

Napredni oblikovno programabilni aktuatorji na osnovi polimerno-dispergiranih tekočerkristalnih elastomerov

Oznaka in naziv projekta

L1-70060 Napredni oblikovno programabilni aktuatorji na osnovi polimerno-dispergiranih tekočerkristalnih elastomerov

L1-70060 Advanced shape-programmable actuators based on polymer dispersed liquid crystal elastomers

Logotipi ARIS in drugih sofinancerjev



Projektna skupina

Vodja projekta: [dr. Andraž Rešetič](#)

Sodelujoče raziskovalne organizacije: [Institut "Jožef Stefan"](#)

Sestava projektne skupine: [dr. Andraž Rešetič](#), [dr. Marta Lavrič](#), [dr. Georgios Kordogiannis](#)

Vsebinski opis projekta

Razvoj mehkih, fleksibilnih materialov z lastnostmi spreminjanja oblike in oblikovno programabilnimi lastnostmi je ključnega pomena za napredek mehke robotike, biomehanike in fleksibilne elektronike. Materiali, ki se spreminjajo po potrebi in lahko prehajajo med trdnimi 3D oblikami v odzivu na dražljaje, kot je toplota, predstavljajo razred aktivnih materialov z možnostjo opravljanja nalog izven zmožnosti klasičnih strojev ali robotov. Ta projekt se osredotoča na polimerno-dispergirane tekočerkristalne elastomere (PDTKE) kot večstranski pametni material za razvoj naprednih mehkih aktuatorjev za integracijo v prihodnje naprave.

PDLCE so kompozitni materiali, ki združujejo tekočerkristalno elastomerne (TKE) mikrodolce, vgrajene v silikonsko matrico. Njihove lastnosti se prenesejo na celoten kompozit, tako da materialu omogočijo podobno termomehansko (TM) preoblikovanje in oblikovni spomin. V nasprotju s konvencionalnimi TKE pa lahko PDTKE oblikujemo v trdne 3D oblike in poljubne velikosti, kar prinaša prednosti v proizvodnji pametnih materialov, vključno z možnostjo prilagajanja in vnašanja novih lastnosti s spreminjanjem vrste in razmerij TKE vključkov. Taka prilagodljivost omogoča ustvarjanje mehkih TM aktuatorjev z prilagojenimi ter novimi lastnostmi brez potrebe po zapletenih sinteznih postopkih.

Trenutno je obvezno potrebna magnetna ureditev TKE delcev, če hočemo v PDTKE vpeljati reverzibilne oblikovne spremembe, medtem ko se oblikovni spomin lahko le enosmerno sprosti nazaj v prvotno obliko, nakar je treba sistem ponovno preoblikovati. Naš cilj je v PDLCE vnesti reverzibilno spominsko lastnost z vključevanjem specializiranih TKE vključkov z točno določenimi faznimi prehodi, katerih

kombinacija nam bo omogočila ohranitev nove, programirane oblike, hkrati pa tudi aktuacijo med novo in prvotno geometrijo.

PDTKE bomo dodali nove funkcionalnosti z vnosom vključkov iz tekočih kovin iz zlitin galija in indija, kar nam bo zagotovilo prevodnost materiala. S tem bomo potencialno lahko PDTKE aktuirali z upornim gretjem, medtem ko bodo spremembe kapacitivnosti materiala na podlagi mehanskih deformacij, omogočile, da bodo PDTKE lahko služili kot temperaturni ali deformacijski senzorji. Ga/In zlitinam lahko z različnimi razmerji obeh kovin prilagajmo temperaturo tališča med 30°C in 150°C. Prevodni PDTKE se bodo zato hitro utrdili pod izbranim tališčem. To bi PDTKE omogočilo zaklenitev deformacije, kjer PDTKE po hitrem hlajenju lahko ohrani svojo aktuirano obliko brez potrebe po trajni izpostavitvi povišani temperaturi.

PDTKE lahko tudi preprosto vlijemo okoli trdnih objektov in s tem v kompozitni material integriramo različne trdne površine ali komponente. V PDTKE bomo zato vgradili prevodne žice oz. vodnike. Tako bomo izdelali modularne PDTKE gradnike z vgrajenim sistemom za gretje – aktuacijo. Taki aktuatorji bodo sestavljeni v različne konfiguracije, s katerimi bomo konstruirali mehke naprave. To bo prikazano z izdelavo umetne oprijemalke ter robotske gosenice z peristaltskim gibanjem. Prav tako bodo v PDTKE dodane montažne točke za pritrditev dodatnih trdnih površin, s katerimi bomo ustvarili hibridne aktuatorje, ki so bolj trpežni in izkazujejo večjo preciznost v premikih v primerjavi z mehкими PDTKE. Za demonstracijo bomo razvili 3D pozicioner s samostojnim nadzorom pozicije v X, Y in Z smeri.

Osnovni podatki sofinanciranja so dostopni na spletni strani [SICRIS](#).

Faze projekta in opis njihove realizacije

1. Delovni paket

Naslov DP: Izbor materialov. Sinteza in karakterizacija TKE.

Vodja: dr. Marta Lavrič

Začetek: 1. mesec

Konec: 30. mesec

Cilji:

Na podlagi razpoložljivih mezogenih komponent bomo sintetizirali več kandidatnih TKE materialov z različnimi temperaturnimi faznimi prehodi ter izbrali najprimernejše za pripravo PDTKE kompozitov z reverzibilnim spominom oblike, tj. SM-PDTKE (pripravljenih v DP2). Mezogeni bodo mono- ali bifunkcionalni, kar bo vodilo do sinteze stransko-verižnih oziroma glavno-verižnih TKE. Na voljo že imamo komercialno pridobljen nabor vinilno terminiranih bifunkcionalnih mezogenov tipa M4, M6, M8, M11 ter drugih 'po-meri' sintetiziranih mezogenov. Temperature faznih prehodov mezogenih komponent bomo določili z ASC kalorimetrijo, pri čemer se bomo osredotočili na jasno izražene prehode med steklasto (g), smektično (Sm), nematično (N) in izotropno (I) fazo.

Sintetizirane TKE bomo razdelili v dve kategoriji: (i) utrjevalci (s-TKE), ki bodo delovali kot ojačitveni vključki za vtiskovanje spomina oblike v PDTKE kompozite, in (ii) aktuatorji (a-TKE), ki bodo služili kot aktivne vključke za temperaturno inducirano spremembo oblike. Zahteva za utrjevalce je prisotnost visoko-temperaturne obstojne steklene faze (g), ki mora biti tudi mehansko dovolj robustna, da pri nižjih temperaturah prepreči relaksacijo deformirane matrice (pogoj: Youngov modul $E_g(s-TKE)$ ($T < T_g$) $\gg E_{PDMS}$). Te parametre bomo prilagajali z izbiro mezogenov in stopnjo zamreženja.

Fazni prehodi aktuatorjev morajo potekati pod T_g utrjevalcev, da omogočijo učinkovito temperaturno gnano aktuacijo brez mehčanja utrjevalcev, saj bi to sicer vodilo do relaksacije programirane oblike PDTKE kompozita.

Kot že omenjeno, je mehansko togost in temperature faznih prehodov steklene faze mogoče uravnavati z vrsto in količino zamreževalca (dvo-, tri- ali petfunkcionalni zamreževalci), uporabljenega pri pripravi TKE. Drugi tekočerkristalni fazni prehodi so večinoma intrinzični lastnostim mezogena, vendar jih je mogoče dodatno prilagoditi s kombiniranjem več vrst mezogenov v enem TKE [1].

Pripravljene TKE bomo termično in termomehansko karakterizirali ter izbrali najprimernejše kombinacije utrjevalcev in aktuatorjev za nadaljnjo pripravo PDTKE kompozitov.

2. Delovni paket

Naslov DP: Reverzibilni PDTKE s spominom oblike.

Sinteza in karakterizacija večkomponentnih PDTKE.

Vodja: dr. Andraž Rešetič

Začetek: 1. mesec

Konec: 33. mesec

Cilji:

Pripravili bomo več kompozitov PDTKE s spominom oblike (SM-PDTKE) z različnimi kombinacijami s-TKE in a-TKE, določenimi v DP1, na podlagi njihovih najprimernejših termomehanskih (TM) lastnosti (M1–2 in D1–2). Delo na pripravi SM-PDTKE se bo začelo takoj z uporabo že razpoložljivih TKE materialov. Na tej osnovi bomo določili minimalni masni delež utrjevalcev TKE, $w_{(s-TKE)}$, potreben za doseganje zadostnega razmerja fiksacije $R_{fix} = \epsilon_{mem} / \epsilon_{prog}$ programirane deformacije (kriterij: $R_{fix} \approx 0,70$), kjer ϵ_{mem} in ϵ_{prog} predstavljata zapomnjeno oziroma programirano deformacijo.

Po sintezi prvega s-TKE z dovolj visoko temperaturo steklastega prehoda T_g v DP1 (M1–2) bomo pripravili začetni prototip SM-PDTKE, ki bo vseboval tako s-TKE kot a-TKE. Na tem prototipu bomo ovrednotili stopnjo potlačitve TM aktuacije v odvisnosti od koncentracije $w_{(s-TKE)}$ ter mehanskih lastnosti posameznih komponent. Ugotovitve teh študij ter zaporedna uporaba drugih kombinacij vključkov s-TKE in a-TKE naj bi vodile do razvoja prvega funkcionalnega SM-PDTKE z reverzibilno aktuacijo.

Optimizacijo TM lastnosti SM-PDTKE bomo nadaljevali s preizkušanjem dodatnih kombinacij vključkov TKE ter z variiranjem Youngovega modula matrice, dokler ne dosežemo tako zadostnega razmerja fiksacije kot tudi ustrezne stopnje reverzibilne TM deformacije λ_{TM} (kriteriji: $R_{fix} \approx 0,70$, $\lambda_{TM} = 10\%$). Tako optimizirani SM-PDTKE bodo uporabljeni za izdelavo različnih aktuatorjev v DP4 in DP5. SM-kompoziti bodo dodatno fino prilagojeni z namenom priprave optimalnega kompozita z najvišjima možnima vrednostma R_{fix} in λ_{TM} .

Raziskave z NMR, usmerjene v orientacijski red TKE in redni parameter mezogenov v SM-PDTKE, bodo potekale vzporedno z drugimi aktivnostmi. Spremembe rednega parametra mezogenov v vključkih TKE zaradi programiranja oblike doslej še niso bile raziskane. Te raziskave se bodo začele na že razvitih PDTKE z nereverzibilno aktuacijo, še preden bodo iz DP1 na voljo ustrezni kandidati (D1–2). Vključki TKE bodo vsebovali majhen delež devterijem označenih mezogenih komponent (5 mol % M(D)6), kar bo omogočilo pridobitev devterijem perturbiranih NMR spektrov. Preučevali bomo temperaturno odvisnost rednega parametra mezogenov ter orientacijski red delcev TKE v deformiranih in nedeformiranih SM-PDTKE. Po razvoju prvega funkcionalnega reverzibilnega SM-PDTKE bomo NMR raziskave razširili še na prehode reda in nereda v vključkih s-TKE in a-TKE. Na ta način bomo lahko ovrednotili temperaturno dinamiko vtisnjenega mezogenega reda in prehodov, ki so odgovorni za reverzibilno aktuacijo SM-PDTKE.

3. Delovni paket

Naslov DP: Prevodni in obliko-zaklepni PDTKE.

Izbor tekoče kovine in priprava ter karakterizacija PDTKE.

Vodja: dr. George Cordoyiannis

Začetek: 1. mesec

Konec: 36. mesec

Cilji:

Osredotočili se bomo predvsem na pripravo prevodnih kompozitov PDTKE (LM-PDTKE), ki bodo vsebovali vključke tekoče kovine (LM) kot prevodni material. Galij je trden pod 29,8 °C, zato naj bi bila njegova dispergacija v kompozitih PDTKE razmeroma enostavna, saj priprava PDTKE vključuje kriomletje potrebnih tekočih in elastičnih komponent v Cryomillu, ki deluje pri približno -196 °C. LM lahko tako dodamo kot dodatno polnilo poleg materiala TKE. Kljub temu bomo preučili več sestav zlitin Ga/In, da prilagodimo temperaturo tališča med 15 °C in 153 °C za praktično sintezo LM-PDTKE. Prevodne kompozite bomo pripravljali z različnimi koncentracijami LM, dokler ne dosežemo električne prevodnosti kompozita.

LM-PDTKE bomo zamreževali bodisi v homogenem magnetnem polju znotraj trajnega magneta z $B = 1$ T, da dobimo magnetno poravnane, aktuatorske kompozite, bodisi v sušilniku/peči, da dobimo neaktuatorske, vendar oblikovno programabilne PDTKE. Ko bo razvit funkcionalni prototip SM-PDTKE (DP2, D2-1), bomo združili prevodni in SM-sistem ter pripravili LM-PDTKE z reverzibilnimi SM-lastnostmi. Zmožnost Joulovega segrevanja ob dovedenem električnem toku bomo preizkusili s termokamero, aktucijo pa karakterizirali z ekstenzometrom. Elektrode bomo pritrdili na različne strani LM-PDTKE ter merili prevodnost v odvisnosti od deformacije in TM-aktucije, s čimer bomo ovrednotili potencial materiala kot TM-senzorja.

Kot sekundarni cilj v DP3 bomo raziskali možnost uporabe vključkov LM kot mehanizma za preprečevanje relaksacije deformacije pri določeni temperaturi, s čimer bi pridobili PDTKE z zmožnostjo zaklepanja oblike (SL-PDTKE). Pripravili in karakterizirali bomo ustrezno zlitino Ga/In ter jo uporabili kot nadomestek za vključke s-TKE v magnetno poravnanih PDTKE za izdelavo delujočega prototipa SL-PDTKE (kriteriji: zaklep vsaj 30 % relaksirajoče deformacije pri hitrem ohlajanju ter popolna relaksacija pri počasnem ohlajanju). Termomehanske lastnosti in aktivacijske temperature bomo določili s TM in toplotnimi meritvami z namenom optimizacije učinkovitosti zaklepanja oblike in temperaturnih hitrosti.

Po potrebi bomo vključke LM za zaklepanje oblike dodatno integrirali v SM-PDTKE, da raziščemo možnost razvoja oblikovno ponovno programabilnega SL-PDTKE z reverzibilno aktucijo.

4. Delovni paket

Naslov DP: Mehki aktuatorji na osnovi PDTKE.

Izdelava mehkega umetnega vitice s strukturo jedro–plašč in modularnih mehkih aktuatorjev.

Vodja: dr. Marta Lavrič

Začetek: 15. mesec

Konec: 34. mesec

Cilji:

Delovni paket bo osredotočen na razvoj novih mehkih TM-aktuatorjev, primernih za nadaljnjo integracijo v mehke naprave z enotočkovno aktivacijo. Osnovne aktuatorje na osnovi PDTKE bomo pripravili z vgrajenimi prevodnimi žicami, ki bodo potekale skozi volumen PDTKE. Takšni PDTKE bodo bodisi poravnani v magnetnem polju (TM-aktuatorski material) bodisi zamreženi v peči (enosmerne SM-lastnosti). Večkomponentne PDTKE bomo dodatno raziskali v kombinaciji z materiali SM-PDTKE.

Kot demonstrator mehkega aktuatorja/naprave bomo pripravili umetno vitico, ki bo v osnovni izvedbi zasnovana kot kombinacija cilindričnega TM-inertnega ali PDTKE jedra (bodisi poravnane bodisi oblikovno programiranega), okoli katerega bomo ulili TM-inerten ali PDTKE plašč. Takšne vitice bodo ob aktivaciji izkazovale reverzibilno zvijanje zaradi neujemanja TM-deformacij med jedrom in plaščem. Nadalje bomo raziskali možnost uporabe prevodnih žic ali kanalov, napolnjenih z LM, kot jedra vitice za aktivacijo z dovedenim električnim tokom ter njihovo kombiniranje z materiali SM-PDTKE in LM-PDTKE.

Raziskali bomo tudi načine dodajanja pritrdilnih točk na pripravljene mehke aktuatorje PDTKE, da jih bo mogoče povezovati v mehke robote ali naprave. To bomo dosegli bodisi z medsebojnim povezovanjem žic večkomponentnih PDTKE v zaporedno vezavo tipa »marjetična veriga« ter dodatnim ulivanjem zunanje plasti PDTKE ali TM-inertnega materiala bodisi z drugimi mehanskimi pristopi. Pri

aktuatorjih SM-PDTKE (nemagnetno poravnan material) bomo vgradili majhne, milimetske magnete, ki bodo omogočali magnetno sestavljanje posameznih elementov PDTKE.

Iz pripravljenih modularnih enot bomo zasnovali več demonstracijskih naprav oziroma robotov tipa »proof-of-concept«, na primer linearno sestavljenega robotskega črva, ki bo s peristaltičnim gibanjem napredoval zaradi zaporednega krčenja in raztezanja posameznih segmentov PDTKE. Materiale bomo dodatno kombinirali z LM-PDTKE z namenom vpeljave električne prevodnosti oziroma potencialnih senzorskih funkcij.

5. Delovni paket

Naslov DP: Hibridni aktuatorji na osnovi PDTKE.

Izdelava modularnih hibridnih aktuatorjev in prototipa 3D-pozicionerja.

Vodja: dr. Andraž Rešetič

Začetek: 16. mesec

Konec: 36. mesec

Cilji:

Delovni paket bo osredotočen na izdelavo hibridnih PDTKE – kompozitov, ki združujejo trdne površine s materialom PDTKE za razvoj temperaturno krmiljenih aktuatorjev ali pozicionerjev. Ti sistemi bodo delovali bodisi avtonomno kot odziv na zunanje temperaturne spremembe bodisi nadzorovano z ogrevanjem prek vgrajenih prevodnih žic. Pripravljeni bodo posebni kalupi, ki bodo omogočali vključitev pritrdilnih točk oziroma vozlišč znotraj materiala PDTKE, na katera bo mogoče namestiti druge trdne komponente. Vozlišča bodo 3D-natisnjena ali strojno obdelana iz nemagnetnega materiala ter trajno integrirana v PDTKE. Po potrebi bodo v hibridne PDTKE vključene tudi grelne žice.

Kot demonstrator hibridnih aktuatorjev bomo sestavili linearni pozicioner iz poravnanih vložkov PDTKE ter aktuator z zvijalno deformacijo iz reverzibilnega materiala SM-PDTKE. Dodatni nosilci bodo izdelani iz magnetnega materiala ali opremljeni s pritrdilnimi elementi ter zasnovani tako, da se prilegajo okoli vložkov PDTKE. To bo omogočilo modularno sestavljanje več hibridnih aktuatorjev PDTKE v funkcionalno napravo. Aktuatorje bo mogoče povezovati na različne načine: zaporedno za povečanje amplitude akcije, vzporedno za razširitev aktivne površine ali pravokotno za uvedbo dodatne prostostne stopnje sistema.

Za demonstracijo bomo izdelali 3D-pozicioner, sestavljen iz treh ločenih hibridnih aktuatorjev PDTKE, ki bodo omogočali neodvisno ali sočasno gibanje v smereh X, Y in Z. Vgrajene bodo grelne žice ter materiali PDTKE z različnimi temperaturami faznih prehodov, kar bo omogočalo neodvisno aktivacijo posameznih položajev. Vsaka plast bo aktivirana bodisi posamično z dovodom električnega toka bodisi zaporedno s postopnim zviševanjem temperature nad prag akcije posamezne plasti. Dodatno bomo raziskali vključevanje materialov SM-PDTKE ali LM-PDTKE za vpeljavo oblikovne programabilnosti, električne prevodnosti in zaklepanja oblike v sistem. Natančnost termično krmiljenega translacijskega gibanja bomo merili s koordinatnim merilnim strojem, opremljenim z ogrevano mizo. Zaradi želje po učinkovitejši uporabi že tako omejenega časa vodje projekta, ki naj bo namenjen predvsem znanstvenemu delu, so vsi zgoraj navedeni delovni paketi iz projektne prijave prevedeni s pomočjo umetne inteligence. Za morebitne slovnične napake se vodja projekta iskreno opravičuje.

Bibliografske reference

- [*Reference vodja projekta*](#)