



Na Katedri za informacijsko in grafično tehnologijo Naravoslovnotehniške fakultete se v zadnjem času z raziskavami osredotočamo na novo in zelo zanimivo področje 4-dimenzionalnega tiskanja ali krajše 4D-tiska. Raziskave potekajo predvsem v okviru doktorskega študija in pot na tem področju s svojimi raziskavami utira kolega Matej Pivar, mag. graf. inž. V prispevku je kratka predstavitev tega hitro razvijajočega se področja in nekaj prvih rezultatov, ki so nastali v okviru raziskav.

Namesto uvoda

3D-tiskanje je že zelo znano in razširjeno področje uporabe. Gre za dodajalno ali aditivno izdelavo tridimenzionalnega predmeta iz digitalnega modela z različnimi tehnologijami. V primerjavi z odzematnimi tehnologijami, ki še vedno prevladujejo v strojništvu, so prednosti 3D-tiska predvsem v možnosti tiska predmetov z organskimi in vkleščenimi strukturami ter v množičnem prilagajanju izdelkov posameznemu kupcu.

Zaradi možnosti tiska z uporabo obsežnega nabora materialov in njihovega hitrega razvoja se v zadnjem času raziskave na področju 3D-tiska vse bolj usmerjajo v uporabo funkcionalnih materialov, ki omogočajo spremembo oblike 3D-natisnjenih predmetov s časom kot četrto dimenzijo. Tako nastaja novo področje z uporabo 3D-tiska, ki ga imenujemo 4D-tisk. Natisnjeni predmeti so sposobni samostojnega preoblikovanja ali spremembe

kemijskih oziroma fizikalnih lastnosti pod vplivom različnih aktivacijskih dejavnikov okolja. Spremembe so lahko reverzibilne ali ireverzibilne in tako odpirajo nova področja uporabe v biomedicini, robotiki, arhitekturi, gradbeništvu, tekstilstvu itd.

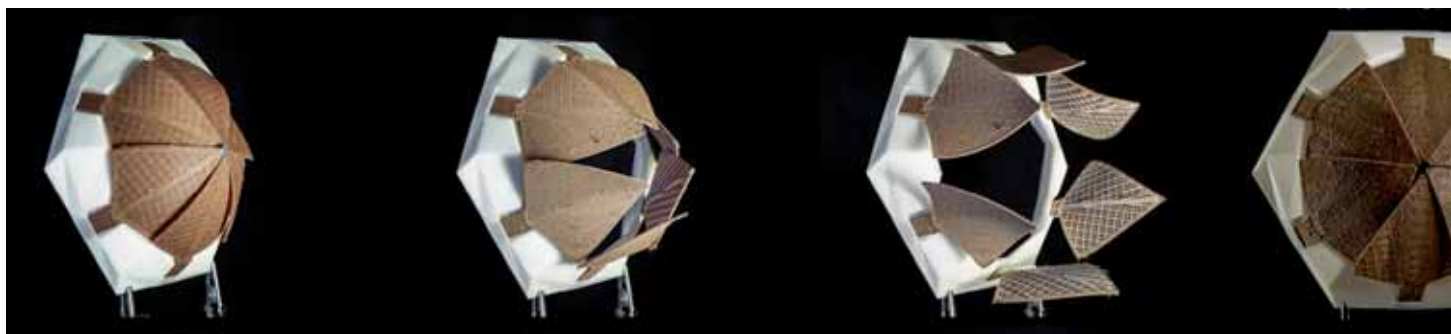
Začetki 4D-tiska

Eno najbolj znanih imen na področju razvoja 4D-tiska je vsekakor raziskovalec Skylar Tibbits. Leta 2013 je začel razvijati samosestavljljive tehnologije za obsežne aplikacije velikih dimenzij, ki bodo omogočale uporabo 4D-tiska v arhitekturi in gradbeništvu in napovedujejo razvoj samosestavljljivega pohištva in celo objektov. Deluje na tehnološkem inštitutu v Massachusettsu (Massachusetts Institute of Technology), MIT v Cambridgeu, na oddelku za arhitekturo, in tam je ustanovil tudi prvi laboratorij za samosestavljljive objekte (Self-Assembly Lab), ki postavlja nove tehnologije za njihovo izdelavo in izdelavo programabilnih materialov.

V laboratoriju zelo uspešno razvijajo 4D-tiskane prototipe objektov, kot so pnevmatični objekti, aktivne tekstilije, aktivna obušala,

preoblikovalne stenske kulise, aktivne prototipe z različnim oksetičnim potencialom, samosestavljljive stole, ki se sestavijo v tekočini, objekte, ki se sestavijo v zraku, samosestavljljive mize, samosestavljljive mobilne telefone, prototipe samoupogibnih proteinov, samosestavljljive objekte na biomolekularni osnovi in še veliko drugih zanimivih prototipov ali kot se v zadnjem času vse bolj uveljavlja izraz – primitivov. Vse navedeno si je možno ogledati na njihovi predstavitveni spletni strani: <https://selfassemblylab.mit.edu/>.

Področje 4D-tiska je danes znano pod različnimi imeni. Tako vse pogostejše slišimo o 4D-biotisku, aktivnih origamih ali samosestavljljivih predmetih oziroma sistemih, če gre za kompleksnejše strukture. Vsem navedenim novonastajajočim področjem je skupno to, da se uporabljajo tehnologije 3D-tiska z računalniško vodenim nalaganjem materiala v zaporednih slojih za ustvarjanje tridimenzionalnega predmeta. Vendar, kot je bilo že omenjeno, 4D-tisk doda dimenzijo transformacije skozi čas. Predmet se lahko v nekaterih razmerah na primer razširi, skrči, zvije, samostojno sestavi, postane porozen



Slika 1: Sprememba oblike objekta s časom, ki nastane pod vplivom spremembe vlažnosti

4D-tisk

3D-tisk s četrto dimenzijo ...

Matej PIVAR, Deja MUČK • Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Katedra za grafično in informacijsko tehnologijo • Snežniška 5, 1000 Ljubljana



itd. Raziskave na področju 4D-tiska se vse bolj usmerjajo v razvoj programabilnih materialov, ki omogočajo, da se predmet po končanem tisku odzove na različne »aktivacijske« vplive okolja (vlažnost, temperatura, tresenje itd.) in tako se v določenem času spremeni. Najpogosteje se spremeni oblika.

Sposobnost za to izhaja iz neskončnih možnosti konfiguracij različnih inženirskih materialov z modifikacijo na molekularni ravni. S to modifikacijo materialov lahko generiramo večfunkcionalno oziroma večnamensko delovanje neskončnih možnosti.

S 4D-tiskanjem je mogoče doseči hitre in natančne izdelovalne metode, ki omogočajo aktivacijo prostorskega samoupogibanja oziroma samosestavljanja predmetov. Prostorske in časovne transformacije lahko realiziramo skozi več mehanizmov aktivacije, kot so fazni prehod tekočega kristalnega gela, koeficient toplotnega raztezanja, razlike v toplotni prevodnosti, razlike v vpojnosti, posledično v nabrekanju itd.

V ta namen se razvijajo parametrični modeli in algoritmi, ki omogočajo napoved deformacije oziroma spremembe oblike ali lastnosti

predmeta s časom in temeljijo na natančnem poznavanju fizikalnih lastnosti polimerov z oblikovnim spominom ter tako dobro napovejo končne oblike predmeta po uporabi določenega načina aktivacije iz okolja. Na sliki 1 je prikazan primer spremembe oblike predmeta s časom pod vplivom delovanja vlage v okolju.

Princip delovanja polimerov z oblikovnim spominom

Ena najbolj preprostih možnosti aplikacij 4D-tiska je uporaba termoplastičnih materialov, ki so sposobni termoformiranja oziroma toplotnega preoblikovanja, to so t. i. shape memory polimeri ali polimeri z oblikovnim spominom (v nadaljevanju SMP). To so termoplastični materiali, njihova osnovna lastnost pa je spreminjanje oblike, najpogosteje pri povišanju temperature. Takoj ko se temperatura zniža na začetno, se njihova oblika povrne v izvirno. Za študij delovanja polimerov SMP sta pomembna predvsem dva parametra: temperatura steklastega prehoda in temperatura tališča. Poleg navedenega pa je pomembna tudi dobra adhezivnost med materiali. Velika prednost omenjenih termoplastičnih materialov je, da se lahko



žnosti (vir: David Correa).



tiskajo z najbolj razširjeno in cenovno ugodno tehnologijo ekstrudiranja termoplastov oziroma modeliranja s spajanjem slojev, FDM.

Pri procesu tiska predmeta, ki bo sposoben preoblikovanja, je treba uporabiti kombinacije dveh ali več termoplastičnih materialov, ki imajo različno temperaturo steklastega prehoda in posledično seveda tudi temperaturo tališča. Najpogosteje se za mesta, ki so aktivni del predmeta, uporabi material z nižjo temperaturo steklastega prehoda, obratno pa se za neaktivne dele predmeta uporabijo termoplastični materiali z višjo temperaturo steklastega prehoda.

Proces preoblikovanja materialov SMP pod vplivom povišane temperature je iz dveh faz. V prvi je treba predmet segreti nad temperaturo steklastega prehoda in pod temperaturo tališča, ki ga ima uporabljeni material na aktivnih delih predmeta. Tako se lahko oblika predmeta spremeni iz izvirne v končno. To obliko nato predmet obdrži s kontroliranim ohlajanjem pod temperaturo steklastega prehoda aktivnega dela. V drugi fazi pa ob ponovnem segrevanju nad temperaturo steklastega prehoda predmet preoblikujemo nazaj v izvirno obliko.

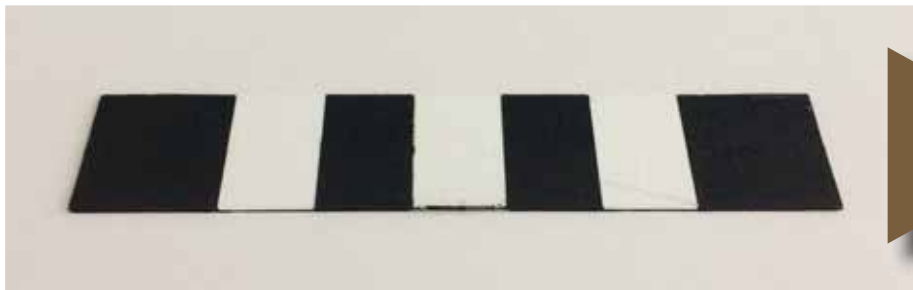
Uporabljene tehnologije 3D-tiska

Pri 4D-tisku se najpogosteje uporabljajo tehnologije ekstrudiranja materiala oziroma termoplastov in tehnologija kapljičnega nanašanja oziroma brizganja materiala. Pogoji so, da se lahko uporabijo različni funkcionalni ali programabilni materiali.

Ekstrudiranje termoplastov

ASTM International uvršča tehnologijo ekstrudiranja termoplastov med tehnologije ekstrudiranja materialov (material extrusion). Je ena najbolj razširjenih tehnologij zlasti med namiznimi tiskalniki za osebno uporabo. Podjetje Stratasys, ki je izumilo tehnologijo ekstrudiranja materialov (material extrusion), natančneje termoplastov, je tehnologijo poimenovalo FDM (fused deposition modelling), kar prevajamo kot modeliranje s spajanjem slojev.

Pri ekstrudiranju termoplastov se uporablja material v obliki t. i. termoplastičnega navitja,



Slika 2: Tiskan trak z dvema različnima materialoma. Levo izvorna oblika, desno nova oblika po aktivaciji.

filamenta, ki se dovede v ekstrudirno glavo, kjer ob segrevanju postane poltekoč in s tem tiskarsko prehoden. Tako se poltekoči material sloj za slojem nalaga na delovno ploščo, se tam ohlaja in spoji s predhodnim slojem, dokler tisk predmeta ni končan. Pri 4D-tisku se sočasno tiska vsaj z dvema različnima termoplastičnima materialoma, ki morata imeti čim bolj različni temperaturi steklastega prehoda in tališča.

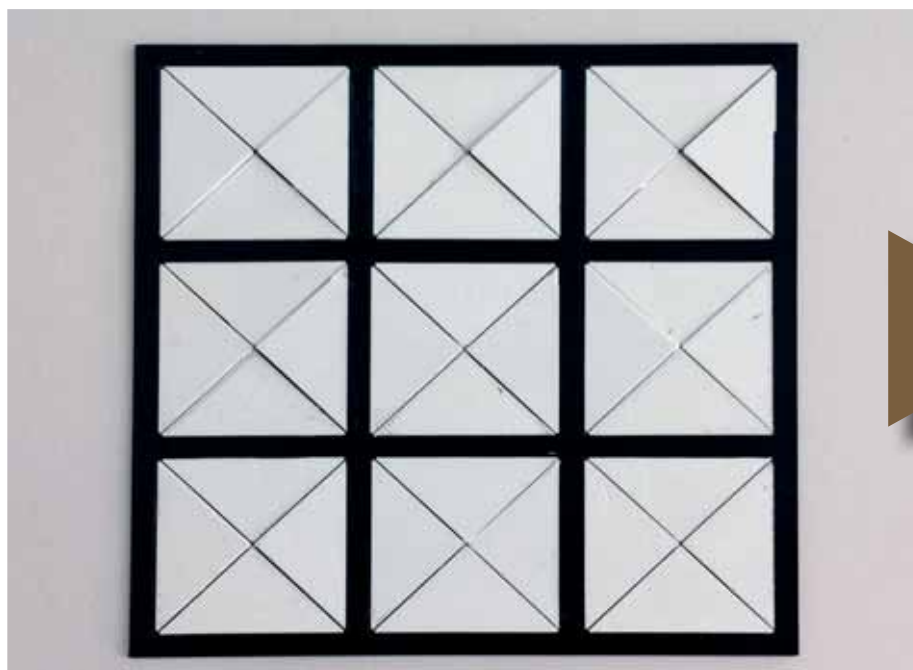
Kapljično nanašanje ali brizganje materiala (Material Jetting)

Pri tej tehnologiji se osnovni material v obliki tekočega fotopolimera injicira skozi podobno tiskalno glavo, kot jo poznamo pri kapljičnem tisku, nato pa se točkovno utrdi z UV-svetlobo. Material se nanaša v slojih. ASTM International

je tehnologijo poimenoval PolyJet, kar je okrajšava celotnega imena photopolymer jetting. Za 4D-tisk se uporabljajo tiskalniki na osnovi tehnologije PolyJet Matrix. Pri omenjenih tiskalnikih se lahko uporablja veliko različnih materialov, ki z medsebojnim mešanjem omogočajo tudi izdelavo novih digitalnih programabilnih materialov s povsem prilagojenimi lastnostmi.

Prvi rezultati

Prve raziskave na Naravoslovnotehniški fakulteti smo usmerili v proučevanje vpliva parametrov procesa 3D-tiska na stopnjo deformacije natisnjenih primitivov z uporabo termoplastov, občutljivih za spremembo temperature. Pri tisku smo uporabili večfunkcionalni 3D-tiskalnik Z-Morph, ki omogoča tisk z ekstrudiranjem termoplastov ali krajše FDM.



Slika 3: Natisnjen primitiv z različno stopnjo deformacije trikotniških struktur.

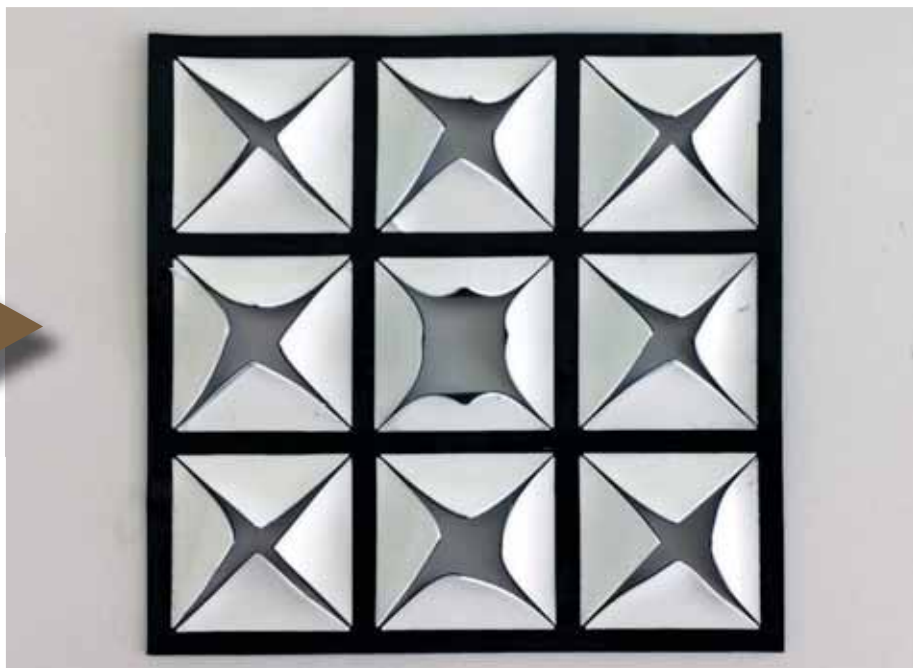


Po prvih testiranjih sta se za najboljšo kombinacijo pri tisku samosestavljljivih primitivov izkazala termoplasta TPU (termoplastični poliuretan) in PLA (polimlečna kislina). Prvega smo tiskali z enim, drugega pa v treh zaporednih slojih.

Pri uporabi omenjenih materialov se aktivni del natisnjenega primitiva, kjer je prisoten PLA,

pri aktivacijski temperaturi zvije, neaktivni del pa zaradi TPU materiala ostane fleksibilen. Da bi dosegli želeno trdnost neaktivnega dela, je treba ta del tiskati s kombinacijo TPU in drugega togega materiala s podobno visoko temperaturo steklastega prehoda in tališča.

Na sliki 2 so razvidni rezultati prvih uspešnih poskusov. Uporabljena sta bila materiala TPU



tur. Levo izvorna oblika primitiva, desno spremenjena oblika po aktivaciji.

(črn) in PLA (bel). Trak se je po potopitvi v vročo vodo pri $T 80^{\circ}\text{C}$, ki je aktivacijska temperatura in je nekoliko višja od temperature steklastega prehoda PLA, sestavil v kocko. Na sliki 3 pa je prikazan primitiv s trikotniškimi strukturami, ki so prav tako tiskane v kombinaciji obeh omenjenih materialov. Aktivacija spremembe oblike se zgodi enako kot v predhodno opisanem primeru, torej ob potopitvi v vročo vodo. Ker so bile trikotniške strukture tiskane z različnimi vzorci zapolnitve, so končne spremembe oblike, ki se izražajo v odprtosti posamezne strukture, različne.

Pogled naprej

Področje 4D-tiska odpira neskončno možnosti novih aplikacij. Tako bo mogoče na primer na plašč škatlice, natisnjen iz termoplastov, z različnimi temperaturami steklastega prehoda in temperaturami tališča postaviti končni izdelek, da se bo embaliral v samosestavljljivo sekundarno embalažo.

Če 4D-tisk uporabimo v kombinaciji z različnimi materiali, na katere tiskamo 3D-predmete, npr. tekstila, se uporabnost še bolj razširi. Tako lahko npr. s 3D-tiskom na raztegljive tekstilije dosežemo razne dekorativne ali pa funkcionalne učinke, kot je povečanje oksetičnega potenciala, spremembe oblike oz. samosestavljljive tekstilne vzorce v vnaprej določeni končni predmet. In ne nazadnje, če vključimo še področje tiska elektronike in s tem osnovnih, preprostih elektronskih komponent, kot so uporovni elementi, na različne termoplastične materiale, lahko zgradimo pametne sisteme, ki niso daleč od pravih preprostih robotov.

Velik izziv v prihodnosti se kaže predvsem na razvoju nove programske opreme, ki bo lahko podprla novorazvijajoča se področja, kot sta biotisk in večmaterialno tiskanje, tiskano elektroniko in seveda tudi 4D-tisk. Vsa navedena področja zahtevajo nova orodja v programski opremi, katerih zmognosti daleč presegajo uporabo trenutnih programov za računalniško modeliranje, ki so znani kot računalniško podprto načrtovanje CAD (computer aided design) ali računalniško podprta proizvodnja CAM (computer aided manufacturing).