na cijeloj trajektoriji.

Zbog jednostavnosti i dobrih karakteristika, isti neizrastiti regulatori korišteni su za sve tri upravljačke petlje robota, ali je potrebno različito skaliranje izlaza neizrastitog regulatora. Na takav način postignute su sljedeće potrošnje energije na trajektoriji robota: $E=19$ [J] (od A do B) i $E=9.2$ [J] (od B do A).

Parametri prvog regulatora s promjenjivom strukturom određeni su prema sljedećem postupku: vrijednost parametra K_σ postavljena je na 0.01 kako bi se omogućilo slijeđenje trajektorije, vrijednost parametra λ određuje količinu potrošnje energije, a promjenom parametra γ dosegnuta je najveća dopuštena pogreška slijeđenja. U simulacijama s tim parametrima regulatora, potrebna je sljedeća količina energije za sve motore robota: $E=51.3$ [J] (od A do B) i $E=28.8$ [J] (od B do A). U usporedbi s rezultatima upotrebe regulatora s neizrastitom logikom može se vidjeti da prvi regulator s promjenjivom strukturom i kliznim režimom treba mnogo više energije za izvršenje istog zadatka. Razlog je tome velikom gubitku energije trešnja signala upravljanja koja može biti uklonjena u svim modificiranim postupcima upravljanja s promjenjivom strukturom pomoću odgovarajuće debljine graničnog sloja $\delta=0.05$. Na takav

The kinematic model of the chosen planar robot in Figure 3 is obtained by use of the Denavit-Hartenberg algorithm of assigning coordinate frames to each robot link [3], [6], [11]. For solving the robot dynamics problem, the Lagrange-Euler [6], [10], [11], or Newton-Euler [6], [11] method can be used. In computer simulations the realistic dynamic robot model with viscous, dynamic and static frictions is used [10], [11], together with robot construction and actuator limits.

To analyse energy consumption along the whole robot tool tip trajectory, the following total energy of all robot motors is calculated according to [3]:

where T_s denotes the whole robot trajectory traverse time, U_{ai} is armature voltage and I_{ai} is armature current for the i th robot motor ($1 \leq i \leq 3$).

In the simulations for all control methods, the maximal allowed whole trajectory tracking error is set to 0.5 [mm]. The goal is to adjust the parameters of all proposed robot controllers to achieve the desired error with the minimum of energy consumption. Because robot tool tip stops at point B, robot trajectory can be divided into two separate parts: one from point A to point B and the other one from point B to point A. That way, by applying different values of controller parameters along these two parts of the robot trajectory, minimal total energy consumption along the whole trajectory can be achieved.

Due to simplicity and good performance, the same fuzzy controllers are used for all three robot control loops, but different scaling of fuzzy controller outputs is necessary. Therefore, the following energy consumption is achieved along the robot trajectories: $E=19$ [J] (from A to B) and $E=9.2$ [J] (from B to A).

The first variable-structure controller parameters are set according to the following procedure: value of parameter K_σ is set to 0.01 to enable trajectory tracking, value of parameter λ defines the amount of energy consumption and by changing parameter γ the maximal allowed tracking error is reached. In simulations with these controller parameters the following amount of energy is needed for all robot motors: $E=51.3$ [J] (from A to B) and $E=28.8$ [J] (from B to A). In comparison with the results of using a fuzzy-logic controller it can be seen that the first variable-structure sliding-mode controller needs much more energy to execute the same task. The reason for this great loss of energy is the chattering of the control signal, which can be eliminated in all modified variable-structure control methods with a proper thickness of the boundary layer of $\delta=0.05$. Consequently, the following energy consumption is achieved in simulations: $E=19.2$ [J] (from A to B) and $E=9.2$ [J]

su način postignute sljedeće potrošnje energije u simulacijama: $E=19.2$ [J] (od A do B) i $E=9.2$ [J] (od B do A) za 2. metodu upravljanja s promjenjivom strukturom, $E=19$ [J] (od A do B) i $E=8.9$ [J] (od B do A) za 3. metodu, $E=19.1$ [J] (od A do B) i $E=9.1$ [J] (od B do A) za 4. metodu. Te su količine potrošene energije vrlo slične vrijednostima potrošnje energije u slučaju upotrebe neizrastog regulatora.

4.1. Analiza robusnosti

Robusnost objašnjenih metoda upravljanja ocijenjena je pomoću promjene tereta i dodavanja šuma i smetnji.

Utjecaj promjena parametara robota na robusnost svih spomenutih postupaka upravljanja robotom analiziran je dodavanjem različitog tereta u alat robota (od 0 to 2 [kg]). Rezultati simulacije na računalu, tj. maksimalna ukupna pogreška slijeđenja trajektorije i ukupna energija svih motora robota potrebna za kretanje vrha alata od točke A do točke B i natrag (Slika 3) prikazani su na Slici 4. Na toj slici može se vidjeti da promjena tereta ima najveći utjecaj na treću metodu upravljanja s promjenjivom strukturom, a najmanji utjecaj na neizrastito upravljanje. Ukupne energije svih motora robota duž cijele trajektorije vrha alata vrlo su slične za sve postupke upravljanja.

Robusnost svih objašnjenih metoda upravljanja robotima također je provjerena dodavanjem bijelog šuma mjerenja svakom signalu brzine vrtnje osovine motora robota (od 0% do 20% brzine) i rezultati su dani na Slici 5. Bijeli šum mjerenja brzine vrtnje osovine motora jedva djeluje na neizrastiti regulator, ali utječe na sve metode s promjenjivom strukturom, posebno na treću.

Još jedan test robusnosti izveden je dodavanjem različitih sinusoidnih vanjskih smetnji M_d signalima momenata motora robota. Rezultati djelovanja složene sinusoidne vanjske smetnje $M_d=M_{Ad}\sin(0.1\cdot t)+M_{Ad}\sin(1\cdot t)+M_{Ad}\sin(10\cdot t)+M_{Ad}\sin(100\cdot t)$, gdje se M_{Ad} mijenja od nule do najveće amplitude prikazane na osi x, na sve motore robota prikazani su na Slici 6. Najbolju robusnost na šum pokazuje neizrastito upravljanje, a najlošija je treća metoda upravljanja s promjenjivom strukturom. Količine ukupno potrošene energije ponovo su vrlo slične za sve simulirane metode.

Analiza utjecaja vanjskih smetnji na robusnost predstavljenih postupaka upravljanja robotima dovršena je ocjenom utjecaja jednostavnih sinusoidnih signala smetnji s različitim frekvencijama $M_d=M_{Ad}\sin(\omega t)$, $\omega=0.1,1,10,100$ [rad/s], gdje se M_{Ad} mijenja od 0 do 0.01[Nm], na 2. (Slika 7), 3. (Slika 8), 4. (Slika 9) metodu upravljanja s promjenjivom strukturom i neizrastito upravljanje (Slika 10). Ti rezultati pokazuju veći utjecaj vanjskoga sinusoidnog signala s frekvencijom $\omega=1$ [rad/s] i najmanji s $\omega=100$ [rad/s] za većinu metoda upravljanja, osim za neizrastito.

(from B to A) for the 2nd variable-structure control method, $E=19$ [J] (from A to B) and $E=8.9$ [J] (from B to A) for the 3rd variable-structure control method, $E=19.1$ [J] (from A to B) and $E=9.1$ [J] (from B to A) for the 4th variable-structure control method. These amounts of consumed energy are very similar to the value of energy consumption in the case of using a fuzzy controller.

4.1. Analysis of robustness

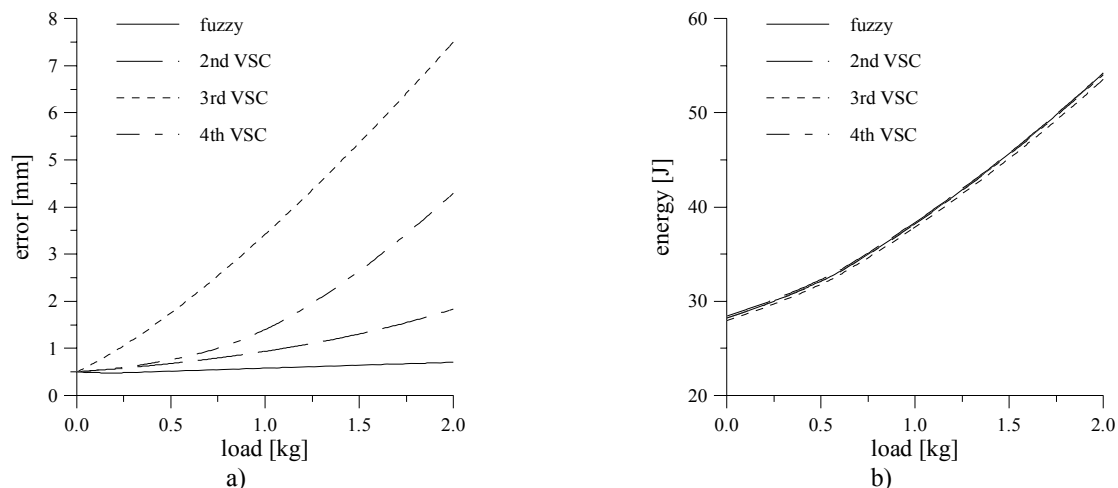
The robustness of explained control methods is evaluated by load change and adding noise and disturbances.

The influence of robot parameter changes on robustness of all mentioned robot control methods is analysed by adding a different load to the robot tool (from 0 to 2 [kg]). The results of computer simulations, i.e. maximal total trajectory tracking error and total energy of all robot motors needed for tool tip movement from point A to point B and back (Figure 3), are shown in Figure 4. From this figure it can be seen that the load change has the greatest effect on the 3rd variable-structure control method and the smallest effect on the fuzzy control. The total energies of all robot motors along the whole tool tip trajectory are very similar for all control methods.

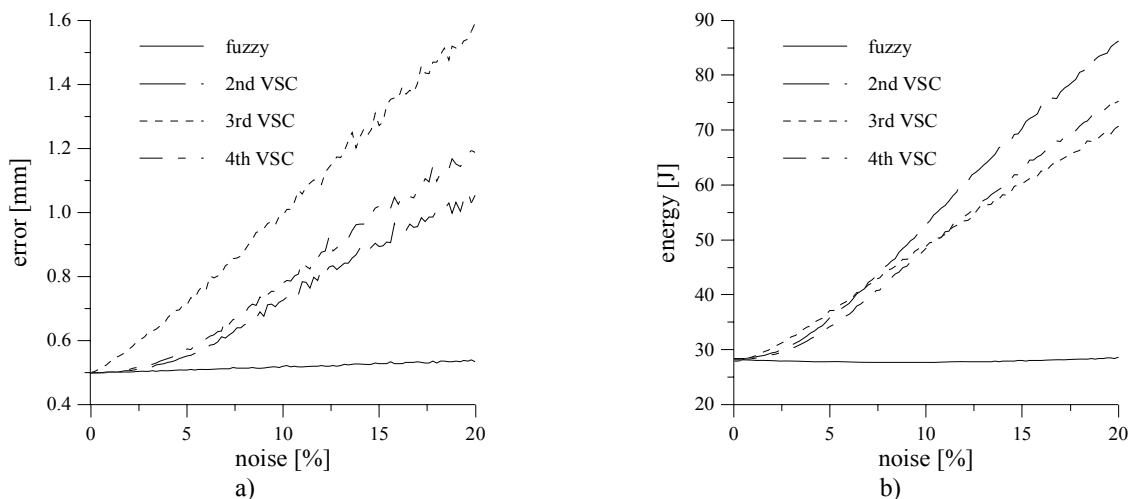
The robustness of all explained robot control methods is also tested by adding white measurement noise to each of the robot motor shaft speed signals (from 0% to 20% of the speed) and the results are given in Figure 5. The white motor shaft speed measurement noise has scarcely any effect on the fuzzy controller, but it influences all variable-structure methods, especially the 3rd one.

Another test of robustness is performed by adding different sinusoidal external disturbances M_d to the robot motor torque signals. Figure 6 shows the results of enacting the complex sinusoidal external disturbance $M_d=M_{Ad}\sin(0.1\cdot t)+M_{Ad}\sin(1\cdot t)+M_{Ad}\sin(10\cdot t)+M_{Ad}\sin(100\cdot t)$ on all robot motors, where M_{Ad} changes from zero to maximal amplitude shown on the x-axis. The fuzzy control method shows the best robustness to noise and the worst is the 3rd variable-structure control method. The amounts of total consumed energy are again very similar for all simulated robot control methods.

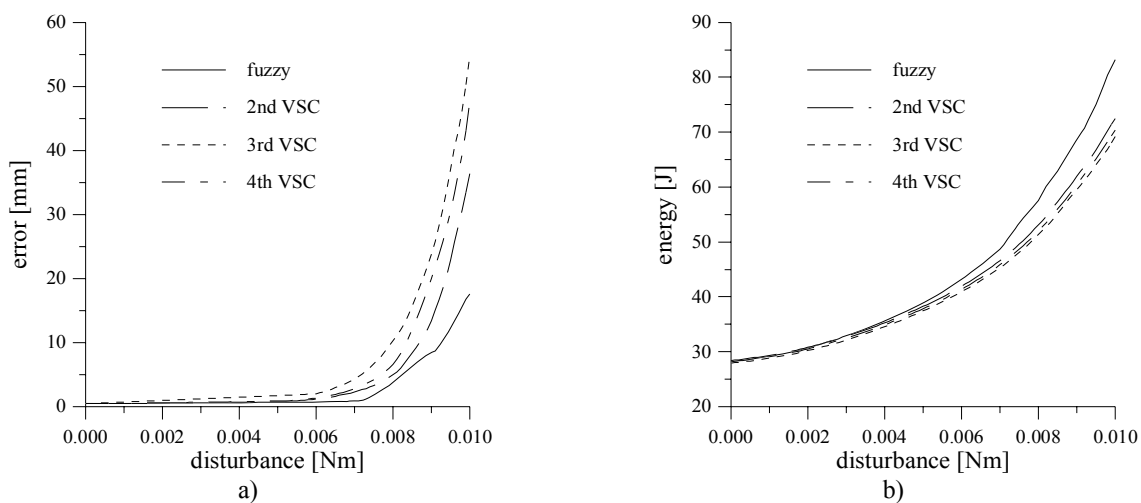
The analysis of the effect of external disturbances on robustness of the presented robot control methods is completed with evaluation of the influence of simple sinusoidal disturbance signals with different frequencies $M_d=M_{Ad}\sin(\omega t)$, $\omega=0.1,1,10,100$ [rad/s], where M_{Ad} changes from 0 to 0.01[Nm], on the 2nd (Figure 7), the 3rd (Figure 8), the 4th (Figure 9) variable-structure control method and the fuzzy control (Figure 10). These results show greater influence of external sinusoidal signal with a frequency $\omega=1$ [rad/s] and the smallest with $\omega=100$ [rad/s] for most robot control methods, except for fuzzy control.



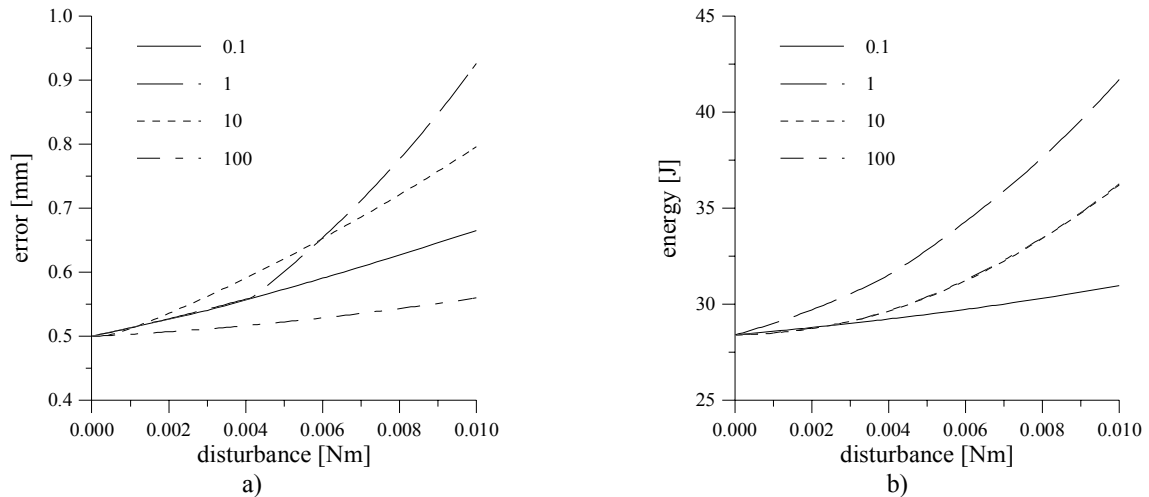
Slika 4. Ukupna pogreška (a) i energija (b) za sve metode upravljanja u slučaju promjene tereta.
Figure 4. Total error (a) and energy (b) for all control methods in the case of load change.



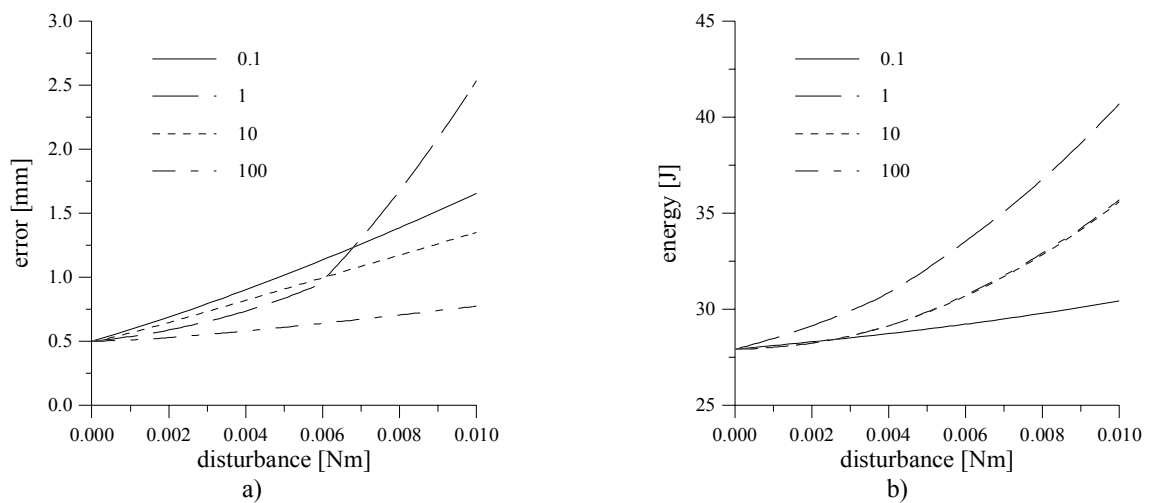
Slika 5. Ukupna pogreška (a) i energija (b) za sve metode upravljanja u slučaju postojanja šuma mjerenja.
Figure 5. Total error (a) and energy (b) for all control methods in the case of existence of measurement noise.



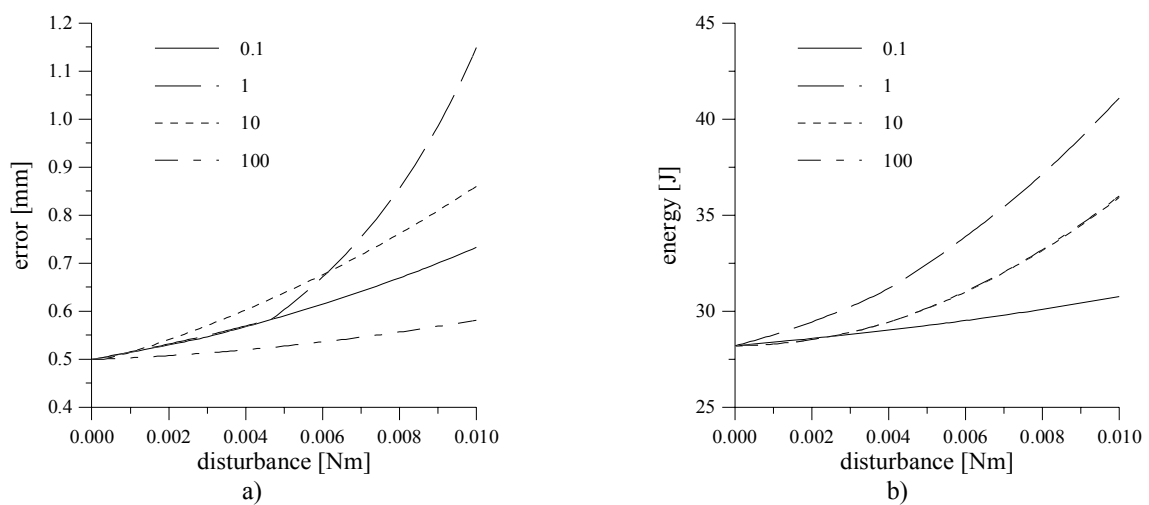
Slika 6. Ukupna pogreška (a) i energija (b) za sve metode upravljanja u slučaju postojanja složene vanjske smetnje.
Figure 6. Total error (a) and energy (b) for all control methods in case of existence of complex external disturbance.



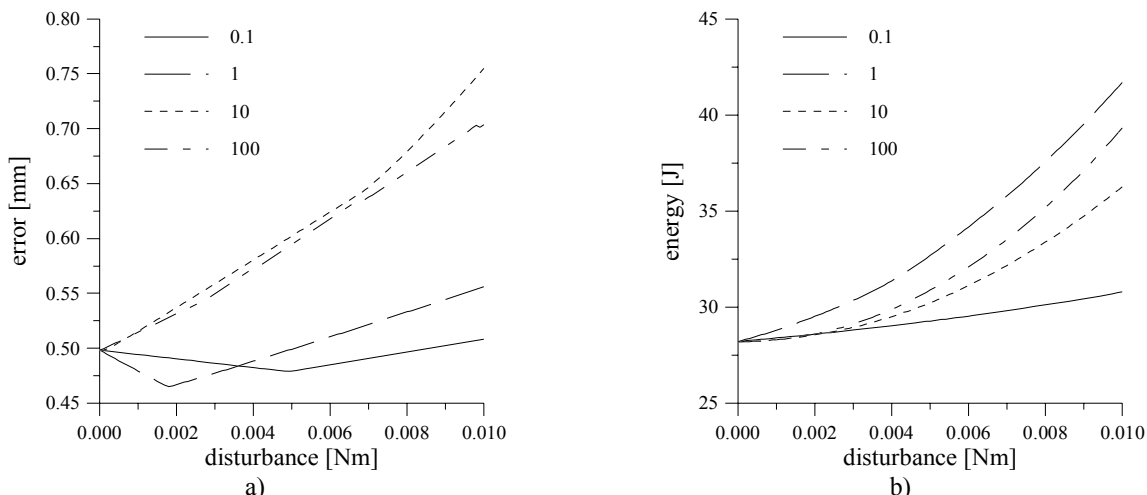
Slika 7. Ukupna pogreška (a) i energija (b) za 2. metodu upravljanja s promjenjivom strukturom uz različite smetnje.
 Figure 7. Total error (a) and energy (b) for the 2nd variable-structure control method with different disturbances.



Slika 8. Ukupna pogreška (a) i energija (b) za 3. metodu upravljanja s promjenjivom strukturom uz različite smetnje.
 Figure 8. Total error (a) and energy (b) for the 3rd variable-structure control method with different disturbances.



Slika 9. Ukupna pogreška (a) i energija (b) za 4. metodu upravljanja s promjenjivom strukturom uz različite smetnje.
 Figure 9. Total error (a) and energy (b) for the 4th variable-structure control method with different disturbances.



Slika 10. Ukupna pogreška (a) i energija (b) za metodu neizrazitog upravljanja uz različite smetnje.
Figure 10. Total error (a) and energy (b) for the fuzzy control method with different disturbances.

5. ZAKLJUČAK

Iako svi predstavljeni postupci upravljanja robotima, tj. s neizrazitom logikom i različite metode upravljanja s promjenjivom strukturom i kliznim režimom, pokazuju dobro slijeđenje trajektorije i robusnost, istraživanje može biti nastavljeno u pronalaženju odgovarajuće kombinacije neizrazitog upravljanja i upravljanja s kliznim režimom za daljnje poboljšanje i pojednostavnjenje slijeđenja trajektorije robota.

6. POPIS OZNAKA

broj osi (stupnjeva slobode) robota	n
referentni kut zakreta osovine motora	θ_r - rad
kut zakreta osovine motora	θ - rad
pogreška kuta zakreta osovine motora	e - rad
promjena pogreške kuta zakreta osovine motora	de - rad
pogreška brzine vrtnje osovine motora	de/dt - rad/s
općenita pogreška varijabli stanja motora	σ - rad/s
najveća pogreška kuta zakreta osovine motora	e_{max} - rad
najveća promjena pogreške zakreta motora	de_{max} - rad
najveća vrijednost izlaza neizrazitog regulatora	u_{max}
parametar neizrazitog regulatora	K_e - 1/rad
parametar neizrazitog regulatora	K_{de} - 1/rad
parametar neizrazitog regulatora	K_u
ukupni signal upravljanja s promjenjivom strukturom	u_R
1. dio signala upravljanja s promjenjivom strukturom	u_1
2. dio signala upravljanja s promjenjivom strukturom	u_2
parametar regulatora s promjenjivom strukturom	λ - 1/s
parametar regulatora s promjenjivom strukturom	K_σ
parametar regulatora s promjenjivom strukturom	γ
debljina graničnog sloja	δ
ukupna energija svih motora robota	E - J
ukupno vrijeme prijelaza trajektorije robota	T_s - s
napon armature	U_a - V

5. CONCLUSION

Although all presented robot control methods, i.e. fuzzy-logic and different variable-structure sliding-mode control methods, show good trajectory tracking performance and robustness, the research may be continued in the search for the proper combination of fuzzy control mechanism and sliding-mode control for further improvements and simplification of robot trajectory tracking.

6. LIST OF SYMBOLS

number of robot axis (degrees of freedom)	n
reference motor shaft angle	θ_r - rad
motor shaft angle	θ - rad
motor shaft angle error	e - rad
change of motor shaft angle error	de - rad
motor shaft speed error	de/dt - rad/s
common motor state variables error	σ - rad/s
maximal error of motor shaft angle	e_{max} - rad
maximal change of motor shaft angle error	de_{max} - rad
maximum of fuzzy controller output	u_{max}
fuzzy controller parameter	K_e - 1/rad
fuzzy controller parameter	K_{de} - 1/rad
fuzzy controller parameter	K_u
total variable-structure control signal	u_R
the first part of variable-structure control signal	u_1
the second part of variable-structure control signal	u_2
variable-structure controller parameter	λ - 1/s
variable-structure controller parameter	K_σ
variable-structure controller parameter	γ
thickness of boundary layer	δ
total energy of all robot motors	E - J
total robot trajectory traverse time	T_s - s
armature voltage	U_a - V

struja armature	I_a - A	armature current
vanjska smetnja	M_d - Nm	external disturbance
amplituda vanjske smetnje	M_{Ad} - Nm	amplitude of external disturbance
kružna frekvencija vanjske smetnje	ω - rad/s	angular frequency of external disturbance

LITERATURA REFERENCES

- [1] Chen, Y.-F.; Mita, T.; Wakui, S.: *A New and Simple Algorithm for Sliding Mode Trajectory Control of the Robot Arm*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 35 (1990), No. 7, p. 828-829.
- [2] Cirstea, M.N.; Dinu, A.; Khor, J.G.; McCormick, M.: *Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems*, Newnes, 2002.
- [3] Desoyer, K.: *Geometry, Kinematics and Kinetics of Industrial Robots*, International Summer School CIM and Robotics, Krems, 1994.
- [4] Hashimoto, H.; Maruyama, K.; Harashima, F.: *A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-34 (1987), No. 1, p. 11-18.
- [5] Kovačić, Z.; Bogdan, S.: *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*, CRC Press, Taylor&Francis Books LLC, 2005.
- [6] Kurfess, T.R.: *Robotics and Automation Handbook*, CRC Press, 2005.
- [7] Morgan, R. G.; Özgüner, U.: *A Decentralized Variable Structure Control Algorithm for Robotic Manipulators*, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1 (1985), No. 1, p. 57-65.
- [8] Mujanović, A.: *Optimiranje adaptivnog sistema s referentnim modelom i signalnom adaptacijom* (PhD thesis), Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, FER Zagreb, 1997.
- [9] Myszkowski, P.: *Comments on "A New and Simple Algorithm for Sliding Mode Trajectory Control of the Robot Arm"*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37 (1990), No. 7, p. 1088.
- [10] Perruquetti, W.; Barbot, J.P.: *Sliding Mode Control in Engineering*, Marcel Dekker Inc., 2002.
- [11] Schilling, R.J.: *Fundamentals of Robotics: Analysis and Control*, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- [12] Spooner, J.T.; Maggiore, M.; Ordonez, R.; Passino, K.M.: *Stable Adaptive Control and Estimation For Nonlinear Systems: Neural and Fuzzy Approximator Techniques*, John Wiley and Sons Inc., 2002.

Izvorni znanstveni rad

Original scientific paper

Adresa autora / Author's address:

Mr.sc. Vesna Krajčić, dipl. ing.

Izv. prof. dr. sc. Nino Stojković, dipl.ing.

Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet

Vukovarska 58

HR-51000 Rijeka, Hrvatska