

LASLO JUHAS<sup>1</sup>  
SINIŠA MARKOV<sup>1</sup>  
LASLO NAĐ<sup>2</sup>  
BRANISLAV BOROVIĆ<sup>2</sup>  
ALEKSANDAR VUJANIĆ<sup>3</sup>  
NAĐA ADAMOVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tehnološki fakultet,  
Novi Sad

<sup>2</sup>Fakultet tehničkih nauka,  
Novi Sad

<sup>3</sup>Institut Für Feinwerktechnik,  
Vienna

NAUČNI RAD

621.875.4:62.229.3/.31:66.093

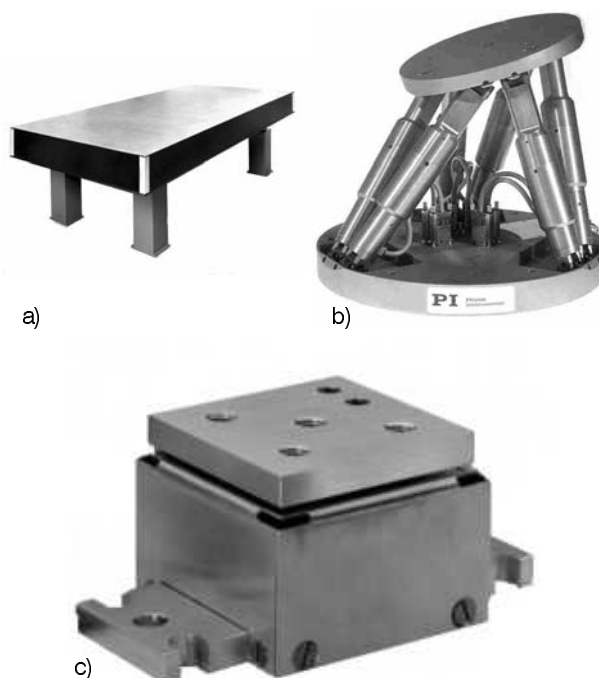
## POKRETNIA PLATFORMA ZA MIKROPOZICIONIRANJE UZORAKA

*U radu je prikazana nova vrsta pokretne platforme za mikropozicioniranje pokretana piezo nožicama. Kao nožice upotrebljene su piezo-cevčice. Kretanje platforme je omogućeno sporim savijanjem i brzim ispravljanjem nožica. Prilikom brzog ispravljanja nožice proklizavaju na podlozi i telo platforme se pomera. Kontinualno kretanje platforme se realizuje ponavljanjem ove procedure. Izvršena su merenja pomeranja piezo-nožica i realizovan je prototip platforme. Kompletna upravljačka elektronika sa mikrokontrolerom je ugrađena na platformu, i omogućeno je translatorno kretanje platforme u bilo kom smeru sa podešljivom veličinom koraka. Podržana je i rotacija oko centra platforme. Elektronika platforme je povezana sa PC računarom i korisnik može da upravlja kretanjem uz pomoć analogne upravljačke palice ili preko tastature. Praktično realizovana platforma se može koristiti na dva načina i može imati primenu između ostalog, pri pozicioniranju objekata ispod mikroskopa, manipulaciji uzoraka (npr. živih ćelija), montaži minijaturnih mehaničkih sklopova i mikroskopskom skeniranju. Ispitivanja performansi realizovane platforme su dala veoma dobre rezultate.*

Nagliim razvojem tehnologije i bioloških nauka (npr. mikrobiologija, patologija) pitanje vrlo preciznog pozicioniranja uzoraka ili manipulatora je sve važnije. Sve češće se pojavljuje potreba i za odgovarajućim platformama koje bi bile u stanju da omoguće adekvatno pozicioniranje za manipulisanje ćelijama.

Piezoaktuatori su se pokazali vrlo pogodnim za realizaciju ovakvih sistema. Najpre su se pojavile statičke platforme za mikropozicioniranje. Statičke platforme su pričvršćene za podlogu i koriste efekat promene dimenzija piezoaktuatora prilikom promene upravljačkog napona. Neke od realizacija platformi ovog tipa, koje omogućavaju 2D ili 3D pozicioniranje objekta, su prikazane su u [1–3]. U radu [4] su kombinovane dve ovakve platforme da bi se omogućilo i hvatanje mikro-objekata. Danas su sistemi bazirani na ovakvim platformama i komercijalno dostupni (Sl. 1a,b,c) [5–7]. Oni omogućavaju vrlo dobru tačnost i ponovljivost pozicioniranja. Međutim, obzirom da je jedan kraj aktuatora fiksiran na podlogu, najveća mana ovakvih rešenja ja da je radna oblast sistema ograničena maksimalnom promenom dimenzija aktuatora. Korišćenjem kaskadno spojenih aktuatora ("stacked design") se ovaj nedostatak može ublažiti jer se radna oblast može povećati nekoliko puta, ali i dalje ostaje, u apsolutnom iznosu, veoma ograničena. To implicira potrebu da se inicijalno pozicioniranje radnog predmeta, pri njegovom postavljanju na platformu, ostvari sa veoma velikom tačnošću. Prema tome, jasno je da bi veća radna oblast bila veoma korisna.

Vrlo velika, teorijski beskonačna, radna oblast se može postići ako se platforma slobodno može kretati po podlozi. Nekoliko vrsta ovakvih platformi je u fazi razvoja. U [8] je prikazana ideja sistema koji bi koristeći harmonijske oscilacije pomerao objekat u obliku glatke ploče po podlozi sa trenjem. Dati su i rezultati računar-



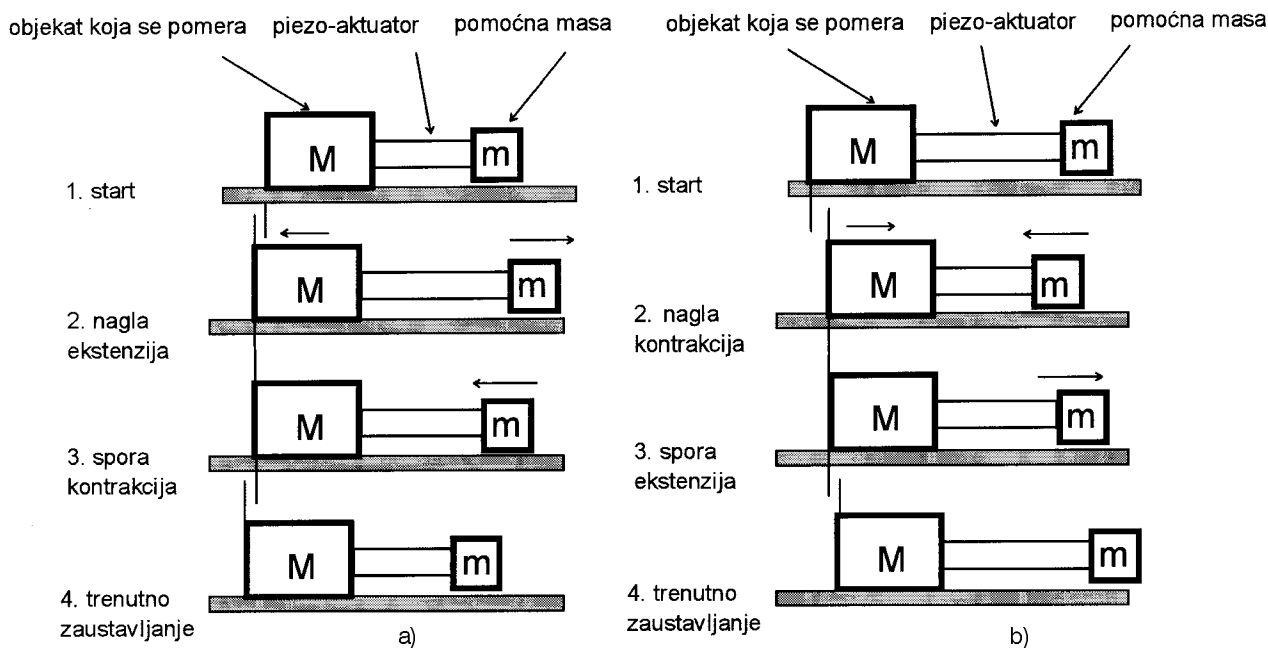
Slika 1. Komercijalno dostupne platforme za mikropozicioniranje [5]  
Figure 1. Commercially available static micropositioning-systems [5]

skih simulacija i proračuna trajektorije kretanja aktuatora i brzine pomeranja ploče. Međutim, pored složenosti upravljanjem aktuatora jer je za određivanje trajektorije kretanja kraja aktuatora neophodno korišćenje i rešavanje složenih nelinearnih funkcija, pojavljuje se i pitanje nosivosti ovakvog sistema. U radovima [9–12] je prikazana drugačija platforma, koja se kreće metodom "recoil of an ejected mass". Princip rada ove platforme, šematski prikazan na Sl. 2, će biti detaljnije opisan jer je veoma interesantan obzirom na način realizacije kretanja naše platforme. Sistem se sastoji od tri glavna dela: samog tela platforme mase  $M$ , piezo-aktuatora, i pomoćne mase  $m$ . Pokretanje se zasniva na naizmeničnoj nagloj i sporij promeni dužine aktuatora koji je pričvršćen s je-

Adresa autora: L. Juhas, Tehnološki Fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Bulevar Cara Lazara 1/A, 21000 Novi Sad, Jugoslavija

Rad primljen: Juli 28, 1999

Rad prihvaćen: Maj 22, 2000



Slika 2. Šematski prikaz i osnovni princip rada sistema prikazanog u [9–12]: a) pomeranje u levo, b) pomeranje u desno  
 Figure 2. Phases of motion of the platform actuated by the method of "recoil of an ejected mass" [9–12]: a) motion to the left, b) motion to the right

dnim krajem na telo platforme a drugim za pomoćni teg. Pri tome, telo platforme se oslanja na podlogu, a pored njega, malo iznad podloge je pomoćni teg. Pokretanje platforme se vrši na sledeći način: prilikom pomeranja u levo prvo dolazi do naglog izduženja aktuatora. Tada, shodno zakonu o očuvanju centra mase, i telo platforme i pomoćni teg će se pomeriti, i dolazi do proklizavanja platforme po podlozi u suprotnom smeru. Sledi spora kontrakcija aktuatora kada, zbog delovanja frikciione sile na telo platforme ona ostaje nepokretna, a zatim, prilikom naglog zaustavljanja pomoćne mase, ponovo dolazi do pomeranja tela platforme. Kretanje u desnom smeru se odvija analogno, samo je tada kontrakcija aktuatora nagla a izduženje sporo.

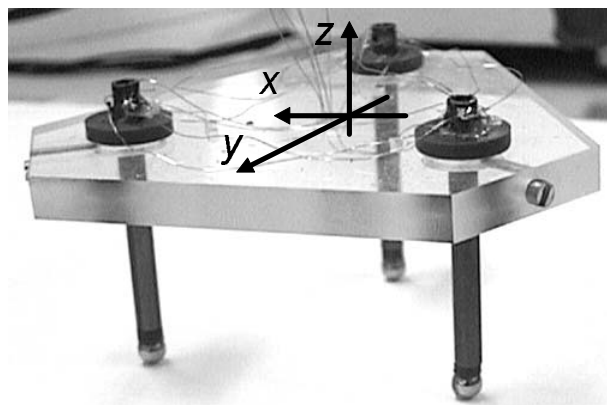
Iako je iz ovih radova jasno da su izvršeni brojni eksperimenti, autori nisu dotakli neke praktične probleme, kao što su npr. problem žičane veze platforme sa vanjskim svetom, i složenost realizacije upravljačke elektronike. Obzirom, da su kod ovog sistema za dobijanje odgovarajućih električnih signala korišćeni visokonaponski pojačavači [13], sistem koji omogućava ravansko kretanje sa tri stepeni slobode je vrlo složen jer je za svaku elektrodu svakog aktuatora potreban poseban visokonaponski pojačavač i posebna žičana veza. Eksperimentalna testiranja mogućih primena pomenutog sistema su date u radovima [14–16].

U ovom radu je prikazana platforma za mikropozicioniranje razvijena, praktično realizovana i eksperimentalno ispitivana na Fakultetu Tehničkih Nauka Univerziteta u Novom Sadu. Platforma se može kretati po podlozi bez ograničenja. Jedini limit predstavlja dužina kablova kojima je platforma spojena sa napajanjem.

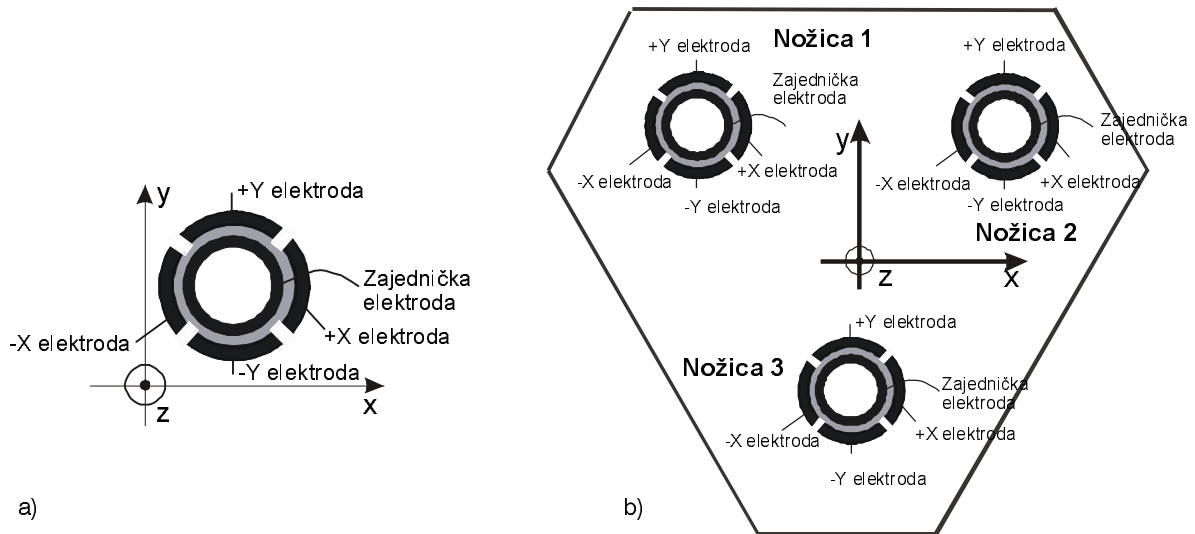
Elektronska kola potrebna za generisanje odgovarajućih naponskih signala za upravljanje piezoaktuatorima su tako konstruisana da budu što jednostavnija. Time je omogućeno smeštanje kompletne elektronike i mikrokontrolera za upravljanje kretanjem na samu platformu. S obzirom da je mikrokontroler u stanju da realizuje sve operacije neophodne za realizaciju kretanja, komunikacija sa glavnim računarnom koja se odvija preko standardnog RS-232 interfejsa sastoji se samo od informacije o pravcu, smeru i amplitudi sledećeg koraka.

#### KONSTRUKCIJA I PRINCIP RADA PLATFORME

Platforma se sastoji od ploče oslonjene na tri nožice (Sl. 3). Na platformi je montirana i elektronika za realizaciju kretanja ali na Sl. 3., zbog jasnoće, ona nije



Slika 3. Fotografija platforme sa ubeleženim koordinatnim osama  
 Figure 3. Photograph of the initial prototype of the platform with piezo legs



Slika 4. Šematski prikaz a) rasporeda elektroda na piezo-čevčici i b) prikaz orijentacije nožica u odnosu na platformu  
 Figure 4. Schematic top view of a) the electrode disposition of the legs and b) the arrangement and connection of the electrodes

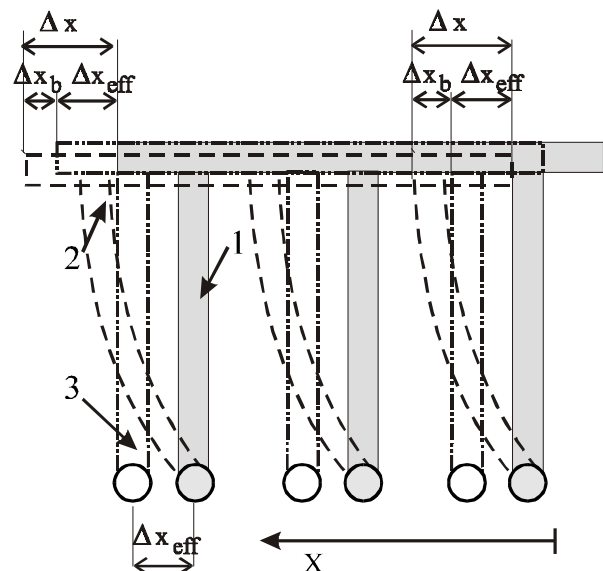
prikazana. Kao nožice upotrebljene su piezo cevčice proizvođača Physikinstrumente [17] sa četiri spoljašnje elektrode i zajedničkom elektrodom na unutrašnjem zidu cevčice (Sl. 4 a) koja se uvek polarizuje tako da bude na najvišem potencijalu. Ovakva polarizacija je neophodna zbog mogućnosti nepoželjnog zakretanja Weiss-ovih domena u piezo-keramici što rezultuje u promeni njenih karakteristika. Svaka spoljašnja elektroda se može posebno polarizovati u odnosu na zajedničku elektrodu. Ako se na neku spoljašnju elektrodu dovede negativan potencijal, dužina te strane cevčice će se usled inverznog piezo-efekta promeniti.

Poprečni presek elektroda i šematski prikaz orijentacije nožica u odnosu na platformu su prikazani na Sl. 4b. Potrebno je napomenuti da se obe 'x-elektrode' nalaze u pravcu x ose, a obe 'y-elektrode' u pravcu y ose koordinatnog sistema koji se nalazi na platformi. Na taj način se kretanje u pravcu određene ose koordinatnog sistema koji se nalazi na platformi uvek postiže aktiviranjem istih elektroda.

Jedan kraj piezo-čevčica korišćenih kao aktuatora je fiksiran za platformu, dok drugi kraj ostaje slobodan. Usled dovođenja napona na unutrašnju i jednu od spoljašnjih elektroda doći će do promene dužine cevčice sa jedne strane i piezo-čevčica će se saviti. U odnosu na prvobitni položaj ose nedeformisane cevčice položaj slobodnog kraja će se promeniti za neku veličinu  $\Delta x$ . S obzirom da se svaka elektroda na svakoj nožici može posebno polarizovati moguće je postići međusobno nezavisno savijanje nožica u bilo kom pravcu x-y ravni. Sve tri nožice su postavljene tako da su elektrode paralelne x odnosno y osi koordinatnog sistema. Na slobodne krajeve cevčica su zalepljene čelične kuglice preko kojih se ostvaruje kontakt sa podlogom.

Da bi objasnili osnovni princip kretanja platforme, razmotrimo prvo translatorno kretanje (pretpostavimo da

se sve nožice savijaju u x-z ravni). Pokretanje platforme se vrši savijanjem nožica u dve faze (kao što je prikazano na Sl. 5). U početnom položaju sve nožice na platformi su potpuno ispružene (pozicija 1 na sl. 5). U prvoj (sporoj) fazi sve nožice se istovremeno savijaju relativno sporo (pozicija 2 na Sl. 5), a zatim naglo ispravljaju (pozicija 3 na Sl. 5). U fazi sporog savijanja kontakt nožica i podloge ostaje očuvan. Drugi kraj nožica (koji je pričvršćen za platformu) se u odnosu na podlogu pomera za  $\Delta x$  pa je platforma na kraju ove faze (Sl. 5, pozicija 2) pomeren za  $\Delta x$  u odnosu na početni položaj. Zatim se nožice naglo ispravljaju, pri čemu, usled inercije platforme, dolazi do proklizavanja kraja nožica sa kuglicama



Slika 5. Faze kretanja platforme: 1- početni položaj, 2- sporo savijanje nožica, 3- naglo ispravljanje i platforma je spremna za sledeći korak

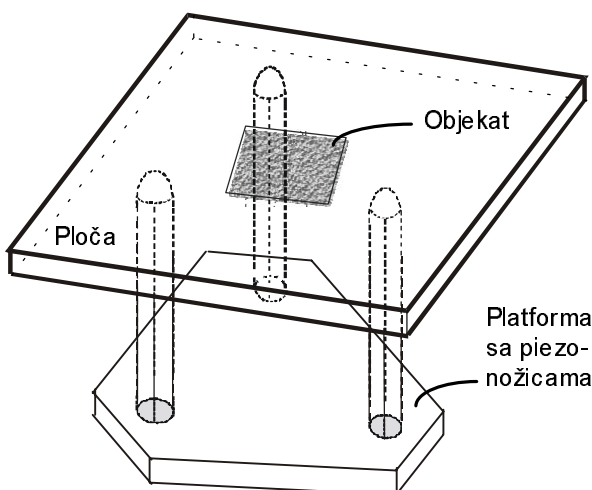
Figure 5. The phases of platform motion: 1- initial position, 2- slow bending of the legs, 3- quick stretching of the legs

po podlozi. Posle ispravljanja nožica u novom ravnotežnom položaju (nožice se nalaze u položaju koji je prikazan na Sl. 5, pozicija 3) platforma je pomerena u pravcu kretanja u odnosu na svoj prvobitni položaj na podlozi. Prilikom naglog ispravljanja nožica proklizavanje se ne vrši za vrednost  $\Delta x$ , već je pomeranje tela platforme umanjeno za određenu vrednost  $\Delta x_b$ , pa je platforma posle ispravljanja nožica pomerena za vrednost  $\Delta x_{eff}$  u odnosu na položaj pre početka koraka. Veličinu  $\Delta x_{eff}$  smo nazvali efektivni korak.

Ponavljanjem ove procedure i savijanjem nožica na željeni način može se obezbediti pomeranje platforme u željenom pravcu korakom veličine  $\Delta x_{eff}$  [18]. Ovakvo kretanje platforme nazvano je direktnim načinom rada.

Interesantno je na ovom mestu uporediti način rada naše i platforme opisane u [9–12]. Realizacija naše platforme je jednostavnija jer se umesto korišćenja posebnog, pomoćnog tega za realizaciju pomeranja platforme, koristi se inercija same platforme. Na taj način je realizacija platforme jednostavnija.

Platforma se može koristiti i na drugačiji način koji je šematski prikazan na Sl. 6. Telo platforme je fiksirano za podlogu i na krajevima nožica se nalazi ploča sa uzorkom koji se pozicionira. Oblik i veličina ove ploče je takav da su mehanički parametri kontakta ploče sa sve tri nožice malo menjaju prilikom kretanja i ostaju približno konstantni. Princip rada platforme je isti kao u prethodnom načinu rada. Tokom prve faze se nožice savijaju relativno sporo i kontakt sa pločom ostaje očuvan. Na kraju ove faze usled savijenosti nožica ploča sa uzorkom je pomerena za neku vrednost  $\Delta x$ . Tokom naglog ispravljanja nožica usled inercije ploče sa uzorkom dolazi do proklizavanja nožica u odnosu na ploču i ploča sa uzorkom će na kraju ciklusa jednog "koraka" biti pomerena za  $\Delta x_{eff}$  u odnosu na početni položaj. Ovo smo nazvali obrnutim načinom rada platforme.



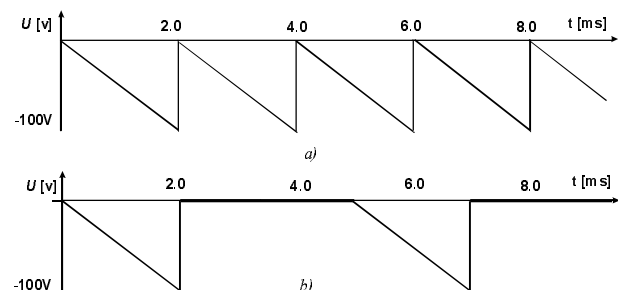
Slika 6. Skica platforme sa piezo nožicama u drugom načinu rada sa postavljnom radnom pločom i uzorkom za pozicioniranje

Figure 6. The platform in reverse mode of operation, with the board transporting the object to be positioned

Brzinom kretanja platforme se može upravljati na više načina. Savijanje cevčica približno linearno zavisi od vrednosti dovedenog napona [19]. Tako je moguće izborom vršne vrednosti dovedenog napona odabrati odgovarajuću veličinu koraka. Drugi način je upravljanje brojem koraka u jedinici vremena. Ova dva načina daju dobre mogućnosti za njihovo kombinovanje, npr. moguće je ostvariti brzo dovođenje platforme blizu odabranog položaja "velikim koracima" i visokom učestanošću koraka čak i sa odstojanja od nekoliko santimetara, a zatim fino pozicioniranje treba realizovati malim koracima npr. manjim od 1  $\mu\text{m}$ . Moguće je raditi i u modu "korak-po-korak" [19] u kome se vrši najpreciznije pozicioniranje.

Brzina kretanja platforme se može regulisati i grublje, promenom broja "testerastih impulsa" u jedinici vremena. Naime, najveću brzinu kretanja je moguće ostvariti uzastopnim slanjem impulsa (bez pauze između dva impulsa), što je prikazano na Sl. 7a. Međutim, moguće je posle svakog impulsa napraviti pauzu (vidi Sl. 7b) čime se srednja brzina automatski smanjuje. Dovođenjem napona odgovarajuće negativne vršne vrednosti istovremeno na jednu x i na jednu y-elektrodu, (Sl. 4a) moguće je ostvariti translaciono kretanje platforme u bilo kom pravcu x-y ravni sa različitim vrednostima koraka  $\Delta x_{eff}$ . Moguće je pobuđivati svaku elektrodu svake cevčice impulsima različitih vršnih vrednosti i na taj način je omogućeno kretanje platforme po bilo kojoj putanji.

Postoji i poseban mod kretanja platforme koja je predviđen za još preciznije pozicioniranje. To je tzv. mod "noga-po-noga". I u ovom modu se u toku prve faze koraka nožice savijaju istovremeno, ali se ispravljanje nožica ne vrši istovremeno već uzastopno sa kratkim pauzama. Na taj način prilikom proklizavanja jedne nožice ostale dve nožice svojim frikcionim silama "drže platformu nepokretnu" u pomerenom položaju (pozicija 2 sa Sl. 5), što omogućava ravnomernije kretanje platforme. Usled frikcionih sila dve trenutno nepokretne nožice, ovom modu kretanja su omogućeni i manji koraci jer do proklizavanja jedne nožice dolazi i pri nižim naponima, na kojima ne dolazi do zajedničkog proklizavanja sve tri nožice.

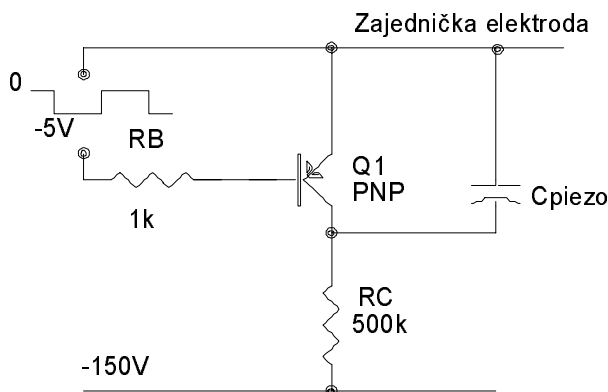


Slika 7. Promenom broja testerastih impulsa u jedinici vremena moguće je podešavati frekvenciju koraka platforme – a) viša frekvencija (veći broj koraka u jedinici vremena), b) niža frekvencija

Figure 7. Changing the number of sawtooth pulses in unit time serves to adjust the step frequency – a) Higher frequency – higher speed, b) Lower frequency – lower speed

## ELEKTRONSKA KOLA ZA REALIZACIJU KORAKA I UPRAVLJANJE KRETANJEM PLATFORME

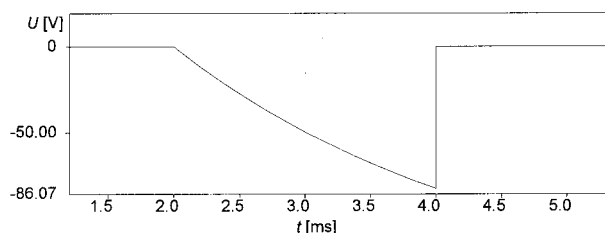
Za generisanje odgovarajućih električnih signala za kretanje piezo-nožica (Sl. 7) pored signal-generatora je neophodan i visokonaponski pojačavač koji može dati odgovarajuće jačine struja u trenutku nagle promene izlaznog napona (trenutak ispravljanja nožica). Imajući u vidu da su vrednosti parazitne kapacitivnosti između elektroda piezo-nožica oko 10nF i da promena napona treba da bude vrlo brza (trajanja maksimalno do 300μs) za omogućavanje naglog ispravljanja nožica platforme potrebni su pojačavači koji mogu dati jačinu struja bar 350mA ili više. Jasno je, da je ovakvo rešenje vrlo skupo, jer se zahteva poseban pojačavač za svaku elektrodu. Zbog toga je razvijeno impulsno kolo za realizaciju potrebnih talasnih oblika napona (Sl. 8). S obzirom da 12 ovakvih kola treba da se montira na platformu, poseban akcenat je stavljen na jednostavnost realizacije i minijaturizaciju kola.



Slika 8. Kolo za generisanje testerastih impulsa sa eksponencijalno opadajućom ivicom

Figure 8. Electronic circuit for sawtooth waveform generation

PNP tranzistor je iskorišćen kao prekidač za naglo pražnjenje RC-kola koji se sastoji od redne veze parazitne kapacitivnosti elektrode  $C_{piezo}$  i otpornika  $R_C$ . Kada je tranzistor zakočen,  $C_{piezo}$  se puni jačinom struje koja se menja eksponencijalno, sa vremenskom konstantom  $\tau_p = R_C \cdot C_{piezo}$  (Sl. 9). Uključivanjem tranzistora RC-



Slika 9. Impulsi generisani kolom sa Sl. 8 za  $\tau_p = 5.6$  ms. S obzirom da je trajanje impulsa 2ms, dostiže se samo 69.9% asimptotske vrednosti napona koja je u ovom primeru 120V

Figure 9. The shape of pulses generated by the circuit from Fig. 8, for  $\tau_p = 5.6$  ms (In this example, for a pulse width of 2ms, the peak negative voltage is only 69.9% of its asymptotical value, here being 120V)

lo se prazni velikom strujom, tako da je postignuto najbrže moguće ispravljanje nožice.

Nelinearnost, koja je neminovna posledica ovakve jednostavne realizacije impulsnog kola nema nikakav uticaj na veličinu koraka i brzinu kretanja ako je nagib opadanja napona uvek manji od onog pri kojem dolazi do proklizavanja nožice po podlozi. S obzirom na dobro poznat izraz za vrednost napona kondenzatora u kolima prvog reda (što je i ovde slučaj kada je tranzistor isključen) može se napisati izraz za vrednost napona na elektrodama piezo-cevčica smatrajući za  $t=0$  trenutak isključenja tranzistora

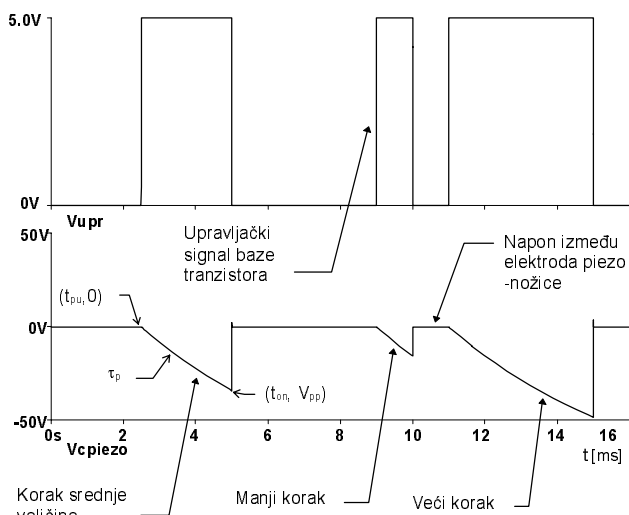
$$U_{piezo}(t) = -U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) \quad (1)$$

U izrazu (1)  $U$  je apsolutna vrednost napona izvora za napajanje nožica čiji je negativan kraj priključen na donji kraj otpornika  $R_C$  a pozitivan na zajedničku elektrodu. Promena napona u vremenu definisana je prvim izvodom izraza (1) po vremenu  $t$ :

$$\frac{d}{dt} U_{piezo}(t) = -\frac{U}{\tau_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (2)$$

Iz jednačine (2) je jasno da je najkritičniji deo promene početak opadanja napona kad je i najveći nagib promene napona. Do proklizavanja platforme po podlozi dakle neće doći ako je vremenska konstanta  $\tau_p$  koju čine kolektorski otpornik  $R_C$  i parazitna kapacitivnost odgovarajuće elektrode  $C_{piezo}$  dovoljno velika.

Da bi se smanjile smetnje koje nastaju usled žičanih vodova koje platformu povezuju sa izvorima napona u direktnom modu rada, sva elektronska kola su smeštena na platformu. Upravljanje PNP-tranzistorima se vrši mikrokontrolerom ATMEL89c52 koji je takođe smešten na platformu. Mikrokontroler je pomoću serijske veze (RS-232) povezan sa glavnim računom. Pošto su u mikrokontroleru implementirani algoritmi za realizaciju kretanja, potrebni su mu samo podaci o načinu i smeru kretanja i o veličini koraka, tako da ulogu glavnog računara može igrati bilo koji računar koji poseduje RS-232 interfejs. U slučaju moda kada se sve nožice ispravljaju istovremeno, omogućeno je translatorno kretanje u bilo kom smeru željenom frekvencijom i veličinom koraka. Veličina koraka se tada određuje impulsno-širinskom modulacijom (pulse-width modulation) posebno po  $x$  i posebno po  $y$  osi. Odnos vremenskog intervala kada je tranzistor isključen i periode koraka nazvan je faktor ispune  $v$ . Kod translacije u opštem slučaju postoji poseban faktor ispune odgovarajuće  $x$ -elektrode,  $v_x$ , i poseban faktor ispune odgovarajuće  $y$  elektrode,  $v_y$ . Vremenski interval u kome je tranzistor odgovarajuće elektrode zakočen definiše vršnu vrednost napona elektrode (Sl. 10). S obzirom da savijanje nožica odgovara vektorskom zbiru napona na  $x$  i  $y$  elektrodi, jasno je da je na ovaj način omogućeno kretanje u bilo kom pravcu odabranom veličinom koraka. Pri tome, u ovom modu rada platforme može se koristiti izvor konstantne vrednosti napona.



Slika 10. Podešavanje veličine koraka promenom faktora ispunje upravljačkog signala baze PNP-transistora  
 Figure 10. Step size adjustment by selecting duty factor of the PNP-transistor base signal

Veličina i pravac pojedinačnih koraka platforme u slučaju translacije se podešava na sledeći način. Kod translacije, vektori brzina sve tri nožice su uvek identične. Usled toga, na svakoj nožici se pobuđuju iste elektrode, korišćenjem identičnih naponskih impulsa.

U slučaju kretanja u pravcu x ili y ose, na nožicama se aktivira samo jedna, odgovarajuća elektroda. Na Sl. 11 je prikazana situacija u slučaju kretanja u pozitivnom smeru x-ose. Tada vektori brzina svake nožice  $\vec{v}_i$  ( $i=1,2,3$ ) imaju identične pozitivne x-komponente  $v_{x1} = v_{x2} = v_{x3}$ , dok im je y-komponenta jednaka nuli. Na bazu tranzistora impulsnih kola koje odgovaraju +x-elektrodama sve tri nožice, dovode se naponski impulsi

na Sl. 11 obeleženi sa  $V_{B+x}$ , dok na baze ostalih tranzistora dovodi napon vrednosti  $-5V$  ( $V_{B-x,+y,-y}$ ) koji ih održava u provodnom stanju. U intervalima kada su tranzistori pridruženi +x elektrodama neprovodni, puni se parazitna kapacitivnost +x elektroda preko otpornika  $R_c$ . Trenutna vrednost napona na +x elektrodama obeležena je na Sl. 11 sa  $V_{+x}$ . S obzirom da vršna vrednost napona na +x elektrodi,  $V_{ppx+}$ , zavisi od trajanja neprovodnog intervala odgovarajućih tranzistora  $t_{offx+}$ :

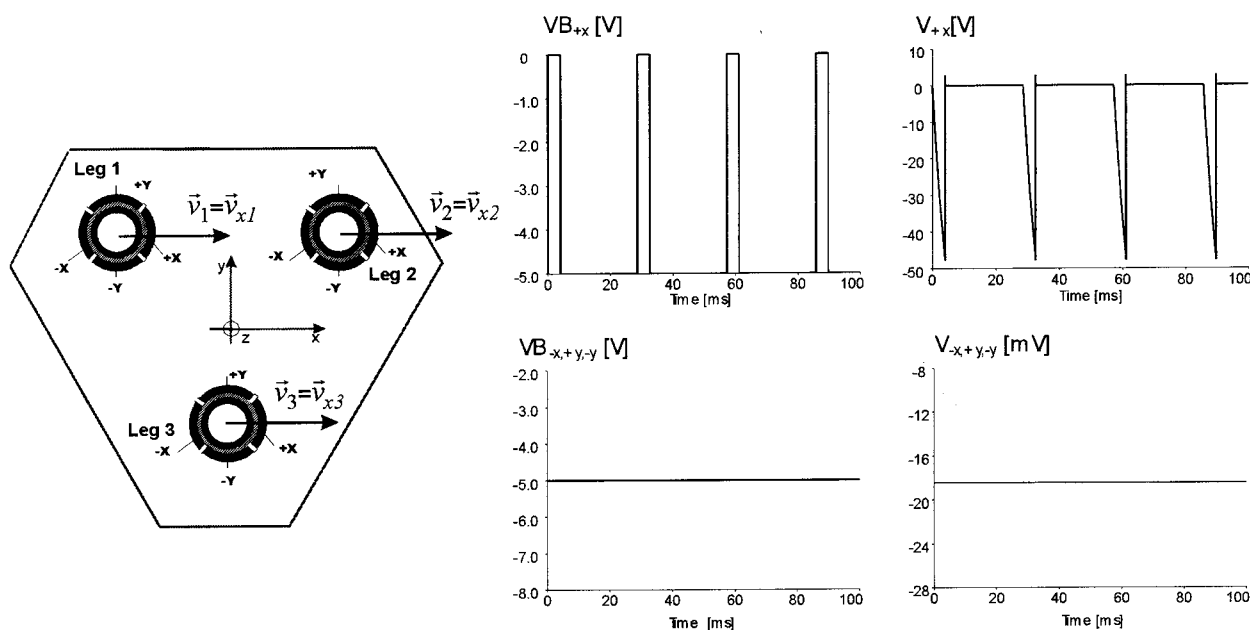
$$V_{ppx+} = U \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{offx+}}{\tau_p}} \right) \tag{3}$$

sledi da je dužinom trajanja neprovodnog intervala moguće podesiti željenu vrednost vršnog napona +x elektroda:

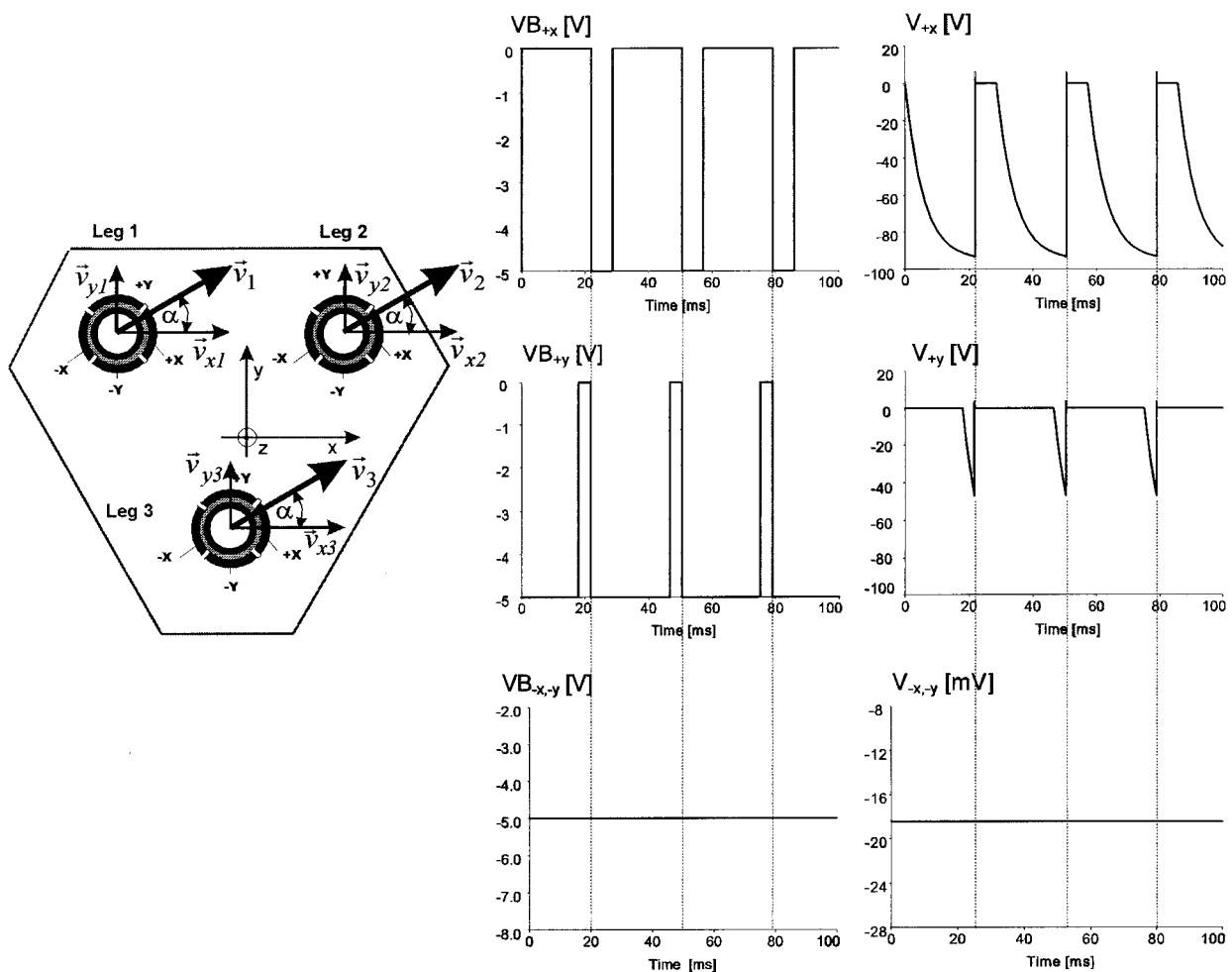
$$t_{offx+} = -\tau_p \cdot \ln \left( 1 - \frac{V_{ppx+}}{U} \right) \tag{4}$$

Kako pomeranje vrha nožice linearno zavisi od vrednosti priključenog napona, dužinom trajanja vremenskog intervala kada su odgovarajući tranzistori neprovodni, moguće je podešavati veličinu efektivnog koraka prilikom kretanja platforme u +x-smeru. U slučaju kretanja u negativnom smeru x-ose, ovakvi pravougaoni impulsi bi se dovodili na baze tranzistora priključenih na -x elektrode, dok bi se na sve ostale dovodio napon  $-5V$ . Potpuno analogno se realizuje kretanje i u pozitivnom ili negativnom smeru y ose.

U slučaju translatornog kretanja platforme u proizvoljnom smeru, aktivne su po dve susedne elektrode na svakoj nožici. U [19] je i eksperimentalno provereno da zakon superpozicije za savijanje cevčice važi u statičkom kao i u kvazistatičkom režimu – što je evidentno posledica linearne zavisnosti pomeranja kraja nožice od amplitude primenjenog napona. Da bi se realizovao ko-



Slika 11. Realizacija translatornog kretanja platforme u pravcu x-ose u pozitivnom smeru i odgovarajući električni signali  
 Figure 11. Translatory motion of the platform in the x-axis direction and the corresponding electric signals



Slika 12. U slučaju kosog kretanja, pravac, smer i veličina koraka odgovara vektorskom zbiru vršnih vrednosti napona na pobuđenim elektrodama

Figure 12. Example of platform translatory motion in an arbitrary direction. The platform moves in the direction of an angle  $\alpha = 26.56^\circ$ . The step direction and angle correspond to a vectorial sum of bending components corresponding to peak voltage values applied on the excited electrodes

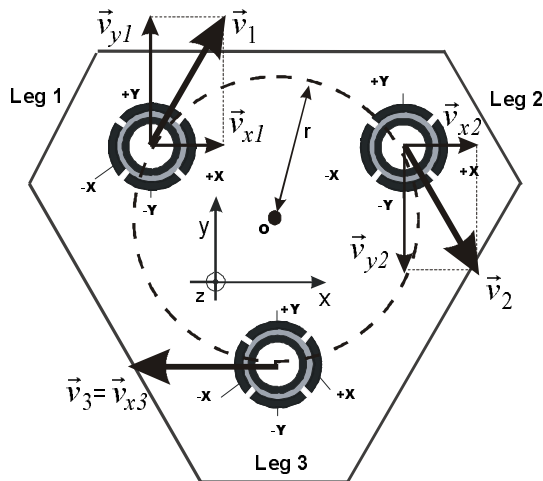
rak željene amplitude u određenom pravcu i smeru, treba dovesti takve signale na dve odgovarajuće, susedne elektrode, čiji vektorski zbir vršnih vrednosti odgovara pravcu, smeru i veličini koraka.

Tako, za slučaj kretanja pod uglom od  $\pm 45^\circ$  na x ili y osu, treba dovesti na odgovarajuće dve susedne elektrode signale istih vršnih vrednosti. Na Sl. 12 je prikazan opštiji primer za kretanja platforme, pod uglom od  $\alpha = 26.56^\circ$  u odnosu na x osu, frekvencijom koraka  $f_{\text{step}} = 35\text{Hz}$ . Tada treba da postoje obe (x i y) komponente brzine i važi vektorski zbir:  $\vec{v}_i = \vec{v}_{xi} + \vec{v}_{yi}$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Potrebno je pobuditi +x i +y elektrodu naponima trenutnih vrednosti  $V_{+x}$  i  $V_{+y}$ , dok su elektrode -x i -y na nultom naponu (na dijagramu obeleženi sa  $V_{-x,-y}$ ). Kako je  $\cos(26.56^\circ) = 0.890$  i  $\sin(26.56^\circ) = 0.445$ , odnos između vršnih vrednosti napona  $V_{ppx+}$  i  $V_{ppy+}$  treba da bude:  $V_{ppx+} / V_{ppy+} = \tan(26.56^\circ) = 0.5$ . Dalje, s je faktor skaliranja kojem je direktno proporcionalna amplituda koraka, i za koje važi:  $V_{ppx+} = s \cdot \cos(\alpha)$ ,  $V_{ppy+} = s \cdot \sin(\alpha)$ .

Ako se npr. izabere  $s = 105$ , odgovarajuće vrednosti vršnih vrednosti napona su:  $V_{ppx+} = s \cdot \cos(26.56^\circ) = 93.45\text{V}$ ,  $V_{ppy+} = s \cdot \sin(26.56^\circ) = 46.72\text{V}$ . Uvrštavajući u izraz (4) za slučaj  $\tau_p = 5.6\text{ms}$  i napon napajanja  $U = 95\text{V}$  mogu se odrediti vrednosti za dužinu vremenskih intervala kada su tranzistori +x i +y elektrode zakočeni:  $t_{\text{off}+} = 23.0\text{ms}$ ,  $t_{\text{off}y+} = 3.8\text{ms}$ . Odgovarajući dijagrami trenutnih vrednosti napona baze tranzistora koji aktivno učestvuju u realizaciji koraka na Sl.12 obeleženi su sa  $VB_{+x}$  i  $VB_{+y}$ , dok je sa  $VB_{-x,-y}$  obeležen napon baze tranzistora pridruženih -x i -y elektrodama. Bitni je uočiti da se sinhronizacija signala vrši tako, da kod svih aktivnih elektroda naglo pražnjenje nastupi u istom trenutku, radi ravnomernog proklizavanja nožica. Početak punjenja kondenzatora (vremenski trenutak zakočenja tranzistora, tada nema proklizavanja nožice po podlozi) zavisi od vrednosti  $t_{\text{off}+}$  i  $t_{\text{off}y+}$ . Kao što je na dijagramima na Sl. 12 prikazano. Usled toga se +x i +y elektrode pune na višne vrednosti napona  $V_{ppx+} = 93.45\text{V}$  i  $V_{ppy+} = 46.72\text{V}$  respektivno, što prouzrokuje savijanje cevčica pod

uglom od  $\alpha = 26.56^\circ$ . Posle trenutnog pražnjenja svih elektroda, realizuje se koraka ovom pravcu. Veličina koraka platforme je direktno srazmerna izabranoj vrednosti  $s=105$ .

U modu kada se sve nožice istovremeno ispravljaju sem translacije moguće je precizno realizovati i bilo kakvo složeno ravansko kretanje, jer se može kontrolisati vršni napon svake elektrode posebno. Pri tome se sama platforma tretira kao kruto telo. Kod složenog ravnanskog kretanja svaka tačka na platformi treba da opiše odgovarajuću, unapred poznatu trajektoriju. Ako se obezbedi da kretanje sve tri nožice u svakom trenutku odgovara trajektoriji koji opisuju tačke iznad njihovog centra na platformi, postignuto je željeno kretanje platforme. Ovo će se ilustrovati na sledećem jednostavnom primeru. Na Sl. 13 je prikazano kretanje pojedinačnih nožica u slučaju rotacije oko tačke O u smeru kazaljke na satu. Svaka nožica realizuje korak u smeru koja je

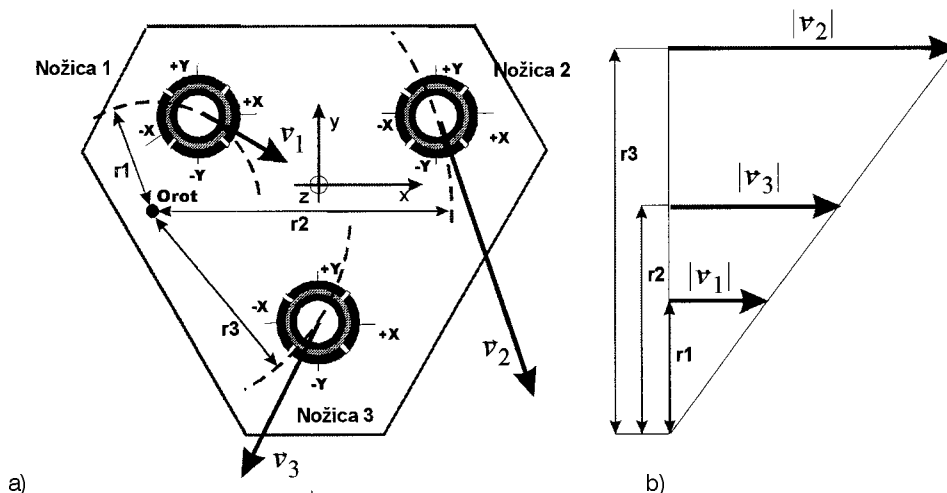


Slika 13. Vektori brzine kretanja nožica platforme prilikom rotacije oko centra platforme  
 Figure 13. Velocity vectors of the platform legs in the case of platform rotation about its central axis

tangenta na krug radijusa  $r$  ocrtanog oko centra platforme, dok je amplituda koraka proporcionalna rastojanju nožice od centra rotacije. Odgovarajuće savijanje svake nožice posebno se postiže superpozicijom napona na po jednoj x i y elektrodi tako da vektorski zbir ovih napona odgovara pravcu, smeru i amplitudi željenog vektora brzine date nožice.

U slučaju rotacije oko tačke O koji se nalazi u centru platforme na istoj udaljenosti od sve tri nožice, amplituda vektora brzine sve tri nožice su iste. Međutim, za razliku od translatornog kretanja u ovom slučaju pravac i smer ovih vektora nije isti. Vektor brzine nožice 1,  $\vec{v}_1 = \vec{v}_{x1} + \vec{v}_{y1}$  ima pozitivnu x i y komponentu, tako da su na ovoj nožici aktivne elektrode +x i +y. Kod nožice 2, y komponenta brzine je negativna, tako da su na ovoj nožici aktivne elektrode +x i -y. Vektor brzine kretanja nožice 3,  $\vec{v}_3 = \vec{v}_{x3}$  ima samo negativnu x-komponentu, tako da je na ovoj nožici aktivna samo -x elektroda. Vršna vrednost napona svake aktivne elektrode se određuje posebno, na sličan način kao ranije, u slučaju translacije. Na osnovu određenih vršnih vrednosti se zatim mogu odrediti i vremenski trenuci uključivanja i isključivanja pojedinih tranzistora za realizaciju rotacije. Jasno je, da kod složenog kretanja svaka aktivna elektroda može imati posebnu vrednost faktora ispunje. Ovakav način upravljanja kretanjem platforme omogućava jednostavnu implementaciju mikrokontrolera za upravljanje kretanjem, kao i "otvorenu arhitekturu" i lako promenu programa mikrokontrolera, ili još bolje, promenu odgovarajućih parametara kretanja i u toku rada čak i bez potrebe za promenom programa. Takođe, ovakva "univerzalnost" omogućava da jednostavnim zadavanjem parametara sa PC-a u toku rada promeni režim i/ili mod rada platforme, bez ikakvih potrebe prepravki ili zamene elektronskih delova ili programa mikrokontrolera.

Rotacije oko proizvoljne tačke  $O_{rot}$  analogno se izvodi rotaciji oko centra kao što je prikazano na Sl. 14a. Pravac vektora  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$  je tangenta na krugove ocrta-



Slika 14. a) Vektori brzine kretanja nožica platforme prilikom rotacije oko proizvoljne tačke i b) amplitude koraka pojedinih nožica  
 Figure 14. The velocity vectors in case of rotation around an arbitrary vertical axis b) corresponding step sizes



ne oko tačke  $O_{rot}$ , dok je amplituda koraka ( $|\vec{v}_1|$ ,  $|\vec{v}_2|$ ,  $|\vec{v}_3|$ ) srazmerna radiusima  $r_1$ ,  $r_2$  i  $r_3$  (Sl. 14b).

U slučaju moda noga-po-noga, ovakav način upravljanja kretanjem sa našim jednostavnim impulsnim kolima nije moguće, već se elektrode sve tri nožice moraju naelektrisati do vršne vrednosti napona. Tada je za upravljanje veličinom koraka u slučaju translacije neophodan promenljivi izvor napona i omogućeno je kretanje samo u smerovima koordinatnih osa platforme aktiviranjem po jedne od 4 elektrode svake nožice. Istovremenim aktiviranjem po dve susedne elektrode nožica, omogućeno je i kretanje pod uglovima  $\pm 45^\circ$  na x i y osu. Takođe, složena ravanska kretanja kao što je rotacija, mogu se postići samo aproksimativno, uz pomoć više pojedinačnih koraka.

## EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Prikaz eksperimentalnih rezultata će biti podeljen u dva dela. U prvom delu će biti prikazani rezultati testiranja karakteristika samih piezo cevčica koje su korišćene kao nožice platforme. U drugom delu će biti prikazani rezultati testiranja kretanja platforme.

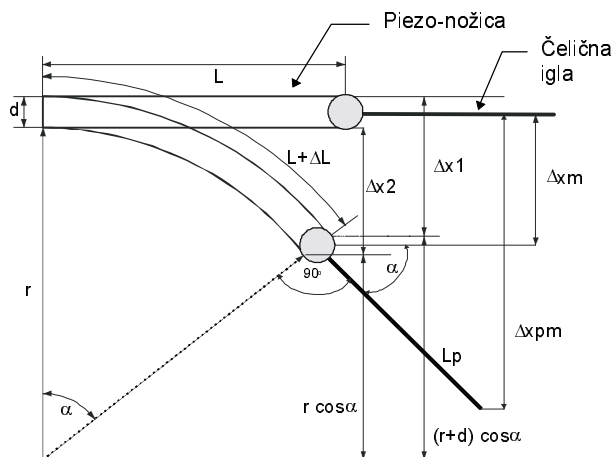
### Rezultati testiranja piezo nožica

Osnovna karakteristika piezo nožica koja je od značaja za realizaciju kretanja je intenzitet njenog savijanja prilikom primene jednosmernog napona. Kataloški podaci korišćenih piezo-čevčica tipa PT130.90 proizvođača Physikinstrumente su: dužina cevčice  $L = 30 \pm 0.2\text{mm}$ , spoljašnji i unutrašnji prečnik piezo-keramčkog sloja  $d = OD = 3.2 \pm 0.1\text{ mm}$ , i  $ID = 2.2 \pm 0.1\text{ mm}$ , piezoelektrična konstanta  $d_{31} = -210 \cdot 10^{-12}\text{ m/V}$ , maksimalni dozvoljeni napon  $U_{max} = 500\text{V}$ , parazitna kapacitivnost između unutrašnje i jedne spoljašnje elektrode  $C_{piezo} = 10\text{ nF}$ .

Pri eksperimentalnoj proverbi savijanja cevčice korišćen je mikroskop sa kalibrisanim okularom i podešljivi naponski izvor. Radi povećanja tačnosti očitavanja intenziteta savijanja cevčice na kuglicu je pričvršćena (zalepljena) tanka čelična igla dužine  $L_p = 37.1\text{mm}$  kako je na Sl. 15 prikazano. Procedura merenja je bila sledeća. Počevši od nulte vrednosti, napon je postepeno povećavan i posmatrano je pomeranje kraja igle i beležen je njegov pomeraj  $\Delta x_{pm}$ . Posle dostizanja maksimalne vrednosti napona on je postepeno smanjivan i položaj vrha igle  $\Delta x_{pm}$  je dalje beležen. Radi provere postojanosti merenja, ovaj postupak je ponovljen tri puta. Položaj kraja cevčice (položaj kuglice)  $\Delta x_m$  se zatim sračunava za svaki očitani položaj vrha igle na sledeći način. Prvo je rešena po  $\alpha$  implicitna jednačina (5), koja sledi iz geometrijskih relacija na osnovu Sl. 15:

$$\Delta x_{pm} = \left( \frac{L}{\alpha} + \frac{d}{2} \right) \cdot (1 - \cos(\alpha)) + L_p \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

gde je  $L$  dužina a  $d$  spoljašnji prečnik cevčice, dok je  $L_p$  dužina čelične igle. Zatim je  $\Delta x_m$  sračunato na osnovu



Slika 15. Eksperimentalno određivanje pomeraja kraja cevčica u zavisnosti od primenjenog napona  $U$ . U stvarnosti savijanje i pomeranje je mnogo manje u odnosu na dužinu cevčice, ovde je prikazano mnogo veće savijanje zbog jasnoće slike.

Figure 15. Experimental evaluation of the displacement of the leg's end as a function of the applied voltage. (In reality, the bending and the displacement are much smaller. Here, they are enlarged for clarity)

jednačine (6) koja takođe sledi iz geometrijskih relacija sa Sl. 15:

$$\Delta x_m = \left( \frac{L}{\alpha} + \frac{d}{2} \right) \cdot (1 - \cos(\alpha)) \quad (6)$$

Na osnovu sračunatih vrednosti za  $\Delta x_m$  je dobijena statička karakteristika sa koje je određen i histerzis cevčica.

Da bi uporedili eksperimentalno dobijene rezultate sa očekivanim savijanjem cevčice na bazi kataloških podataka ("teoretskim" savijanjem) odredili smo teoretske vrednosti savijanja cevčica na sledeći način. Usled dovođenja napona između jedne spoljašnje i unutrašnje zajedničke elektrode, doći će do promene dužine te strane cevčice za vrednost  $\Delta L_t$ , prema jednačini (7) [5]:

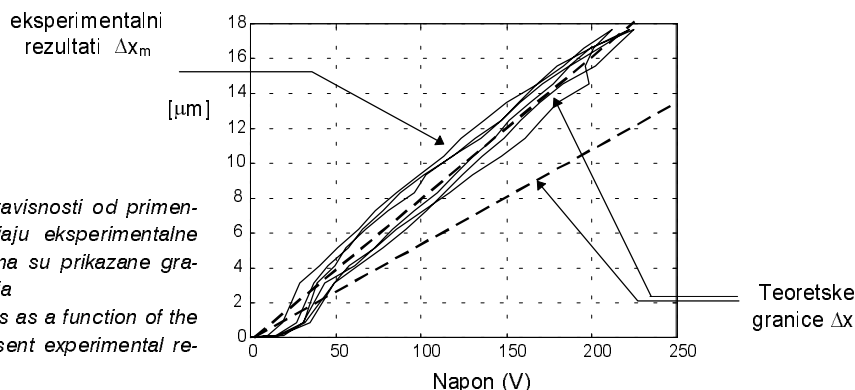
$$\Delta L_t = L \cdot d_{31} \cdot \frac{2U}{OD - ID} \quad (7)$$

Kako dužina naspramne strane cevčice ostaje nepromenjena, piezo-čevčica će se saviti ( $L$ ). Pod pretpostavkom da je cevčica homogena, kao i na osnovu geometrijskih relacija (8-10) koje su jasne sa Sl. 15 je moguće odrediti približnu vrednost promene položaja slobodnog kraja cevčice  $\Delta x_1$  i  $\Delta x_2$ :

$$\begin{cases} L = r \cdot \alpha \\ L + \Delta L_t = (r + d) \cdot \alpha \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = \frac{\Delta L_t}{d} \\ r = \frac{L \cdot d}{\Delta L} \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta x_2 = (r+d) - (r+d) \cdot \cos \alpha = (r+d) \cdot (1 - \cos \alpha), \quad (9)$$

$$\Delta x_1 = r - r \cdot \cos \alpha = r \cdot (1 - \cos \alpha). \quad (10)$$



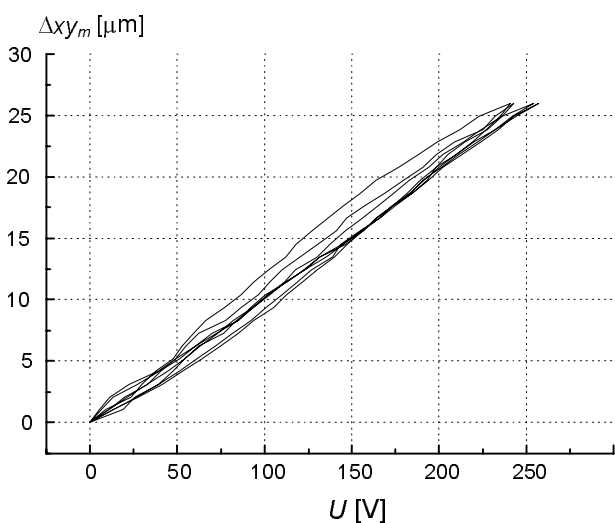
Slika 16. Pomeranje kraja cevčice u zavisnosti od primenjenog napona. Tanke linije predstavljaju eksperimentalne rezultate a debljim isprekidanim linijama su prikazane granice teoretski određene oblasti pomeraja  
Figure 16. Displacement of the leg ends as a function of the applied voltage. The solid lines respesent experimental results, the dashed lines theoretical limits

S obzirom da se na kraju cevčice nalazi pričvršćena kuglica, sledi da je teoretska vrednost savijanja cevčice  $\Delta x_t$  data sa:

$$\Delta x_t = \left( \frac{d \cdot (OD - ID)}{2 \cdot d_{31} \cdot U} + \frac{d}{2} \right) \cdot \left( 1 - \cos \left( \frac{2 \cdot L \cdot d_{31} \cdot U}{d \cdot (OD - ID)} \right) \right) \quad (11)$$

Na ovaj način se može (usvajanjem odgovarajućih kataloških vrednosti odstupanja za ID, OD odnosno (L) odrediti maksimalna, odnosno minimalna vrednost za  $\Delta x_t$ . Na dijagramu sa Sl. 16 su prikazane vrednosti  $\Delta x_m$  (određene na bazi merenja) kao i teorijski određena oblast pomeraja kraja cevčica  $\Delta x_t$ .

Kako zavisnost pomeraja kraja nožice u slučaju aktiviranja samo jedne elektrode približno linearno zavisi od primenjenog napona (vidi Sl. 16), pretpostavljeno je da u slučaju aktiviranja dve susedne elektrode za pomeranje kraja nožice važi zakon vektorskog sabiranja. Ova pretpostavka je i eksperimentalno proverena dovodeњem napona iste vrednosti na dve susedne elektrode u odnosu na zajedničku elektrodu i merenjem amplitude pomeraja kraja iglice. Amplituda pomeraja kraja nožice  $\Delta x_{ym}$  i u ovom slučaju se određuje analogno kao u slučaju aktiviranja samo jedne elektrode nožice.



Slika 17. Vrednosti pomeraja kraja piezo-cevčice  $\Delta x_{ym}$  u slučaju kad su pobuđene dve susedne elektrode  
Figure 17. Displacement of the leg end  $\Delta x_{ym}$  in the case of exciting two neighboring electrodes

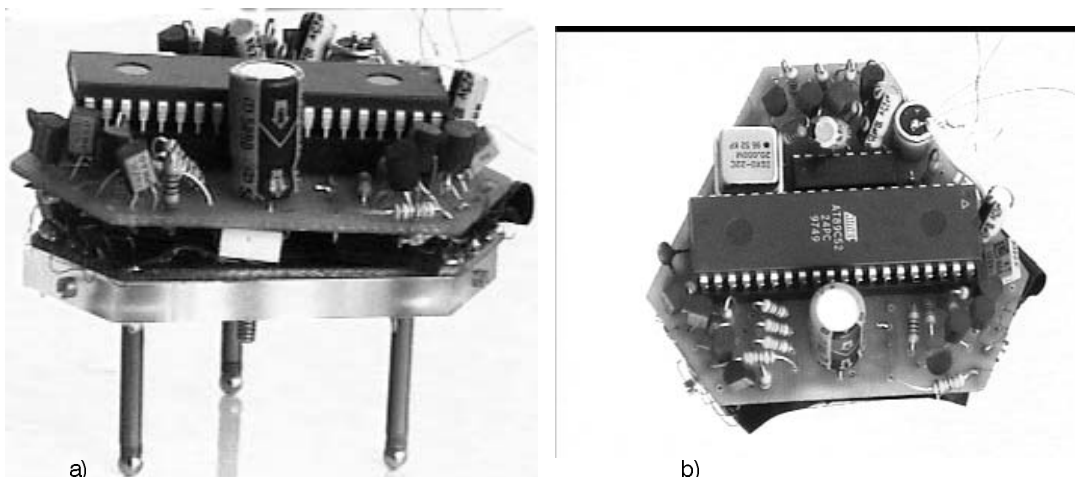
Za vrednosti  $\Delta x_{ym}$  koji su prikazani na dijagramu na Sl. 17 važi  $\Delta x_{ym} \approx \sqrt{2} \cdot \Delta x_m$ , što potvrđuju pretpostavku o važenju zakona vektorskog sabiranja. Ovaj rezultat je vrlo bitan zbog primene pri realizaciji kretanja platforme.

Proverena je i zakrivljenost cevčica u kvazistatičkom režimu rada. Umesto jednosmerne, na elektrode nožica je doveden prostoperiodični napon promenljive, niske frekvencije i amplitude i posmatrana je amplituda pomeranja kraja iglice. Pokazalo se, da je amplituda pomeraja kraja iglice približno ista odgovarajućem pomeranju u slučaju jednosmernog napona za sve frekvencije do 150Hz.

### Rezultati testiranja kretanja platforme

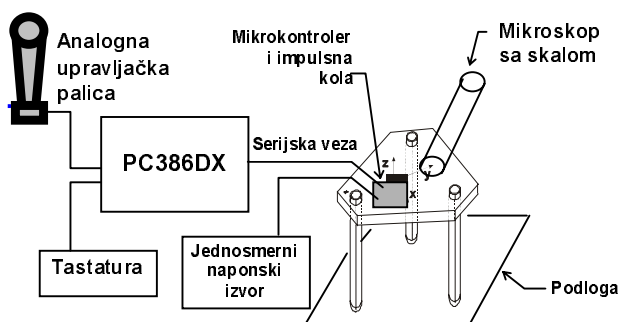
Na Sl. 18a je prikazana fotografija platforme sa pričvršćenim elektronskim kolima sa odstranjenom pločom za objekat, dok je na Sl. 18b prikazan pogled odozgo na platformu. Eksperimentalna provera i merenje brzine kretanja platforme i veličine efektivnog koraka su vršena pomoću aparature koja je šematski prikazana na Sl. 19. Kao glavni računar je korišćen IBM-PC kompatibilni računar tipa 386DX. Programska podrška je napisana korišćenjem programskog jezika TurboC. Ulazne jedinice računara su bili analogni joystick za on-line upravljanje kretanjem platforme i tastatura za precizno zadavanje parametara kretanja.

Upravljanje džojstikom omogućava laku realizaciju osnovnih kretanja: translaciju i rotaciju. Uz simultanu vizuelnu kontrolu platforme korisnik može veoma jednostavno vršiti korekcije kretanja tako da se postigne željena pozicija. Zbog toga je u toku funkcionalnog testiranja mogućnosti kretanja platforme korišćen džojstik. Međutim, kod preciznih merenja, za upravljanje platformom isključivo je korišćena tastatura koja omogućava veoma precizno zadavanje (i održavanje tokom kretanja) parametara kao i samog načina kretanja, na osnovu kojeg se mogu vršiti precizna merenja raznih karakteristika platforme. PC prosleđuje osnovne podatke o zadatom kretanju platforme mikrokontroleru koji se nalazi na samoj platformi preko serijske veze, a mikrokontroler na osnovu ovih podataka određuje vremenske trenutke uključivanja i isključivanja pojedinih tranzistora. S obzi-



Slika 18. Fotografija a) platforme sa pričvršćenim elektronskim kolima za realizaciju kretanja, bez ploče za objekat b) pogled odozgo na elektroniku platforme

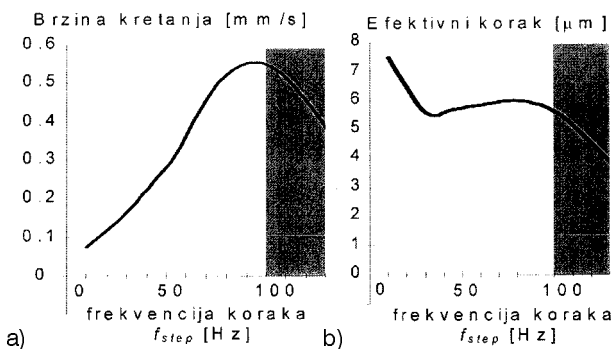
Figure 18. Photograph of a) complete platform, with the upper board removed, b) top view of the platform



Slika 19. Aparatura za eksperimentalnu proveru i merenje kretanja platforme u direktnom načinu rada

Figure 19. Experimental setup for platform motion measurements in direct operation mode

rom da je program za mikrokontroler realizovan u assembleru, veoma se brzo izvršava i zauzima samo 1kB memorije. Na ovaj način je omogućeno da se platforma duže vreme kreće sa konstantnim parametrima što je bilo izuzetno značajno prilikom testiranja performansi kre-



Slika 20. Zavisnost a) brzine kretanja platforme i b) veličine efektivnog koraka platforme za  $U = 150V$  u direktnom načinu rada

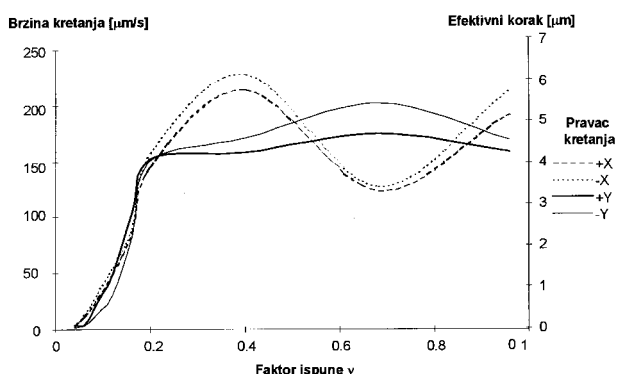
Figure 20. a) Platform speed, b) Effective step size as a function of step frequency in the direct operation mode for  $U = 150V$

tanja platforme. Kretanje platforme je mereno pomoću mikroskopa sa izbaždarenim okularom i preciznog hronometra. Vremenska konstanta RC kola za svaku elektrodu je ista i iznosi  $\tau_p = 5.6 ms$ .

Izvršen je veliki broj merenja, ali će se ovde prikazati samo nekoliko karakterističnih rezultata. Dijagrami prikazani na Sl. 20–25 se odnose na kretanje platforme sa istovremenim ispravljanjem nožica. Pre svega, određena je zavisnost brzine kretanja i veličine efektivnog koraka platforme od frekvencije koraka (Sl. 20 a) i b)).

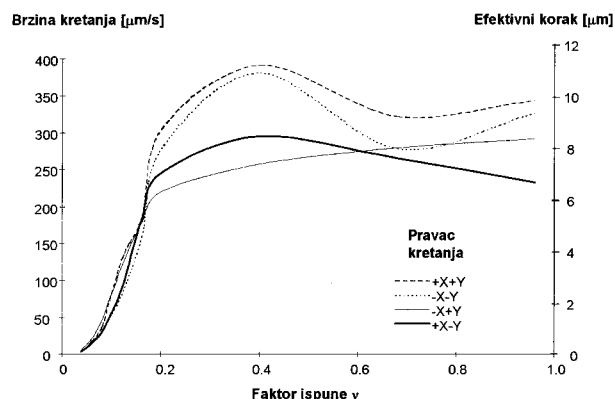
Na dijagramu sa Sl. 20 a) se jasno uočava oblast u kome brzina kretanja raste sa promenom frekvencije, a zatim oblast gde daljim povećavanjem frekvencije dolazi do smanjivanja brzine kretanja (šrafirana oblast). Na osnovu ovih rezultata za sva dalja merenja odabrana je frekvencija koraka  $f_{step} = 35Hz$ .

Na Sl. 21 je prikazan dijagram brzine i efektivnog koraka platforme u zavisnosti od faktora ispunje  $\nu$  za vrednosti napona napajanja  $U=100V$  i frekvencije koraka



Slika 21. Dijagram brzine i veličine efektivnog koraka platforme u zavisnosti od faktora ispunje  $\nu$  za  $f_{step} = 35Hz$  i  $U = 100V$  u direktnom načinu rada

Figure 21. Platform speed and effective step size versus duty cycle  $\nu$ , for voltage  $U = 100V$  and step frequency  $f_{step} = 35Hz$  in direct operation mode



Slika 22. Dijagram brzine i veličine efektivnog koraka platforme prilikom kretanja pod uglom od  $\pm 45^\circ$  u odnosu na x/y osu u zavisnosti od faktora ispunje  $v$  za  $f_{\text{step}} = 35\text{Hz}$  i  $U = 100\text{V}$  u direktnom načinu rada

Figure 22. Platform speed and platform effective step as a function of duty cycle  $v$  in case of motion along the direction of  $\pm 45$  and deg relative to x or y axis, for  $f_{\text{step}} = 35\text{Hz}$  and  $U = 100\text{V}$  in direct operation mode

platforme  $f_{\text{step}} = 35\text{Hz}$ . Oblik karakteristike podseća na vremenski dijagram punjenja kondenzatora u RC-kolu. To znači da je mehanizam proklizavanja nezavisan od faktora ispunje, i s druge strane, da i u slučaju kvazistatičkog režima rada važe zaključci koje su ranije izvedene za statički režim rada. Takođe, s obzirom na geometrijski oblik i simetriju platforme, jasno je da se moglo očekivati da su karakteristike pri kretanju u  $+x$  i  $-x$  kao i pri kretanju u  $+y$  i  $-y$  smeru vrlo slične.

Dobra linearnost i ujednačenost karakteristika u oblasti od  $v = 0$  do  $v = 0.2$  omogućava preciznu kontrolu veličine koraka i brzine kretanja platforme. Na Sl. 22 prikazan je dijagram zavisnosti brzine kretanja i veličine efektivnog koraka platforme od faktora ispunje  $v$  u

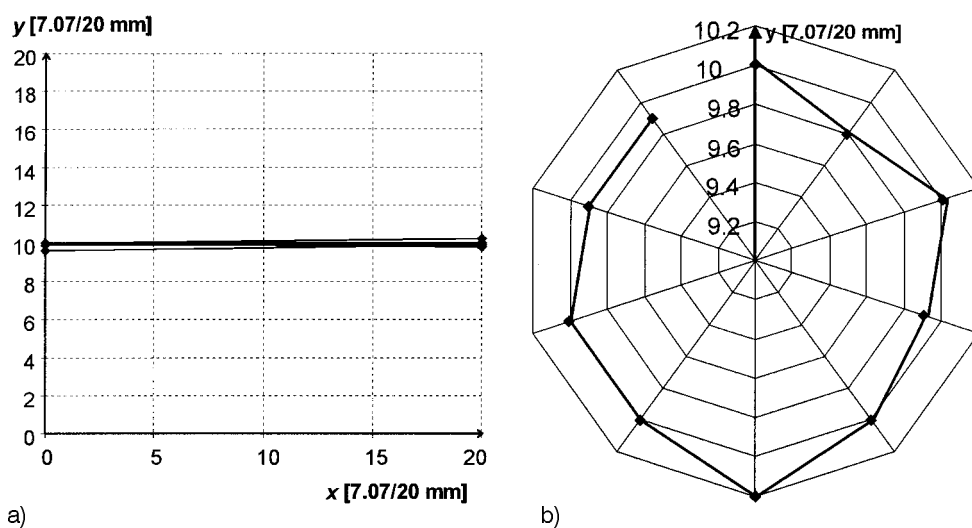
slučaju kretanja pod uglom  $\pm 45^\circ$  na x ili y osu kada se istovremeno dovode isti upravljački signali na dve susedne elektrode (jednu x i jednu y).

Oblik karakteristika je sličan kao u slučaju kretanja u pravcima kordinatnih osa, s tim da je veličina efektivnog koraka približno jednaka amplitudi vektorskog zbira koraka posebno u x i y smeru.

Ponovljivost kretanja platforme je proverena korišćenjem mikroskopa sa izbaždarenim mrežastim kordinatnim sistemom kao što je prikazano na Sl. 23 a. Posmatrano je kretanje markirane tačke na platformi prilikom kretanja u pravcu x ose. Kretanje platforme je pet puta ponovljeno od početka ( $x=0$ ) do kraja ( $x=20$ ) programirane putanje i nazad. Početna y kordinata markirane tačke je bila  $y = 10$  [7.07/20 mm]. Platforma je u jednom prelasku prešla razdaljinu od 7.07mm. Na Sl. 23 a) je prikazano stvarno kretanje markirane tačke u slučaju programiranog kretanja po x osi, a na Sl. 22b tzv. radar-dijagram kretanja. Na y-osi radar-dijagrama je prikazana stvarna vrednost y kordinate (odstupanje od željene pozicije) markirne tačke u toku. Ovakav prikaz rezultata omogućava veoma pregledan uvid u odstupanje kretanja od zahtevanog pravca.

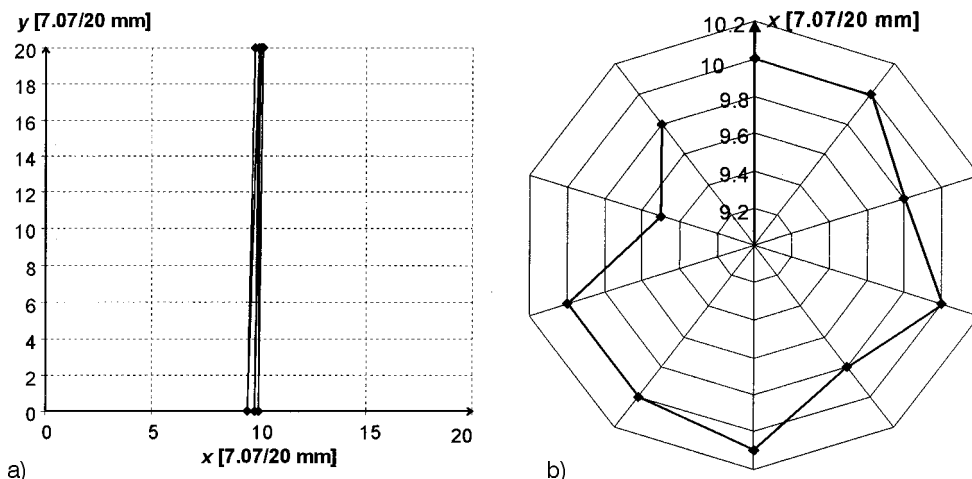
Sa Sl. 23 je očigledno da su odstupanja od zadatog smera kretanja u smeru x ose nakon nekoliko prolaza manja od 2%. Na Sl. 24 su prikazani istovetni dijagrami ali za slučaj kretanja po y-osi. Nakon pet prolaza, maksimalna relativna greška kretanja je 2.5%.

Testirana je i nosivost platforme, i utvrđeno je da ona može poneti koristan teret i do 220g. Pri tome se efektivni korak smanjuje srazmerno opterećenju, ali je kretanje platforme i dalje stabilno, ravnomerno i precizno. Na Sl. 25 je prikazana zavisnost brzine kretanja i veličine efektivnog koraka od napona napajanja i ukupne mase platforme za slučaj faktora ispunje  $v = 0.5$  i frekvencije kretanja  $f_{\text{step}} = 30\text{Hz}$ .



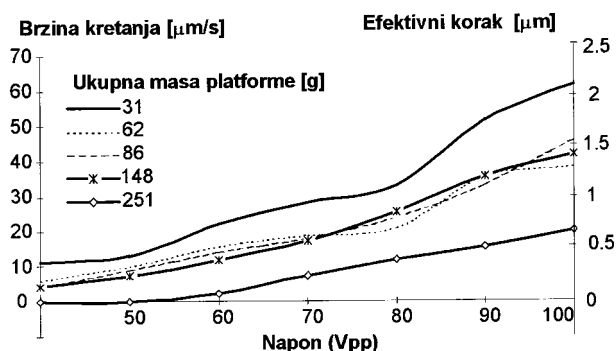
Slika 23. Eksperimentalni rezultati provere postojanosti kretanja u pravcu x ose a) kordinatni sistem mikroskopa i kretanje markirane tačke prilikom kretanja platforme, b) radar-dijagram odstupanja

Figure 23. Results of motion stability testing along x-axis: a) motion of the reference point in the coordinate frame of the microscope, b) radar-diagram of the position deviation after each pass



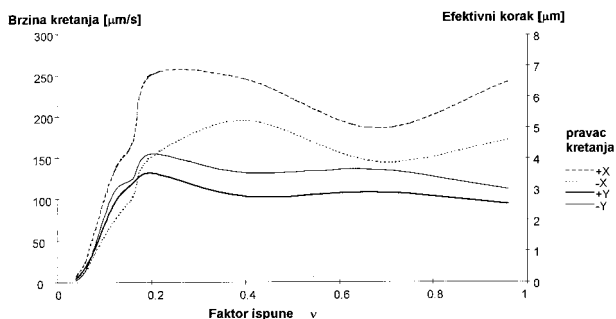
Slika 24. Eksperimentalni rezultati provere postojanosti kretanja u pravcu y ose a) koordinatni sistem mikroskopa i kretanje markirane tačke prilikom kretanja platforme, b) radar-dijagram odstupanja

Figure 24. Results of motion stability testing along the y-axis: a) motion of the reference point in the coordinate frame of the microscope, b) radar-diagram of the position deviation after each pass



Slika 25. Brzina i efektivni korak u zavisnosti od ukupne mase platforme i napona napajanja za slučaj frekvencije koraka  $f_{\text{step}} = 30\text{Hz}$

Figure 25. Platform speed and effective step size in the x direction as a function of applied peak voltage  $U$  for different masses and a step frequency of 30Hz



Slika 26. Dijagram brzine i veličine efektivnog koraka platforme u zavisnosti od faktora ispunje  $\nu$  za  $f_{\text{step}} = 35\text{Hz}$  i  $U = 100\text{V}$  u obrnutom načinu rada

Figure 26. Platform speed and effective step size versus duty cycle  $\nu$  for  $f_{\text{step}} = 35\text{Hz}$  and  $U = 100\text{V}$ , in reverse mode of operation

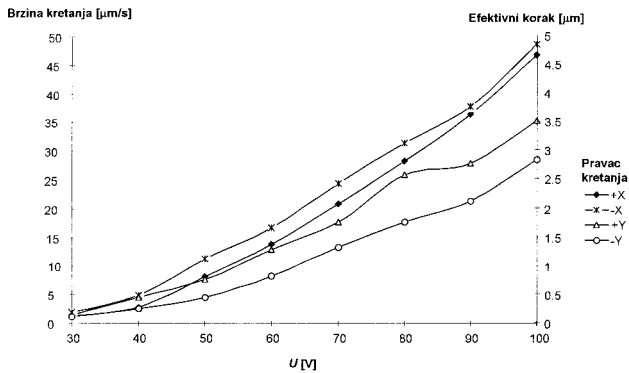
Dijagram na Sl. 26 prikazuje brzinu kretanja i veličine efektivnog koraka u zavisnosti od faktora ispunje platforme u obrnutom načinu rada (Sl. 6). Zaključci koje važe za direktan način rada, važe i u ovom slučaju. Najmanji korak pri kome je kretanje platforme stabilno i ravnomerno u oba slučaja iznosi oko  $0.5\ \mu\text{m}$ .

Za slučaj kretanja platforme u modu noga-po-noga usled drugačijeg mehanizma kretanja očekivana je mogućnost smanjenja koraka platforme. U ovom slučaju, zbog ograničenja primenjenih impulsnih kola, nije moguće kontrolisati brzinu kretanja platforme variranjem faktora ispunje, već se to izvodi promenom napona napajanja  $U$ . Da bi kretanje platforme bilo ravnomerno, svaka elektroda se mora naelektrirati do asimptotske vrednosti napona, odnosno do vrednosti  $U$ . Time je nametnuta i maksimalna frekvencija koraka pri kome se platforma još ravnomerno kreće:  $f_{\text{stepmax}} = 12\text{Hz}$ . U našim merenjima za vrednost frekvencije koraka korišćena je vrednost  $f_{\text{step}} = 10\text{Hz}$ .

Eksperimentalni rezultati prikazani na Sl. 27 potvrđuju pretpostavku o mogućnosti smanjivanja efektivnog koraka a samim tim i povećavanja rezolucije i preciznosti kretanja platforme. Platforma se stabilno i ravnomerno kreće i pri naponu napajanja od 30V, koraci ma od oko  $0.2\ \mu\text{m}$ .

Proverena je i ponovljivost kretanja platforme u modu noga-po-noga. Postupak merenja je bio identičan postupku provere ponovljivosti kretanja platforme u modu istovremenog ispravljanja nožica. Rezultati su takođe prikazani na Sl. 28–29, dijagramima istog tipa.

Sa ovih dijagrama je uočljivo, da je ponovljivost kretanja platforme u slučaju moda noga-po-noga slabija nego u slučaju moda istovremenog ispravljanja nožica. U slučaju kretanja po x-osi odstupanje od referentnog smera u jednom prolazu dostiže 5%, dok u slučaju kretanja po y osi 10%.

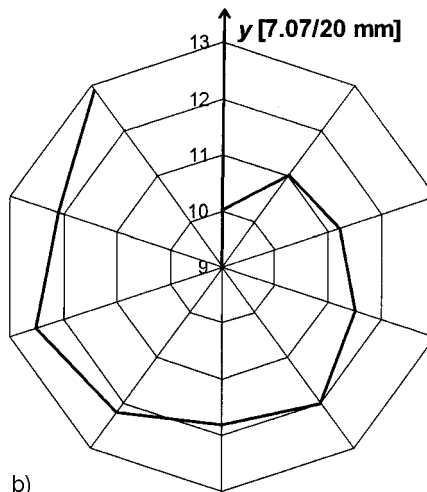
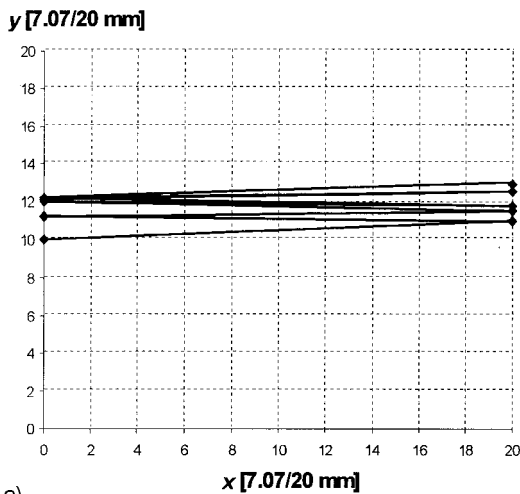


Slika 27. Dijagram brzine i efektivnog koraka platforme u zavisnosti od napona napajanja U za slučaj  $f_{step} = 10\text{Hz}$  u modu noga-po-noga

Figure 27. Platform speed and effective step size versus applied voltage U, for  $f_{step} = 10\text{Hz}$ , in leg-by-leg mode of operation

**ZAKLJUČAK**

Značajna novost kod naše platforme je veoma velika, teorijski beskonačna radna oblast sa zadržavanjem mikrometerske i submikrometerske rezolucije. Platforma se može koristiti u različitim režimima rada i može vršiti složeno kretanje po podlozi. Pored svoje osnovne funkcije – pozicioniranje objekta pod mikroskopom – postoji niz mogućih primena. U slučaju da se na platformu montira zašiljeno optičko vlakno, ona bi omogućila SNOM inspekciju (*scanning near-field optical microscopy*). S obzirom da realizovana platforma može poneti korisni teret i do 100g, na nju bi se mogla montirati hvatajka kojom bi se mogle prenositi pojedinačne ćelije ili pak ćelije iz kulture tkiva na veća rastojanja sa zadržavanjem mikrometerske rezolucije. Uz odgovarajući manipulator potencijalna primena platforme je u ubrzavanju

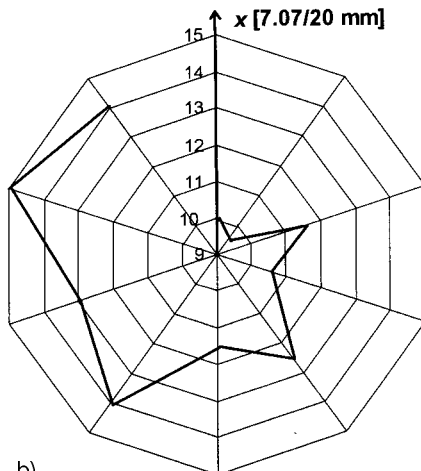
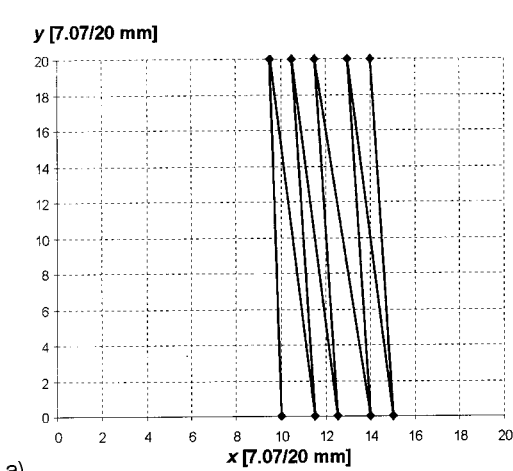


a)

b)

Slika 28. Eksperimentalni rezultati provere ponovljivosti kretanja u pravcu x ose u modu noga-po-noga a) kordinatni sistem mikroskopa i kretanje markirane tačke prilikom kretanja platforme, b) radar-dijagram odstupanja

Figure 28. Results of motion stability testing along the x-axis, in leg-by-leg mode of operation: a) motion of the reference point in the microscope coordinate frame, b) radar-diagram of the position deviation after each pass



a)

b)

Slika 29. Eksperimentalni rezultati provere postojanosti kretanja u pravcu y ose u modu noga-po-noga a) kordinatni sistem mikroskopa i kretanje markirane tačke prilikom kretanja platforme, b) radar-dijagram odstupanja

Figure 29. Results of motion stability testing along the y-axis in step-by-step mode of operation: a) motion of the reference point in the microscope coordinate frame, b) radar-diagram of the position deviation after each pass

neke supstance u živu ćeliju ili doziranje manje količine nekog reaktanta za niz reakcija koje se izvode u specifičnim uslovima i prostoru.

Eksperimentalni rezultati pokazuju, da uprkos jednostavnoj realizaciji platforme, preciznost pozicioniranja može biti i do 0.2  $\mu\text{m}$ . Još preciznije pozicioniranje bi se moglo ostvariti ako bi elektronika platforme posedovala i tzv. "strech"-mod rada. Radi se o tome, da nakon približavanja platforme cilju, istovetnim savijanjem svih nožica u određenom smeru određenom amplitudom se objekat na platformi može dodatno i vrlo precizno pozicionirati u okviru veličine jednog koraka. Savijanje nožica i zadržavanje u tom stanju se može postići postavljanjem konstantnih vrednosti napona na odgovarajuće x i y elektrode. Implementacija ovog moda zahteva dodatna, složena elektronska kola, ali u nekim primenama bi mogla biti od velike koristi.

## LITERATURA

- [1] Pasi Ojala, Tatsuo Arai, Tamio Tanikawa, "Kinematic analysis and motion control of a redundant micro manipulator", 2<sup>nd</sup> Japan-France Congress on Mechatronics, Nov. 1-3, Takamatsu, Japan, pp. 473-476
- [2] Pasi Ojala, Tatsuo Arai, Tamio Tanikawa, Heikki Koivo, "Motion optimization and control of the 7 D.O.F. micro manipulator", Scandinavian Symposium on Robotics, October 4-6, 1994, pp. 132-136
- [3] T. Arai, R. Larssonneur, Y. M. Jaya, "Calibration and basic motion of a micro hand module", Proc. of the IECON'93, Nov. 15-19, 1993, pp. 1660-1665
- [4] Tamio Tanikawa, Tatsuo Arai, Pasi Ojala, "Two-finger micro hand", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1995, pp. 1674-1679
- [5] PZT Fundamentals – Piezopositioning Technology, Physik Instrumente GmbH&Co., 1997.
- [6] Physikinstrumente – oficijalna prezentacija na Web-adresi: [www.physikinstrumente.com](http://www.physikinstrumente.com)
- [7] F. Claeysen, R. Le Letty, F. Barillot, N. Lhermet, "Piezoactive actuators for micro-positioning", Forum ADEMIS, 20-21 Nov 1997, CEDRAT Recherche, Zirst, F38246 Meylan CEDEX
- [8] Woo Sok Chang, Kamal Yuocef-Toumi, "Modeling of an omni-directional high precision friction drive positioning stage", Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, pp.175-180
- [9] Toshiro Higuchi, Yusof Hojjat, Masahiro Watanabe, "Micro actuators using recoil of an ejected mass", Proc of IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop, Massachusetts, Nov. 1987
- [10] Toshiro Higuchi, Yutaka Yamagata, "Precise positioning mechanism utilising rapid deformations of piezoelectric elements (2<sup>nd</sup> Report)", JSPE-58-10 '92-10-1759
- [11] T. Higuchi, Y. Yamagata, K. Furutani, K. Kudoh, "Precise positioning mechanism utilising rapid deformations of piezoelectric elements", IEEE Proc. on Micro Electro Mechanical Systems, Nappa Valley, California, 11-14 February 1990
- [12] Yutaka Yamagata, Toshiro Higuchi, "Micro motion mechanism using reactional force by rapid deformations of piezoelectric elements", 1<sup>st</sup> IFToMM Int. Micromechanism Symposium, Tokyo, June 1-3 1993
- [13] Toshiro Higuchi, Masahiro Watanabe, Kenichi Kudou, "Precise positioner utilising rapid deformations of a piezoelectric element", JSPE-54-11 '88-11-2107
- [14] J. Mendes, M. Nishimura, Y. Yamagata, T. Higuchi "3-DOF automatic printed board positioning system using impact drive mechanism", Proc. of the 11<sup>th</sup> Korea Automatic Control Conference, October 24-26, 1996
- [15] Arvid Bergander, Yutaka Yamagata, Toshiro Higuchi, "Application of the impact drive principle to the alignment of workpieces on rotating supports", Proc. of the 11<sup>th</sup> Korea Automatic Control Conference, October 24-26, 1996
- [16] J. Mendes, N. Nishimura, K. Tomizawa, Y. Yamagata, T. Higuchi, "Printed board positioning system using impact drive mechanism", SICE '96, July 24-26 Tottori
- [17] PZT Fundamentals – Piezopositioning Technology, Physik Instrumente GmbH&Co., 1999
- [18] Laslo Juhas, Tome Lozanovski, Nađa Adamović, Aleksandar Vujanić, Laslo Nađ, Branislav Borovac, "Ispitivanje mogućnosti realizacije piezo-platforme za mikropozicioniranje sa piezo-aktuatorima", XLII konferencija ETRAN, 1-5 jun, 1998
- [19] Laslo Juhas, "Platforma za mikropozicioniranje sa piezo-nožicama", Magistarski rad, Novi Sad, 1999

## SUMMARY

### MOVING PLATFORM FOR SAMPLE MICROPOSITIONING

(Scientific paper)

Laslo Juhas<sup>1</sup>, Siniša Markov<sup>1</sup>, Laslo Nađ<sup>2</sup>, Branislav Borovac<sup>2</sup>, Aleksandar Vujanić<sup>3</sup>, Nađa Adamović<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Technology, Novi Sad; <sup>2</sup>Faculty of Technical Sciences, Novi Sad;

<sup>3</sup>Institut Für Feinwerktechnik, Vienna, Austria

A new type of moving platform for micro positioning is described. The platform consists of a platform body mounted on three legs, made of piezo-tubes. The legs have no joints and motion is performed by slow bending and quick stretching of the legs. During the quick stretching phase the leg tips slip over the ground surface and the platform moves by a small increment. Repetition of this procedure results in a continuous motion. Although the platform design is very simple, it is possible to achieve various motion speeds and very precise positioning. By proper actuation of the legs it is possible to realise either translatory or complex planar motion. The test results of the realised prototype are encouraging and very promising.

Key words: Moving platform • Micropositioning • Motion • Translatory • Planar •

Ključne reči: pokretna platforma • mikro pozicioniranje • kretanje • translatorno • planarno •

**HEMIJSKA STABILNOST TROBAZNIH BARUTA**  
**CHEMICAL STABILITY OF TRIPLE BASE POWDERS**