

přehledový článek

3D tisk a jeho využití v radiologii

3D printing in radiology

Marek Mechl, Marek Dostál

Klinika radiologie a nukleární medicíny
Lékařská fakulta MU a FN, Brno

Přijato: 15. 12. 2021

Korespondenční adresa:

Mgr. Ing. Marek Dostál, Ph.D.
Klinika radiologie a nukleární medicíny
LF MU a FN
Jihlavská 20, 625 00 Brno
e-mail: dostal.marek@fnbrno.cz

Podpořeno projektem MZ ČR Koncepční rozvoj
výzkumné instituce (FNBr, 65269705) a MŠMT
ČR (MUNI/A/1342/2020).

Konflikt zájmů: žádný.

Hlavní stanovisko práce

Autoři shrnují principy a současné možnosti 3D tisku z dat získaných radiologickými zobrazovacími metodami.

SOUHRN

Mechl M, Dostál M. 3D tisk a jeho využití v radiologii

Aplikace 3D tisku v radiologii se v poslední době rychle rozvíjí vzhledem k dostupnosti této metody i relativně jednoduchému zpracování dat z radiologických zobrazovacích metod. Autoři shrnují základní technické principy 3D tisku včetně zpracování zdrojových dat a následného využití ve výuce i medicínské praxi.

Klíčová slova: 3D tisk, zobrazovací metody.

Major statement

The authors summarises principles and applications of 3D printing from radiological imaging datasets.

SUMMARY

Mechl M, Dostál M. 3D printing in radiology

There is fast progress of the 3D printing applications in radiology in recent years due to availability of this method and relatively simple processing of the data from radiological imaging methods. The authors summarises basic principles of 3D printing and its applications in education and clinical practice indeed.

Key words: 3D printing, imaging methods.

ÚVOD

Princip 3D tisku je znám již několik desítek let. Vzhledem k technickým omezením i dostupnosti však došlo k jeho podstatnému rozvoji až v poslední dekádě. V současné době lze zakoupit jednoduchou 3D tiskárnu za jednotky tisíc korun a spotřební materiál pro tisk řádově za stokoruny. Nelze nezmínit, že jedna z nejvíce rozvíjejících se firem vyrábějících 3D tiskárny je v České republice. Vzhledem k tomu, že radiologické metody pořizují ve většině případů obrazy vrstev vyšetřovaných oblastí, tak mohou být ideálním zdrojem dat pro 3D tisk. V posledních letech se tato technika dynamicky rozvíjí, a to právě i v radiologii.

Pandemie sice v současné době zbrzdila prezenční kongresy, na mezinárodních kongresech v Evropě i USA však byly organizované celé sekce věnované tematice 3D tisku již před několika lety. V obou největších radiologických společnostech (ESR, RSNA) již fungují zájmové skupiny a sekce zaměřující se na 3D tisk a jeho praktické aplikace.

ZÁKLADNÍ PRINCIPY 3D TISKU

Běžný tisk dokumentu na papír (či obdobné médium) spočívá zjednodušeně v nanesení tenké vrstvy barvy

na tento podklad. Výsledný obraz má sice jen dva rozměry, nicméně při podrobnějším zkoumání bychom došli k závěru, že barvy musí být určitá vrstva, byť jen ve zlomcích milimetru. Pokud bychom takových vrstev nanášeli více na sebe, dospějeme *de facto* k 3D tisku. Základním principem 3D tisku je skutečně postupné nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe, čímž vznikne požadovaný prostorový objekt. Jako materiál samozřejmě nelze použít barvu, ale hmotu, kterou lze nanášet v tekuté nebo vazké formě a která posléze zachová svůj tvar. Tohoto postupu lze docílit tavením hmoty za relativně vysoké teploty (okolo 200 °C), jež si po vychladnutí v řádu sekund až desítek sekund zachovává svůj tvar. Vhodných materiálů pro 3D tisk je celá řada, vše záleží na možnostech jednotlivé tiskárny a účelu použití výtisku. Většina běžně komerčně dostupných tiskáren v současné době používá nejvíce kyselinu polymléčnou (PLA – polyactic acid), která se taví v rozmezí 180–220 °C a je chemicky inertní – vyrábí se z ní například hračky pro děti. Použít lze i jiné materiály jako například akrylonitril-butadienstyren (ABS), nylon (PA) nebo polykarbonát (PC). Tiskový materiál je ve většině případů navinutý na cívku ve formě „struny“ tak, aby se postupně během tisku tato z cívky odvíjela, a byla tak k dispozici bez nutnosti zásahu uživatele.

Zcela zásadní částí 3D tiskárny je tzv. tisková hlava, která taví tiskové médium a nanáší je postupně na základnu. Tato hlava se musí pohybovat ve třech na sebe kolmých směrech a je řízena jednoduchým modulem, jenž ovládá tři (nebo více) servomotorů. Výsledná kvalita tisku pak záleží na tom, jak tenkou vrstvu je schopna tisková hlava nanést – čím tenčí vrstva, tím kvalitnější výsledný model, ale samozřejmě i větší spotřeba materiálu a delší čas tisku samotného. Doba tisku je jedním z parametrů, kterým se 3D tisk zásadně liší od běžného tisku. Jednoduché modely lze vytisknout během několika desítek minut, u složitějších však může tisk trvat i několik dnů, tedy řádově desítky hodin.

PŘÍPRAVA MODELU K TISKU

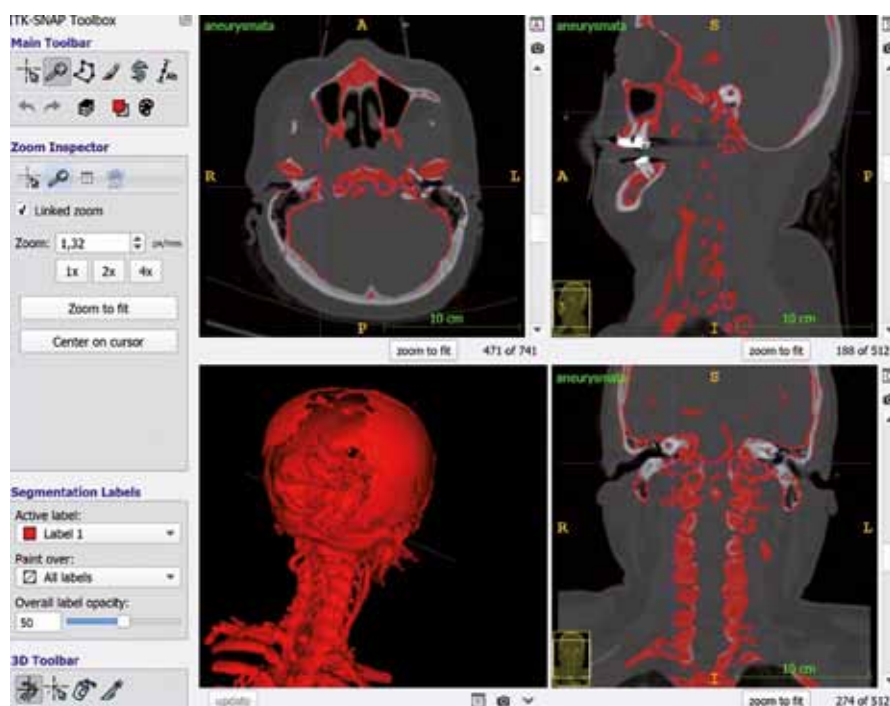
Všeobecně lze vytisknout jakýkoliv model, který je připraven dedikovaným programem. Nestačí tedy jen „prostorový“ obraz v počítači, tento je nutný speciálním programem připravit k tisku – „rozřezat“ na jednotlivé vrstvy, podle kterých pak bude tiskárna vytvářet objekt. V angličtině se tento postup nazývá „slicingem“, tedy „vrstvením“. I samotný prostorový model musí být v některém z formátů podporovaným tiskárnou, které lze dále zpracovávat (např. STL, PLY, WRL).

Většina radiologických zobrazovacích metod využívá zobrazování vrstev, proto je jejich zpracování pro 3D tisk relativně jednoduché. Základním předpokladem „kvalitního“ modelu je dostatečné prostorové rozlišení zdrojových obrazů. Je to tedy stejné jako u prostorových rekonstrukcí na výpočetní tomografii (CT) či magnetické rezonanci (MR). Ze tří základních rozměrů je nejdůležitější rozměr „z“, tedy tloušťka vrstvy, což samozřejmě platí pro zdrojové CT i MR obrazy. Sebelepší rozlišení v osách „x“ a „y“ bude zbytečné, pokud je šíře vrstvy příliš velká, což způsobí, že bude povrch modelu výrazně nepravidelný (nebu- de hladký, ale schodovitý, v podstatě obdoba rekonstrukcí z vrstev šíře nad 2 a více milimetrů na starších typech přístrojů). Zjednodušeně lze tento požadavek shrnout termínem „izotropní voxel“. Na CT je ideální mít „zdrojové“ submilimetrové vrstvy a na MR pak data z 3D sekvencí, taktéž maximálně 1 mm a méně. Sérii takových vrstev (obrazů) je nutné uložit ve standardním DICOM formátu a zpracovat dedikovanými programy. Tyto programy (viz dále) umožní vymezit oblast zájmu (crop) a zvolit typ rekonstrukce. Ve většině případů je to projekce povrchu typu SSD (surface shaded reconstruction). Takový připravený projekt je nutné uložit ve formátu, který lze zpracovat programy pro 3D tisk, které jsou dodávány společně s tiskárnou a ve většině případů jsou zdarma. Z těchto formátů je nejčastějším STL (StereoLithography), který zachycuje povrch pomocí trojúhelníkové sítě. Pro více informací o tomto formátu využijte publikaci (1, 2).

Připravený projekt importujeme do výše uvedeného programu k tiskárně, kde je třeba zvolit parametry tisku. Těchto je sice celá řada, pro běžný tisk

je jich však potřeba nastavit jen několik málo. Především je to rozlišení tisku, které zásadně ovlivňuje kvalitu modelu, myslí se tím šíře jedné vrstvy tisku. Obvykle činí 0,2 mm, nižší hodnoty znamenají kvalitnější výsledek, větší spotřebu materiálu a delší dobu tisku a naopak, jak již bylo uvedeno výše. Důležitým krokem je výběr a volba tzv. „podpory“. V případě složitějších modelů totiž může dojít k tomu, že některé jeho části na sebe nenavazují ve směru tisku, tedy zespoda nahoru, a je tedy nutné vytisknout podpůrnou strukturu, na které budou výše uvedené části uloženy (obr. 1 až 6). Tato „podpora“ může být ze stejného materiálu jako model a je ji pak nutné z okolí modelu vyjmout (odlomit), nebo může být použitý jiný materiál, například rozpustný ve vodě (PVA – polyvinylalkohol), který se po vložení vytištěného modelu do vody rozpustí, což je jednodušší a praktičtější, ovšem druhý přístup vyžaduje 3D tiskárnu schopnou tisku s více různými materiály.

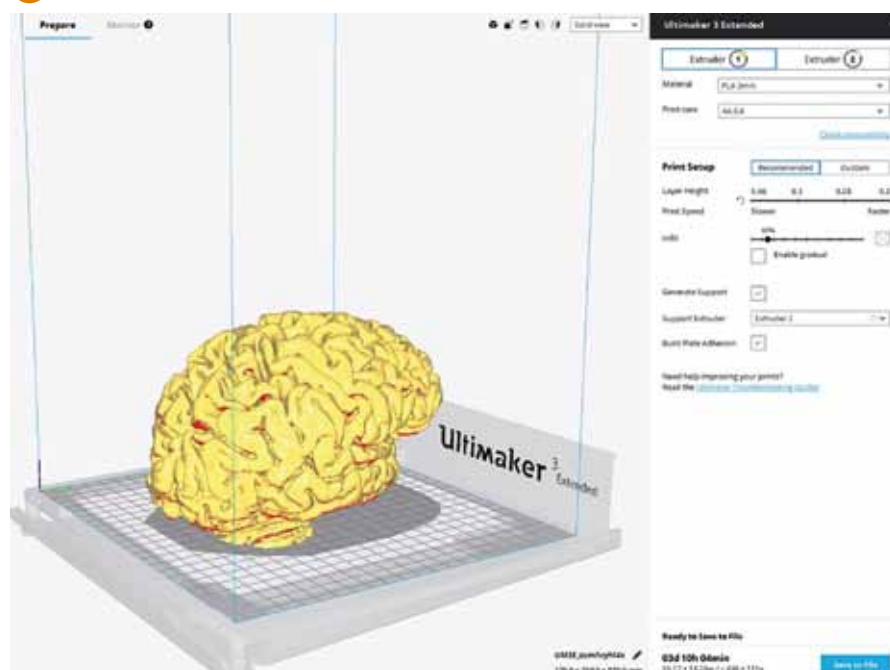
PŘÍKLADY ZPRACOVÁNÍ DAT A MODELŮ



1 Segmentace skeletu a tepen v programu ITK-SNAP®. Zpracovávána byla data z CT, jež jsou zobrazena ve třech základních rovinách (transverzální, sagitální a koronální). Patrný je postup automatické segmentace v červené barvě, což lze sledovat i v 3D pohledu vlevo dole. Výsledek segmentace je pak uložen v STL formátu k dalšímu zpracování.

Segmentation of bone and arteries with ITK-SNAP® software. CT dataset is processed and displayed in three fundamental planes (transversal, sagittal and coronal). Automatic segmentation is seen in the red colour and 3D view (left below). The result of the segmentation is saved in STL format for subsequent processing.

2a



2b



2 Model mozkové kůry vytvoření zpracováním dat z MR vyšetření: (a) zpracování již připraveného modelu v programu Ultimaker Cura® pro tiskárny Ultimaker® (<https://ultimaker.com/>), náhled modelu připraveného k tisku ve standardním rozlišení. Vzhledem k velikosti modelu je vypočtená doba tisku 3 dny a 10 hodin (vpravo dole); (b) vytisknutá část modelu (zhruba polovina)

3D print of the brain cortex created from MR images: (a) processing of the already prepared model in Ultimaker Cura® software (<https://ultimaker.com/>). Preview of the finalised model ready for print in standard resolution. Time of printing is calculated to 3 days and 10 hours due to model size (right below); (b) approximately half of the model printed

3a



3b



3c



3d



3 Postup tisku u modelu bederní páteře: (a) začátek tisku modelu s vytvořenou základnou modelu v bílé barvě uprostřed, po stranách je patrné poloprůhledná struktura podpory; (b) zhruba polovina modelu s dobře patrnou podporou u základny modelu a též vpravo. Dále je patrná vnitřní struktura modelu, který se netiskne plný, ale uvnitř je vytvořené žebrovní, jehož tvar a množství lze měnit tak, aby model držel vcelku a přitom nebyla vysoká spotřeba materiálu; (c) hotový model bederní páteře před odebráním (odlámáním) podpory; (d) definitivní model se spinální jehlou a demonstrací transforaminálního přístupu do páteřního kanálu

Lumbar spine model print procedure: (a) beginning of the printing with model base in white colour in centre, sideways is support structure from semitransparent material; (b) approximately half of the model printed with support material near the base and on the right side. Internal composition of the model is seen, which is not full, but constructed with structure to sustain it together and keep the consumption of material as low as possible; (c) printed model of the lumbar spine before removing the support material; (d) finalised model with the spinal needle positioning for the demonstration of the transforaminal spinal canal approach.



4 Model tříštivé fraktury patní kosti z CT dat zhotovený pro traumatologa před rozvahou o typu a postupu operačního řešení

Model of the comminutide fracture of the calcaneal bone from CT dataset is used for trauma surgeon for preoperative planning

5a



5b



5 Model kosti křížové se schwannomem pravostranného kořene S1 vpravo v červené barvě. Příklad tisku ze dvou materiálů tiskárnou se dvěma tiskovými hlavami. Semitrparentním materiálem je vytištěna kost a červeným pak tumor, který se šíří mimo páteřní kanál.

Sacrum model with schwannoma of the right S1 nerve root on red colour.

Example of two material print on two print head printer. Bone is printed with semitransparent material and tumor with the red one. Tumor is growing outside of the spinal canal.



6 Model komorového systému mozku zpracovaný ze zdrojových dat z MR vyšetření

Ventricular system of the brain model prepared from MRI dataset



7 Model pánve u pacienta po traumatu s frakturou kosti křížové a rozstupem symfýzy – zdrojová data z CT vyšetření u polytraumatu

Model of the pelvis in patient with severe trauma, fracture of sacrum and symphysis distension – dataset from CT examination

PRAKTICKÉ VYUŽITÍ A ZÁVĚR

V radiologické praxi běžně pracujeme s prostorovými rekonstrukcemi a modelováním, avšak pouze v rámci práce na dedikovaných pracovních stanicích či softwaru. 3D tisk nám poprvé umožnil studovat modely v reálné podobě, což vede k lepší orientaci v anatomických poměrech zobrazené (a vymodelované) oblasti. Z toho důvodu bylo první praktické využití 3D modelů v rámci výuky, tedy především radiologické anatomie v přípravě radiologických asistentů a pre- i postgraduální výuky lékařů. Osvědčilo se nám využití modelu při různých typech ověřování znalostí, především srovnání výsledku

zobrazovací metody (obrazu) a samotného modelu v rámci anatomické orientace či identifikace a zhodnocení případného patologického nálezu.

Využití jsme našli i v případě radiologických intervenčních metod, například u nemocných se spinální muskulární atrofií, u kterých je komplikovaný přístup do páteřního kanálu. Modely využíváme při plánování přístupu, zvláště u transforaminálního. V rámci projektu AZV ve spolupráci s ortopedickou klinikou LF MU a FN v Brně a inženýry z VUT jsme 3D tisk využili pro předoperační plánování dětských skolióz, kde mohl operátor před i v průběhu operace model využít pro lepší orientaci. I možnost využití 3D modelu vedlo k fixaci menší části páteře, což by mělo výrazně zlepšit životní standard operovaných dětí.

Praktické využití pro implantaci různých typů protéz naráží na problematiku biokompatibility, která není neřešitelná, je však (především legislativně) značně komplikovaná. Na našem pracovišti zkoušíme možnost 3D tisku formy, ve které by bylo možné modelovat samotné finální implantáty. Naopak se postupně zvyšuje počet 3D tisků, které zpracováváme společně s kolegy z traumatologie, chirurgie a ortopedie, které slouží k jejich jednodušší orientaci například u komplikovaných zlomenin (viz obr. 4). Pro tisky menších modelů s vyšší přesností lze použít speciální tiskárny zpracovávající světlocitlivou pryskyřici (SLA – Stereolithography Apparatus). Tímto způsobem však lze tisknout jen malé modely zhruba do velikosti několika centimetrů, nehodí se tedy pro modely větší a komplikovanější. ●

LITERATURA

1. Takashi K, Madoka S, Rieko A, Taisuke K. DICOM segmentation and STL creation for 3D printing: a process and software package comparison for osseous anatomy. 3D print Med 2020; 17.
2. <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
3. Mikulka J, Chalupa D, Svoboda J, Filipovič M, Repko M, Maxová M. Multimodal and Multiparametric Spatial Segmentation of Spine. In Proceedings of the 2020 19th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME). Praha: Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering 2020; 89–93.
4. Chalupa D, Mikulka J, Filipovič M, Říha K, Dostál M. Pediatric Spine Segmentation and Modeling Using Machine Learning. In 2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) 2019; 1–5.
5. Mikulka J, Chalupa D, Říha K, Filipovič M, Dostál M. Spatial CT/MRI of Children's Spine Processing and Modeling of Mechanical Forces. In 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring) 2019; 3840–3844.
6. Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A, Giannopoulos AA, et al. Medical 3D printing for the Radiologist. Radiographics 2015; 35(7): 1965–1988.