

# MEHKA ROBOTIKA

LARA ERZIN

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

Ključne besede: mehka robotika, mehki materiali, mehki aktuatorji, senzorji

Mehki roboti so narejeni iz mehkih, elastičnih materialov in omogočajo edinstvene možnosti uporabe na področjih, kjer klasična, neprozna robotika ne pride v poštev, na primer za neinvazivne operacije, protetiko in umetne organe. Pristopi za oblikovanje in delovanje izhajajo iz narave in kompleksnega gibanja živih bitij. Zaradi svoje mehke zgradbe, ki lahko spreminja obliko, se lahko mehki roboti prilagajajo nepredvidljivim okoljem in varno interagirajo z ljudmi. Novo nastajajoče področje mehke robotike združuje različna področja, kot so fizika materialov, biomedicinsko inženirstvo in področje inteligentnih sistemov.

## SOFT ROBOTICS

Soft robots are composed of compliant, elastic materials and offer unique applications in the fields where conventional rigid robotics cannot be applied, for instance noninvasive surgeries, prosthetics and artificial organs. Their design and operation draw heavily from nature, often mimicking the complex motion of living creatures. Due to their soft structure with the capability to change shape, soft robots are able to adapt to unpredictable environments and can safely interact with humans. The newly emerging field of soft robotics is highly multi-disciplinary, combining areas such as material physics, biomedical engineering and intelligent systems.

## Uvod

Naprave v našem vsakdanjem življenju so večinoma narejene iz togih komponent, ki se odlikujejo v ponavljajočih se nalogah v predvidljivih ter strukturiranih okoljih. Na drugi strani pa so živi organizmi v milijonih let evolucije razvili najrazličnejše sisteme, v katerih pretežno najdemo mehke materiale, ki omogočajo boljše prilagajanje okolju [14]. Prav to razhajanje z naravo je eden od globokih navdihov za iskanje drugačnih rešitev za robotske sisteme, ki se danes začneta prepoznavati kot novo področje, imenovano mehka robotika [12].

Mehka robotika je področje robotike, ki se ukvarja z ustvarjanjem robotov iz materialov, ki so mehki, upogljivi in elastični, torej podobni tistim v živih organizmih [22]. Običajne robote po navadi poganjajo elektromotorji ali črpalke, pri čemer take naprave lahko zmorejo velike sile, visoke hitrosti in veliko natančnost, vendar pa praviloma niso zmožne prilagajanja okolju

in varnega delovanja v bližnjem stiku z ljudmi [21]. Zato je vedno bolj zaželen lastnost robotskih sistemov, še posebej tistih, ki morajo interagirati z ljudmi [15], da uporabljajo mehke materiale, ki na primer lahko učinkovito razpršijo energijo ob udarcih, zadušijo nihanja in omogočajo bolj gladke ter neprekinjene gibe. Roboti, narejeni iz mehkih materialov, se tudi praviloma lažje odzivajo na spremembe v okolju in so bolj robustni [21].

Mehka robotika odpira možnosti za nove tehnologije v biomedicinskih napravah, industrijski avtomatizaciji in celo v raziskovanju vesolja. Zanimivi nastajajoči izumi na področju mehke robotike so na primer črpalka brez ventilov, ki posnema delovanje srca vretenčarjev, lahke in fleksibilne sončne celice, umetni organi in pametna protetika [19]. Mehki roboti lahko spreminjajo obliko ali celo rastejo [18]. Ker se je razvoj področja mehke robotike začel dokaj nedavno, je danes veliko raziskav usmerjenih v iskanje ustreznih materialov in njihovo vključevanje v robotske sisteme. Povsem mehki roboti trenutno še nimajo prave uporabne vrednosti in so namenjeni predvsem demonstraciji zmožnosti mehkih materialov. Mehki roboti, ki pa so že v uporabi, se po navadi zanašajo na zunanje napajanje in vključujejo trde komponente [12].

V nadaljevanju je predstavljen model gibanja izbranega podvodnega mehkega robota, kot prikaz prednosti mehkih robotov, opisane so nekatere metode izdelave, predstavljene so vrste senzorjev in aktuatorjev, v zadnjem poglavju pa je opisano delovanje prvega povsem mehkega avtonomnega robota.

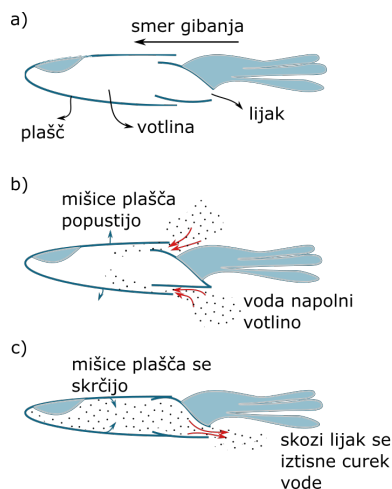
### Gibanje modelskega podvodnega mehkega robota

Veliko vodnih organizmov se pri svojem gibanju zanaša na periodične oscilacije dela telesa (plavuti, rep) ali pa kar celega telesa, kar zahteva aktivacijo sklepov in usklajeno gibanje okončin, in je kot tako relativno zapleteno in posledično s stališča robotike manj uporabno. Zato se v mehki robotiki razvija načine gibanja, ki temeljijo na spreminjanju oblike telesa ali spreminjanju volumna telesa. Tako gibanje je v naravi značilno predvsem za enocelične organizme ter nekatere plaščarje in glavonožce [9]. Glavonožci se poganjajo s pomočjo omišičene plaščeve votline – ko mišice plašča popustijo, votlino napolni voda, ko pa se skrčijo, skozi lijak iztisnejo vodni curek in s tem odrinejo žival v drugo smer [2]. Shema gibanja je prikazana na sliki 1. Nedavno pa so pri hitrih manevrih glavonožcev opazili nepričakovano velike pospeške in večje hitrosti, kot bi jih lahko le zaradi curka izločene vode, kar se razloži z učinkom t. i. hidrodinamske mase (*»added-mass recovery«*) [26].

### Hidrodinamska masa

Pri pospešenem gibanju telesa – npr. organizma ali robota – v tekočini se mora poleg telesa premikati tudi okoliška tekočina, ki se pretaka iz območja

## Mehka robotika



**Slika 1.** Shema gibanja glavonožca: a) Glavni gibalni elementi glavonožca. b) Mišice plašča popustijo in votlino napolni voda. c) Mišice se skrčijo, s čimer iztisnejo curek vode, kar odrine žival v nasprotno smer.

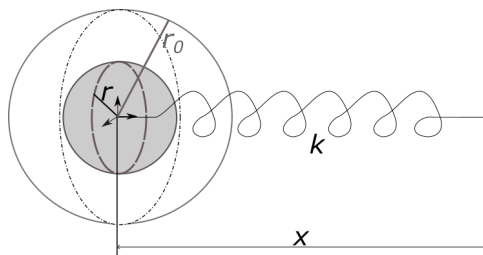
pred telesom v prostor za njim. Pri tem telo na tekočino deluje s silo in tako vpliva na hitrostno polje tekočine in pospešek. Seveda tekočina deluje nazaj na telo z nasprotno enako silo in ta sila predstavlja učinek t. i. hidrodinamske mase. Gre torej za efektivno silo, ki je posledica tega, da gibajoče telo s seboj vleče (ali zaustavlja) del volumna okoliške tekočine, kar pa ima na telo podoben učinek, kot da bi imelo dodatno maso. Kvocijent hidrodinamske mase je definiran kot razmerje med maso tekočine, ki jo telo pospeši, in maso izpodrinjene tekočine [13].

Hidrodinamska masa je pomembno odvisna od razmerja med gostoto tekočine in gostoto telesa. Če obravnavamo gibanje teles z veliko gostoto v tekočini s precej manjšo gostoto, lahko njene učinke zato velikokrat zanemarimo. Številni biološki organizmi – kot prikazani glavonožec –, enako pa tudi mehki roboti, sestojijo iz materialov z nižjo gostoto in zato učinek hidrodinamske mase lahko postane pomemben.

### Krogelno nihalo v tekočini

Za ponazoritev vpliva hidrodinamske mase na gibanje telesa obravnavamo nihalo na vzmet potopljeno v tekočino. Izkaže se, da ko takemu nihalu periodično spreminjamo volumen – a ohranjamo njegovo maso – nekaj energije, ki jo je oddalo tekočini, pridobi od tekočine nazaj. V modelu zaradi enostavnosti obravnavamo krogelno nihalo, vendar je izpeljava ustrezna tudi za druga telesa, ki se jim volumen spreminja izotropno. Rezultati pa se lahko posplošijo tudi na nekatere bolj anizotropne spremembe volumna, kot jih na

primer opazimo pri glavonožcih [8, 9]. To telo se giba le-levo-desno in ni model plavalca, ki dejansko lahko plava v neki smeri. Vzmet v našem modelu pa v kontekstu glavonožcev ustreza elastičnemu tkivu plašča, ki pomembno sodeluje pri njihovem gibanju [10].



**Slika 2.** Shema modelskega podvodnega robota s spreminjajočim se volumnom, kjer  $r$  označuje polmer oscilatorja ob času  $t$ ,  $r_0$  pa je povprečen polmer oscilatorja.

Obravnavamo torej enodimenzionalni oscilator (shema prikazana na sliki 2) z maso  $m$ , volumnom  $V$  ter s konstanto vzmeti  $k$ . Nihalo niha v smeri  $x$  in lahko spreminja svoj volumen, pri čemer pa ohranja svojo maso.

Ko tako nihalo-robota potopimo v tekočino z gostoto  $\rho$  (za katero privzamemo, da je konstantna), deluje nanj t. i. Morisonova sila. Morisonova sila je semiempiričen zapis dveh osrednjih sil, ki vplivata na oscilirajoče telo v tekočini: prvi inercialni člen predstavlja spremembo vztrajnosti zaradi hidrodinamske mase, drugi člen pa predstavlja upor v tekočini. Dinamično enačbo (2. Newtonov zakon) za oscilirajoče telo zapišemo kot

$$m\ddot{x} + kx = F = -\frac{\partial}{\partial t} [C_{11}\rho V\dot{x}] - \frac{1}{2}C_D\rho A\dot{x}|\dot{x}|, \quad (1)$$

kjer sta na desni strani člena Morisonove sile in je  $A$  prečni presek telesa,  $C_D$  koeficient upora telesa,  $C_{11}$  koeficient hidrodinamske mase,  $\dot{x}$  hitrost nihala,  $\ddot{x}$  pa njegov pospešek [8]. Prvi člen na desni strani zgornje enačbe si lahko poenostavljeno razložimo tako, da si predstavljamo, da se s telesom giba tekočina z maso  $C_{11}\rho V$ . To povzroči silo sorazmerno s časovnim odvodom zmnožka dodatne mase tekočine in hitrosti telesa. Bolj natančna izpeljava tega člena je dostopna v literaturi [3].

Če enačbo (1) preuredimo, dobimo

$$(m + C_{11}\rho V)\ddot{x} + \left(\frac{1}{2}C_D A|\dot{x}| + C_{11}\dot{V}\right)\rho\dot{x} + kx = 0, \quad (2)$$

kar nakaže, da je smiselno uvesti efektivno maso  $m_e$  in časovno odvisen

efektivni koeficient dušenja  $C_e$  kot

$$m_e = m + C_{11}\rho V \quad (3)$$

$$C_e(t) = \frac{1}{2}C_D\rho A |\dot{x}| + C_{11}\rho\dot{V}, \quad (4)$$

kar omogoči, da enačbo (2) zapišemo kot efektivno enačbo dušenega nihanja

$$m_e\ddot{x} + C_e(t)\dot{x} + kx = 0,$$

ki pa ima časovno odvisen koeficient dušenja. Za doseganje optimalnega gibanja takega robota pa se praviloma poskuša doseči režim gibanja, ko je  $C_e(t) = 0$ , kar se res lahko doseže v primeru negativne spremembe volumna  $\dot{V} < 0$ . Ko je efektivni koeficient dušenja enak nič, se efektivno izniči učinek upora tekočine in dobimo nedušeno nihanje. Za doseg takega efektivno nedušene gibanja je potrebno spreminjanje volumna, pri katerem se telo počasi skrči, nato pa se hitro napihne nazaj na prvotno velikost [9]. Za tako efektivno nedušeno gibanje položaja telesa  $x$  velja

$$x = X \cos \omega t, \quad (5)$$

kjer je  $X$  amplituda odmika nihala, za fazo nihanja pa privzamemo, da je enaka nič.

Posebej zanimiv režim gibanja – ko je sistem efektivno nedušen – dobimo, ko je  $C_e = 0$ , kar da zvezo:

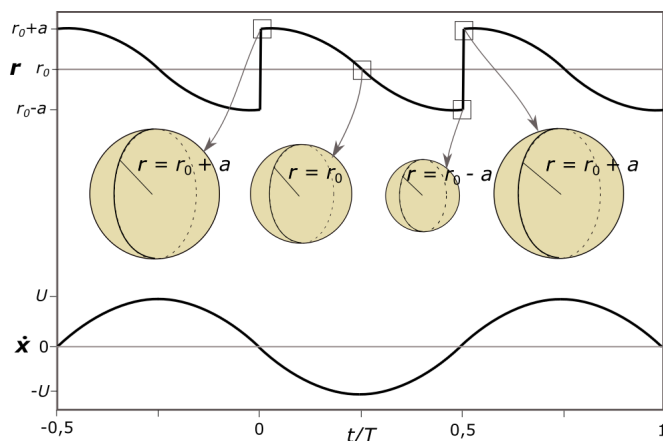
$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \frac{C_D A |\dot{x}|}{C_{11}}. \quad (6)$$

Če je nihajoče telo v obliki krogle, je njegov prečni presek enak  $A = \pi r^2$ , volumen je  $V = \frac{4\pi r^3}{3}$ , sprememba volumna pa  $\dot{V} = 4\pi r^2 \dot{r}$ , kar enačbo (6) prepíše v

$$\dot{r} = -\frac{1}{8} \frac{C_D}{C_{11}} |\dot{x}|. \quad (7)$$

Iz te zveze opazimo, da bi se moral polmer telesa  $r$  ves čas spreminjati v času, če naj ima telo konstantno hitrost, saj sta koeficienta  $C_D$  in  $C_{11}$  pozitivna. Da to omejitev zaobidemo v realnem gibanju, se volumen telesanihala poveča vsakič, ko to pride v skrajno lego, kjer je njegova hitrost enaka nič, kot nakazuje slika 3.

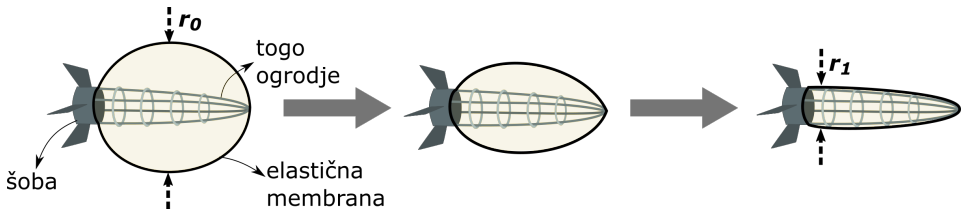
Ko je sferično telo-robot v skrajni legi, je njegova hitrost enaka nič in je efektivna elastična vzmet raztegnjena, kar ustreza stanju, ko ima telo največji volumen z radijem  $r_0 + a$ . Telo nato spustimo in to se zaradi sile vzmeti pospeši, volumen pa se začne zmanjševati. Po četrtini nihaja, ob času  $t = 0,25 T$ , se nahaja v ravnovesni legi in polmer krogle je takrat enak



**Slika 3.** Spreminjanje volumna in hitrost sferičnega telesa-robota v tekočini z efektivno nič upora. Zgornji del grafa prikazuje spreminjanje polmera krogle, na spodnjem delu grafa pa je prikazana hitrosti nihanja, kjer je  $U = \omega X$  amplituda hitrosti.

$r_0$ . Do časa  $t = 0,5 T$  pa se volumen krogle zmanjša na minimalno vrednost. Takrat je nihalo v drugi skrajni legi, kjer je njegova hitrost enaka nič, in tam se telo hitro napihne (predpostavimo, kot da hipno). Kroglo povečamo, ko miruje, saj takrat nenadno povečanje hidrodinamske mase ne vpliva na pogon [9].

Podobno gibanje, kot predstavljeno v poenostavljenem modelu nihanja telesa s spreminjajočim volumnom v okoliški tekočini, so opazovali tudi v eksperimentu, kjer pa se telo res usmerjeno giba, saj pri stiskanju uporabljajo šobo, ki usmerja tok okoliške tekočine [24]. Posebej so tako pokazali, da telo, ki spreminja obliko, nazaj pridobi del kinetične energije, ki jo je prej predalo tekočini (kar na predstavljenem primeru nihala ustreza zagotavljanju nedušene nihanja). To so demonstrirali s podvodnim vozilom z elastično membrano napeto čez togo ogrodje, ki posnema eno pulzacijo glavonožca. Shema gibanja vozila je prikazana na sliki 4. Podobno kot pri glavonožcih se elastična membrana napolni z vodo (vozilu se močno povečata prečni presek in volumen), nato pa curek vode izločen skozi šobo vozilo požene v gibanje, membrana se prazni in vozilu se prečni presek in volumen zmanjšata na velikost togega ogrodja. Zaradi zmanjšanja polmera in volumna se zmanjša hidrodinamska masa, zaradi česar, tako kot v zgornjem modelu, vozilo zopet pridobi del kinetične energije, ki jo je prej predalo okoliški tekočini. Gibanje vozila z elastično membrano so nato primerjali z gibanjem togega vozila, ki ga poganja sila curka enaka tisti pri vozilu z membrano. Ugotovili so, da je imelo vozilo z elastično membrano v primerjavi s togim vozilom 200 % večjo hitrost in 130 % večji pospešek, kar lahko pripišemo le členu  $C_{11} \dot{V} \rho \dot{x}$ , ki se je v enačbi (2) pojavil kot posledica spreminjanja oblike telesa [24, 9].



**Slika 4.** Shema gibanja podvodnega vozila z elastično membrano, ki posnema gibanje glavonožca. Elastična membrana je napolnjena z vodo, zato ima večji volumen; njen premer je  $r_0$ . Skozi šobo se nato izloča curek vode, kar požene vozilo in membrana se začne krčiti. Curek vode se ustavi, ko membrana doseže togo ogrodje vozila in je njen premer  $r_1 < r_0$ .

### Pristopi in izzivi izdelave mehkih robotov

Prožnost materialov – sploh na stikih različnih elementov robota – predstavlja osrednji izziv za izdelavo mehkih robotov, saj običajne tehnike, kot sta na primer spajanje in varjenje, ne pridejo v poštev [4]. Da je napetost stikov ob spreminjanju volumna ali oblike čim manjša, morajo imeti vsi materiali robota čim bolj podobno mehansko trdnost, torej podoben prožnostni modul. Materiali, kot so kovine in trda plastika, iz katerih so narejeni običajni roboti, imajo tipične vrednosti prožnostnega modula večje od  $10^9$  Pa, prožnostni modul večine tkiv v živih organizmih, na primer kože in mišic, pa ima velikost med nekje  $10^2$  in  $10^6$  Pa. Prav to razhajanje je v ozadju številnih izzivov pri načrtovanju in izdelavi mehkih robotov.

Najbolj pogosto uporabljena metoda za izdelavo mehkih robotov je vlivanje v modele (»*molding*«), kjer v kalupe vlivajo tekoče materiale (npr. silikonsko gumo), ki se nato strdijo in jih lahko iz kalupa odstranijo. Pogosta težava, ki se pojavlja pri tem postopku, so zračni mehurčki, ki se ujamejo v material, kar pa lahko rešijo z vakuumskim razplinjevanjem ali s centrifugo [20].

Obstaja pa tudi več drugih pristopov za izdelavo mehkih robotov. Metoda oblikovnega odlaganja (»*shape deposition manufacturing*«) temelji na tem, da se material in podporna struktura nalagajo v plasteh in sproti oblikujejo, kar je posebej primerno za vključevanje čipov, vezij in žic v polimere [4]. Metoda izdelave pametnih mikrokompozitov (»*smart composite microstructure*«) združuje polimere okrepljene z ogljikovimi vlakni z elastičnimi polimeri, ki delujejo kot sklepi, kar se izkaže posebej uporabno predvsem za manjše robote, ki merijo nekaj mm. Tretja metoda, ki se uporablja za izdelavo mehkih robotov, pa je 3D-tiskanje, pri kateri pa se lahko uporabi več različnih materialov, s čimer dobijo strukture, ki imajo lokalno različne mehanske lastnosti [4].

## Pogon mehkih robotov

### Pogonski mehanizmi

Aktuator je osnovni element robota, ki omogoča njegovo premikanje ali poganjanje, pri čemer sprejme nek signal – električni, svetlobni, ... – in ga nato pretvori v mehansko spremembo kot npr. spremembo oblike dela robota. Klasični aktuatorji za svoje delovanje večinoma izkoriščajo hidravlične, pnevmatične ali električne principe, so pa praviloma zaradi svoje teže, velikosti in togosti pogosto neprimerni za uporabo v mehkih robotih [1, 14]. Aktuatorji mehkih robotov so zato narejeni praviloma iz mehkih materialov, izvajajo lahko kompleksne premike in imajo veliko tako aktivnih kot pasivnih prostostnih stopenj [27].

Pogonski mehanizmi, preko katerih delujejo aktuatorji, so različni [11] in vključujejo na primer svetlobne, električne ali magnetne signale, ki se lahko točno in hitro spreminjajo in hkrati delujejo na daljavo. Za biomedicinsko uporabo so toplotni signali, kot je na primer gretje z UV-svetlobo, pogosto bolj varni, a so velikokrat tudi počasnejši in manj učinkoviti. Aktuatorji, ki delujejo na tekočino pod pritiskom, lahko proizvajajo velike sile in so lahko precej lahki, a običajno zahtevajo povezavo z zunanjo črpalko. Aktuatorji, ki jih poganjajo spremembe v kemijski sestavi, vlagi ali pH, morajo delovati v tekočini v natančno kontroliranem okolju, poleg tega pa je odzivni čas po navadi daljši [11].

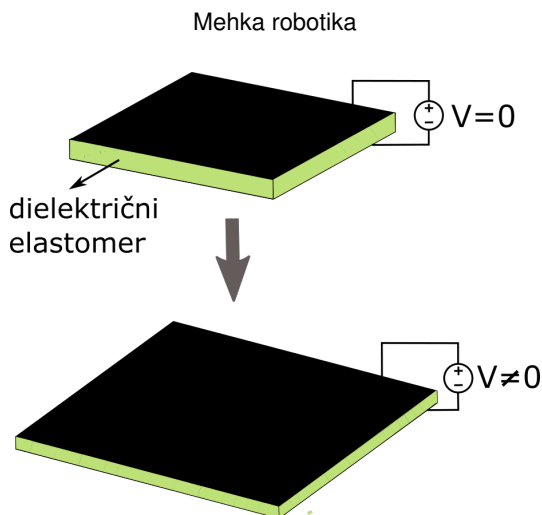
### Materiali

Pogonski mehanizem in vzbujevalni signal, preko katerega deluje aktuator, bistveno vpliva na primernost materiala za izdelavo mehkih robotov. Najbolj pogosto uporabljeni materiali za aktuatorje v mehkih robotih so polimeri, geli, tekočine, papir in ogljik [11].

Polimeri so sestavljeni iz zelo dolgih molekul, ki pa sestojijo iz ponavljajočih se manjših strukturnih enot – monomerov. Poznamo umetno sintetizirane polimere, to sta na primer silikonska guma in poliuretan, in naravne polimere, kar so na primer DNK in različni proteini. V mehki robotiki so pogosto uporabljeni polimeri iz tekočih kristalov, polimeri z oblikovnim spominom (*»shape-memory polymers«*) in dielektrični polimeri [11]. Princip delovanja dielektričnega elastomera je prikazan na sliki 5, kjer napetost na elektrodah povzroči mehansko napetost in posledično spremembo debeline elastomera [29].

Aktuatorje, ki delujejo na osnovi tekočin, po navadi aktivira sprememba tlaka ali viskoznosti [11]. Izziv pri razvoju takih aktuatorjev je, da je tok tekočin lahko kompleksen in včasih ob stiku s površinami ali drugimi tekočinami pride do neželenega mešanja. Poleg tega so lastnosti mnogih tekočin močno pogojene z okoljskimi dejavniki. Eden od pristopov kontrole tekočine

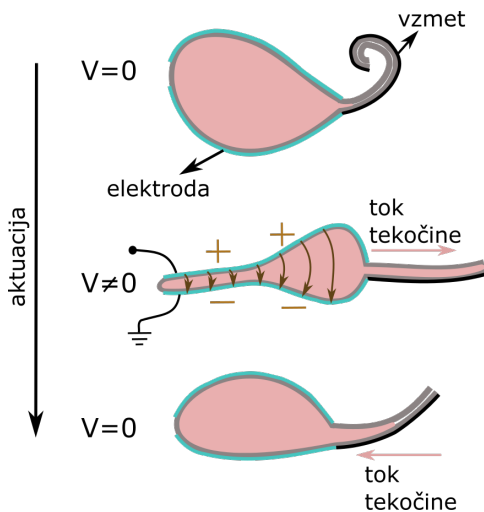




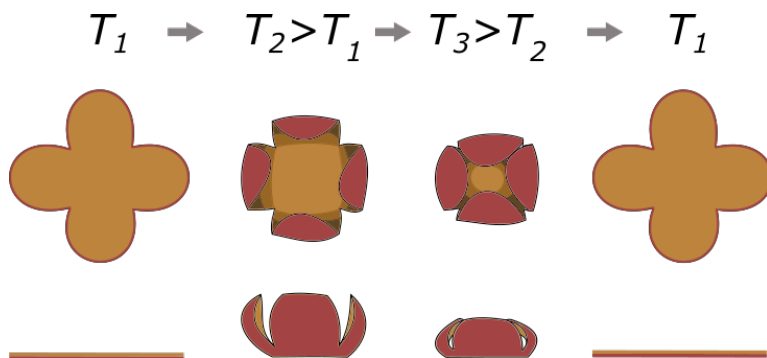
**Slika 5.** Princip delovanja aktuatorja iz dielektričnega elastomera. Napetost na elektrodah povzroči spremembo debeline elastomera, kar povzroči mehansko napetost v smeri širjenja elastomera.

je, da se površino tekočine prekrije s koloidnimi delci (hidrofilnimi, hidrofobnimi, ...), kar npr. lahko onemogoči stik s površinami in prepreči mešanje različnih tekočin [11]. Primer aktuatorja, ki deluje na osnovi tekočine, je prikazan na sliki 6. Znotraj polimernega ovoja, na katerega so naparjene elektrode, je dielektrična tekočina. Napetost na elektrodah povzroči stiskanje polimernega ovoja, kar tekočino potisne naprej in povzroči razteg vzmeti na koncu aktuatorja. Ko se napetost izključi, se vzmet spet skrči in tekočina steče nazaj [16].

Ogljikove nanocevke se pogosto vključijo v aktuatorje za mehke robote, čeprav imajo relativno visok elastični modul ( $> 1$  TPa) [11]. Poleg nanocevk se v aktuatorje vključujejo tudi atomi ogljika in grafen, saj imajo vsi ti materiali visoko električno in toplotno prevodnost. Nanocevke so lahko narejene iz ene ali več plasti grafena, pri čemer je njihov premer tipičnih dimenzij  $\sim 1$  nm, dolžina pa je lahko tudi milijonkrat večja. Lahko so prevodne ali polprevodne, odvisno od kota, pod katerim je zvita plast grafena. Čeprav je raztezek ogljikovih struktur, v primerjavi z drugimi aktuatorji v mehki robotiki, tipično manjši, pa jih ravno zaradi zanimivih električnih in toplotnih lastnosti velikokrat uporabljajo [11]. Na sliki 7 je prikazano delovanje aktuatorja v obliki rože, ki je narejen iz tanke plasti grafena. Z ustrezno obdelavo površine dosežejo, da se sredina plasti grafena drži površine. To strukturo postavijo v vodo in ob segrevanju vode se listi zložijo, sredina pa ostane na mestu. Ob ponovnem ohlajanju se listi raztegnejo v prvotno obliko [28].



**Slika 6.** Shema delovanja aktuatorja na osnovi dielektrične tekočine. Napetost na elektrodah povzroči stiskanje ovoja, kar tekočino potisne v lovko in vzmet se raztegne. Ko se napetost izključi, tekočina steče nazaj v ovoj in vzmet se spet zviže.

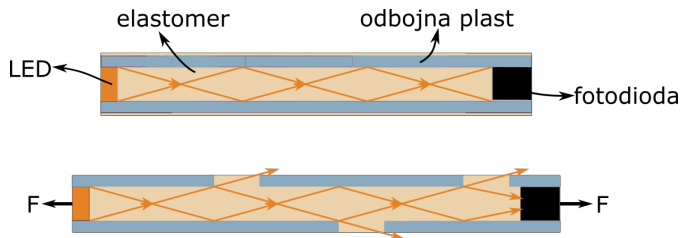


**Slika 7.** Prikaz delovanja aktuatorja iz grafena v obliki rože. Ob povečanju temperature  $T$  se listi zložijo, sredina plasti grafena pa ostane na mestu. Ob ponovnem ohlajanju se listi raztegnejo v prvotno obliko.

## Krmiljenje mehkih robotov

Krmiljenje je ključen del delovanja vsakega robota, saj z njim določamo delo oziroma funkcije, ki jih robot lahko avtonomno ali kontrolirano opravlja. Gibanje mehkih robotov je pogosto težko predvideti ali meriti, zato je delovanje mehkih robotov pogosto omejeno na vodenje brez povratne zanke [6]. To pomeni, da robot nima povratne informacije in se giba avtonomno, tudi brez informacije o dogajanju v svoji okolici. Za vodenje s povratno zanko, pri katerem vodenje prilagajamo in stanje sistema primerjamo z referenco, pa moramo biti sposobni meriti gibanje robota [30]. Ponovno zaradi narave mehkih robotov, njihovega gibanja praviloma ne moremo meriti s tradicionalnimi senzorji (kot npr. piezoelementi, ...). Idealni senzorji v mehki robotiki bi bili gibljivi, lahki in ne bi omejevali gibanja samega robota.

Povsem mehki senzorji zato praviloma temeljijo na uporabi elastomerov, pri čemer na primer merijo upornost ali pa intenziteto prepuščene svetlobe. Primer takega mehkega senzora je prikazan na sliki 8. Skozi elastomer prevlečen z odbojno plastjo, ki deluje kot valovni vodnik, potuje svetloba. Ko se elastomer zaradi napetosti raztegne, se v neelastični odbojni plasti pojavijo odprtine, zaradi česar del svetlobe uide iz valovoda in njena intenziteta se zmanjša [23]. Pogosta težava s takimi senzorji je, da je težko sklepati, kakšna deformacija je povzročila spremembo intenzitete.

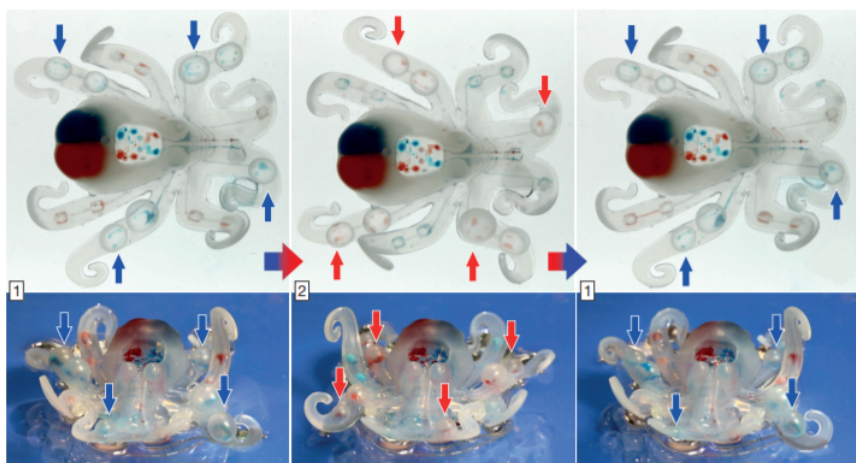


**Slika 8.** Princip delovanja mehkega optičnega senzora. Svetloba potuje skozi elastomer prevlečen z odbojno plastjo. Ob raztezku elastomera zaradi sile  $F$  se v odbojni plasti pojavijo odprtine in del svetlobe uide, zaradi česar se intenziteta svetlobe na koncu valovnega vodnika zmanjša.

Pogosto se kot senzorje za krmiljenje mehkih robotov uporabljajo tudi dielektrični elastomeri, in sicer tako, da tanko plast elastomera vstavijo med dve mehki elektrodi, s čimer dobijo kondenzator. Ko se zaradi mehanske napetosti spreminja debelina elastomera, se s tem spreminja tudi kapacitivnost. Pogost izziv pri takih senzorjih predstavlja temperaturna odvisnost dielektrične konstante. Na primer pri spremembi temperature od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  v nekaterih polimerih lahko pride tudi do 30 % povečanja dielektrične konstante [6].

## Prvi avtonomni mehki robot

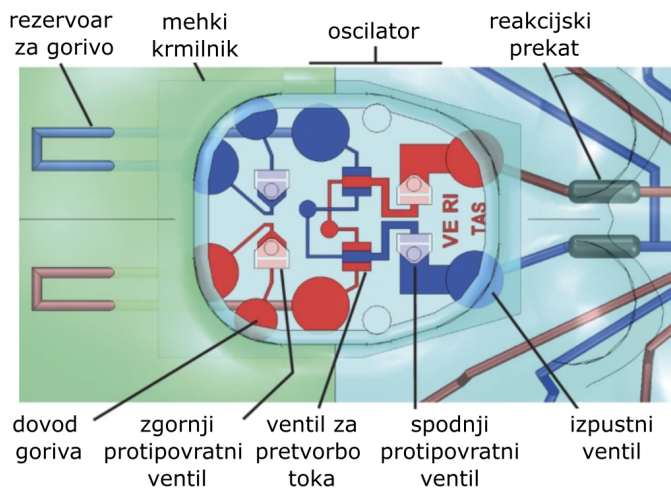
Področje mehke robotike je v relativno začetnih stopnjah razvoja, tako da velika večina razvitih mehkih robotov vključuje trde komponente, kar vodi do hibridnih sistemov. Za gibanje ponavadi potrebujejo zunanje napajanje in vodenje, pogosto prav tako v obliki togih sistemov. Ravno zato je napredek, ki ga je leta 2016 dosegla skupina na Univerzi Harvard, tako pomemben. Razvili so Octobota (glej sliko 9), prvega povsem mehkega avtonomnega robota, ki za delovanje ne potrebuje zunanjega napajanja ali vodenja. Octobot sicer nima velike uporabne vrednosti, saj zmore za zdaj le manjše premike svojega telesa.



**Slika 9.** Prvi avtonomni mehki robot Octobot in njegovo delovanje. Na osnovi mikrofluidnega logičnega vezja Octobot preklaplja med dvema načinoma aktuacije. 1) Najprej plin potuje v štiri izmed lovke (označene z modrimi puščicami) in povzroči njihov premik, nato pa preko ventila odteče v okolico. 2) Zatem plin steče v preostale štiri lovke (označene z rdečimi puščicami) in povzroči aktuacijo. Ta proces se ponavlja, dokler v rezervoarjih ne zmanjka goriva. Ponatisnjeno z dovoljenjem Macmillan Publishers Ltd: *Nature* (An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots, Wehner, M., Truby, R., Fitzgerald, D. et al.), copyright 2016.

Octobot je povsem mehek pnevmatični robot z osmimi lovkami. Giblje se avtonomno, brez vpliva okolice. Njegovo telo je narejeno iz silikona, za izdelavo telesa so uporabili vlivanje v modele in 3D-tiskanje. Senzorjev robot nima, torej gre za vodenje brez povratne zanke, saj svojega gibanja ni zmožen prilagajati okolju. Napajanje poteka preko razpada monopropelanta, torej goriva, ki energijo sprošča preko eksotermnega kemijskega razpada ob stiku s katalizatorjem. Ob tem se sprosti plin, ki ga nato robot uporabi za aktuacijo. Napajanje vodi mikrofluidno logično vezje, ki je v grobem sestavljeno iz treh delov: rezervoarja za gorivo, oscilatorja, ki kontrolira do-

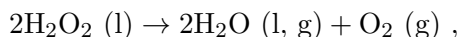
## Mehka robotika



**Slika 10.** Shema mikrofluidnega krmilnika Octobota. Glavni trije deli so rezervoarja za gorivo, oscilator ter prekata, kjer poteče reakcija. Prilagojeno ponatisnjeno z dovoljenjem Macmillan Publishers Ltd: *Nature* (An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots, Wehner, M., Truby, R., Fitzgerald, D. et al.), copyright 2016.

vajanje goriva, in prekata, kjer poteka reakcija. Njegova shema je prikazana na sliki 10. Pri izdelavi Octobota so poleg vezja s 3D tiskanjem v elastomer dodali tudi kanale z dvema vrstama črnila. Eno izmed črnil – ubežno črnilo – je namenjeno ustvarjanju kanalov, po katerih se ob delovanju pretaka plin. Izdelano je na osnovi vode in ga po tiskanju odstranijo z izhlapevanjem, da dobijo odprte kanale. Drugo črnilo pa vsebuje platino, ki deluje kot katalizator za gorivo.

Potek delovanja Octobota je prikazan na sliki 9. Za delovanje najprej v dva rezervoarja vbrizgajo 0,5 ml goriva ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), od koder teče v oscilator, kjer sistem ventilov pretvori enotni tok goriva v izmenični tok. Medtem ko je tok iz enega kanala začasno prekinjen, gorivo iz drugega kanala teče v prekat, v katerega je bila že prej vbrizgana platina. Tam poteče reakcija razpada tekočega vodikovega peroksida v vodo in kisik



pri čemer nastaja torej plin kisik, zaradi česar se volumen goriva pri danem tlaku poveča za faktor 160-krat. Nastali plin nato teče v štiri lovke, ki se zaradi plina razširijo, kar povzroči premik. Nato se plin skozi ventil sprosti v okolico. Takrat se sprosti tok goriva iz drugega kanala in postopek se ponovi, le da tokrat plin napolni druge štiri lovke [25]. Ta proces se nato ponavlja, dokler ne zmanjka goriva, kar je za opisan sistem približno osem minut.

Kot omenjeno, Octobot za zdaj nima posebne uporabne vrednosti, saj nima senzorjev, ni zmožen interagirati z okolico ter zmore le manjše premike. Kljub temu pa je pomemben za nadaljnji razvoj mehke robotike, saj prikazuje možnost izdelave povsem mehkih robotov. Taki roboti bi zaradi mehкости in potencialne enostavnosti izdelave lahko v prihodnosti imeli pomembno vlogo v medicini in na nekaterih drugih področjih [5].

## Zaključek

Razvoj področja mehke robotike se je začel šele nedavno, zaradi česar je za zdaj večina raziskav usmerjena v iskanje ustreznih materialov in njihovo implementacijo v robotske sisteme. Inherentne prednosti – sploh mehкost in dobra biokompatibilnost – nakazujejo nabor zanimivih možnih aplikacij od medicinskih pripomočkov do uporabe v vesolju [12]. NASA na primer razvija mehke robote, ki bi se uporabili pri raziskovanju Lune ali Marsa [17], skupina znanstvenikov v Švici pa razvija mikrorobote, velikosti le  $10\ \mu\text{m}$ , ki bi omogočali minimalno invazivne operacije [7]. Da pa bi povsem mehki roboti zares postali širše uporabni, je treba poiskati nove algoritme za nadziranje gibanja mehkih robotov, ki bodo upoštevali značilnosti materialov in njihovo dinamiko, poiskati hitrejšе in cenejše metode izdelave ter zagotoviti enostavnost upravljanja mehkih robotov. Splošneje vsebine mehke robotike odpirajo nove vsebine na naboru znanstvenih področij od bioinženiringa in medicine do fizike materialov [14].

## LITERATURA

- [1] R. Addinall, T. Ackermann in I. Kolaric, *Nanostructured Materials for Soft Robotics – Sensors and Actuators*, Soft Robotics: Transferring theory to application, 147–156 (2015), dostopno na [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44506-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44506-8_13), ogled 30. 5. 2022.
- [2] E. Anderson, W. Quinn in M. De Mont, *Hydrodynamics of locomotion in the squid *Loligo pealei**, Journal of Fluid Mechanics **436**, 249–266 (2001), dostopno na [10.1017/S0022112001004037](https://doi.org/10.1017/S0022112001004037), ogled 30. 5. 2022.
- [3] C. E. Brennen, *A review of added mass and fluid inertial forces*, Naval civil engineering laboratory, California, 1982.
- [4] K.J. Cho, J.S. Koh, S. Kim, W.S. Chu, Y. Hong in S.H. Ahn, *Review of Manufacturing Processes for Soft Biomimetic Robots*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing **10**, 171–181 (2009), dostopno na <https://doi.org/10.1007/s12541-009-0064-6>, ogled 30. 5. 2022.
- [5] N. Daly, *Octopus Inspires World's First Soft, Autonomous Robot*, National Geographic, maj 2017, dostopno na <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/explore-octobot-soft-robot>, ogled 30. 5. 2022.

- [6] W. Felt, *Sensing Methods for Soft Robotics*, doktorsko delo, The University of Michigan, 2017.
- [7] S. Fusco, M. S. Sakar, S. Kennedy, C. Peters, R. Bottani, F. Starsich, A. Mao, G. A. Sotiropoulos, S. Pané, S. E. Pratsinis, D. Mooney in B. J. Nelson, *An integrated microrobotic platform for on-demand, targeted therapeutic interventions*, *Advanced Materials* **26**, 952–957 (2014), dostopno na <https://doi.org/10.1002/adma.201304098>, ogled 30. 5. 2022.
- [8] F. Giorgio-Serchi in G. Weymouth, *Drag cancellation by added-mass pumping*, *Journal of Fluid Mechanics* **798**, R3 (2016), dostopno na [10.1017/jfm.2016.353](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.353), ogled 30. 5. 2022.
- [9] F. Giorgio-Serchi in G. D. Weymouth, *Underwater Soft Robotics, the Benefit of Body-Shape Variations in Aquatic Propulsion*, *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*, *Biosystems & Biorobotics* **17**, 37–46 (2017), dostopno na [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46460-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46460-2_6), ogled 30. 5. 2022.
- [10] J. M. Gosline in R. E. Shadwick, *The role of elastic energy storage mechanisms in swimming: an analysis of mantle elasticity in escape jetting in the squid, *Loligo opalescens**, *Canadian Journal of Zoology* **61**(6), 1421–1431 (1983), dostopno na <https://doi.org/10.1139/z83-191>, ogled 30. 5. 2022.
- [11] L. Hines, K. Petersen, G. Z. Lum in M. Sitti, *Soft Actuators for Small-Scale Robotics*, *Advanced Materials* **29**, 1603483 (2017), dostopno na <https://doi.org/10.1002/adma.201603483>, ogled 30. 5. 2022.
- [12] F. Iida in C. Laschi, *Soft Robotics: Challenges and Perspectives*, *Procedia Computer Science* **7**, 99–102 (2011), dostopno na <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.12.030>, ogled 30. 5. 2022.
- [13] J. M. J. Journée in W. W. Massie, *Offshore Hydromechanics*, Delft University of Technology, Delft, Nizozemska (2001).
- [14] S. Kim, C. Laschi in B. Trimmer, *Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics*, *Trends in Biotechnology* **31**, 287–294 (2013), dostopno na <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>, ogled 30. 5. 2022.
- [15] C. Laschi, F. Iida, J. Rossiter, M. Cianchetti in L. Margheri, *Introduction, Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*, *Biosystems & Biorobotics* **17**, 1–4 (2017), dostopno na [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46460-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46460-2_1), ogled 30. 5. 2022.
- [16] P.-W. Lin in C.-H. Liu, *Bio-Inspired Soft Proboscis Actuator Driven by Dielectric Elastomer Fluid Transducers*, *Polymers* **11**, 142 (2019), dostopno na <https://doi.org/10.3390/polym11010142>, ogled 30. 5. 2022.
- [17] J. Miley, *NASA Develops Soft Robots for Future Space Missions*, *Interesting Engineering*, 2019, dostopno na <https://interestingengineering.com/nasa-develops-soft-robots-for-future-space-missions>, ogled 30. 5. 2022.
- [18] S. G. Nurzaman, F. Iida, L. Margheri in C. Laschi, *Soft Robotics on the Move: Scientific Networks, Activities, and Future Challenges*, *Soft Robotics* **1**, 154–158 (2014), dostopno na <http://doi.org/10.1089/soro.2014.0012>, ogled 30. 5. 2022.