

Koliko smo spremni za primenu nanotehnologije?

Dragan Z. Šaletić, Branislav V. Selić i Gyula Mester

”If you look at automata which have been built by men or which exist in nature, you very frequently notice that their structure is controlled to a much larger extent by the manner in which they might fail and by the (more or less effective) precautionary measures which have been taken against their failure.”

„Ako pogledate automate koje su sazdali ljudi ili one koji postoje u prirodi, vrlo često ćete uočiti da je njihova struktura u najvećoj meri uslovljena načinima na koje oni mogu da otkazu kao i (manje ili više uspešnim) preventivnim merama kojima se oni brane od toga.“

John von Neuman (*”Theory of Self-Reproducing Automata“*, 1956).

Sadržaj — U radu se razmatraju moguće posledice razvoja nanotehnologije. Prvo se bavimo stanjem u oblasti: pregled ukazuje na uticaje promene dimenzija na delovanje i opažanje u prostorima nano dimenzija. Potom se razmatra mogući budući razvoj. Ukazuje se na oblasti čiji rezultati bi se mogli koristiti u budućem razvoju nanotehnologije: nauku o materijalima, biotehnologiju, nanoelektroniku, i računarsku tehniku. Razmatraju se globalno, i sa aspekta regiona, problemi i mogućnosti razvoja nanorobotike.

Ključne reči — agent, inteligentni sistemi, meko računarstvo, nanorobotika, nanotehnologije, računarstvo, rasplinuti sistemi

D. Z. Šaletić, član *IEEE*, Računarski fakultet, Beograd, Srbija (telefon: 381-11-2627613; faks: 381-11-2623287; e-mail: dsaletic@raf.edu.rs).

B. V. Selic, member *ACM*, Malina Software Corp., and University of Toronto, Canada, (e-mail: selic@acm.org)

G. Mester, University of Szeged, Szeged, Hungary; (e-mail: gmester@inf.u-szeged.hu).

I. UVOD

NANOTEHNOLOGIJA se bavi proučavanjem materije na atomskim i molekularnim nivoima dimenzija, obično 100 nm ili manjim, i obuhvata i pravljenje naprava tih dimenzija. U okviru nanotehnologija uočljiv je i razvoj nanorobotike, oblasti koja se bavi proučavanjem robota koji deluju u prostoru nanometarskih dimenzija ($10^{-9} m$), [1], [2], [3], [4]. Oblast naučnih istraživanja – nanorobotika, postoji. Postoje li nanoroboti? Ne! Postavlja se pitanje: da li je ono što postoji u okviru nanorobotike samo nanotehnologija, ili su tu prisutne i teme koje se razmatraju u oblastima računarske tehnike, inteligentnih sistema i robotike? Da li razmatranja tih tema, ako postoje, vodi ka novim oblicima računarstva, radikalno novim tehnologijama? Ako je odgovor potvrđan, mogu li se sagledati problemi i mogućnosti ovog toka razvoja? U ovom, radu, pokušavamo da odgovorimo na ova pitanje.

Postoji trend u razvoju tehnike i tehnologije ka upravljanju strukturom materije: pokušava se sa ostvarivanjem kontrole nad molekularnom strukturom materije, atom po atom, kao što je predložio *Richard Feynman* [Fajnmn] 1959. u svom proročanskom članku [5] o minijaturizaciji,

„Ono o čemu ja želim da pričam je problem tretiranja i upravljanja stvarima u prostorima malih dimenzija ... Ne plašim se da razmotrim konačno pitanje kao što je da li, na kraju – u nekoj velikoj budućnosti – možemo urediti atome na način na koji mi želimo: same atome, skroz, u tom prostoru!”

Oblast nanorobotike se razvija od prvih ideja 1960-tih i 1970-tih godina ka njihovim ostvarivanju kroz prve mikromehaničke sisteme iz 1980-tih godina. Danas, mnogi mikrorobotski sistemi ostvaruju nove primene: montažu, inspekciju, održavanje, mikrooptiku, u raznim oblastima. Nanorobotika je korak u minijaturizaciji pokretnih autonomnih objekata nanodimenzija, koji sledi posle mikrorobotike.

Kako ulazimo u 21. vek, očekuje se da uticaj nanotehnologije na zdravlje, ekonomsko stanje, i bezbednost čoveka bude bar toliko značajan, kao što su to bili u 20. veku kombinovani uticaji antibiotika, integrisanih kola, i polimera koje je napravio čovek.

Na primer, *N. Lane* je 1998. tvrdio, [4]:

„Kad bi nas neko zapitao koja je to oblast nauke i tehnike koja će najverovatnije generisati prodore ka sutrašnjici, ja bih ukazao na nauku i tehniku o nanoprostoru”.

Velike naučne i tehnološke mogućnosti koje nudi nanotehnologija podstakle su široka istraživanja nanosveta i inicirale se konkurentne napore na svetskoj sceni [6], koji su dodatno podstaknuti objavljivanjem dokumenta *National Nanotechnology Initiative* (Nacionalna nanotehnološka inicijativa) u SAD 2000. godine, [7].

U ovom radu razmatramo najnovija dostignuća nanotehnologije, na osnovu literature, ukazujemo na oblasti čiji rezultati bi se mogli koristiti u budućem razvoju nanorobotike, dajemo naša sagledavanja mogućnosti razvoja nanorobotike u našem regionu, i ukazujemo na moguće probleme razvoja nanorobotike u globalnom smislu.

II. NANOROBOTIKA

Nanorobotika obuhvata robote čije veličine su izražene nanodimenzijama, nanorobote. Nanorobotika se bavi i velikim robotima koji su sposobni da manipulišu objektima nanometarskih dimenzija, sa nanometarskom rezolucijom. Takvi veliki roboti poznati su kao nanomanipulatori [3]. Nanorobotika se bavi procesima nanoproizvodnje nanorobota, nanoaktuatora, nanosenzora, i fizičkim modeliranjem u prostorima nanodimenzija. Važna komponenta nanorobotike bavi se tehnologijama nanorobotske manipulacije: montažom nanodelova, manipulisanjem biološkim ćelijama ili molekulima, i tipovima robota koji se mogu koristiti u izvršavanju ovih zadataka.

Naučna i tehnološka očekivanja od nanotehnologije stimulisala su opsežna istraživanja nanosveta, i javila se dobra istraživačka konkurencija. Očekuje se da će nanomanipulacija omogućiti direktno sklapanje molekula ili supermolekula radi gradnje većih nanostrukture, što u krajnjem može voditi i samosklapanju u nanomašinama. Nanorobotska manipulacija je osnova konstruisanja nanouređaja strukturiranjem materijala radi izgradnje gradivnih blokova, i sklapanjem tih gradivnih blokova u složenije sisteme.

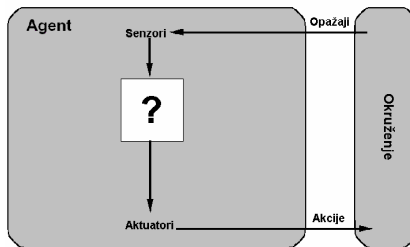
Koji će oblik imati budući nanoroboti, još uvek nije jasno. Nisu jasni ni zadaci koje će ti nanoroboti izvršavati. Uprkos tome, nanorobotika se razvija u pravcu konstruisanja inteligentnih senzora, aktuatora, i sistema manjih od 100 nm. Inteligentni senzori, aktuatori i sistemi tih dimenzija nazivaju se nanoelektromehaničkim sistemima (NEMS). Uređaji ovih dimenzija nude mnoge fascinantne mogućnosti: manipulisanje nanoobjektima korišćenjem nanoalata, merenja mase u femtogram (10^{-15}) opsezima, opažanja sile pikonjtn (10^{-12}) veličina, gigahercno kretanje, i druge. Ove, i druge još neuočene mogućnosti utiće na zadatke, koje će izvršavati budući nanoroboti. Razvoj treba da omogući robotske manipulatore nanodimenzija i druge oblike nanorobota, odnosno formiranje oblasti nanorobotike, [3].

III. DELOVANJE I OPAŽANJE U PROSTORIMA NANODIMENZIIJA

Fizika u prostorima nano dimenzija je u nekim apsektima potpuno različita od fizike u prostoru makro dimenzija. Savremena fizika obuhvata kvantnu mehaniku kao oblast koja opisuje materiju u nanometarskom prostoru. Valja ukazati na činjenicu da se broj atoma prilagođava promenama dimenzija sa L^3 . Ako tranzistor u mikronskom prostoru dimenzija sadrži 10^{12} atoma, onda, na nanometarskoj skali, $L'/L = 10^{-3}$ će sadržati 1000 atoma, verovatno isuviše malo da bi tranzistor sačuvao svoju funkciju, [2], [4]. Uprkos ovim izazovima, mnogi važni problemi u nanofizici su rešeni. Među njima su delimično i problemi nanoaktuatora, važni zbog toga što se na osnovu njih uglavnom određuje položaj nanorobota i nanorobotskih manipulatora. Rešenja problema nanoaktuatora za nanorobote su istraživačka rešenja, relativno daleko od praktične realizacije. Vrš se istraživanja i kretanja sa nanometarskom rezolucijom.

Saopšteni rezultati istraživanja pokazuju da će apstrakcija, koju će nanoroboti realizovati, počivati na inteligentnom agentu koji prima informacije od okruženja preko svojih senzora (nanosenzora), i koji deluje na okruženje svojim aktuatorima (nanoaktuatorima), Sl. 1.

Poželjno je da nanoaktuatori za nanorobotske manipulacije imaju sledeće osobine: 1) nanorezoluciju, 2) kompaktnost, 3) mogućnost generisanja jakih udaraca i velikih sila.



Slika 1. Opšta blok šema inteligentnog agenta.

Elektrostatika, elektromagnetika i piezoelektrični efekti su najčešći načini za realizaciju delovanja u prostorima nanodimenzija, ali se koriste i drugi: termomehanički, na osnovu promene faze, memorije oblička, magnetnostriktivni, i drugi, [3].

Opazanje u prostorima nanodimenzija uglavnom je povezano sa alatima viđenja. Uobičajeni alati viđenja koji se koriste u istraživanju u mikro- i nanorobotici, obuhvataju optičku, elektronsku i mikroskopiju sa skenirajućim sondama.

Prilikom izbora odgovarajućeg alata za prikupljanje slikovnih/opažajnih podataka u prostorima mikro- i nano- dimenzija, prvo se razmatraju sledeći faktori:

1. Uzorak: veličina, provodljivost, i kompatibilnost sa okruženjem.
2. Rezolucija: sposobnost viđenja finih detalja probnog uzorka.
3. Dubina polja: oblast dubine za koju je probni uzorak u prihvatljivom fokusu.
4. Kontrast: odnos između tamnog i svetlog.
5. Osvetljaj: količina svetlosti.

Glavni alati viđenja su optički (svetlosni) mikroskopi, koji su ušli u digitalnu eru. Za nanoopazanje aktuelni su metodi mašinskog viđenja.

IV. NANOMANIPULATORI

Nanomanipulacija, ili poziciono i/ili upravljanje silom u prostorima nanometarskih dimenzija, je ključna tehnologija, koja omogućava nanotehnologiju, i može voditi ka pojavi molekularnih asemblera (sastavljača) zasnovanih na kopiranju (*replication-based*), [3]. Ovi tipovi asemblera predloženi su kao proizvodne mašine opšte namene za proizvodnju širokog opsega korisnih proizvoda, kao i za kopiranje samih sebe (samokopiranje, *self-replication*).

U ovom trenutku, nanomanipulacija se može primeniti na naučna ispitivanja mezoskopskih fizičkih fenomena, (mezoskopska skala je dužinska skala na kojoj se može prihvatljivo razmatrati svojstvo materijala ili pojave bez razmatranja pojedinih atoma, a koncepti u srednjem, kao što su gustina i temperatura su od koristi. Za čvrsta tela i tečnosti ovo je obično nekoliko do deset nanometara i uključuje usrednjavanje nad nekoliko hiljada atoma ili molekula. Prema tome mezoskopska skala je grubo identična nanoskopskoj skali za većinu čvrstih tela.) u biologiji, i u konstrukciji prototipa nanouređaja. Nanomanipulacija je fundamentalna tehnologija za opisivanje osobina nanomaterijala, nanostruktura, i nanomehanizama, za pripremu gradivnih blokova nanodimenzija, i za sklapanje nanouređaja kao što su NEMS.

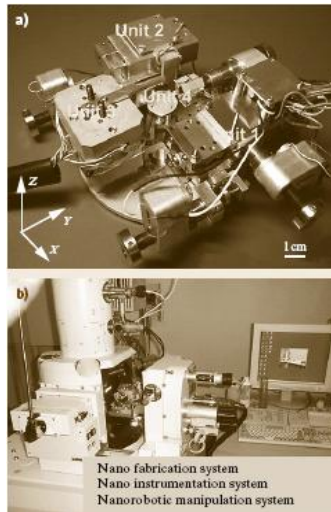
Nanorobotske manipulatore (NRMe) karakteriše sposobnost 3-D pozicioniranja, upravljanja orijentacijom, nezavisno pobuđivani višestruki krajnji efektori, i nezavisan sistem posmatranja u realnom vremenu.

Nanorobotski manipulatori imaju dve funkcije: opažanje i manipulaciju. Ako se te funkcije razdvoje, NRMi mogu imati znatno više stepeni slobode.

Nanomanipulacioni sistemi u opštem slučaju obuhvataju nanomanipulatore u ulozi uređaja za pozicioniranje, mikroskope kao *oči*, razne krajnje efektore, (izvršne delove), među kojima su i sonde i pincete, kao *prste* sistema, i razne tipove senzora (sile, pomeraja, taktilne, naprezanja, i tako dalje) za omogućavanje manipulacije i/ili određivanje svojstava objekata. Ključne tehnologije za nanomanipulaciju obuhvataju posmatranje, delovanje, merenje, projektovanje sistema i proizvodnju, kalibraciju i upravljanje, komunikaciju, i sprežnik (*interface*) čovek-mašina.

Nanorobotski manipulatori predstavljaju suštinske komponente nanorobotskih manipulacionih sistema.

Na Sl. 2.a) , [4], prikazan je nanorobotski manipulacioni sistem sa 16 stepeni slobode, sa mogućnošću dodavanja dodatne opreme.



Slika 2 Nanorobotski sistem. a) Nanorobotski manipulatori.
b) Nanolaboratorija.

Nanolaboratorija je prikazana na Sl. 2.b). U nanolaboratoriju su integrisani nanorobotski sistem manipulacije, nanoanalitički sistem i sistem nanoproizvodnje.

V. NANOROBOTSKI UREĐAJI

Nanorobotski uređaji obuhvataju alate, senzore, i aktuatore nanometarskih dimenzija.

Veliki broj raznih istraživača nezavisno istražuje strategije proizvodnje ovakvih nanouređaja i obuhvataju tehnike kao što su nanolitografija, nanoutiskivanje, i hemijsko nagrizanje, te takve metode kao što su samo-sklapanje, *dip-pen* litografija, i usmereno samo-sklapanje. Ovi metodi mogu masovno generisati pravilne nanooblike. Sa sposobnošću pozicioniranja i orijentisanja objekata nanodimenzija, nanorobotska manipulacija omogućava tehnologiju za strukturiranje, karakterisanje i sklapanje mnogih tipova nanosistema.

Ispituju se nanotehnološki prototipovi molekularnih mašina, [8]. Korišćenjem nanotehnoloških metoda, novih rezultata u genetičkom i biomolekularnom računarstvu, biološki nanoroboti mogu se primeniti za ostvarivanje naprednih medicinskih rezultata, [9].

VI. NOVI OBLICI RAČUNARA

Murov (*Moore*) zakon (po *Gordonu E. Mooreu* suosnivaču *Intela*) opisuje dugotrajni trend prisutan u istoriji razvoja računarskog hardvera. Od pronalaska integrisanog kola 1958. godine, broj tranzistora koji se mogu smestiti bez velikih troškova na integrirano kolo raste eksponencijalno, duplirajući se približno svake dve godine, [10]. Ovaj trend se održava već pola veka, a 2005 je procenjeno da se ne očekuje da će se okončati za bar sledećih 10 godina. Ali, *Intel* je već sišao na dimenzije zbog kojih se sagledava da će se ovaj trend okončati u sagledivoj budućnosti. Rekli smo, ako tranzistor u mikronskom prostoru dimenzija sadrži 10^{12} atoma, onda, na nanometarskoj skali, $L/L = 10^{-3}$ će sadržati 1000 atoma, verovatno isuviše malo da bi tranzistor sačuvao svoju funkciju,. Zbog navedenog, i razvoja nanorobotike, posle četrdeset godina minijaturizacije koja omogućava napredak u performansama, troškovima, efikasnosti potrošnje energije i veličini, javljaju se novi zahtevi u pogledu poboljšavanja performansi. Iz oblasti nanorobotike dolaze zahtevi u pogledu smanjivanja dimenzija do nanoprostora, smanjivanja potrošnje energije po operaciji, uz očuvanje integriteta podataka. U tom kontekstu potrebno je istraživanje radikalno novih pristupa računarstvu, zasnovanih, kako izgleda, na kvantnoj fizici i biologiji.

Kvantni računar je računarski uređaj koji direktno koristi fenomene kvantne fizike, kao što su superpozicija i međusobni uticaji, za izvođenje operacija nad podacima. Osnovni princip kvantnog računarstva je da se kvantna svojstva mogu upotrebiti za predstavljanje podataka i obavljanje operacija nad tim podacima.

Iako je kvantno računarstvo u početnom stadijumu razvoja, vršeni su eksperimenti u kojima su obavljene kvantno-računarske operacije na veoma malom broju kubita (*qubit-quantum binary digit*). To je uslovalo nastavak i praktičnih i teorijskih istraživanja ka razvoju kvantnih računara, različitih od tradicionalnih računara zasnovanih na tranzistorima, ili od DNA računara.

Rezultati u oblasti biomolekularnog računarstva pokazuju izvodivost bioračunara, [11], što predstavlja prvi korak na putu ka budućim nanoprocessorima te vrste.

VII. ZAKLJUČAK

Da odgovorimo na pitanja, koja smo postavili u početku: da li je ono što postoji u okviru nanorobotike samo nanotehnologija, ili su tu prisutne i teme koje se razmatraju u oblastima računarske tehnike, inteligentnih sistema i robotike? Da li razmatranja tih tema, ako su prisutne, vodi ka novim oblicima računarstva, radikalno novim tehnologijama? Ako je odgovor potvrđan, mogu li se sagledati problemi i mogućnosti ovog toka razvoja?

Ono što postoji u okviru oblasti nanorobotike je nanotehnologija. Ta nanotehnologija je u obliku koji je sličan onome u kome je postojala makrotehnologija sredinom 20. veka, obliku koji je bio osnova za pojavu računara. Dakle, može se očekivati i razvoj računara u obliku koji će podržati nanorobotiku, u radikalno novom obliku. Novi oblici računara se očekuju ne samo zbog zahteva nanorobotike, već i zato što se Murov zakon približava svom dimenzionalnom kraju: valja razmatrati ono što sledi posle oblasti važenja Murovog zakona.

Oblik budućih nanorobota i zadaci koji će oni obavljati još uvek nisu sasvim jasni. Očigledno je da će apstrakcija koju će oni realizovati počivati na inteligentnom agentu koji prima informacije od okruženja preko svojih senzora (nanosenzora), i koji deluje na okruženje svojim aktuatorima (nanoaktuatorima). Uz teoriju inteligentnih agenata, sagledava se potreba za novim kvantnim algoritmima, novim računarskim paradigmama, možda sa obradama neizvesnosti, [12], novim komunikacionim protokolima. Čini se da će raspliniti pristup, na primer [13], zadržati aktuelnost i u ovom kontekstu. Traže se i radikalno nove tehnike obrade informacija zasnovane na biohemiji. Izgleda ipak da je kvantno računarstvo kako bliži, tako i (zbog dimenzija) realniji put.

Mišljenja smo da je fascinantna oblast nanorobotike van domašaja mogućnosti našeg regiona, bar u ovom trenutku. Ono o čemu bi možda valjalo u regionu razmišljati su oblasti primene nanorobota. Možda možemo razmišljati o doprinosu razvoju nanorobota razmatrajući interakciju i opažanja nanorobota.

Rezultati istraživanja su veoma ohrabrujući. Složeniji nanoroboti mogu dati znatan doprinos oblasti zdravstvene zaštite. Nauka o nanomaterijalima, bio-nanotehnologija, nanoelektronika i računarstvo, svemirske i vojne tehnologije će dobiti razvojem nanorobotike. Korišćenjem metoda nanotehnologije i razvoja genetskog i biomolekularnog računarstva, i biološki nanoroboti moći će da se primene za unapređivanje medicine. Noviji razvoj biomolekularnog računarstva pokazuje izvodivost bioračunara, što je pak prvi korak ka realizaciji te vrste nanoprocesora.

Da li se nanorobotika razlikuje od svojih prethodnika iz oblasti robotike samo u pogledu srazmere i tehnologije kojom se realizuje? Poznavaoi dijalektike su upoznati sa principom da promena u kvantitetu može da dovede do promena u kvalitetu (svojstvu). U kojoj meri je taj princip zastupljen i u ovom slučaju? To jest, da li postoji mogućnost da će toliko minijaturizovane dimenzije, po kojima se nanotehnologija razlikuje od svojih tehnoloških predaka, prouzrokovati neke dosad neuočene ili neočekivane pojave?

Svakako, najočiglednija od svojstvenih karakteristika nanouređaja jeste da mogu da budu tako sitni da su praktično nevidljivi za ljudsko oko, pa i za druga naša čula. Drugim rečima, nanomašine mogu da deluju oko nas, ili čak u nama, a da toga nismo ni svesni. Uzgred, ovo je i jedna od najviše očekivanih prednosti ove tehnologije. Na primer, ozbiljno se razmišlja o mogućnostima ubrizgavanja specijalnih nanorobota u telo, gde će da pronalaze i uništavaju maligne ćelije raka, viruse ili nataložene holesterolske nanose.

Drugo svojstvo nanotehnologije jeste mogućnost mnogobrojnosti, pogotovu ako se uzme u obzir potencijal nekih nanorobota da se samo-razmnožavaju. Kao termiti koji su pojedinačno slabi, ali vrlo efektivni kada deluju u mnoštvu, tako i rojevi nanorobota mogu imati dejstvo, koje znatno prevazilazi njihove pojedinačne minijaturne dimenzije.

Nije potrebno neko dublje razmišljanje da se sagledaju i potencijalne opasnosti koje se kriju iza toga, polazeći od tehnoloških kvarova ili projektantskih propusta do zloupotrebe. Kao što nam je već opšte iskustvo sa računarskom tehnologijom pokazalo, teško je predvideti sve moguće posledice uvođenja radikalno novih tehnologija u društvo. Nema sumnje da su računari i prateća telekomunikaciona tehnika transformisali savremeno društvo donoseći nam mnoge pogodnosti i blagodeti. No, isto tako, te su tehnologije prouzrokovale i ozbiljne nepoželjne efekte, kao što su olakšani krađa ili falsifikovanje poverljivih podataka, računarski virusi, masovni prodor pornografije, gubitak informacija, i tome slično.

Rešenje za ovakve potencijalne probleme svakako nije u tome da se koči ili spreči dalji razvoj nanotehnologije—između ostalog zato što je tako nešto

neizvodljivo sprovesti u praksi—već da se razvoj usmerava u pozitivnom pravcu. U konkretnom slučaju tehnologije, važno je da se istovremeno sa razvojem nanotehnologije obavljaju i ozbiljna i obimna istraživanja o punom dijapazonu potencijalnih društveno negativnih posledica nanotehnologije, bez obzira na nesagledivost celokupnog obima takvih mogućnosti. Značajna komponenta takvih istraživanja mora biti izučavanje i razvijanje metoda i tehnologija koje će ili sprečiti ili makar otežati nepoželjne posledice. Paralelno sa tim, svakako je potrebno da tehnički stručnjaci učestvuju u definisanju pravnih normi i zakona kojima će se regulisati budući razvoj i primena nanotehnologije.

Sa tehničkog gledišta, oblast koja je izuzetno relevantne za ove aspekte nanotehnologije jeste teorija upravljanja, naročito metode upravljanja raspodeljenim sistemima. Sa softverskog stanovišta, vrlo značajne izgledaju formalne metode zasnovane na matematičkoj logici, koje bi omogućavale da se formulišu pravila koja sprečavaju dovođenje sistema u nepoželjna i opasna stanja. Takođe je potrebno ispitati primenljivost metoda koje su do sada korišćene u sigurnosno-kritičnim ("safety-critical") softverskim sistemima kao što su autopiloti, medicinski uređaji, ili sistemi za upravljanje nuklearnim centralama. Takođe su potrebni novi namenski softverski jezici višeg reda, kao i odgovarajući razvojni alati, koji bi služili za programiranje takvih sistema, a koji bi bili prilagodjeni za formalne matematičke analize za proveru ispravnosti.

Na kraju, rešavanje problema upravljanja nanotehnologijom, da bi se izbegle zloupotrebe ili nesreće, mora biti sastavni i neodvojivi deo svakog istraživanja u ovoj oblasti. To nije samo tehnička, već i moralna obaveza svakog naučno-tehničkog istraživača.

LITERATURA

- [1] G. Mester, "Introduction to Micro- and Nanorobotic Engineering", *Proceedings of the 27th Scientific Electrotechnical Conference "Science in Practice", SIP* 2009, pp. 1-4, Pécs, Hungary, February 26-27, 2009.
- [2] D. Z. Šaletić, G. Mester, "Nanorobots- State of the Art", *Zbornik radova XV simpozijuma YuInfo* 2009, pp. 1-5, Kopaonik, Srbija, 8.-11. mart 2009., ISBN 978-86-85525-04-9, 143.pdf (6 strana) 2009.
- [3] D. Z. Šaletić, G. Mester, „Nanoroboti – čime raspoložemo, a šta nam još treba da bismo ih realizovali?“, Lj. Papić, ur., *Zbornik radova 12. Međunarodne konferencije Upravljanje kvalitetom i pouzdanošću*, ICDQM-2009, jun 2009., Beograd, Srbija, Istraživački centar za upravljanje kvalitetom i pouzdanošću, DQM, Čačak, str. 859-866
- [4] B. J. Nelson, L.Dong, F. Arai, "Micro/Nanorobots", in: Siciliano, B., O. Khatib, (ed.s) *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag, New York, 2008
- [5] R.P. Feynman: "There's plenty of room at the bottom", *Caltech Eng. Sci.* **23**, 22–36 (1960)

- [6] ICT – *Information and Communication Technologies*, Work Programme 2009-2010 (<http://cordis.europa.eu/fp7/ict/>)
- [7] M.L. Downey, D.T. Moore, G.R. Bachula, D.M. Etter, E.F. Carey, L.A. Perine: *National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution, A Report by Interagency Working Group on NanoScience, Engineering and Technology* (Committee on Technology, National Science and Technology Council, Washington 2000)
- [8] I. Shimoyama: "Scaling in microrobots", *Proc. IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems (IEEE, Piscataway 1995)* pp. 208–211
- [9] A. Cavalcanti, B. Shirinzadeh, R. A. Freitas Jr., T. Hogg, "Nanorobot Architecture for Medical Target Identification", *Nanotechnology, IOP*, Vol. 19, no. 1, 015103 (15pp), January 2008.
- [10] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics Magazine* 19 April 1965
- [11] A. Ummat, Sharma G., Mavroidis C., Dubey A., "Bio-Nanorobotics: State of the Art and Future Challenges", 2005
- [12] D. Z. Šaletić, "On Further Development of Soft Computing, Some Trends in Computational Intelligence", Ed. Anikó Szakál *Proceedings of the 4th Serbian-Hungarian Joint Symposium on Intelligent Systems, SISY 2006, Septembar 29-30 2006, Subotica, Serbia*, pp. 319-328
- [13] G. Mester, "Improving the Mobile Robot Control in Unknown Environments", *Zbornik radova XIII simpozijuma o računarskim naukama i informacionim tehnologijama na CD-u, YUiINFO 2007, Kopaonik, 11-14.03.2007.*, pp. 168.pdf

ABSTRACT

In the paper the impacts of development of nanotechnology are discussed. The overview outlines scaling effects on actuation, and sensing at nano scale. Then, a possible future development is considered. Some scientific areas that offer useful results for future development of nanorobotics. are pointed out: material science, biotechnology, nanoelectronics, and computer engineering. The problems and possibilities of developing of nanorobotics at our region, as well as globally, are considered also .

ARE WE READY FOR NANOTECHNOLOGY?

Dragan Z. Šaletić, *Member, IEEE*, Branislav V. Selić, *Member, ACM*, and Gyula Mester