

Osnovni koncepti automatike i mehatronike sa LEGO programabilnim robotom

MILAN S. MATIJEVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,

Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

VLADIMIR M. CVJETKOVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,

Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac

VOJISLAV Ž. FILIPOVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,

Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo, Kraljevo

NIKOLA D. JOVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,

Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Stručni rad

UDC: 007.52:681.5

LEGO Mindstorms NXT je našao primenu u inženjerskoj edukaciji vodećih inženjerskih škola poput RWTH Aachen University koji je kreator RWTH – Mindstorms NXT Toolbox-a za Matlab. Programski paket Matlab/Simulink je široko dostupan i popularan za studente širom sveta, ali softverski dodaci potrebni za rad sa sistemima u realnom vremenu su preskupi za univerzitete, posebno za one u zemljama u razvoju. U radu je opisan metodološki pristup nastavi koji se trenutno koristi za uvodne predmete u oblasti automatike i mehatronike na Univerzitetu u Kragujevcu i koji ne zahteva skupu softversku podršku. Opisan je i koncept organizacije eksperimenata putem Interneta, a što će biti realizovano u narednom periodu.

Ključne reči: Inženjersko obrazovanje, LEGO Mindstorms NXT, Python, modeliranje i identifikacija, PID upravljanje, unakrsno sprezanje/upravljanje, automatika i mehatronika

1. UVOD

LEGO programabilni robot - LEGO Mindstorms NXT - je već osam godina dostupan globalan proizvod firme LEGO koji je između ostalih namena, našao svoje mesto i kao nastavno sredstvo upotrebljivo na svim nivoima obrazovanja. Po maloprodajnoj ceni od 290 USD je dostupan na tržištu USA, a kod nas je skuplji. Iako relativno jeftin LEGO NXT nije standardno nastavno sredstvo na nižim nivoima obrazovanja kod nas. Dva su razloga: 1) materijalna strana nastavne podrške je već duži niz godina bolno pitanje, 2) nije razvijena metodologija takve nastavne podrške ni u pogledu obrazovanja đaka ni u pogledu obuke nastavnika, naspram sličnog, prisutnog u Sloveniji, na primer. Na univerzitetskom nivou, zahvaljujući pre svega raznim EU programima donatorske ili kreditne

pomoći Srbiji, bitno je popravljena materijalna baza nastave i istraživanja u poslednjih deset godina, tako da nam je delom omogućen transfer nastavne prakse svetskih univerziteta [1 - 5]. U ovom radu je opisan jedan aspekt primene LEGO Mindstorms NXT na Univerzitetu u Kragujevcu, sa mogućnošću slične primene i na drugim i institucijama i nivoima obrazovanja. Razvijena je baza tipičnih Python programa koji omogućavaju studentima relativno brz pristup eksperimentisanju na LEGO platformi i bez podrške komercijalnih softverskih alata. Napravljeni su i prvi eksperimenti putem Interneta sa LEGO Mindstorms NXT, poput u [6]. Usavršavanje takvog pristupa bi još više moglo da podigne dostupnost laboratorijskih resursa u nastavi na predmetima sa velikim brojem polaznika.

Rad se osim toga bavi i mapiranjem nastavne metodologije poznatih inženjerskih škola [7] na naše uslove i prirodu aktuelnih predmeta sa već definisanim akreditovanim sadržajima u našem sistemu obrazovanja. Ilustrativni scenario teorijskih koncepata je baziran na osnovnom kompletu LEGO Mindstorms NXT sa sensorima i aktuatorima (DC motori).

Adresa autora: Milan Matijević, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Kragujevac, Sestre Janić 6

Rad primljen: 27.05.2014.

Rad prihvaćen: 25.06.2014.

2. LEGO PROGRAMABILNI ROBOT

Osnovni LEGO Mindstorms NXT komplet koji se sastoji od programabilne jedinice, dva senzora za dodir, senzora za boju/količinu svetlosti, ultrazvučnog senzora rastojanja, tri DC motora sa integriranim enkoderom i reduktorom, prikazan je na slici 1.

Minikomputer ili programabilna jedinica (popularno zvana "brick" ili "cigla" [5]) se sastoji iz sledećih bitnih komponenti:

- glavni procesor radne frekvencije 48MHz, 32-bitni ARM mikrokontroler Atmel AT91SAM-7S256, fleš memorija 256KB, RAM memorija 64KB i USB interfejs;
- pomoćni procesor radne frekvencije 8MHz, 8-bitni Atmel AVR procesor ATmega48, fleš memorija 4KB i 512B RAM memorija;
- 4 analogna ulaza za senzore;
- 3 PWM izlaza za pobudu LEGO DC motora sa kanalom za čitanje enkodera integriranih u kućište LEGO DC motora;
- Bežični Bluetooth CSR BlueCoreTM 4 v2.0 +EDR sistem koji podržava serijski ulaz, 47KB RAM memorije, 8MB fleš memorije, radni takt 26MHz;
- USB 2.0 za razmenu podataka maksimalnom brzinom od 12 Mbit/s;
- LCD monohromatski displej rezolucije 100x64 piksela;
- Zvučnik 2-16KHz sa 8-bitnom rezolucijom;
- Napajanje, koje čini 6 AA baterija (9V).

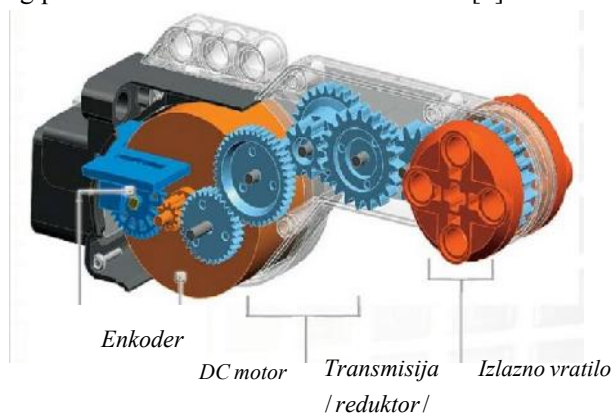


Slika 1 - LEGO Mindstorms NXT 8547 komplet: programabilna jedinica, tri DC motora sa integriranim enkoderima, dva senzora za dodir, sensor za boju ili količinu svetlosti, ultrazvučni sensor rastojanja.

Tri izlazna priključka, namenjena kontroli motora, su označena sa A, B i C, dok su ulazni priključci za senzore označeni sa 1, 2, 3 i 4. Izlazni i ulazni priključci su standardni sa 6-to žilnim kablovima.

Izlazi minikomputera se povezuju sa aktuatorom (slika 2, [8]), komercijalnog naziva "LEGO Mindstorms NXT Interactive Servo Motor (9842)". Zapravo se radi o integriranom proizvodu koji sadrži DC

motor, reduktor i inkrementalni enkoder rezolucije 1 stepen, a koji minikomputer može čitati putem ulaznog porta. Karakteristike motora su date u [8].



Slika 2 - LEGO DC motor sa integriranim enkoderom i reduktorom

Nominalne karakteristike LEGO DC motora su: napajanje 9 V, maksimalna ugaona brzina 177 min⁻¹, obrtni moment 16.7 Ncm, snaga 2.03 W, koeficijent korisnog dejstva 41 %.

Upravljačka promenljiva motora je PWM signal, kojim se, u opsegu od -100 do 100 %, utiče na smer rotacije motora i njegovu snagu. Ugaona brzina motora je direktno proporcionalna snazi, i obrnuto proporcionalna momentu opterećenja. Vrednost upravljačke promenljive se upisuje u registar dužine osam bita. Bit najveće težine čuva informaciju o znaku, a ostali bitovi čuvaju informaciju o apsolutnoj vrednosti upravljačke promenljive, odnosno, zadate snage motora. Maksimalna željena brzina motora robota odgovara upravljačkom signalu od 100% snage motora ili vrednosti 127 koja se upisuje u registar upravljačke promenljive.

Ultrazvučni senzor daljine se sastoji od mikrofona, zvučnika i mikroprocesora, i radi u opsegu rastojanja od 5 do 255 cm sa tačnošću od ±3 cm. Zahvaljujući sopstvenom mikroprocesoru, senzor izmerenu daljinu daje u centimetrima. Radi po principu sonara šaljući kratkotrajne signale od 40 KHz, i zatim meri vreme koje je potrebno da zvuk ode i odbije se od objekta.

Dalje izlaganje u ovom radu je zasnovano na gore pomenutim NXT komponentama, dok je u [9] dat pregled karakteristika i principa rada i drugih NXT senzora.

U [10, 11] je data šira ilustracija primene LEGO robota, i od osnovnoškolskog do visokoškolskog obrazovanja, i u različitim softverskim okruženjima. Sa NXT kompletom se dobija programska aplikacija sa grafičkim okruženjem prilagođenim za korisnike sta-

rije od 10 godina. Ipak, u obrazovne svrhe, pogotovo na višim nivoima obrazovanja, uputnije je koristiti softverske mogućnosti poput Matlab-a, LabVIEW-a, NXC-a, i slično. U skladu sa metodološkim pristupom primenjenim u [7], mi smo se opredelili za Python. Python je open-source objektno orijentisani programski jezik visokog nivoa i LEGO robot se putem Pythona može programirati na dva načina. Programski kod napisan u Pythonu se prevodi u NXC kod, kompajlira i snima u memoriju robota preko Bluetooth radija ili USB kabla. Na ovaj način, robot je po snimanju programa potpuno autonoman.

Drugi pristup je da se Python programski kod izvršava na personalnom računaru i da se izvršne naredbe šalju robotu putem USB kabla ili Bluetooth radija. Na ovaj način se koriste moćniji računarski resursi personalnog računara i sve prednosti objektno orijentisanog programiranja, ali je kretanje robota ograničeno dužinom USB kabla ili dometom Bluetooth radija.

Za razliku od Matlab/Simulink podrške koja pored osnovnih licenci zahteva još skuplje real-time module, korišćenje Pythona je besplatno, a sa stanovišta obrazovanja korisnije. Tamo gde veština programiranja ne treba da opterećuje izradu studentskog laboratorijskog zadatka, nastavno osoblje treba da obezbedi tzv. "skeletal code" po ugledu na [7]. Dopunom datog koda student brže rešava zadatak definisanog obrazovnog fokusa.

3. ILUSTRATIVNI REZULTATI

U sklopu predmeta Mehatronika [15], Senzori i aktuatori, Računarski podržano merenje i upravljanje [16], je na Univerzitetu u Kragujevcu razvijen set baznih eksperimentalnih zadataka za studente bez značajnog predznanja iz oblasti automatike i mehatronike. Eksperimentalnu platformu čini: PC računar sa Python programskim okruženjem, LEGO mikrokompjuter (programabilna jedinica, ili popularno minikompjuter), ultrazvučni senzor daljine i dva LEGO motora. Osnovni koncepti automatike i mehatronike sa LEGO programabilnim robotom su ilustrovani kroz sledeće faze:

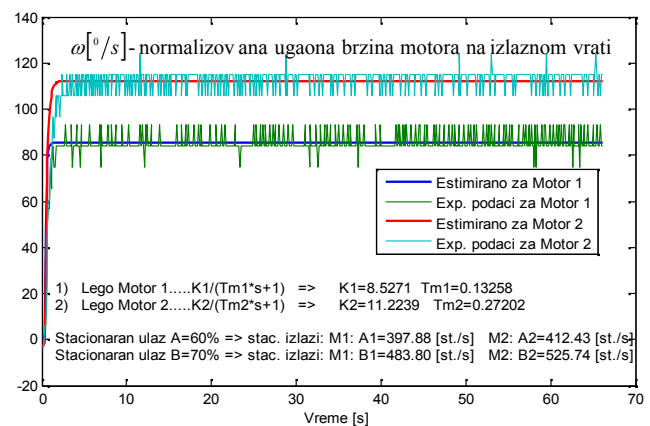
Određivanje dinamičkih karakteristika senzora

Snimaju se vremenski odziv senzora, zatim, komentarišu karakteristike senzora i izbor periode odabiranja. U datim eksperimentalnim uslovima student formira program koji u trenucima odabiranja kT ($k=1,2,\dots$) realizuje prekidnu rutinu u kojoj se čitaju vrednosti sa senzora i upisuju u fajl. Izvan prekidne rutine program nastavlja sa radom: čita vrednosti iz fajla i iscrtava vremenski dijagram odziva senzora.

Određivanje dinamičkih karakteristika motora

Minikompjuter istom odskočnom funkcijom istovremeno pobuđuje dva LEGO DC motora. Snimaju se odskočni odzivi i vrši identifikacija stacionarnih stanja pre i posle pobude, kao i parametarska identifikacija dinamičkog modela prelaznog procesa za oba motora, a za usvojenu strukturu modela prvog reda (dinamičkog ponašanja motora)

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K}{T_m s + 1} \quad (1)$$



Slika 3 - Normalizovani dinamički odzivi LEGO DC motora za ulaznu PWM odskočnu pobudu $u(kT) = 60 + 10h(kT - 100T)$ [%].

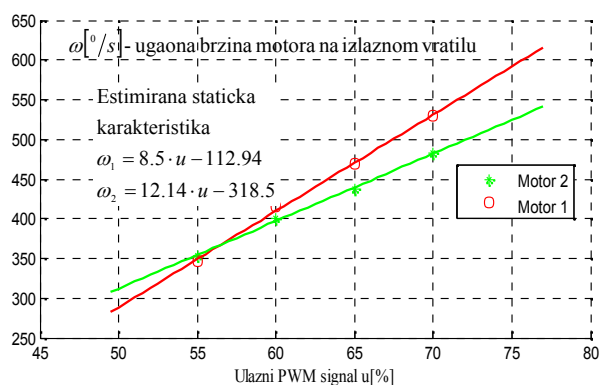
Primer eksperimentalnog rezultata je dat na slici 3, a normalizovana ugaona brzina znači stvarnu ugaonu brzinu umanjenu za njenu stacionarnu vrednost ugaone brzine neposredno pre odskočne pobude.

U konkretnom slučaju rezultata sa slike 3, očigledna je razlika u odzivima na istu pobudu dva nominalno ista LEGO DC motora. Mogućnost takve pojave zaslužuje posebnu diskusiju sa studentima.

Određivanje statičkih karakteristika motora

Prethodni eksperimentalni zadatak se ponavlja sa ciljem određivanja i crtanja statičke karakteristike, ali i određivanja nominalnog dinamičkog modela LEGO DC motora (ili više njih!) koji će kasnije biti korišćeni za projektovanje kontrolera brzinskog i pozicionog servomehanizma sa LEGO DC motorom u ulozu izvršnog organa.

Snimaju se odzivi i na uzlazne i na silazne odskočne pobude ulaznog signala iz celog opsega vrednosti ulaznog signala [-100%, 100%] a sa amplitudom skoka do 5%. Kako bi se smanjilo vreme trajanja ovako zamišljenog eksperimenta, isti se, u obrazovne svrhe, može sprovesti i na užem ulaznom opsegu.



Slika 4 - Statička karakteristika LEGO DC motora estimirana nad snimljenim tačkama statičke karakteristike u opsegu [55%, 70%] ulaznog signala

Na osnovu serije eksperimenata računaju se parametri modela (1) i za jedan i za drugi LEGO motor, i u konkretnom slučaju koji ilustruje slika 4, napravljeno je 8 eksperimentalnih proba gde je parametarska identifikacija metodom najmanjih kvadrata dala parametre modela (1) motora 1 i 2 u opsezima

$$K_1=[6.9, 9.9], K_2=[10.5, 14.7], T_{m1}=[0.023, 0.13], T_{m2}=[0.07, 0.27],$$

i srednjim vrednostima

$$\begin{aligned} K_1 &= 8.5, \\ K_2 &= 11.7, \\ T_{m1} &= 0.07, \\ T_{m2} &= 0.15. \end{aligned}$$

Ipak, iz linearizovane statičke karakteristike na posmatranom opsegu (slika 4) biramo pojačanja $K_1=8.5$, $K_2=12.14$ u nominalnom dinamičkom modelu motora 1 i 2

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{\omega_1(s)}{U(s)} = \frac{8.5}{0.11s + 1}, \\ G_2(s) &= \frac{\omega_2(s)}{U(s)} = \frac{12.14}{0.11s + 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

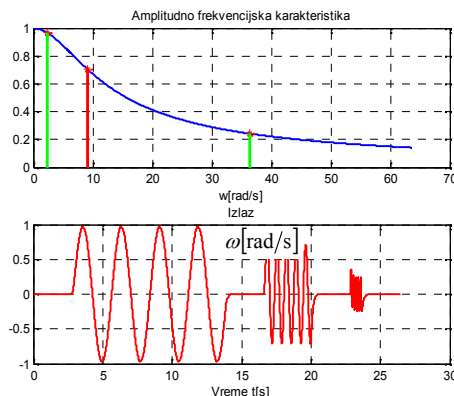
Vremenske konstante T_{m1} i T_{m2} su iz identifikovanih opsega izabrane tako da su jednake periodi odabiranja u konkretnom slučaju.

Ilustracija frekvencijskih karakteristika motora

Za identifikovani dinamički model, računa se granica trodecibelskog propusnog opsega ω_o i sprovede se simulacije poput pokazanih na slici 5.

Zatim se vrši eksperimentalna verifikacija dobijenih rezultata simulacije. Pri tome, amplituda ulaznog signala treba da bude prilagođena statičkoj karakteristici (da se ne izađe iz linearnog okruženja izabrane radne tačke oko koje se sprovodi eksperiment).

Prikazati ulazni i izlazni signal, amplitudno-fazno-frekvencijsku karakteristiku. Komentarisati vezu vremenskog i frekvencijskog domena, frekvencijsku propusnost, selektivnost, eksperimentalnu verifikaciju.



Slika 5 - Ilustracija frekvencijskih karakteristika LEGO DC motora. Dole: vremenski odziv na $1 \cdot \sin(\omega t)$, za $\omega = \omega_o/4$, ω_o , $4 \cdot \omega_o$. Gore: AF karakteristika sa posebno označenim $\omega = \omega_o/4$, ω_o , $4 \cdot \omega_o$ (ω_o – granica trodecibelskog propusnog opsega)

Sinteza PI regulatora brzinskog servomehanizma

Realizuje se sinteza PI kontrolera brzinskog servomehanizma sa identifikovanim LEGO DC motorima tako da funkcija prenosa sistema u zatvorenoj povratnoj sprezi bude

$$G_{de}(s) = 1/(2 \cdot \max(T_{m1}, T_{m2}) \cdot s + 1).$$

Pošto su dinamički modeli (2) u okolini izabrane radne tačke različiti u našem slučaju, to će se razlikovati i PI kontroleri

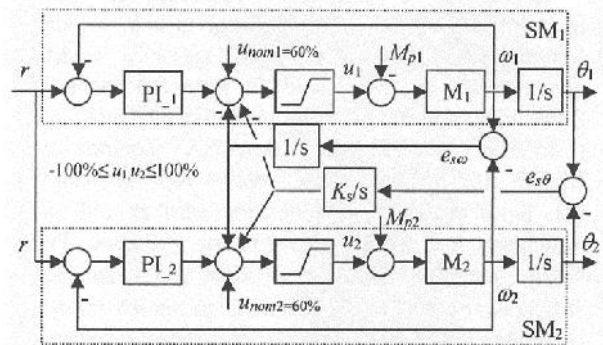
$$\begin{aligned} G_{c1}(s) &= T_{m1}/(2 \cdot K_1 \max(T_{m1}, T_{m2})) + 1/(2 \cdot K_1 \max(T_{m1}, T_{m2}) \cdot s), \\ G_{c2}(s) &= T_{m2}/(2 \cdot K_2 \max(T_{m1}, T_{m2})) + 1/(2 \cdot K_2 \max(T_{m1}, T_{m2}) \cdot s). \end{aligned} \quad (3)$$

Eksperimentalna ilustracija se sastoji u snimanju odziva oba (servo)motora za istu odskočnu funkciju referentne vrednosti u okolini radne tačke. U našem slučaju takav ulaz sistema sa zatvorenim povratnom spregom može biti: $r(kT) = 400 + 50h(kT - 100)$. Snimaju se ugaone brzine motora i računa njihova međusobna razlika, tj. greška sinhronizacije. Eksperiment se ponavlja za slučaj kada se 1) uvodi poremećaj na jedan od motora (usporava se ili zaustavlja rukom izlazna osovinu), 2) kontroler svede na P kontroler $G_{c1}(s) = K_{p1}$. Komentariše se greška stacionarnog stanja, kvalitet prelaznog procesa i greška sinhronizacije u navedenim slučajevima.

Unakrsno sprezanje brzinskih servomehanizma

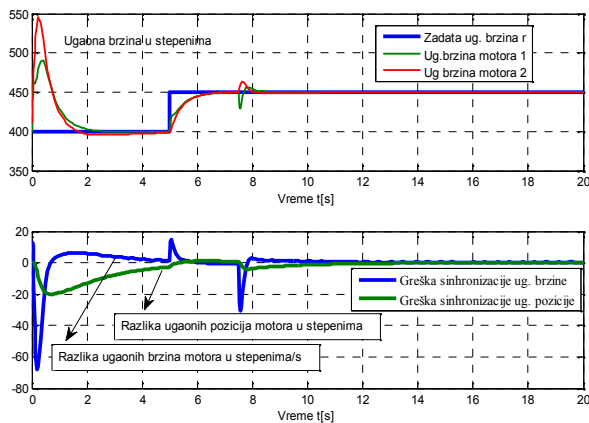
Radi minimizacije grešaka sinhronizacije rada dva motora i po brzini ($e_{s\omega}$) i po poziciji ($e_{s\theta}$), potrebno je primeniti strukturu sa unakrsnim sprezanja sa dva

motora, kako je to prikazano na slici 6. Kao i u prethodnom slučaju, oba servomotora se pobuđuju sa $r(kT) = 400 + 50h(kT - 100)$. Konstanta K_s na slici 6 ima vrednost 0.5 (menjati od 0 do 1). Snimaju se na istim dijagramima referentna vrednost r i ugaone brzine ω_1 i ω_2 . Prate se i greške sinhronizacije u 1) nominalnom slučaju, 2) pri degradaciji PI kontrolera prvog servomotora na P kontroler, 3) u slučaju dejstva poremećaja (rukom se može zaustaviti jedan motor i videti da li će se i drugi zaustaviti).



Slika 6 - Struktura sistema sa unakrsnim sprežanjem prethodno podešenih servomotora SM₁ i SM₂ u okolini radne tačke ($u_{nom}=60\%$). M_{p1} i M_{p2} su efekti poremećajnih (spoljnih) momenata na upravljačku promenljivu.

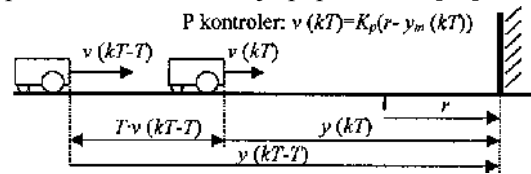
Na ovaj način, robot koji se pogoni sa dva LEGO DC motora, čiji se parametri mogu i razlikovati i menjati tokom vremena, i na koje mogu delovati različiti poremećaji, ostvaruje pravolinijsko kretanje sa zadatom brzinom (proporcionalno r).



Slika 7 - Simulacija rada sistema sa slika 6. Pokazan i efekat poremećaja tipa početnih uslova i efekat $M_{p1}=M_{p2}=5 \cdot h(t-7.5)$. Parametri objekata M_1 i M_2 su različiti: $K_1=8.5$, $K_2=12.4$, $T_{m1}=0.0292$, $T_{m2}=0.2752$. PI parametri (3) nisu menjani sem što je drugi PI regulator (PI_2) sveden na P regulator (I dejstvo isključeno), radi demonstracije kvaliteta sprežanja i robustnosti.

P kontroler za kretanje mobilnog robota na konstantnom rastojanju od prepreke

Koncept eksperimenta je preuzet iz [7], njegova demonstracija je data u [12], definicija ilustrovana na slici 8, a za razliku od prethodnih eksperimentalnih primera, gde su motori Lego robota bili neopterećeni i ne u funkciji kretanja robota, sada motori robota, koji se oslanja i na treći pomoćni točak, treba da pozicioniraju robot na zadatu udaljenost od zida. Za merenje udaljenosti od prepreke (zida) ispred koristi se ultrazvučni senzor daljine. Usvojiti da je upravljačka promenljiva translatorska brzina robota (koju robot realizuje strukturom na slici 6). Upravljačku promenljivu (zadatu brzinu translatorskog kretanja robota) generiše P kontroler na osnovu zadatog (r) i ostvarenog (y) rastojanja od zida. Signal ostvarenog rastojanja kontroler dobija od senzora, i to je signal izmerenog rastojanja (y_m). U idealnom slučaju $y_m=y$. Student treba da diskutuje izbor pojačanja P regulatora K_p i izvrši eksperimentalnu verifikaciju poput date u [12].



Slika 8 - Ilustracija postavke i ciljeva sedmog eksperimentalnog zadatka: Pozicioniranje robota na zadato rastojanje od zida. Upravlja se brzinom robota koja je proporcionalna rastojanju od zadatog cilja.

Zadatak rešavati naspram sledećih pretpostavki: 1) idealan slučaj dinamike senzora ($y_m=y$) i pogona robota (brzina v se može realizovati bez greške i bez kašnjenja); 2) dinamiku senzora aproksimirati kašnjenjem za jednu periodu odabiranja

$$y_m(kT) = q^{-1}y(kT) = y(kT - T). \tag{4}$$

Na osnovu slike 8 i navedenih pretpostavki računaju se funkcije prenosa u operatorskoj formi za oba slučaja:

$$y_m(kT) \equiv y(kT) \Rightarrow \frac{y(kT)}{r(kT)} = \frac{-TK_p q^{-1}}{1 - (1 + TK_p)q^{-1}}. \tag{5}$$

$$y_m(kT) \equiv q^{-1}y(kT) \Rightarrow \frac{y(kT)}{r(kT)} = \frac{-TK_p q^{-1}}{1 - q^{-1} - TK_p q^{-2}}. \tag{6}$$

a zatim, prihvatajući smenu operatora kašnjenja q^{-1} za z^{-1} gde je z kompleksna promenljiva, dobijamo karakteristične jednačine sistema sa zatvorenom povratnom spregom

$$y_m(kT) \equiv y(kT) \Rightarrow F(z) = z - (1 + TK_p) = 0. \tag{7}$$

$$y_m(kT) \equiv q^{-1}y(kT) \Rightarrow F(z) = z^2 - z - TK_p = 0. \tag{8}$$

odakle se analiziraju polovi sistema u zavisnosti od pojačanja P regulatora. Metodologija u [7] ne traži prethodno poznavanje z-transformacije i bazira se na diskretnom modeliranju i definisanju uticaja polova sistema bazirano na vremenskom domenu i analizi da li će odziv sistema divergirati (sistem je nestabilan) ili konvergirati (stabilan) i kako (aperiodski ili oscilatorno). Uvođenje kompleksne promenljive z je dato kao alat za brže izračunavanje polova, i to u slučaju (7), pola $1 + TK_p$, a u slučaju (8), polova

$$0.5 \pm 0.5\sqrt{1 + 4K_p T}. \quad (9)$$

Odavde je, za slučaj (7), uslov stabilnosti dat relacijom

$$-2/T < K_p < 0. \quad (10)$$

a uslov da odziv bude stabilan i neoscilatoran je sledeći

$$-1/T < K_p < 0. \quad (11)$$

Za slučaj (8), za $K_p = -1/(4T)$ sistem ima dva jednaka i realna pola u 0.5, i na taj način se postiže najbrži mogući neoscilatorni odziv. Za vrednosti

$$-1/(4T) \leq K_p < 0. \quad (12)$$

sistem je stabilan a odziv aperiodski, dok je za

$$-1/T < K_p < -1/(4T). \quad (13)$$

sistem stabilan ali sa oscilatornim odzivom. Za pojačanja koja ne zadovoljavaju (12) i (13) sistem je nestabilan.

U skladu sa navedenom analizom student bira pojačanja P regulatora, a u eksperimentalnoj verifikaciji rezultata vrednuje uticaj učinjenih uprošćenja, odnosno pretpostavki i svesno napravljenih grešaka modeliranja.

Peti i šesti eksperimentalni zadatak se ne bave sintezom regulatora, već strukturom i svrhom sistema sa zatvorenom povratnom spregom, kao i svrhom i mogućnostima određenih tipova upravljačkih koncepata. Sedmi zadatak se bavi sintezom P regulatora, ali i povezuje važne inženjerske koncepte kao što su modularnost, apstrakcija, izračunavanja - čija validnost je uvek ograničena kvalitetom polaznih pretpostavki pri postavljanju inženjerskog problema.

Poseban aspekt koji može biti komentarisano u sedmom eksperimentalnom zadatku jeste i projektovanje šasije LEGO robota, uticaj pozicije težišta i trećeg (pomoćnog, slobodnog) točka na kretanje robota, odnosno na formiranje poremećajnih momenata M_{p1} i M_{p2} (slika 6), raspodelu opterećenja, mogućnost proklizavanja pogonskih točkova i slično. Eksperi-

mentalni zadatak 7 se može realizovati na horizontalnoj i kosoj podlozi.

4. SOFTVERSKI ASPEKTI I MOGUĆNOSTI EKSPERIMENTISANJA PUTEM INTERNETA

Univerzitet u Kragujevcu raspolaže sa vrlo ograničenim brojem licenci programskog paketa Matlab. Recimo, Fakultet inženjerskih nauka poseduje ukupno 50 plivajućih licenci Matlaba i Simulinka za nastavne svrhe (bez dodatnih modula, tj. toolbox-ova). Iako Mindstorms NXT Toolbox za Matlab RWTH Aachen University daje besplatno [2], potrebni dodaci Matlab/Simulinka za rad sa sistemima u realnom vremenu su preskupi. Po ugledu na [7], izabran je Python kao besplatno softversko okruženje u kome se mogu realizovati svi prethodno navedeni eksperimentalni zadaci u celosti. Sem što je ovakav pristup jeftiniji, on je i korisniji za obrazovanje inženjera.

Za brzo i efikasno uvođenje studenata u programski jezik Python, osmišljeno je softversko rešenje tutor sistema za učenje [13], po ugledu na slično u [7], i sa gotovo istim primerima i metodologijom kao u [7]. Za razliku od [7], gde se za objašnjavanje predmetnih inženjerskih koncepata koristi mobilna robotika kao ilustracioni scenario sa Pioneer 3DX robotima, naša namera je da korišćenjem Python programskog okruženje isto može biti postignuto na više od 10 puta jeftinijoj LEGO NXT robotskoj platformi.

Jedan od veoma važnih razloga za izbor programskog jezika Python je veliki broj postojećih razvijenih modula sa bibliotekama klasa i funkcija za najraznovrsnije primene koji se mogu slobodno koristiti. Za LEGO Mindstorms NXT je razvijen NXT-Python paket [14] koji predstavlja driver i programski interfejs za rad sa ovim robotom. Uz ovaj paket su potrebni još i neki dodatni moduli koji omogućavaju kontrolu robota preko USB porta i Bluetooth radija iz Python programa. Programski jezik Python može da se koristi na različitim softversko hardverskim platformama što značajno proširuje mogućnosti primene za implementaciju obrazovnih projekata baziranih na LEGO robotima i Python - u. NXT-Python je uspešno testiran sa različitim verzijama Windows operativnog Sistema - XP, 7, 8, 8.1, kao i u Linux okruženju. Posebno je interesantna mogućnost rada na popularnom Raspbery Pi - u [http://www.raspberrypi.org/] koji predstavlja izuzetno jeftin računar veličine kreditne kartice koji radi u nekoj od verzija Linux operativnog sistema: Raspian (prilagođena verzija Debian distribucije), Pidora (prilagođena verzija distribucije Fedora) i druge.

Raspbery Pi je utoliko interesantniji, jer je pre svega namenski razvijen za obrazovne svrhe, i za koji je razvijen veliki broj programskih paketa koji

omogućavaju brojne primene i povezivanje sa raznim uređajima i senzorima.



Slika 9 - Osnovni koncept LEGO Web Lab – a na Univerzitetu u Kragujevcu

Razvijena baza osnovnih Python programa za učenje i rad sa LEGO NXT na Univerzitetu u Kragujevcu namenjena je za korišćenje u laboratorijskim uslovima. Radi boljeg iskorišćenja postojećih laboratorijskih LEGO NXT resursa, pokrenut je razvoj za daljinski pristup LEGO aparaturi koji treba da omogućiti da studenti preko web – a kontrolišu robote, kao i da testiraju svoja programska rešenja postavljenih eksperimentalnih zadataka.

Python se na različite načine može koristiti preko web – a, iz browser – a korisnika. Na slici 9 prikazan je osnovni koncept LEGO web laboratorije koja se koristi za udaljeni pristup i kontrolu robota.

Udaljeni korisnik – student, preko mreže, koristeći bilo koji savremeni web browser prijavljuje se administratorskom sistemu web server–a gde su definisana njegova prava pristupa i korišćenje LEGO web robota. Python programi koji kontrolišu robote se izvršavaju na web serveru koji se nalazi u laboratoriji i na koji su priključeni LEGO roboti preko USB kabla ili Bluetooth radija. Prijavljeni student može da uploaduje svoj fajl sa Python programom koji kontrolišu LEGO robota i da na taj način testira svoj program. Sesija udaljenog korisnika je implementirana preko AJAX–a čime se omogućava slanje podataka sa web strane upload–ovanom Python programu. Rezultat rada programa se može pratiti preko podataka koje Python program generiše i vraća preko web servera. Web kamera povezana na server omogućava eventualno vizuelno praćenje pomeranja robota.

Osim slanja rezultata rada programa u vidu numeričkih vrednosti i posmatranja kretanja preko web kamere, na web stranici se može adekvatnom animacijom korišćenjem HTMLa, CSSa i JavaScripta predstaviti efekat upravljanja robotom, ili samo njegovim motorima, bez potrebe za instalacijom dodatnih plug–in–ova za prikaz u korišćenom web browser–u. Prikazana osnovna koncepcija na slici 9 je

nezavisna od operativnog sistema kao i hardverske platforme. Može se koristiti web server (Microsoft IIS, Apache...) na klasičnom PC računaru, ali i web server (LightTPD,...) na sasvim skromnoj hardverskoj platformi kao što je Raspberry Pi.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisan jedan aspekt primene LEGO Mindstorms NXT na Univerzitetu u Kragujevcu.

Sistem razvijenih eksperimentalnih zadataka na relativno jeftinoj laboratorijskoj platformi LEGO Mindstorms NXT je ilustrativni scenario za razumevanje apstraktnih teorijskih koncepata u oblasti automatike, mehatronike i inženjerstva, generalno.

Studenti se upoznaju sa principima modeliranja i identifikacije, principima rada sistema u otvorenoj i zatvorenoj povratnoj sprezi, fenomenom programiranja u realnom vremenu, filtarskim osobinama sistema, fenomenima koji su realno prisutni pri integraciji mehatroničkog proizvoda i uticaju softverskog rešenja na kvalitet njegovog funkcionisanja. U osmišljenom laboratorijskom orkuženju student lakše uočava i povezuje važne inženjerske koncepte poput modularnosti, apstrakcije, računskih aspekata, i jasnije uočava prednosti i ograničenja postavljenih polaznih pretpostavki u rešavanju inženjerskog problema.

Razvijena je baza tipičnih Python programa koji omogućavaju studentima relativno brz pristup eksperimentisanju na LEGO platformi i bez podrške komercijalnih softverskih alata.

Napravljeni su i prvi eksperimenti putem Interneta. Usavršavanje takvog pristupa bi još više moglo da podigne dostupnost laboratorijske podrške u nastavi na predmetima sa velikim brojem polaznika.

LITERATURA

- [1] Rising, James. SP.293 Lego Robotics, Spring 2007. (MIT OpenCourseWare: Massachusetts Institute of Technology), <http://ocw.mit.edu/courses/special-programs/sp-293-lego-robotics-spring-2007>
- [2] A. Behrens, L. Atorf, R. Schwann, B. Neumann, R. Schnitzler, J. Ballé, T. Herold, A. Telle, T.G. Noll, K. Hameyer and T. Aach, "MATLAB Meets LEGO Mindstorms - A Freshman Introduction Course Into Practical Engineering" IEEE Transactions on Education, vol. 53, no. 2, pp.306–317 2010. <http://mindstorms.lfb.rwth-aachen.de/>
- [3] Massachusetts Institute of Technology, MIT 6.270 Course: Autonomous Robotics Competition, <http://scripts.mit.edu/~6.270/>, Lecture Notes 2010-2014: <http://scripts.mit.edu/~6.270/contestants/>, 2014.

- [4] B. H. Ferri, S. Ahmed, J. E. Michaels, E. Dean, C. Garyet, S. Shearman, "Signal processing experiments with the LEGO MINDSTORMS NXT kit for use in signals and systems courses", in Proc. American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, pp. 3787-3792, June 10-12, 2009.
- [5] Y. Kim, "Control systems Lab using a LEGO Mindstorms NXT Motor System," IEEE Trans. on Education, vol. 54, No 3, pp. 452-461, August 2011.
- [6] G. Sziebig, B. Takarics, P. Korondi, "Control of embedded systems via Internet," IEEE Trans. on Education, vol. 57, No 10, pp. 3324-3333, 2010.
- [7] K. Leslie, J. White, H. Abelson, D. Freeman, T. Lozano-Pérez, and I. Chuang. 6.01SC Introduction to Electrical Engineering and Computer Science I, Spring 2011. (MIT OpenCourseWare; Massachusetts Institute of Technology), <http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-01sc-introduction-to-electrical-engineering-and-computer-science-i-spring-2011>
- [8] R. Watanable, NXT Motor Internals: NXT Characteristics: <http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm>, 2007.
- [9] M. L. Gasperi, P. Hurbain, Extreme NXT: Extending the LEGO Mindstorms NXT to the Next Level, second edition, Springer Verlag, New York, 2009.
- [10] Državno đlačko i studentsko takmićenje u konstrukciji i programiranju mobilnih robota: <http://www.ro.feri.uni-mb.si/tekma/>, Univerzitet u Mariboru, 2014.
- [11] Bonnie Heck, LEGO NXT Experiments for Signals and Systems: http://users.ece.gatech.edu/~bonnie/book3/LEGO_Experiments.html, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2014.
- [12] Demonstracija efekata projekta 144856-TEMPUS-2008-RS-JPGR na nastavni proces <https://www.youtube.com/watch?v=cBVfc3Gwv1Y>, Univerzitet u Kragujevcu, 2012.
- [13] M. Matijević, V. Joković, Uvod u objektno orjentisano programiranje – Elektronska zbirka zadataka sa softverskim rešenjem interaktivnog sistema testiranja podrške ućenju, CD izdanje projekta 144856-TEMPUS-2008-RS-JPGR, FIN Univerzitet u Kragujevcu, 2013: <http://cpa.fin.kg.ac.rs:30/Home/EPublishing?Length=4>
- [14] NXT-Python paket: <https://code.google.com/p/nxt-python/>, 2012.
- [15] M. Matijević, A. Stanojević, M. Vasković, N. Jović, Moodle portal nastavnog predmeta Mehatronika <http://moodle.mfkg.rs/course/view.php?id=236>, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, 2014.
- [16] M. Matijević, G. Jakupović, J. Car, Računarski podržano merenje i upravljanje, Univerzitet u Kragujevcu, 2008.

SUMMARY

BASIC CONCEPTS OF AUTOMATION AND MECHATRONICS WITH LEGO MINDSTORMS NXT

Mindstorms LEGO NXT is using in engineering education at well recognized engineering schools like RWTH Aachen University where is created the RWTH - Mindstorms NXT Toolbox for Matlab. MATLAB / Simulink is widely available and popular for students around the world, but software toolboxes which are required for work with the real time systems are too expensive for the universities, especially those in developing countries. This paper describes an approach that is currently used in introductory subjects in the field of automation and mechatronics at the University of Kragujevac, and that does not require expensive software support.

Key words: *Engineering education, LEGO Mindstorms NXT, Python, Modeling and identification, PID control, cross coupling control, Automation and mechatronics*