

Razvoj vibracijskega rotacijskega mikromotorja v tekočini

Božidar Bratina¹, Álvaro Baines García², Matjaž Petek¹, Suzana Uran¹, Riko Šafarič¹

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

²Public University of Navarre, Campus de Arrosadia, 31006 Pamplona, Navarra, Španija

E-pošta: bozidar.bratina@um.si

Abstract.

The paper presents a micromotor development based on vibration-induced rotation flow in a fluid, where a rotational velocity of the fluid which rotates the object (rotor) is obtained by external vibrations. Two types of fluidic motors are presented, firstly a micro sized motor as a microstructure consisting of four pillars (stator) and a hexagon ring made of glass micro-spheres (rotor). And secondly a submillimetre sized motor with rotating disk on the surface of the fluid in a pot. The paper explains calculations of the micro-motor design, and use of van der Waals and capillary force methods to build microstructures. The results confirm the vibration-induced rotation flow around pillars, where carefully designed pillar structure enables equilibrium point inside the pillars for micro rotor rotation. Several microstructure designs under different induced vibrations were tested. Both micro sized and submillimetre sized motor designed with different rotors (disk, ring and axis mounted ring) were tested and successfully rotated.

1 Uvod

Sestavni del vsakega robota predstavljajo aktuatorji, pogosto elektromotorji, ki skrbijo za linearno ali rotacijsko premikanje robotskih delov. Trendi s področij biomedicine in nanotehnologij se kažejo v integraciji raznih miniaturnih robotskih sistemov, ki bi omogočali manipulacije na mikronivoju (gradnja mikrostruktur, ciljno doziranje zdravil, itd). Miniaturizacija oblik robotov pa zaradi velikosti sestavnih delov ter principov delovanja pogonskih sklopov (virov energije) ni enostavna. Elektromagnetne sile v mikrosvetu niso nujno prevladujoče ter je posledično potrebno izkoriščati druge sile za delovanje. Današnji mikro in nanopogoni temeljijo na mehanskih ali kemijskih principih. Takšni motorji se že uporabljajo v praksi (Piezo) za translatorska in omejena rotacijska gibanja, razne eksotične izvedbe pa služijo bolj kot dokaz delovanje in so v praksi še neuporabne. [1, 2] Mikromotor, ki bi deloval podobno kot elektromotor (vrtenje z možnostjo vodenja vrtiljajev) pa v mikrosvetu ni enostavno zgraditi zaradi miniaturne zgradbe in vplivov različnih sil na objekte.

V prispevku je predstavljen razvoj in izgradnja mikromotorja s funkcijo vrtenja osi s pomočjo zunanjih induciranih vibracij. Takšni mikromotorji so lahko aplikativno uporabljeni kot črpalke na področju mikrofluidike, pogonski stroji, itd. V nadaljevanju je opisan razvoj mikromotorja, kjer vrtenje rotorja v tekočini temelji na vrtečem se pretoku tekočine, ki ga

ustvarjajo umetne vibracije okoli ali znotraj pritrjenih mikroobjektov. [3, 4] Opisan je princip delovanja in razvoj mikrostrukture motorja v tekočini, ter opis potrebne vibracijske naprave. V tretjem poglavju sledi prikaz testiranja vrtenja tekočine okrog pritrjenih mikroobjektov, mikroobjektov okrog mikrostruktur in znotraj mikrostrukture, v tekočini zaradi induciranih vibracij. Prispevek zaključujemo s prikazom razvoja motorja v lončku na submilimetrskem nivoju, kjer je kot rotor uporabljen disk, obroč in obroč nataknen na os, ki se vrti na površini tekočine. Prikazani rezultati potrjujejo osnovni princip delovanja razvitih mikromotorjev z vrtenjem v ali na površini tekočine.

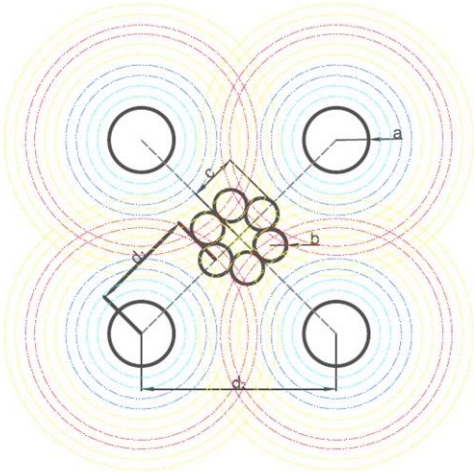
2 Vibracijski rotacijski mikromotor v tekočini

Dandanes je z mikroobjekti že možno zgraditi mikrostrukture. Predstavljene metode z uporabo van der Waalsovih [5] ali kapilarnih sil [6] omogočajo relativno hitro izgradnjo, končno lepljenje ali sintranje pa utrdi mikrostrukture (zobnik, os, ležaj, itd), da so primerne za uporabo v različnih aplikacijah. Te enostavne strojne gradnike je mogoče sestaviti v reduktor ali kakšen bolj kompleksen gibajoč mehanski mikrostroj. Za pogon je seveda potrebno energija in njen prenos, kjer smo se osredotočili na princip vrtenja mikroobjekta (mikromotor) s pomočjo vibracij v ustreznih atmosferskih pogojih. Vibracije namreč vzbudijo pretok tekočine tankega filma na površini mikroobjekta, le-ta pa s kapilarnim principom posledično vrtenje mikroobjekta. Takšno primitivno in nekontrolirano vrtenje steklene kroglice, smo omejili in nadgradili z valjasto obliko rotorja, ki se lahko vrti le v smeri vzdolžne osi. Zaradi nezadovoljivega vrtenja zaradi vpliva težnosti, pretankega filma vode in prenosa vibracij na mikrostrukture, smo bili primorani koncept spremeniti. Glede na različne vire [3, 4], ki opisujejo razvoj mikrofluidnih generatorjev pretoka vzbujanih z mehanskimi vibracijami smo preizkusili tehnologijo za izdelavo mikrorotorjev različnih dimenzij. Vibracije, ki povzročijo gibanje tekočine omogočajo kontroliran transport mikroobjektov po tekočini. Z ustrezno načrtano strukturo je možno doseči vrteč pretok tekočine okoli ali znotraj pritrjenih mikroobjektov. Pri razvoju smo izkoristili predhodno znanje gradenj mikrostruktur, da smo zgradili testni poligon vrtenja mikroobjektov. Na mikro nivoju so strukture običajno ustvarjene z jedkanjem, v našem primeru pa so zgrajene iz mikrodelcev s pomočjo nanorobotskega manipulatorja z enoprstnim prijemalom [5], ki omogoča

prenos mikroobjektov z Van der Waalsovo ali kapilarno silo. Prijemanje/ odlaganje mikroobjektov je kontrolirano s hlajenjem/gretjem v lokalni okolici. [6] Vse mikrostrukture v prispevku so sestavljene iz steklenih kroglic in utrjene z lepljenjem.

2.1 Pretok tekočine na osnovi vibracij

Avtorji [3] so prikazali transport in vrtenje posameznega mikroobjekta (celice velikosti cca. 100-150 μm) s pomočjo pritrjenih stebrov na površino, ki je vzbujana z ustreznimi vibracijami. Rotacijo celice dosežejo z zaprto strukturo treh stebrov, kjer se ustvari ravnovesno stanje sil, ki vrtijo objekt z določeno hitrostjo in smerjo. S spremembo frekvence in/ali amplitude vibracij je mogoče premikanje oz. vrtenje kontrolirati, kar omogoča opazovanje celic v prostoru za namene biomedicinskih aplikacij. Vibracije, pravokotne na površino, okrog pritrjenega mikroobjekta v tekočini povzročijo usmerjen krožni tok tekočine okrog njega. Gibanje površine z vibracijami mora biti usklajeno po X-Y osi s sinusnim/ kosinusnim zbujanjem, da se doseže krožno gibanje. Glede na vir [3] je maksimalna hitrost krožnega toka dosežena pri razdalji cca. 100 μm od površine stebra, seveda pa je odvisno od oblike in zasnove stebra. S postavitvijo več stebrov v zaprto obliko je možno krožni pretok okrog posameznih stebrov usmeriti v krožno gibanje tekočine znotraj strukture, kar izkoriščamo za vrtenje mikroobjektov v centru. S teoretičnimi izračuni glede na število stebrov in dimenzij mikroobjekta (rotor) je na sliki 1 prikazana zasnova poligona za testiranje vrtenja v centru.



Slika 1. Tlorisni prikaz pretoka tekočine (črtkane črte) okrog štirih stebrov in šestkotnega mikrorotorja znotraj stebrov.

Dimenzije gradnikov so sledeče: polmer stebra $a=40\ \mu\text{m}$, polmer steklenih kroglic šestkotnika $b=20\ \mu\text{m}$, polmer šestkotnika $c=60\ \mu\text{m}$. Načrtovanje celotnega poligona, razmik med stebri, in razmik med stebri in rotorjem v centru je izveden po [3]. Po enačbi (1) se določi razmik med rotorjem in stebri $d_1=100\ \mu\text{m}$, a da je zadoščen pogoj v enačbi, je izbran malce večji razmik $d_1=120\ \mu\text{m}$.

$$d_1 > a + c \quad (1)$$

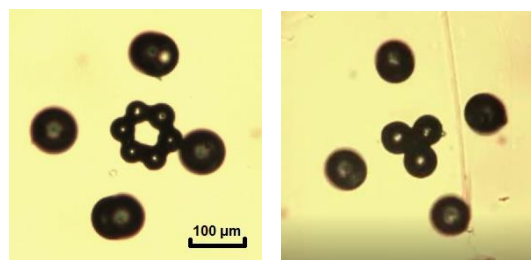
Stranica enakostraničnega trikotnika med dvema stebroma in centrom rotorja je določena z izrazom (2).

$$\text{stranica} = d_1 + \left(c - \frac{b}{2}\right) \quad (2)$$

Po (3) se lahko izračunamo zadostna razdalja med stebri.

$$d_2 = \sqrt{\left(\left(c - \frac{b}{2}\right) + d_1\right)^2 + \left(\left(c - \frac{b}{2}\right) + d_1\right)^2} \quad (3)$$

Glede na dimenzije je izračunana razdalja $d_2=226\ \mu\text{m}$. Stebri so izdelani iz dveh večjih steklenih kroglic postavljenih ena na drugo ter prilepljeni na površino steklene ravnine z UV lepilom. Manjše steklene kroglice pa so sestavljene v rotor šestkotne ali trikotne oblike, ter zlepljene v čvrsto mikrostrukturo. Slika 2 prikazuje končno obliko poligona štirih stebrov z rotorjem v centru.



Slika 2. Prikaz različnih oblik rotorjev vstavljenih med štiri stebre v tekočini. Merilna skala velja za slike 2-4.

2.2 Vibracijska naprava

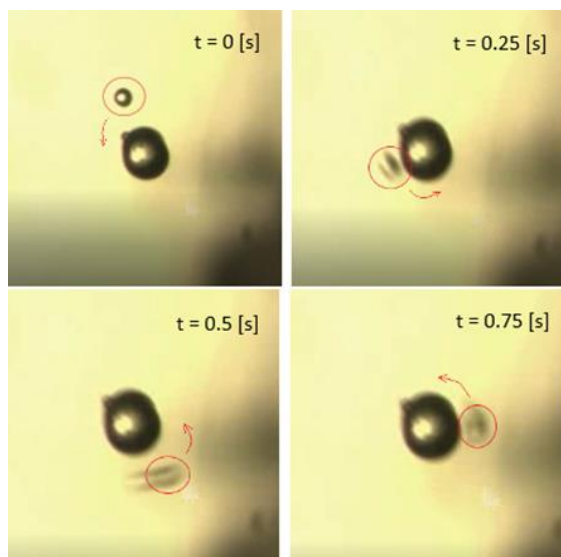
Vibracijska naprava krožno vzbuja ravno stekleno površino (mizico) z nameščenim lončkom ali štirimi stebri, da povzroči krožno gibanje tekočine znotraj lončka ali okoli stebrov. Zgrajena je iz dveh linearnih piezo motorjev pravokotnega preseka $6 \times 6\ \text{mm}$, ki sta nameščena medsebojno pravokotno, eden po x-osi, drugi po y-osi. Mizica vibracijske naprave je vpeta med oba linearna piezo motorja. Na obeh oseh vibracijske naprave so uporabljeni linearni piezo motorji proizvajalca Nanofaktur MPO 050015. Ta piezo motor izvaja pomike v območju 0-15 μm s krmilno napetostjo med 0 in 150 V (max. -45V do +180 V). V osnovnem območju napetosti lahko ti linearni motorji proizvajajo silo potiska do 1125 N, silo vleka pa 50 N. Togost linearnega piezo motorja je 75 N/ μm . Vsak linearni piezo motor krmilimo s pomočjo eno kanalnega gonilnika EOO-050100 istega proizvajalca. Ta gonilnik omogoča povečan obseg izhodne krmilne napetosti, nastavitev offset napetosti med 0 in 10V, na njegov vhod pa lahko priključimo napetost v območju -3 do 12V. Krožno gibanje mizice vibracijske naprave dosežemo tako, da krmilimo premikanje linearnega motorja na x-osi po sinusni funkciji, medtem ko

krmilimo premikanje linearnega motorja na y-osi po kosinusni funkciji. Sinusni in kosinusni časovni potek napetosti generiramo s pomočjo mikrokrmilnika PIC in pulzno širinske modulacije s frekvenco 50kHz. S filtriranjem pulzno širinskega signala dobimo sinusni in kosinusni signal s frekvenco v območju 0 do 1kHz.

3 Testiranje vrtečega pretoka tekočine okrog in znotraj poligona

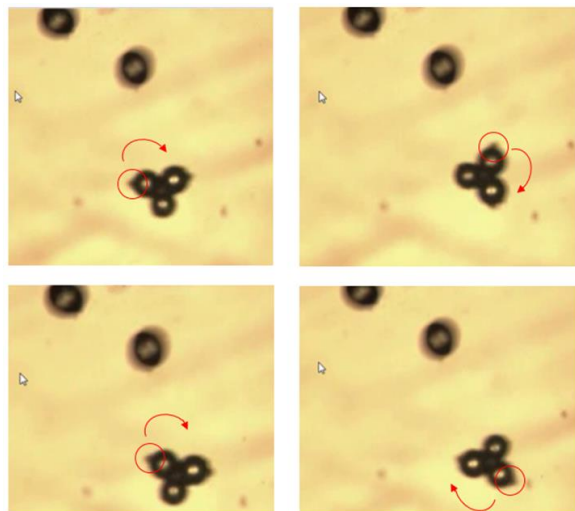
Testiranje smo pričeli s preizkušanjem vrtenja mikroobjekta, kjer je bila celotna ravna površina s poligonom in mikroobjektom potopljena v tekočino (kapljica vode). Potopljen poligon oz. površino steklene ravnine smo pričeli vzbujati z vibracijami ter tako ustvarili pretok tekočine okrog mikroobjektov. Intenziteto vibracij smo nadaljevali s spreminjanjem napetosti aktuatorjev (vibrator), kjer je bilo za zadovoljivo krožno vzbujanje potrebno zagotoviti frekvenco cca. 250 Hz in amplitudo 10 μm . Dokler je mikroobjekt (steklena kroglica) potopljen na dnu kapljice oziroma v kontaktu s površino ravnega stekla deluje kot steber, zaradi česar se okrog njega vzpostavi krožni tok. Če je pretok okrog njega dovolj močan se mikroobjekt prične vrteti. Če ga sila vzgona med vrtenjem dvigne od tal krožni tok okrog njega oslabi in izgubi vrtilno hitrost ter potone na dno. Z ustrezno nastavitvijo frekvence in amplitude vibracijske naprave je bilo mogoče doseči zanesljivo vrtenje mikroobjekta, ter krmiliti hitrost glede na intenziteto vzbujanja. Hitrosti krožnega vrtenja je bila med $1 < \omega < 10 \text{ rad/s}$.

Nadalje smo na stekleno površino pritrdili steber iz dveh kroglic ter posneli obnašanje mikroobjekta v krožnem toku tekočine okrog stebra. Opisan primer je predstavljen s serijo slik (slika 3), ki kažejo na vrtečo kroglico okrog stebra. Slika stebra je zaradi induciranih vibracij nejasna. Nazadnje smo izdelali še mikrostrukturo rotorja v obliki šestkotnika, ki ga lahko dogradimo v enostaven zobnik. Sestavljen in zlepljen je iz steklenih kroglic, ter vstavljen med štiri stebre.



Slika 3. Krožno vrtenje steklene kroglice v tekočini okrog pritrdjenega stebra na površino z induciranimi vibracijami.

Izkazalo se je, da je bila lepljena mikrostruktura rotorja problematična saj se je del rotorja z UV lepilom zaradi velike adhezivnosti površine lepila večkrat dotaknil stebrov in rotor prilepil na steber. Zato smo izvedli poenostavljeno verzijo rotorja, ki je bil sestavljen iz le treh kroglic v obliki trikotnika zlepljenega v sredini. Zaradi manjših dimenzij nove oblike trikotnega rotorja le-ta ni pravilno usklajen z načrtovanimi dimenzijami poligona in je pri neustreznem vzbujanju zdrsnil iz centra poligona. Potreben bi bil nov preračun in postavitev poligona, da bi v notranjosti ustvarili ravnovesne pogoje za enakomerno vrtenje trikotnega rotorja. Slika 4 predstavlja zaporedje vrtenja trikotnega rotorja v tekočini med vzbujanjem z vibracijami, kjer je ušel iz centra poligona. Na slikah rotorja je opazna nepravilnost na kroglici, kar služi za indikacijo vrtenja.



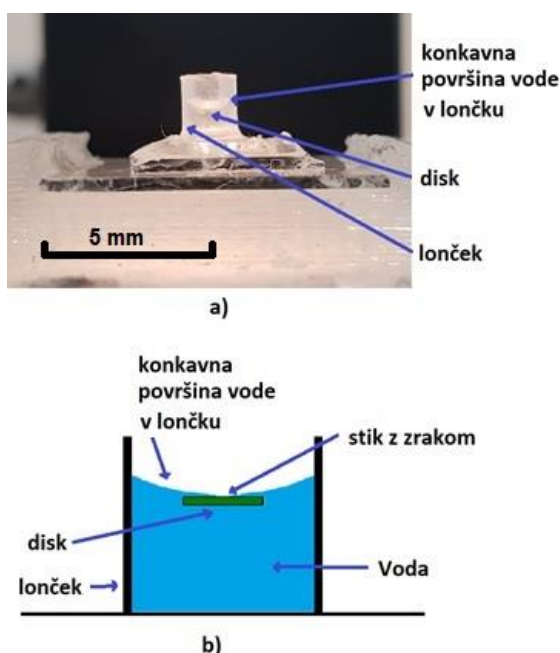
Slika 4. Inducirano vrtenje trikotnega rotorja na ravni površini, izven poligona (dva stebra od štirih sta vidna zgoraj).

S povečanjem števila stebrov se poligon spremeni v zaprto obliko oziroma lonček. Zato smo vzporedno z razvojem fluidnega mikromotorja preverili tudi delovanje malo večje submilimetrsk verzije motorja.

4 Submilimetrski vibracijski mikrofluidni rotacijski motor

Na zgornji predpostavki smo nadaljevali razvoj submilimetrsk verzije, kjer na ravno stekleno površino namestimo lonček višine cca. 1,5 mm in notranjim premerom 0,9 mm v katerem se nahaja voda z nadrobljenimi bruski papirja. Površino krožno vzbujamo s pomočjo vibracijske naprave, s frekvenco 260 Hz in amplitudo 10 μm . Center vrtenja vode je bil točno v središču lončka. Če vibracija ni bila natančno krožno vibriranje, se je center vrtenja premaknil izven središča ali pa so se v lončku ustvarili dva ali tri središča vrtenja. Cilj je doseči krožno gibanje medija z enim središčem v centru krožnice lončka. Z eksperimentom smo dokazali delovanje krožnega toka ob različnih amplitudah in frekvencah vibriranja in dosegli nastavljivo krmiljenje kroženja vode v urini ali protiurini smeri z rotacijsko krožno hitrostjo vode na površini v lončku $-15 \text{ rd/s} < \omega < +15 \text{ rd/s}$.

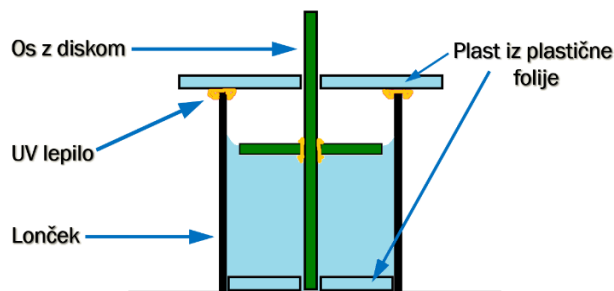
Naslednji eksperiment, ki smo ga opravili je bil rotirajoči se disk z diametrom cca. 500 μm , ki je "lebdel" neposredno pod konkavno površino vode, zaradi površinske napetosti na stiku med vodo in zrakom. Disk, narejen iz plastične folije debeline cca. 200 μm smo vrteli v obeh smereh s krožno hitrostjo cca. $-15 \text{ rd/s} < \omega < +15 \text{ rd/s}$. Eksperimentalno napravo vibrirajočega lončka in diska prikazuje slika 5a in njegovo skico slika 5b. Da bi sila zaradi površinske napetosti delovala mora biti vsaj en del diska (rotorja) v stiku z zrakom, čeprav je večji del diska potopljen pod gladino površine vode v lončku. Površinska napetost vode ima še eno dobro lastnost, to je, da disk centrira na dno konkavne ploskve površine vode v lončku, kjer je tudi center rotirajoče se vode, tako, da se disk med vrtenjem ne odmika proti robu lončka. Ta efekt je nujno potreben za delovanje mikrofluidnega vibracijskega rotacijskega motorja z osjo, ki ga prikazuje slika 6.



Slika 5. Eksperiment z rotirajočim diskom pod gladino vode.

Zadnji eksperiment, ki smo ga izvedli je bil delujoči vibracijski mikrofluidni motor, ki je omogočal kotne hitrosti cca. $-10 \text{ rd/s} < \omega < +10 \text{ rd/s}$, čeprav se je voda vrtela z večjo hitrostjo, to je cca. $-15 \text{ rd/s} < \omega < +15 \text{ rd/s}$. Vzrok za ta pojav vidimo v tem, da se je del energije rotirajoče vode porabil, za premagovanje trenja v preprostih ležajih v spodnjem in zgornjem delu osi motorja, na katerega je prilepljen disk (rotor ali turbina) motorja. Skico opisanega motorja prikazuje slika 6. Os z diskom se je vrtela le, če smo gladino vode postavili natančno na višino diska, kjer je vsaj del zgornje ploskve diska imel stik z zrakom. S tem smo omogočili delovanje sil površinske napetosti na disk, ki je bil s tem centriran na sredino lončka, na dno konkavne ploskve površine vode v lončku, naravnost v sredino krožice se vode v lončku. To je imelo blagodejen vpliv na zmanjšanje sil trenja v preprostem ležaju v zgornjem in

spodnjem delu osi (luknjica v plastični foliji premera cca. 200 μm). Os je bila izdelana iz steklenega vlakna premera 125 μm . Lonček in vsi sestavni elementi motorja so bili pritrjeni ali lepljeni z UV lepilom. Z ustreznim vibracijskim vzbujanjem po drugih oseh bi bilo možno z zaprtim lončkom s tekočino takšen motor uporabljati tudi v horizontalni smeri.



Slika 6. Vibracijski mikrofluidni motor z osjo.

5 Zaključek

V članku je predstavljen razvoj različnih vibracijskih rotacijskih mikromotorjev v tekočini za namene izdelave mikrostrojev. Kontrolirane vibracije površine na kateri so nameščeni mikroobjekti in potopljeni v tekočino, ustvarijo gibanje tekočine, kar s pravilnim načrtovanjem omogoča vrtenje mikrostruktur. Hitrost vrtenja je odvisna od frekvence in amplitude vzbujanja vibracij, smer vrtenja pa od sinusnega/ kosinusnega vzbujanja po X-Y osi. Dosežene hitrosti vrtenja in sile vrtenja so zadostne za izkoriščanje kot pogonsko silo mikromotorjev. Izvedba predstavljenih mikromotorjev je trenutno še v fazi razvoja in testiranja različnih oblik ter še ni primerna za aplikativno rabo.

Literatura

- [1] B. Jurado-Sánchez, M. Pacheco, R. Maria-Hormigos, A. Escarpa: Perspectives on Janus micromotors: Materials and applications. *Applied Materials Today*, str. 407–418, 2017.
- [2] M. Guix, C.C. Mayorga-Martinez, and A. Merkoci: Nano/Micromotors in (Bio)chemical Science Applications. *Chemical Reviews*, str. 6285–6322, 2014.
- [3] T. Hayakawa, S. Skuma, F. Arai: On-chip 3D rotation of oocyte based on a vibration-induced local whirling flow. *Mycrosystems & Nanoengineering*, 2015.
- [4] M. Hagiwara, T. Kawahara, F. Arai: Local streamline generation by mechanical oscillation in a microfluidic chip for noncontact cell manipulations. *Applied Physics Letters*, št. 101, str. 074102, 2012.
- [5] R. Šafarič, D. Lukman: One-finger gripper based on the variable van der Waals force used for a single nano/micro-sized object. *Journal of micromechanics and microengineering*, št. 24, str. 1–13, 2014.
- [6] S. Uran, R. Šafarič, B. Bratina: Reliable and accurate release of micro-sized objects with a gripper that uses the capillary-force method. *Micromachines*, 2017.