

Izdelava fantoma za ultrazvočno medicinsko diagnostiko s postopkom 3D tiskanja

Nejc Klanjšček¹, Sašo Arnuga², Miha Fošnarič², Samo Penič¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
²Zdravstvena fakulteta, Univerza v Ljubljani, Zdravstvena pot 5, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: samo.penic@fe.uni-lj.si

3D-printed Medical Ultrasound Phantom

Medical ultrasound is today one of the most common and accessible diagnostic imaging method in medicine. No ionizing radiation and low heat exposure of the tissue makes modern ultrasonography a diagnostic technique with almost no health threat. However, quality control of the ultrasound equipment must still be adequate, otherwise safety of the patient can be endangered, especially from misdiagnosis.

The 3D printing technology is becoming widely available and therefore provides efficient means for producing complicated structures. In the presented research, the method of 3D printing was applied to develop and build a low-cost tissue mimicking body (phantom). Such phantoms are used to test ultrasonic probes and for scientific and educational purposes. In the process of developing a phantom for ultrasonic imaging, several challenges had to be overcome, such as choosing appropriate materials that mimicked human tissues or keeping the phantom watertight.

1 Uvod

Ultrazvočne preiskave so najpogostejša in najdostopnejša slikovna diagnostična metoda v medicini, saj je relativno varna, cenovno ugodna in sorazmerno enostavna za uporabo [1, 2, 3]. Zaradi odsotnosti ionizirajočega sevanja je prva izbira v predrojstveni diagnostiki (Slika 1) in drugih medicinskih preiskavah, kjer je varnost prioriteta.

Akustična impedanca, z , je lastnost snovi, ki nam pove, kako se snov odziva na tlak, ki ga povzroča njeno mehansko valovanje. V preprostem primeru ravnega vala brez faznega zamika med tlakom, p , in hitrost delca snovi, v , velja preprosta zveza $z = p/v$. Izkaže se [1], da lahko takšno akustično impedanco izrazimo kot produkt

Fizikalna osnova ultrazvočnih diagnostičnih naprav je mehansko valovanje nad človeško slušno mejo (frekvence nad 20 kHz), ki ga sonda naprave v obliki pulzov oddaja in zaznava njihov odboj od različnih delov znotraj telesa. Pri tem izkorišča dejstvo, da je na meji dveh snovi, skozi kateri se ultrazvok širi, njegova odbojnost sorazmerna z razliko v akustičnih impedancah obeh sredstev [1]. Akustična impedanca, z , je lastnost snovi, ki nam pove, kako se snov odziva na tlak, ki ga povzroča njeno mehansko valovanje. V preprostem primeru ravnega vala brez faznega zamika med tlakom, p , in hitrost



Slika 1: Ultrazvočni posnetek človeškega plodu v 20. tednu nosečnosti [4].

delca snovi, v , velja preprosta zveza $z = p/v$. Izkaže se [1], da lahko takšno akustično impedanco izrazimo kot produkt

$$z = \rho c, \quad (1)$$

kjer je ρ gostota snovi in c hitrost širjenja valovanja. V tabeli 1 je nekaj akustičnih impedanc v človeškem telesu. Odbojnost, R , na meji dveh snovi lahko zapišemo kot [1]

Organ	Impedanca [kg/(m ² s)]
Pljuča	$0,18 \cdot 10^6$
Ledvice	$1,63 \cdot 10^6$
Jetra	$1,65 \cdot 10^6$
Mišice	$1,71 \cdot 10^6$
Kosti	$7,8 \cdot 10^6$
Voda	$1,48 \cdot 10^6$
Zrak	$0,0004 \cdot 10^6$

Tabela 1: Akustične impedance v človeškem telesu

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2, \quad (2)$$

kjer sta I_r in I_i jakosti (povprečni gostoti energijskih tokov) odbitega in vpadnega valovanja, z_1 in z_2 pa aku-

stični impedanci snovi po kateri valovanje pride do mejne mejne ploskve in od katere se odbije.

Na podlagi jakosti odboja in pretečenega časa med oddajo in sprejemom signala nato naprava rekonstruira sliko in jo v realnem času izriše na zaslon.

Za kontrolo kakovosti ultrazvočnih naprav za medicinsko diagnostiko, pa tudi za pedagoško in raziskovalno delo, se pogosto uporablja testne naprave, *t.i.* ultrazvočne fantome, ki posnemajo fizikalni odziv človeškega tkiva na ultrazvok, ki ga oddajajo diagnostične sonde [5, 6, 7, 8].

Tržišče ponuja ultrazvočne fantome za različne namene, vendar pa so ti zaradi cene nedostopni in/ali zaradi poslovnih skrivnosti izdelave neprimerni za izobraževanje in raziskovalno delo. Po drugi strani pa sodobna tehnologija 3D tiskanja omogoča izdelavo skoraj poljubnih tri-razsežnih struktur iz digitalnega modela. Tako lahko ob simuliranju primernih fizikalnih lastnosti sami izdelamo cenovno ugodne ultrazvočne fantome [9].

V prispevku predstavljamo poskus lastne izdelave ultrazvočnega fantoma s pomočjo aditivne proizvodnje oziroma 3D tiskanja. V nadaljevanju najprej natančno opišemo uporabljeno metodo, nato predstavimo rezultate testiranja izdelanega prototipa z ultrazvočno diagnostično napravo in v diskusiji med drugim predstavimo naslednje korake za izboljšavo prototipa.

2 Metoda 3D tiskanja

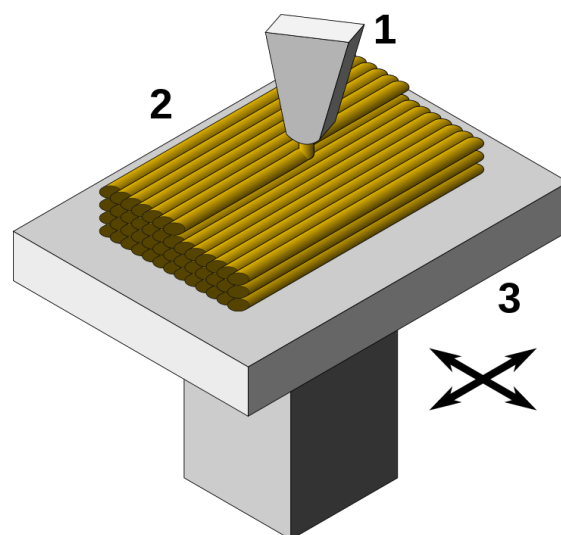
Metoda 3D tiskanja spada med *t.i.* aditivne metode, katerih skupna lastnost je, da material h končnemu modelu (izdelku) dodajamo. V tem pogledu se razlikuje od tradicionalnih metod, kjer navadno surovemu obdelovancu material odvezemamo (subtraktivne metode). Pod krovnim izrazom 3D tiskanja poznamo množico različnih tehnologij kot so "Fused deposition Modelling" ali FDM, "Powder bed fusion", "Inkjet printing", Stereolitografija ali SLA in druge [10]. Širši javnosti sta najdostopnejši metodi sta SLA in FDM.

Najpogosteje uporabljena metoda 3D tiskanja je metoda FDM, kjer tiskalnik nalaga plasti materiala tako, da stali surovino (običajno v obliki plastičnega filameta) in iz taline gradi model. Principa delovanja prikazuje slika 2. Na voljo je več vrst plastičnih materialov, primernih za uporabo v tiskalnikih tega tipa. Velikost modela je pogojena z velikostjo mize na kateri gradimo model, ta pa je omejena z dolžino vodil, po katerih koračni motorji premikajo mobilno mizo in/ali glavo ekstruderja.

Večino delov fantoma smo izdelali na FDM 3D tiskalniku Anycubic i3 Mega, proizvajalca Anycubic. Po navedbah proizvajalca je ločljivost tiskanja $12,5 \mu\text{m}$ v ravnini in $2 \mu\text{m}$ v višino, velikost delovne površine pa je $210 \times 210 \text{ mm}$. Največja dovoljena višina tiskanega modela je 205 mm . Priporočene hitrosti tiskanja so $20\text{--}100 \text{ mm/s}$. Uporabili smo glavo s šobo premera $0,4 \text{ mm}$.

3 Načrtovanje in izdelovanje fantoma

Za načrt in izdelavo 3D modela fantoma smo uporabili programsko opremo Solidworks 2017 podjetja Dassault Systèmes. Na sliki 3 sta prikazana dva glavna sestavna



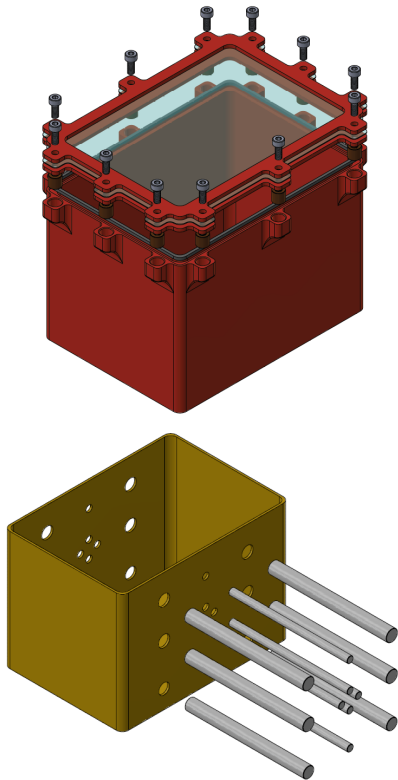
Slika 2: FDM metoda 3D tiskanja: segreti kovinska glava ekstruderja stali plastiko v filamentu (1) in jo naloži v plasteh tankih kolobarjev na model (2). Mobilna miza se premika v dveh ali treh oseh in s tem omogoča oblikovanje strukture (3) [11].

dela fantoma. Zgornji del slike 3 je tri-dimenzionalni pogled na ohišje, škatlo, v katero vstavimo notranje ogrodje s prečnimi palicami. Na isti sliki spodaj pa je prikazano ogrodje in prečne palice, ki služijo kot ovire za ultrazvočno valovanje – fantomski objekti, ki simulirajo različna tkiva v telesu. Za takšno konstrukcijo smo se odločili predvsem zato, ker smo želeli spreminjati geometrijo samih prečnih palic in s tem primerjati rezultate. Palice so iz materialov različnih akustičnih impedanc, katere posnemajo obnašanje različnih tkiv v človeškem telesu.

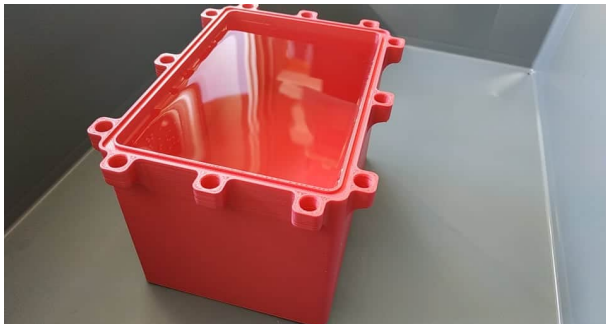
Notranjost fantoma je zapolnjena s tekočino, ki naj bi bila kar najbolj akustično podobna različnim tkivom v človeškem telesu. Pregled snovi, primernih za simuliranje različnih tkiv v človeškem telesu smo našli v obstoječi literaturi [12].

Pri samem načrtovanju smo naleteli na kar nekaj izzivov. Eden večjih je bila vodotestnost fantoma (slika 4). Pri prvi izvedbi smo tiskali fantoma pri preveliki hitrosti ter tako naredili stene porozne za vodo. To smo poskušali odpraviti s slojem iz bitumenske mase, s katero smo premazali notranjost fantoma. Ta tehnika se ni obnesla in je bilo potrebno natisniti še eno ohišje fantoma. To ohišje smo prilagodili tako, da smo zmanjšali debelino sten fantoma in izbrali manjšo hitrost tiskanja.

Čas tiskanja ohišja fantoma je bil 34 ur , ogrodja za notranjo konstrukcijo plastičnih ovir iz palic pa 12 ur . Nizka hitrost tiskanja in povečana količina izločene plastike (105%) sta bila nujno potrebna parametra, da smo dobili plasti ohišja fantoma, ki so bile trdno povezane in so dobro zatesnile stene. STL datoteko smo pripravili v rezalniku (angl. "slicer") Cura 4.2, podjetja Ultimaker, pri čemer smo uporabili naslednje nastavitve, kateri so bili ključni za kvalitetno izdelano ogrodje:



Slika 3: Načrt fantoma. Zgoraj: ohišje, škatla, v katero vstavimo notranje ogrodje s prečnimi palicami. Spodaj: Nosilna konstrukcija s prečnimi ovirami okroglega premera.



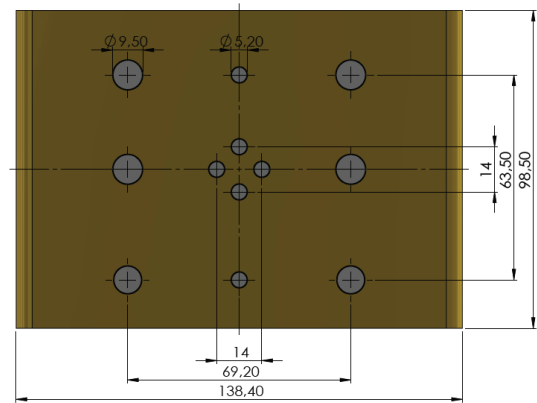
Slika 4: Testiranje vodotesnosti natisnjene ohišja fantoma.

- Layer Height: 0,15 mm
- Material bed temperature: 55°C
- Nozzle temperature: 210°C
- Print speed: 60 mm/s
- Infill density: 70%
- Flow rate extrusion offset factor: 105%
- Cool fan speed: 70%

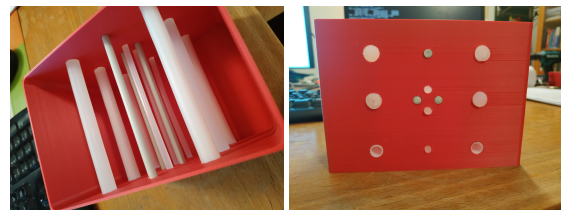
Za ohišje in notranje ogrodje fantoma smo uporabili plastiko PLA (poliaktična kislina), zaradi enostavnosti tiskanja, biološke razgradljivosti in dobre mehanske trdnosti. Plastični filament je mat rdeče barve, premera 1,75

mm, gostote 1,24 g/cm³, priporočene temperature tiskanja 180 – 220°C, proizvajalca Plastika Trček.

Ko smo imeli vodotesno ohišje, smo izdelali še nosilec fantomskih elementov – v našem primeru palice z različnimi akustičnimi impedancami, predstavljenimi v tabeli 2. Notranjost fantoma je zasnovana modularno, saj lahko palice menjavamo in spreminjamo njihov položaj v fantomu (sliki 5 in 6):



Slika 5: Postavitev prečnih ovir v nosilnem ogrodju



Slika 6: Struktura nosilne konstrukcije in prečnih palic iz različnih plastičnih materialov.

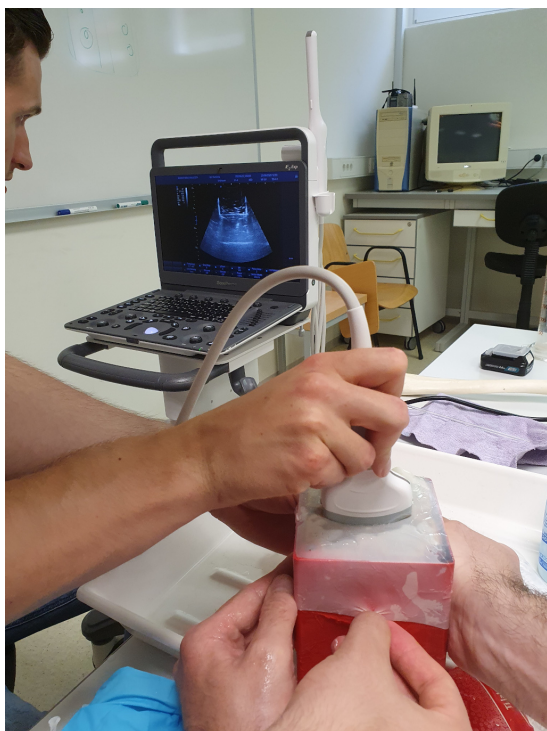
Tudi pri izdelavi pokrova fantoma smo naleteli na nekaj vprašanj, namreč kako zatesniti pokrov in iz kakšnega materiala ga izdelati. Zatesnili smo ga s pomočjo posebej natisnjene tesnila iz elastičnega plastičnega materiala TPU (Plastika Trček). Nato smo izdelali kar nekaj pokrovov iz različnih materialov in različnih debelin. Pri tem smo ugotovili, da pokrov ne sme biti predebel in za najprimernejše se je izkazalo, da je izdelan iz tanke gume oz. lateksa (slika 7).

4 Razprava in zaključek

Z uporabo metode 3D tiskanja smo z izjemo palic različnih parametrov za ultrazvočno valovanje in membrane na pokrovu, uspeli natisniti prototip fantoma. Pri prvih meritvah smo nas slikah uspešno izmerili razdalje med sondo in palicami, ki so ustrezale razdaljam modela. Soočili smo se z nekaterimi problemi, kot so izbira primerne materiala in parametrov tiskanja, da smo dosegli tesnenje fantoma.

Tabela 2: Lastnosti materialov za prečne ovire (filamente) v fantomu.

Material	Hitrost zvoka (m/s)	Gostota (g/cm ³)	Akustična impedanca [kg/(m ² s)]
ABS (siva)	2170	1,07	$2,30 \cdot 10^6$
Akril	2750	1,18	$3,25 \cdot 10^6$
Najlon	2600	1,12	$2,91 \cdot 10^6$
Polikarbonat (prosojen)	2270	1,18	$2,68 \cdot 10^6$
Polietilen	1950	0,90	$1,56 \cdot 10^6$
Polietilen (HD)	2430	0,96	$2,33 \cdot 10^6$
Polietilen (LD)	1950	0,92	$1,79 \cdot 10^6$
PVC	2380	1,38	$3,28 \cdot 10^6$



Slika 7: Merjenje razdalj med palicami z ultrazvokom skozi membrano iz kirurške rokavice iz lateksa.

Pri nadaljnjih raziskavah bomo poskusili izdelati fantoma z dolgotrajno stabilno zapolnitvijo s primerno tekočino ter z dodatki za merjenje pretokov tekočin (z t.i. Doppler UZ).

Zahvala. Ideja za pričujoče delo se je razvila iz projekta *Odprtokodni sistem za zajem in obdelavo medicinskih slik iz ultrazvočnih diagnostičnih naprav po DICOM standardu*, ki smo ga med marcem in junijem 2020 izvedli v okviru programa *Po kreativni poti do znanja*. Zato se avtorji zahvaljujemo Javnemu študentskemu, razvojnemu, invalidskemu in preživninskemu skladu RS, Ministrstvu za izobraževanje, znanost in šport RS, Evropskemu socialnemu skladu EU, Zdravstveni fakulteti UL ter Univerzi v Ljubljani za finančno in logistično podporo. In nenazadnje seveda tudi vsem sodelujočim na projektu: podjetju *ECHOSON d.o.o.*, mentorju prof. dr. Janezu Žibertu in študentom Mancij Pišek, Pii Pikelj, Sari Kidrič, Ninu Kleindienstu in Žanu Regoršku.

Literatura

- [1] A. Thrush, P. R. Hoskins, and K. Martin, *Diagnostic Ultrasound: Physics and Equipment*. CRC Press, 2019.
- [2] V. Jevtič, J. Matela, and Šurlan M., *Diagnostična in intervencijska radiologija. Splošni del*. Založba Pivec, 2014.
- [3] S. Arnuga, *Izobraževanje s področja ultrazvoka za radiološke inženirje: primerjava evropskih izobraževalnih programov in predlog izobraževanja v Sloveniji*. Ljubljana: Zdravstvena fakulteta, 2019.
- [4] Wikipedia contributors, "Ultrasound — Wikipedia, the free encyclopedia," 2020. [Na spletu; dostopano 20. junij 2020].
- [5] Y. H. Kim, "Ultrasound phantoms to protect patients from novices," *The Korean journal of pain*, vol. 29, no. 2, p. 73, 2016.
- [6] K. Nattagh, T. Siau, J. Pouliot, I.-C. Hsu, and J. A. Cunha, "A training phantom for ultrasound-guided needle insertion and suturing," *Brachytherapy*, vol. 13, no. 4, pp. 413–419, 2014.
- [7] G. Carbajal, A. Lasso, Á. Gómez, and G. Fichtinger, "Improving n-wire phantom-based freehand ultrasound calibration," *International journal of computer assisted radiology and surgery*, vol. 8, no. 6, pp. 1063–1072, 2013.
- [8] E. D. Ehler, B. M. Barney, P. D. Higgins, and K. E. Dusenbery, "Patient specific 3d printed phantom for imrt quality assurance," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 59, no. 19, p. 5763, 2014.
- [9] C. Kollmann, D. Dubravský, and B. Kraus, "An easy-to-handle speed of sound test object for skills labs using additive manufacturing (raptus-sos)," *Ultrasonics*, vol. 94, pp. 285–291, 2019.
- [10] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [11] Wikipedia contributors, "Fused filament fabrication — Wikipedia, the free encyclopedia," 2020. [Na spletu; dostopano 20. junij 2020].
- [12] M. O. Culjat, D. Goldenberg, P. Tewari, and R. S. Singh, "A review of tissue substitutes for ultrasound imaging," *Ultrasound in medicine & biology*, vol. 36, no. 6, pp. 861–873, 2010.