

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

MEMS robot, ki plava po krvi

2. seminarska naloga
pri predmetu
OPTIČNE IN NANOTEHNOLOGIJE

Avtorji:

Aljoša Kopina, Mitja Cerkenik, Bine Gorjanc, Miha Pinterič

Ljubljana, 11.12.2010

KAZALO

1. UVOD.....	3
2. REALIZACIJA.....	4
2.1 Fizikalni problemi na MEMS nivoju	4
2.2 Problemi z realizacijo.....	6
3. REZULTATI IN RAZPRAVA	8
3.1 Predstavitev hipotetičnih gradnikov na MEMS nivoju	8
3.2 Robotska in hibridna bio-robotska rešitev	11
4. ZAKLJUČEK.....	13
5. VIRI	14

1. UVOD

Mikro elektro mehanski sistemi (MEMS) so sistemi na mikro nivoju. Sestavljeni so iz delov velikosti od 1 do 100 mikrometrov, MEMS naprave pa so večinoma velikosti od 20 mikrometrov do 1 milimetra. Običajno so sestavljene iz pretvornikov, aktuatorjev, senzorjev, mehanskih komponent in elektronike. Na mikro nivoju se klasični fizikalni konstrukti ne izkažejo vedno kot uporabni. Zaradi velikega razmerja med površino in volumnom, površinski efekt elektrostatičnosti in efekt površinske napetosti prevladajo nad vztrajnostjo in termoakumulacijo.

Na področju MEMS nas je zanimala realizacija takega mikrorobota, ki bi lahko plaval po krvi v žilah. Želeli smo zasnovati tako plovilo in za to poiskati primerno orodje. Raziskovali smo obstoječe rešitve in skušali ugotoviti koliko je bilo do sedaj narejeno in kako daleč je še uresničenje česa takega. Raziskovali smo tudi fizikalne probleme na nivoju MEMS zato, da bi našli primerne gradnike s katerimi bi bilo možno realizirati tako MEMS podmornico in da bi ugotovili ali je to sploh možno realizirati.

2. REALIZACIJA

Primarni vir naše raziskave je bil internet. Pri iskanju primernega orodja za zasnovanje naše MEMS podmornice smo ugotovili, da še leto nazaj brezplačno dostopni programi, so sedaj plačljivi. Komercialna orodja kot so Conventorware, Intellisense, Ansys, Comsol, bi omogočala tako načrtovanje. Kontaktiranje prvega proizvajalca je bilo neuspešno. Odgovor na prošnjo, da bi nam omogočali uporabo njihovega izdelka za določen čas je bil pozen in ponujali so nam le posebno ponudbo, ne pa brezplačno. Zaradi tega se je naša začetna zamisel načrtovanja MEMS robota spremenila v raziskavo možnih in obstoječih rešitev.

2.1 Fizikalni problemi na MEMS nivoju

Površinska napetost je posledica privlačnih van der Waalsovih sil med molekulami kapljevine. V notranjosti kapljevine je vsaka molekula obdana z vseh strani z drugimi molekulami, zato jo van der Waalove sile vlečejo enako v vse smeri in je rezultanta sil enaka nič. Za plast molekul na gladini pa to ne velja — molekule iz notranjosti kapljevine delujejo nanje s privlačnimi silami, ki jih pa molekule plina z druge strani ne uravnesijo, tako da jih uravnovesi le nestisljivost kapljevine. Gladina kapljevine se tako obnaša kot prožna plošča. Posledica tega je, da se kapljevine zberejo v kapljice, kot tudi kapilarnost, pojav, da se kapljevina, ki moči podlago, vzpne po stenah ozke cevke. Površinsko napetost izkoriščajo tudi nekatere žuželke za hojo po vodni gladini.

Elektrostatika je veja znanosti, ki se ukvarja s pojavi, ki izhajajo iz stacionarnih ali počasnih pretokih električnih nabojev. V primeru ploščnega kondenzatorja je električni naboj z gostoto σ enakomerno porazdeljen po ravnini. Silnice so pravokotne na to ravnino. Okoli nabite ploskve s ploščino S si zamislimo zaprto ploskev v obliki prizme, ki ima osnovni ploskvi vzporedni z nabito ploskvijo, stranske pa vzporedne s silnicami. Ker so stranske ploskve vzporedne s silnicami, prispeva k električnemu pretoku skozi prizmo le pretok skozi obe osnovni ploskvi, to je $2SD$. Po zakonu o električnem pretoku je ta enak naboju v notranjosti zaključene ploskve:

$$2SD = \epsilon_0 = \sigma S$$

Če upoštevamo še zvezo med gostoto in jakostjo električnega polja

$$D = \epsilon_0 E$$

dobimo za slednjo izraz

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Ploščni kondenzator je sestavljen iz dveh vzporednih plošč, enakih opisani, le da je ena pozitivno, druga pa negativno nabita. Naboj obeh plošč je po velikosti enak. Električno polje med obema ploščama je enako vsoti prispevkov obeh plošč:

$$E = \frac{\sigma_+}{2\epsilon_0} + \frac{|\sigma_-|}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Vidimo, da se jakost električnega polja s krajem ne spreminja. Pravimo tudi, da je takšno polje homogeno.

Termoakumulacija je zmogljivost shranjevanja toplote telesa. Shranjevanje toplote je sorazmerna z volumnom medtem ko disipacija toplote je sorazmerna s površino. V primeru MEMS gradnikov imamo veliko razmerje med površino in volumnom kar povzroča slabe termoakumulacijske lastnosti.

Vztrajnost je lastnost teles, da vztrajajo v enakomernem gibanju in se upirajo spremembi velikosti ali smeri hitrosti. Merilo za vztrajnost je vztrajnostna masa telesa.

Reynoldsovo število (Re) je brezrazsežno število, s katerim v mehaniki tekočin označimo tok tekočin. Določeno je kot razmerje, pri katerem v števcu nastopa zmnožek značilne dolžine v prečnem prerezu l (npr. premera krogle, ki se giblje v tekočini, ali premera cevi, po kateri teče tekočina), gostota tekočine ρ in povprečna hitrost gibanja tekočine v_s , v imenovalcu pa (absolutna) dinamična viskoznost η :

$$\text{Re} = \frac{l\rho v_s}{\eta}$$

Če definiramo kinematično viskoznost $\nu = \eta/\rho$, lahko Reynoldsovo število zapišemo kot

$$\text{Re} = \frac{lv_s}{\nu}$$

Reynoldsovo število je kriterij, s katerim lahko napovemo, ali bo tok tekočine laminaren ali turbulenten. V režimu laminarnega toka velja linearni zakon upora, v režimu turbulentnega toka pa kvadratni zakon upora. Za gibanje krogle v tekočini velja, da ga lahko opišemo z linearnim zakonom upora pri $\text{Re} < 0,5$ in s kvadratnim, če velja $\text{Re} > 1000$. V vmesnem območju ne velja noben od omenjenih približkov. Za tok tekočine po ceveh se ocenjuje, da je laminaren pri $\text{Re} < 2300$ in turbulenten pri $\text{Re} > 2300$.

Reynoldsovo število je imenovano v čast angleškemu inženirju in fiziku Osbornu Reynoldsu (1842-1912) in njegovemu delu v hidrodinamiki in hidravliki.

Zaradi svoje mikro velikosti, mikro plovila delujejo v zelo majhnih Re številkah, kar pomeni, da je vztrajnostna sila manj pomembna ali celo zanemarljiva v primerjavi z viskoznostjo. Zato so plavajoči mikro roboti podvrženi bistveno drugačni hidrodinamiki v primerjavi s plavajočimi roboti običajne velikosti. Tako pogonski mehanizmi plavajočih makro robotov so

lahko na splošno neuporabni na mikro lestvici. Ta problem motivira raziskovalce za razvoj novih konceptov in oblikovanje učinkovitejših sistemov za pogon plavajočih mikro robotov. Če bi bili deset tisočkrat manjši, bi bila voda kot melasa. S pogonom v obliki vesla si ne bi kaj dosti pomagali. Uporabiti moremo spiralo v obliki odpiralca za steklenice.

2.2 Problemi z realizacijo

Mikro roboti v večini primerov potrebujejo več energije, kot jo lahko shranimo v baterije ustreznih velikosti za uporabo na mikro nivoju. Namesto dodajanja večjih baterij oz. virov energije sami napravi, kar povečuje težo in mere, se uporablja pristop z uporabo zunanjih magnetnih polj, s katerimi se upravlja robotsko napravo, ki vsebuje magnetni material. Pri tem načinu krmiljenja in upravljanja robotka moramo biti zelo natančni, ker sicer lahko zelo hitro zaide iz poti, kar pa lahko ima škodljive ali celo usodne posledice znotraj človeškega telesa.

Kljub temu, da polja ki jih gradient tuljav v običajnih napravah za magnetno resonanco niso dovolj močna da bi potegnili delce pod približno 250 mikrometrov velikosti, bi po besedah Dr. Martela (iz NanoRobotics Laboratory na Ecole Polytechnique de Montréal v Kanadi) lahko z izboljšano napravo za magnetno resonanco z močnejšimi tuljavami poganjali delce velike tudi le 50 mikrometrov. Manjše krvne žile in ostala občutljiva območja znotraj telesa pa tudi s temi izboljšavami predstavljajo nedosegljivo ozemlje.

Največji problem pa predstavljajo omejitve hitrosti te naprave. Za frekvence višje od frekvenc, ki sovpadajo z maksimalno dosegljivo hitrostjo, se rotacija naprave ne bi sinhronizirala z rotacijsko frekvenco zunanjega magnetnega polja in hitrost bi se zmanjšala. Poleg težav zaradi omejitve hitrosti, so tu še druge težave povezane z uporabo magnetnega polja:

- pacienti s srčnimi spodbujevalniki, kovinskimi vsadki in strelnimi ranami, niso primerni da jih izpostavimo magnetnim poljem, ker lahko sila magneta vpliva na njih, jih iztrga ali kako drugače resno poškoduje pacientova tkiva
- zaradi premajhne hitrosti robotka, mora pacient ostati v magnetnem polju dlje, kot je to dovoljeno z uradnimi predpisi
- gradient magnetnega polja lahko povzroči eddyjeve tokove (električni pojav: pri premikajočem se izvoru magnetnega polja v vodniku pride do pretoka elektronov; ta pretok gre lahko v obratno smer (primerljivo z vrtinci, ki nastanejo v tekoči vodi, ko gre mimo ovire) in inducira magnetno polje nasprotujoče izvornemu; eddijevi tokovi lahko povzročijo uporovne izgube v obliki toplote) v pacientu in prispevajo k segrevanju. Načeloma to ni problem pri uporabi magnetne resonance ampak lahko nastane problem kadar se robotek premika po telesu. Leta 2006 sta Bahareh Behkam (iz fakultete v Virginia Tech) in Metin Sitti (direktor nanorobotskega laboratorija Carnegie Mellon univerziteti v Pittsburghu, Pennsylvania) predlagala nov, varen, miniaturn in energijsko varčen pogonski sistem, ki se lahko uporablja za vse bolnike, brez omejitev; bioaktuator, kar je organska pogonska naprava. Ta metoda ima še to prednost, da pacienti načeloma ne čutijo nikakršnega nelagodja, ker niso izpostavljeni magnetnemu polju dalj časa.

Čeprav je napredek na področju mikro/nano izdelave robotkov pripeljal do realizacije različnih mini mobilnih robotov, ozko grlo za nadaljnji razvoj in miniturizacijo mobilnih robotkov na produkte reda velikosti nekaj mikrometrov oz. minimizacija pogonov in virov energije, še vedno predstavljajo težave. Bioaktuatorji so v tem pogledu povsem nadrejeni vsem vrstam pogonov, ki jih je naredil človek. Njihova glavna prednost je v tem, da so sposobni pretvarjati kemijsko energijo v električno oz. mehanično, z minimalnimi izgubami. So kompaktni, učinkoviti in sposobni zapletenih premikov. Na žalost pa izolacija ter odstranitev bioaktuatorjev iz živih organizmov in rekonstrukcija daje zelo slabe rezultate. Da bi obšli ta problem se uporabljajo flagela motorji znotraj nedotaknjenih celic *S.marcescens* (slika 1) bakterije za nadzorovan pogon plavajočega robota. Z uporabo gibljivosti mikroorganizmov, so pokazali nove možnosti za kontrolirano upravljanje na mikro nivoju.

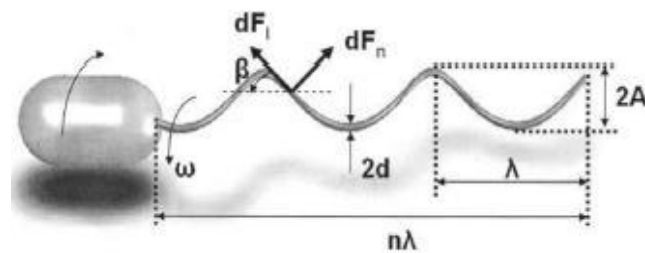


Slika 1: *S.marcescens*

3. REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1 Predstavitev hipotetičnih gradnikov na MEMS nivoju

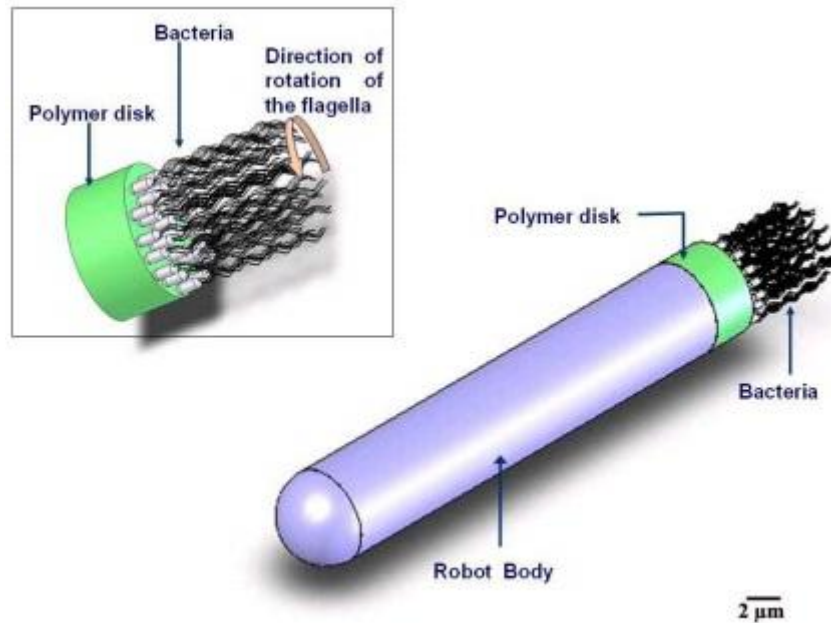
Flagellum (slika 2) je pogonski organel, ki vključuje reverzibilno rotacijski motor, vgrajen v celične stene, in z nitko, ki sega v zunanji medij. Nitka je dolga ($\sim 10 \mu\text{m}$), tanka ($\sim 20\text{nm}$), spiralasta ($2,5 \mu\text{m}$ kroglja, s premerom $0,5 \mu\text{m}$), ki se vrti pri hitrosti $\sim 100 \text{ Hz}$. Ta pogonski sistem lahko učinkovito deluje tudi pri zelo majhnem merilu in nizkih številkah Re .



Slika 2: Flagellum

Bakterije, le $0,5 \mu\text{m}$ v premeru in $2 \mu\text{m}$ dolge, se poganjajo z vrtenjem svojih spiralam podobnih repov, znanih kot flagella, z zelo veliko hitrostjo ($\sim 300 \text{ Hz}$). Ti flagella repi merijo samo 20 nm v premeru in približno $10 \mu\text{m}$ v dolžino. V tem primeru so *S. marcescens* bakterije pritrjene na Polistiren (PS) mikrosfere preko elektrostatične, van der Waalsove in hidrofobne interakcije. Ko pritrjene bakterije vrtijo svoje flagella repe potiskajo mikrosfero naprej. Zagon in ustavitev mikrosfere se nadzira z uvajanjem različnih kemikalij v eksperimentalno okolje. Za ustavitev gibanja se uvedejo ioni bakra. Ti ioni se vežejo na flagella rotor in preprečijo njegovo gibanje. Za nadaljevanje gibanja se uvede drugo kemikalijo, imenovano etilendiamintetraocetna kislina (EDTA), ki »polovi« bakrove ione vezane na flagella rotor, kar omogoča, da le-ta nadaljuje svoje gibanje.

Uporaba biomotorjev znotraj nedotaknjenih celic je preprostejša, saj čiščenje in rekonstitucija nista potrebni. Poleg tega je na voljo preprosto hranilo, kot je glukoza, tako da so ATP ali ionski premiki pridobljeni s celico. Najpomembneje je, da so senzori že prisotni v celici in vključeni v motor. Nenazadnje bolj zapletene organele kot uporabljamo, bolj raznoliko gibanje lahko dosežemo. Zato v teh raziskavah uporabljamo flagella motor znotraj nedotaknjenih celic. V tem primeru predstavljamo hibridni plavalni mikrorobot, ki ga poganjajo spiralni flagella repki (okoli 20 nanometrov v premeru) bakterij, pritrjenih na anorgansko telo robota. Konceptualna risba robota je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Konceptualna risba mikrorobota

Prednosti hibridnih robotov vključujejo: (i) Delovanje na majhno količino hranil za daljše časovno obdobje (miniaturnost in učinkovitost), (ii) Deli pogonskega elementa, to so bakterije, se same razmnožujejo, zato ne potrebujemo mikro izdelovanja novih. Vendar pa obstajajo številni izzivi, povezani z izvedbo in karakterizacijo teh robotov. Nekateri od njih so: (i) ponovljivost in prirastek, (ii) nadzor hitrosti bakterij, (iii), Orientacija in konfiguracija pritrjenih bakterij.

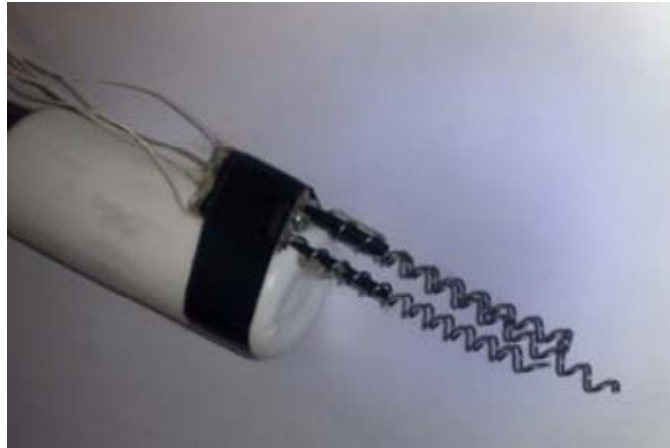
James Friend, co-direktor Micro / Nanophysics Research Laboratory na Univerzi Monash v bližini Melbourn, Avstralija, gradi flagella-navdahnjene mikromotorje in upa, da bodo nekega dne poganjali mikrorobote skozi arterije in vene. V središču motorja so piezoelektrični materiali - posebni kristali, ki v prisotnosti električnega polja zelo malo spremenijo obliko. Ko tak material damo v hitro izmenjujoče električno polje, začne vibrirati. Te vibracije se prenesejo na drugo strukturo in obračajo rotor, ki deluje kot flagella rep. V zadnjih letih je dr. Friend zaporedoma gradil vedno manjše različice svojih motorjev - sedanja različica meri 250 mikrometrov v premeru. Zagotavljanje energije na plovilu je problematično, zato raziskuje uporabo zunanjih magnetnih polj za pogon naprave.

Za nadzor krivulje plavanja robota mora načrtovalec najprej poznati razmerje med silami, momenti in kotnimi hitrosti flagelle, da lahko prilagodi hitrost vrtenja motorjev za zahtevano obremenitev (f_x , f_y , F_z , M_x , M_y , M_z).

Z numerično strategijo lahko izračunamo rotacijske vrednosti flagelle in izračunamo sile in momente na robota, ampak tu imamo inverzen problem. V splošnem je razmerje med obremenitvami in kotnimi hitrosti zapleteno in popolnoma nelinearne narave, zato moramo to obravnavati zelo previdno. Od novih metodologij za večrazsežno oceno, so nevronske mreže obetavna tehnologija zaradi svoje sposobnosti, da so naučene in uporabljane za raziskavo sistemov, ki vključujejo nelinearne dinamike. Zaradi teh dokazanih zmogljivosti, so bile v identifikaciji sistema uporabljene nevronske mreže. Umetna nevronska mreža (ANN) je masiven vzporedno razdeljen procesor, sestavljen iz medsebojno povezanih procesnih enot. Temeljna enota za obdelavo podatkov se imenuje nevron ali vozlišče, ki je matematična abstrakcija nevrona v bioloških znanostih. Priljubljen in uspešno uporabljan ANN model je

večplastni perceptron (MLP). MLP ima večplastno, vnaprej podano konfiguracijo in je uporabljan v nadzorovanem (ciljno usmerjenem) načinu z zelo priljubljenim algoritmom učenja z vzratnim širjenjem napake (Error back-propagation learning algorithm). Običajno ima MLP vhod, skrite plasti in izhodne plasti. Upoštevati je potrebno, da je sinaptična utež povezana z vsako povezavo. Error back-propagation učenje je sestavljeno iz dveh prehodov skozi omrežje na podlagi plast-v-plast: prehod naprej in prehod nazaj. Med preходом naprej so vse sinaptične uteži mreže fiksirane. Po procesiranju dobi ANN razmerja med vhodi in izhodi in se uporablja za prilagoditev kotne hitrosti flagelle.

Kot vidimo, osna hitrost na ta način podaja učinkovito potisno silo in momente za mikrorobota, ki spremeni svojo smer, vendar je robot z enojnim flagella pogonom nezanesljiv. To dejstvo je potrjeno z eksperimentalnimi opažanji izvedbe z uporabo robotkov s tremi flagella pogoni (slika 4). Iz tega spoznamo, da so mikroroboti z več-flagellarnim pogonom boljši pri manevriranju in potrebujejo le učinkovit sistem nadzora, kot so ANN (umetne nevronske mreže) na električnih čipih.



Slika 4: testni model za multi-flagella koncept pogona

3.2 Robotska in hibridna bio-robotska rešitev

To raziskovalno delo bi preučilo dva različna koncepta.

Biomimetski plavajoči mikrorobot: Dizajn in mikroproizvodnja povsem mehanskega pogonskega sistema, ki ga je navdihnili sposobnost spontanega in aktivnega gibanja bakterij.

Biomimetski concept pogona je navdihnili flagelacija bakterij, kot so npr. *E. Coli* (slika 5).



Slika 5: Bakterija E. Coli

Flagele teh celic so naključno razporejene po površini celic in vsak flagelni motor se rotira neodvisno od ostalih.

Na drugi strain pa sta Bekhamov in Sittijev model teoretična pristopa in sta samo uporabna pri arhitekturi z eno flagelo. Za koncept večih flagel, ki sta ga predlagala in preučevala Taheri in Mohammadi-Amin ("Towards a multi-flagella architecture for E.Coli Inspired swimming microrobot propulsion," Proc. 8th World Congress on computational mechanics & 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ,Venice, Italy, 30 June-4 July, 2008) je priporočljiv numerični pristop. Ta metoda pogona je primerna za plavajoče robote, ki naj bi plavali v biotekočinah nizkih hitrosti. Potencialne ciljne regije, kjer bi se ti roboti uporabljali, vključujejo očesno votlino, cerebrospinalno tekočino in sečilni sistem.

Pogonska metoda, o kateri teorizira Ishiyama (T. Honda, K. Arai and K. Ishiyama, "Effect of micro machine shape on swimming properties of the spiral-type magnetic micro-machine," IEEE Transaction on Magnetism, vol. 35, pp. 3688-3690, 1999), uporablja zunanje magnetno polje za rotacijo majhnega vijaka v tekočini. Ta magnetno upravljani mikrostroj ne zahteva nobenega izvora energije ali kontrolerja na robotu in ni pripet. Tako je zelo privlačen za medicinsko kirurgijo in katetrsko namene. Pokazano je bilo, da ta tip spiralnih strojev lahko plava v tekočinah različnih viskoznosti in v širokem rangu Re števil. Eksperimenti so bili izvedeni na milimetrskem stroju v silikonskem olju s kinetično viskoznostjo $5 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$, uporabljajoč Buckinghamov PI-jev teorem. Re število tega spiralnega stroja je bilo enako kot pri stroju, velikemu nekaj mikronov, ki plava v vodi. Z uporabo magnetnega polja 100 Oe (oersted – enota za jakost magnetnega polja: $1 \text{ A/m} = 4 \pi \times 10^{-3} \text{ Oe}$) je dosegel maksimalno linearno hitrost 0.022mm/s pri frekvenci 0.24Hz. Pri frekvenci, ki je višja kot frekvenca, ki ustreza maksimalni hitrosti, rotacije stroja ni mogoče sinhronizirati z rotacijsko frekvenco zunanjega polja in se hitrost tako zmanjša. Frekvenca, pri kateri dobimo najvišjo hitrost se

tako imenuje 'step-out' frekvenca. Magnetna resonanca kot način za magnetni pogon mikrostrojev za operacijo z minimalno invazijo je bila tudi raziskovana na Virginijski univerzi in Ecole Polytechnique de Montreal.

Hibridni plavajoči mikrorobot: Uporaba večjega števila mutiranih bakterij za pogon abiotskega telesa robota.

Mikrobi na primer, so razvili uspešne metode za manevriranje v telesnih tekočinah. Večje živali plavajo tako, da potiskajo proti vodi s svojimi plavutmi in udi, a ta pristop je neefektiven pri zelo majhnih velikostih. Mikrobom se zdi tekočina gosta in mirujoča in viskoznost je glavna sila, s katero morajo računati majhni organizmi. Kot rezultat so bakterije razvile unikaten način plavanja: uporabljajoč drobne rotirajoče motorje imenovane flagele, ki so podobni odpiračem za steklenice.

Metin Sitti, uporablja bakterije kot biološke motorje, ki poganjajo majhne kroglice skozi tekočino. Namesto da bi se zanašali na zunanji sistem za nadzor gibanja, dr. Sitti in kolegi uporabljajo kemične signale, s katerimi povedo bakterijam kaj narediti.

V nedavnih eksperimentih so dokazali, da lahko ustavijo in poženejo bakterijske flagele preprosto tako, da jih izpostavijo dvem različnim vrstam substanc. Uspešno usmerjanje bakterij bo predmet nadaljnjih testov, pravi dr. Sitti, ampak bi lahko bilo izvedeno preko kemotaksisa – procesa, s katerim majhni organizmi kontrolirajo svoje gibanje glede na kemične substance v svojem okolju, da bi našli hrano ali pa ubežali strupom.

4. ZAKLJUČEK

Programi za načrtovanje MEMS so od letos plačljivi, kar pomeni, da se je tovrstna tehnologija dovolj razvila in razširila, da je postala tržna. Omejen dostop do teh programov pa bo omejil širjenje informacij in zaviral raziskave tistih, ki kot mi, ne bodo finančno podprti.

Pri načrtovanju MEMS robotka, ki bi plaval v krvi, se razvijalci soočajo s številnimi fizikalnimi problemi. Od teh smo omenili le tiste, ki so povezani z našo raziskavo. Zaradi teh problemov se je razvoj usmeril v hibridne bio-robotske rešitve, ki pa zahtevajo veliko znanja na področju biologije in kemije. Vztrajnost pri razvoju kaže na to, da je veliko interesa in rezultati so obetavni.

Nadaljni razvoj bo pripeljal do mikrorobotov, ki bodo lahko potovali do sedaj nedostopnih delov telesa. Uporabnik jih bo lahko krmilil in zelo natančno usmerjal za dostavljanje zdravil in pregled bolezni, ki so še v zgodnji fazi. V primeru kirurških posegov na očeh bi se uporabljalo le blag anestetik, zdravljenje pa bi potekalo brez šivov.

Ker v našem delu nismo mogli razviti konkretnih rešitev, smo se osredotočili na raziskave drugih inštitutov. Podali smo širši pregled trenutnega razvoja naprave, ki bi lahko plula po krvi v žilah. Iz številčnih virov smo zbrali zadostno količino informacij potrebnih za omogočanje in olajšanje načrtovanja naslednjim (morebiti) finančno podprtim generacijam.

5. VIRI

- <http://www.memsuniverse.com/?p=787>
 - <http://nanolab.me.cmu.edu/projects/swimming/>
 - http://www.swissinfo.ch/eng/Swiss_build_Fantastic_Voyage_micro-robot.html?cid=996636
 - http://www.zoltan-nagy.net/pdf/Economist_200809.pdf
 - <http://www.eng.monash.edu.au/non-cms/mnrl/MNRL/Microactuators.html>
 - <http://www.efunda.com/formulae/fluids/overview.cfm>
 - <http://www.waset.org/journals/waset/v54/v54-88.pdf>
 - <https://nanohub.org/resources/2737/download/2007.04.11-clark-nt501.pdf>
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current
 - http://sl.wikipedia.org/wiki/Elektrostatika#Elektrostatika.C4.8Dna_potencialna_energija
 - <http://sl.wikipedia.org/wiki/Vztrajnost>
 - http://sl.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_število
 - http://sl.wikipedia.org/wiki/Površinska_napetost
 - <http://en.wikipedia.org/wiki/MEMS>
 - <http://en.wikipedia.org/wiki/Inertia>
 - <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatics>
 - <http://en.wikipedia.org/wiki/Adhesive>
 - [http://en.wikipedia.org/wiki/Cohesion_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Cohesion_(chemistry))
-
- B. Behkam and M. Sitti, "Bacterial Flagella-Based Propulsion and On/Off Motion Control of Microscale Objects," *Applied Physics Letters*, 90 (1):1-3. [pdf](#)
 - B. Behkam and M. Sitti, "Toward Hybrid Swimming Microrobots: Propulsion by an Array of Bacteria", *Proceedings of IEEE 2006 International Conference of Engineering in Medicine and Biology*, pp. 2421-2424, 2006. [pdf](#)
 - B. Behkam and M. Sitti, "Design methodology for biomimetic propulsion of miniature swimming robots", *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 128 (1): 36-43 MAR 2006. [pdf](#)
 - B. Behkam and M. Sitti, "Modeling and Testing of a Biomimetic Flagellar Propulsion Method for Microscale Biomedical Swimming Robots", *Proceeding of 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2005, pp. 37 - 42. [pdf](#)
 - B. Behkam and M. Sitti, "E. Coli Inspired Propulsion for Swimming Microrobots", *Proceedings of 2004 ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*, Anaheim, CA, 2004. [pdf](#)
 - B. Behkam and M. Sitti, "Bacterial Flagella-Based Propulsion and On/Off Motion Control of Microscale Objects," *Applied Physics Letters*, 90 (1):1-3. [pdf](#).