

РЕЗЮМЕТА

НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ ОТ ГРУПА В, РАВНОСТОЙНИ НА ХАБИЛИТАЦИОНЕН ТРУД

на ас. д-р инж. Живко Борисов Близнаков

представени за участие в конкурс за „доцент“
в област на висше образование 5. Технически науки,
професионално направление 5.2. Електротехника, електроника и автоматика,
по специалност „Биомедицинска техника и технологии“
публикуван в ДВ брой 86 / 06.10.2020 г.

Научни публикации, равностойни на хабилитационен труд на тема:

"Компютърни модели, симулации, алгоритми и софтуерни приложения в образната диагностика с използване на рентгенови лъчи"

За участие в конкурса и покриване на минималните наукометрични показатели в **Група В** са подбрани **10** научни **рецензирани** публикации на **Английски език**, реферирани в международната база данни **SCOPUS** с общ брой **100.96** точки.

No	Научни публикации, Група В	Брой точки
B4-01	Bliznakova K, Bliznakov Z , Buliev I, <i>Comparison of algorithms for out-of-plane artifacts removal in digital tomosynthesis reconstructions</i> . Computer Methods and Programs in Biomedicine, July 2012, Volume 107, Issue 1, pp. 75-83, DOI: 10.1016/j.cmpb.2011.09.013	20.00
B4-02	K. Bliznakova, I. Buliev, Z. Bliznakov , N. Kolev, J. Kolev, (2013) <i>Study of suitability of new materials for use with physical breast phantoms</i> , 4 th IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB 2013), 21-23 November 2013, Iasi, Romania, pp. 1-4, DOI: 10.1109/EHB.2013.6707335	12.00
B4-03	Bliznakova K, Dermitzakis A, Bliznakov Z , Kamarianakis Z, Buliev I, Pallikarakis N, <i>Modeling of small carbon fiber-reinforced polymers for X-ray imaging simulation</i> . Journal of Composite Materials, Volume 49, Issue 20, pp. 2541-2553, Article first published online: 7 Sept 2014, Issue published: 1 Aug 2015, DOI: 10.1177/0021998314550219	10.00
B4-04	Bliznakova K., Kamarianakis Z., Dermitzakis A., Bliznakov Z. , Buliev I., Pallikarakis N. (2014), <i>Modelling of small CFRP aerostructure parts for X-ray imaging simulation</i> . International Journal of Structural Integrity, Vol. 5 No. 3, pp. 227-240. DOI: 10.1108/IJSI-02-2014-0009	10.00
B4-05	A. Marinov, D. Ivanov, Z. Bliznakov , H. Bosman, I. Buliev, K. Bliznakova, (2016) <i>Application of Computational Phantoms and their 3D Print-outs for Educational Purposes</i> . In: Sontea V., Tiginyanu I. (eds) 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, (ICNBME 2015), 23-26 September 2015, Chisinau, Republic of Moldova, IFMBE Proceedings, vol. 55, pp. 493-496, Springer, Singapore, DOI: 10.1007/978-981-287-736-9_116	10.00
B4-06	Baneva Y., Bliznakova K., Cockmartin L., Marinov S., Buliev I., Mettievier G., Bosmans H., Russo P., Marshall N., Bliznakov, Z. , <i>Evaluation of a breast software model for 2D and 3D X-ray imaging studies of the breast</i> , Physica Medica, 41 (2017), pp. 78-86, DOI: 10.1016/j.ejmp.2017.04.024	6.00

B4-07	Dukov N., Bliznakov Z. , Buliev I., Bliznakova K. (2019) <i>Creation of Computational Breast Phantoms with Extracted Abnormalities from Real Patient Images</i> . In: Lhotska L., Sukupova L., Lacković I., Ibbott G. (eds) <i>World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018, IFMBE Proceedings</i> , vol. 68/1, pp. 213-217, Springer, Singapore, DOI: 10.1007/978-981-10-9035-6_38	15.00
B4-08	G. Esposito, G. Mettievier, K. Bliznakova, Z. Bliznakov , H. Bosmans, A. Bravin, I. Buliev, F. Di Lillo, D. Ivanov, M. Minutillo, A. Sarno, J. Vignero and P. Russo, <i>Investigation of the refractive index decrement of 3D printing materials for manufacturing breast phantoms for phase contrast imaging</i> , <i>Physics in Medicine & Biology</i> , 2019, Vol. 64(7), pp. 1-11, DOI: 10.1088/1361-6560/ab0670	4.62
B4-09	Dukov, N., Bliznakova, K., Feradov, F., Buliev, I., Bosmans, H., Mettievier, G., Russo, P., Cockmartin, L., Bliznakov, Z. <i>Models of breast lesions based on three-dimensional X-ray breast images</i> , <i>Physica Medica</i> , 2019, 57, pp. 80-87, DOI: 10.1016/j.ejmp.2018.12.012, 2019	6.67
B4-10	S. Daskalov, N. Okkalidis, J.M. Boone, S. Marinov, Z. Bliznakov , G. Mettievier, H. Bosmans, P. Russo, K. Bliznakova, (2020) <i>Anthropomorphic Physical Breast Phantom Based on Patient Breast CT Data: Preliminary Results</i> . In: Henriques J., Neves N., de Carvalho P. (eds) <i>XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing - MEDICON 2019, IFMBE Proceedings</i> , vol. 76, pp. 367-374, Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-31635-8_44	6.67

- B4-01** Bliznakova K, **Bliznakov Z**, Buliev I, *Comparison of algorithms for out-of-plane artifacts removal in digital tomosynthesis reconstructions*. Computer Methods and Programs in Biomedicine, July 2012, Volume 107, Issue 1, pp. 75-83, DOI: 10.1016/j.cmpb.2011.09.013

Сравнение на алгоритми за отстраняване на артефакти, получени от не фокусирани равнини в реконструкции от цифрова томосинтеза

Цифровата томосинтеза е метод на реконструкция на томографски изображения, която използва ограничен набор от проекции, възпроизведени от различни ъгли и получени в ограничена дъга около човешкото тяло. Реконструиранието томограми от необработени оригинални проекционни изображения, обаче, са неизменно засегнати от томографски шум. Пример е размиването на обекти, разположени извън равнината на фокус, които обекти се наслаждат един върху друг върху фокусирания образ в реконструирания равнината. Съществуват два основни типа методи, които разглеждат този проблем и предлагат варианти за неговото решение. Едните методи използват предварителна обработка на получените проекции, например предварително филтриране на изображенията с различни филтри, преди да се приложи реконструиранието, докато другите методи включват последваща пост-обработка на реконструиранието томограми с цел намаляване на шума.

Тази научна разработка има за цел да изследва и сравни два подхода за генериране на томограми с намален шум. Първият подход е базиран на общ метод за последваща обработка на реконструирания томограма въз основа на изграждане на маска на шума от всички равнини в реконструирания обем и нейното последващо изваждане от равнината на фокус. Вторият подход е базиран на реконструкция на томограми, използвайки Алгоритъм на Многобройните Изображения (Multiple Projections Algorithm) с предварително филтриране на първоначалните проекции.

С цел оценяване на двата подхода, е извършена симулация, използвайки три математически фантома, създадени чрез специализиран собствен софтуерен продукт: *XRayImagingSimulator*. Реализиран е експеримент, който използва два физически фантоми (TOR-MAX и TOR-MAM), които са подобни на математическите фантоми, използвани в симулацията. Експериментът е реализиран на SYRMEP линията в лабораторната инфраструктура на ELETTRA Synchrotron Light Laboratory, Триест, Италия, където са получени експерименталните изображения. Върху симулационните и експерименталните проекции са приложени двата подхода за реконструиранието на томограми. Резултатите са оценени качествено и количествено.

Резултатите показват, че и двата метода за премахване на шума успешно елиминират размиването, причинено от паразитни обекти от други равнини. Въпреки това, и в двата случая на хомогенен или нехомогенен обект на изследване, методът с предварително филтриране на проекциите (FMPA) не може да постигне добри стойности на контраста (CNR) за обекти, характеризирани се с нисък контраст, докато другият метод с маска на шума и последващо изваждане (MPA-NM) демонстрира по-добро качество на реконструиранието томограми и по-високи стойности на контраста (CNR) за обекти с ниско-контрастни характеристики (каквито са мастните лезии), особено в случай на нехомогенен обект.

Качествената и количествена оценки на реконструиранието томограми показват, че трябва да се осъществи пост-обработка на реконструирания обем, за да се повиши контраста и да се намали шума в реконструиранието равнини. Методът е особено ценен при хетерогенен обект, какъвто е обект е човешката тъкан, тъй като подобрява видимостта на всички обекти на изследване, като намалява ефекта на припокриване на отделните слоеве.

Comparison of algorithms for out-of-plane artifacts removal in digital tomosynthesis reconstructions.

Digital tomosynthesis is a method of reconstructing tomographic images that uses a limited set of projections reproduced from different angles and obtained in a limited arc around the human body. However, reconstructed tomograms of raw original projection images are affected by tomographic noise. An example is the blurring of objects located outside the focus plane, which objects are superimposed on each other on the focused image in the reconstructed plane. There are two main types of methods that address this problem and propose solutions. Some methods use pre-processing of the obtained projections, for example pre-filtering of the images before applying the reconstruction, while other methods include subsequent post-processing of the reconstructed tomograms in order to reduce the noise.

This research aims to explore and compare two approaches to generate tomograms with reduced noise. The first approach is based on a general method for subsequent processing of the reconstructed tomograms based on the construction of a noise mask from all planes in the reconstructed volume and its subsequent removal from the plane of focus. The second approach is based on the reconstruction of tomograms using the Multiple Projections Algorithm with pre-filtering of the initial projections.

In order to evaluate the two approaches, a simulation was performed using three computational phantoms created by a dedicated in-house developed software product: *XRayImagingSimulator*. An experiment was performed using two physical phantoms (TOR-MAX and TOR-MAM), which are similar to the computational phantoms used in the simulation. The experiment was performed at the SYRMEP line of ELETTRA of Synchrotron Light laboratory infrastructure, Trieste, Italy, where the experimental images were obtained. Both approaches for tomogram reconstruction were applied to the simulation and experimental projections. The results are evaluated qualitatively and quantitatively.

The results show that both noise reduction methods successfully eliminate blur caused by parasitic objects from the other planes. However, in both cases of a homogeneous or inhomogeneous object of study, the filtered multiple projection algorithm (FMPA) cannot achieve good contrast values (CNR) for objects with low contrast, while the other method with a using noise-mask and subsequent subtraction (MPA-NM) demonstrates better quality of reconstructed tomograms and higher contrast-to-noise ratios (CNR) for objects with low-contrast characteristics (such as fatty lesions), especially in the case of an inhomogeneous object.

Qualitative and quantitative evaluations of the reconstructed tomograms show that post-processing of the reconstructed volume should be performed to increase the contrast and reduce the noise in the reconstructed planes. The method is especially valuable for a heterogeneous object, such as the human tissue, as it improves the visibility of all objects of study by reducing the effect of overlapping of the individual planes.

- B4-02** K. Bliznakova, I. Buliev, **Z. Bliznakov**, N. Kolev, J. Kolev, (2013) **Study of suitability of new materials for use with physical breast phantoms**, 4th IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB 2013), 21-23 November 2013, Iasi, Romania, pp. 1-4, DOI: 10.1109/EHB.2013.6707335

Проучване за приложимост на нови материали за създаване на физически фантоми на млечна жлеза

Физическите модели на млечна жлеза играят важна и решаваща роля в тестването и оптимизирането на рентгеновите техники с цел подобряване на качеството на медицинските изображения. Едно от най-важните приложения е използването им като средство за оценяване и проверка на клинични протоколи, които се използват в ежедневната клинична практика на модалностите, използващи рентгенови лъчи: като например, оценка на дозата, оценка на входящата радиация, регулиране на началната енергията, т.н. Друго важно приложение на тези фантоми е използването им за тестване, оценка и изясняване на ролята и ползите от новите рентгенови модалности, като например томосинтеза, компютърна томография, двойно-енергийна модалност и др., с цел своевременно откриване и правилно диагностициране на специфични видове туморни образувания в млечната жлеза. Въпреки неотложната нужда от тези фантоми, тяхното произвеждане среща трудности, свързани с (а) ограничения в принципа на работа на наличните принтиращи технологии, (б) липса на подходящи материали за принтиране, (в) ограничения, налагани от софтуера на принтера (ограничения в размера на обекта).

Тази разработка представя предварителни резултати, базирани на компютърни симулации, имащи за цел да изследват смеси от епоксидна смола и йод на прах в определени съотношения, като заместители на тъкани във физическите фантоми на млечна жлеза, предназначени за рентгенови тествания. Това изследване е част от дългосрочна цел на екипа, а именно да се разработи, тества и оцени цялостна технология за производство на физически модели на човешки органи и структури от техните 3D софтуерни модели. По същото време е подадено и патентно приложение за реализирането на 3D принтер с две дюзи, използващи два материала, като количеството на всеки един от материалите се изчислява от алгоритъм, разработен специално за целите на този принтер. Двата основни материала са епоксидна смола и йод на прах. Симулирани са смеси от двата материала в съотношение 0 до 100%. За сравнение са моделирани и 9 други материала, които се използват широко в радиологията: мастна тъкан, жлезиста тъкан, BR-12, плексиглас, полиетилен, парафин, поликарбонат, вода, епоксидна смола. За всеки материал, са моделирани абсорбционните коефициенти за енергии на рентгеновото лъчение в диапазона 10 keV - 32 keV.

Резултатите показват, че ако в сместа епоксидна смола–йод се използва йод с тегло, вариращо между 0% и 1.8% от общата маса на сместа епоксидна смола–йод, то тогава свойствата на получената смес са близки до тези на реалните тъкани на гърдата. Представена е реализация на туморно образувание с размити контури и променяща се плътност, като концентрацията на йод е по-голяма в централната област на образуванието. По-нататъшни стъпки са свързани с експериментална верификация на симулираните смеси. Пригответни са няколко физически фантома със смеси на епоксидна смола и йод, и тествани в синхротронната инфраструктура ESRF в Гренобъл, Франция.

Реализирано е основно компютърно изследване за подходящи материали, които могат да се използват като заместители на човешки тъкани. Резултатът е база за реализирането на подаден патент за конструиране на 3D принтер, използващ 2 основни материала, които се смесват по подходящ начин за изработването на 3D фантоми, съдържащи нехомогенни области с размити граници.

Study of suitability of new materials for use with physical breast phantoms

Physical models of the breast play an important and crucial role in testing and optimizing X-ray techniques in order to improve the quality of medical images. One of the most important applications is their use as a means of evaluating and verifying clinical protocols used in the daily clinical practice of X-ray modalities: such as dose estimation, entrance radiation, initial energy exposure, etc. Another important application of these phantoms is their use to test, evaluate and clarify the role and benefits of new X-ray modalities, such as tomosynthesis, computed tomography, dual-energy modality, etc., in order to timely detect and correctly diagnose specific types of breast tumours and other formations in the mammary gland. Despite the urgent need for these phantoms, their production encounters difficulties related to (a) limitations in the principle of operation of the available printing technologies, (b) lack of suitable printing materials, (c) limitations imposed by the printer software - restrictions in the printing size of the object.

This study presents preliminary results based on computer simulations aimed at investigating mixtures of epoxy resin and iodine powder in certain proportions, as tissue substitutes in the physical phantoms of the breast intended for X-ray imaging. This research is part of the team's long-term goal, namely to develop, test and evaluate a complete technology for the production of physical phantoms of human organs and structures from their 3D software models. At the same time, a patent application has been submitted for the implementation of a 3D printer with two nozzles using two different materials, the amount of each of the materials being calculated by an algorithm developed specifically for the purposes of this printer. The two main materials are epoxy resin and iodine powder. Mixtures of the two materials were simulated in a ratio of 0 to 100%. For comparison, 9 other materials that are widely used in radiology are modelled: adipose tissue, glandular tissue, BR-12, Plexiglas, polyethylene, paraffin, polycarbonate, water, epoxy resin. For each material, the absorption coefficients for X-ray energies in the range 10 keV - 32 keV are modelled.

The results show that if iodine with a weight varying between 0% and 1.8% of the total mass of the epoxy-iodine mixture is used in the epoxy-iodine mixture, then the properties of the obtained mixture are close to those of the real breast tissues. The creation of a tumour formation with blurred contours and varying density is presented, as the concentration of iodine is higher in the central region of the formation. Further steps are related to the experimental verification of the simulated mixtures. Several physical phantoms with mixtures of epoxy resin and iodine were prepared and tested in the European Synchrotron Radiation Facility infrastructure in Grenoble, France.

A basic computer study has been performed for suitable materials that can be used as substitutes for human tissues. The results are the basis for the submission of a patent application for the construction of a 3D printer using two basic materials, which are mixed in a suitable way to make 3D phantoms containing inhomogeneous areas with blurred boundaries.

B4-03 Bliznakova K, Dermitzakis A, **Bliznakov Z**, Kamarianakis Z, Buliev I, Pallikarakis N, **Modeling of small carbon fiber-reinforced polymers for X-ray imaging simulation**. Journal of Composite Materials, Volume 49, Issue 20, pp. 2541-2553, Article first published online: 7 Sept 2014, Issue published: 1 Aug 2015, DOI: 10.1177/0021998314550219

Моделирание на малки по размери, подсилени с въглеродни влакна полимери за симулация на рентгенови изображения

Подсилени с въглеродни влакна полимери (ПВВП) са едни от най-перспективните композитни материали, които могат да интегрират съществуващите изисквания на авионавигацията, автомобилостроенето и строителството. Например, нарастващото използване на композитни материали в авиационна индустрия през последното десетилетие се дължи основно на изискване за намаляване на теглото и изграждане на по-икономични (от гледна точка на гориво) самолети. Композитните материали предлагат намалено тегло в комбинация с отлични механични свойства като висока твърдост и якост при повишена температура, като същевременно са по-трайни и по-устойчиви на корозия от конвенционалните метални компоненти. Като такива, те са идеални материали за структурно вграждане в самолети и по-специално в рамките на първичните структури и управляващи повърхности, като елерони и ротори, обшивки на крила, капази на двигателите, капази на фюзелажа и др.

Въпреки това, все още има няколко предизвикателства, които пречат на по-широкото използване на композитните материали в този тип приложения като например висока цена на композитните материали, усложнени процедури за производство и ремонт. В допълнение, техническите проверки и изпитания на структури от ПВВП е много по-голямо предизвикателство при традиционните техники, използващи неразрушително тестване и контрол, като например проверка с ултразвук. Това се дължи основно на сложните форми на тези части и затрудненото разпространение на ултразвуковата вълна поради процеси на отражение, пренасяне и дисперсия, които могат да възникнат на границите между влакната и основния материал на запълване.

Тази научна разработка представя методология за генериране на реалистични тримерни софтуерни модели на подсилени с въглеродни влакна полимерни структури, предназначени за използване в симулационни проучвания на съвременни методи за неразрушително тестване чрез рентгенова техника. Разработени, представени и оценени са два модела на ПВВП. Единият модел е изграден от множество подредени слоеве, които съдържат непрекъснати въглеродни нишки, а вторият като сплетен текстил от вплетени въглеродни нишки. Следните ПВВП дефекти са моделирани: поръзност, липса на въглеродни нишки, не-въглеродни включения. Рентгенови проекционни изображения са генерирани с помощта на разработен симулатор за рентгенови изображения. Получените предварителни качествени и количествени резултати потвърждават като цяло добрата корелация на характеристиките между симулирани и експериментални рентгенографски данни и оправдават използването на този модел за изследвания на ПВВП с рентгенова образна диагностика.

Прилагането на модела на ПВВП е демонстрирано в симулационно изследване, имащо за цел да оцени количествено целесъобразността на две рентгенови техники за образна диагностика: конусно-лъчева компютърна томография и цифрова томосинтеза, като техники за инспекция посредством неразрушителен контрол на ПВВП структури. Симулацията показва, че във всички случаи използването на конусно-лъчева компютърна томография превъзхожда, както конвенционалната рентгенография така и цифровата томосинтеза от гледна точка на характеризирание на дефектите и тяхната по-добра визуализация.

Modeling of small carbon fiber-reinforced polymers for X-ray imaging simulation

Carbon fibre reinforced polymers (CFRP) are one of the most promising composite materials that can integrate the existing requirements of aeronautics, automotive and construction industries. For example, the growing use of composite materials in the aviation industry over the last decade is mainly due to the requirement to reduce weight and build more fuel-efficient aircrafts. Composite materials offer reduced weight in combination with excellent mechanical properties, such as high toughness and strength at high temperatures, while being more durable and more resistant to corrosion than conventional metal components. As such, they are ideal materials for structural installation in aircrafts and in particular within primary structures and control surfaces, such as ailerons and rotors, wing linings, bonnets, fuselages, etc.

However, there are still several challenges that prevent the wider use of composite materials in this type of applications, such as the high cost of composite materials, complicated manufacture and service procedures. In addition, technical inspections and tests of CFRP structures are a much greater challenge in traditional techniques using non-destructive testing and control, such as ultrasonic inspection. This is mainly due to the complex shapes of these parts and the difficult propagation of the ultrasonic wave due to reflection, transfer and dispersion processes that can occur at the boundaries between the fibres and the base of the filling material.

This research work presents a methodology for generating realistic three-dimensional software models of carbon fibre reinforced polymer structures designed for use in simulation studies of modern methods for non-destructive testing by using X-ray techniques. Two CFRP models have been developed, presented and evaluated. One pattern is made up of a number of stacked layers that contain continuous carbon fibres, and the other is made of woven carbon fibre fabrics. The following CFRP defects are modelled: porosity, lack of carbon fibres, and non-carbon inclusions. X-ray projection images are generated using an in-house developed X-ray imaging simulator. The obtained preliminary qualitative and quantitative results largely confirm the good correlation of the characteristics between simulated and experimental radiographic data and justify the use of this model for studies of CFRP with X-ray imaging techniques.

The application of the CFRP model is demonstrated in a simulation study aiming to quantify the feasibility of two X-ray imaging techniques: cone-beam computed tomography and digital tomosynthesis, as inspection techniques through non-destructive testing of CFRP structures. The simulation shows that in all cases the use of cone-beam computed tomography is superior to both, conventional radiography and digital tomosynthesis, in terms of characterizing the defects and their better visualization.

B4-04 Bliznakova K., Kamarianakis Z., Dermitzakis A., **Bliznakov Z.**, Buliev I., Pallikarakis N. (2014), *Modelling of small CFRP aerostructure parts for X-ray imaging simulation*. International Journal of Structural Integrity, Vol. 5 No. 3, pp. 227-240. DOI: 10.1108/IJSI-02-2014-0009

Моделиране на малки композитни аеро-структурни части предназначени за симулации на рентгенови техники

В днешно време композитните материали навлизат все по-широко в самолетостроенето. Предвижда се, повече от 50% от структурните части на следващото поколение самолети (като например AIRBUS 350 XWB) да бъдат направени от композитни материали, което ще доведе до по-големи изисквания по отношение тестването на тези материали за евентуални дефекти, като кухини, липса на запълваща смола, образуване на пори и разслояване. Такива изисквания включват изследване на съществуващи и нови методики за неразрушителен контрол, базирани на рентгенови изображения и предназначени за тестване на аеро-структурни части и компоненти.

Целта на тази научна работа е да разработи реалистичен компютърен модел на аеро-структурни части, изработени от полимери подсилени с въглеродни влакна (ППВВ), предназначени за изследване и верификация на използването на рентгеново-базирани техники за образна диагностика, като метод за неразрушителен контрол на аеро-структурни части в самолетната индустрия.

Методологията за дизайн и конструкция на ППВВ е следната. ППВВ съдържат слоеве от снопове въглеродни влакна, залети със смола. Ориентацията на сноповете въглеродни влакна в различните слоеве е строго определена и зависи от местоположението на самия слой по отношение на другите слоеве. В настоящия модел, всеки сноп от въглеродни влакна е симулиран като кръгов цилиндър с диаметър няколко микрометра. Цялостният модел на аеро-структурната част се състои от насложени един върху друг слоеве от еднопосочни въглеродни снопове. Сноповете в тези слоеве имат ориентация на $0^\circ / 90^\circ / 45^\circ / -45^\circ$. Два вида аеро-структури, използващи ППВВ, са моделирани: плоска панелна структура и реална структура на клипс-скоба. Симулирани са два вида дефекти във всеки компютърен модел: (1) порест слой и (2) не-въглеродни елементи. Генерирани са софтуерни рентгенови изображения със специално разработена симулационна платформа. Симулирани са три рентгеново-базирани постановки: рентгенография, цифрова томосинтеза и конусно-лъчева компютърна томография.

Резултатите показват, че двата вида дефекти (порьозност и не-въглеродни елементи) се детектират и с трите вида рентгеново-базирани техники. Цифровата томосинтеза и конусно-лъчевата компютърна томография, обаче, предоставят значително по-високо качество на получените тестови изображения.

Авторите демонстрират практическата полза от компютърната методология за генериране на модели на аеро-структурни части, съставени от ППВВ. Разработеният софтуер е ценен инструмент в проектирането, тестването и оптимизацията на рентгенови техники за образна диагностика, предназначени за използването им в неразрушителен контрол и тестване на композитни материали. За генерирането на рентгенови изображения на модели, базирани на ППВВ е необходимо сравнително малко време, като по този начин, резултатите от първичната виртуална оптимизация и тестване биват налични изключително бързо и на ниска цена.

Оригиналността и научният принос на тази работа се състои в предложения иновативен компютърен модел на ППВВ аеро-структури, предназначени за компютърни симулации на рентгенови изображения. Моделът се характеризира с простота на неговото конструиране и генериране, както и с реалистичен визуален изглед на симулираните рентгенови изображения.

Modelling of small CFRP aerostructure parts for X-ray imaging simulation

Nowadays, composite materials are becoming more widespread in aircraft construction. It is estimated that more than 50% of the structural parts of the next generation aircrafts (such as the AIRBUS 350 XWB) will be made of composite materials, which will lead to greater requirements for testing these materials for possible defects, such as cavities, lack of filler resin, porous formations and delamination. Such requirements include the investigation of existing and new non-destructive testing methods based on X-ray imaging and designed to test aero-structural parts and components.

The aim of this research work is to develop a realistic computer-based model of aero-structural parts made of carbon fibre reinforced polymers (CFRP), designed to study and verify the use of X-ray-based imaging techniques as a method for non-destructive testing of aero-structural parts in the aircraft industry.

The methodology for design and construction of CFRP is as follows. CFRPs contain layers of resin-coated carbon fibre bundles. The orientation of the carbon fibre bundles in the different layers is strictly defined and depends on the location of the layer itself in relation to the other layers. In the current model, each bundle of carbon fibre is simulated as a circular cylinder with a diameter of several micrometres. The overall model of the aero-structural part consists of superimposed layers of unidirectional carbon bundles. The bundles in these layers have an orientation of $0^\circ / 90^\circ / 45^\circ / -45^\circ$. Two types of aero-structures using CFRPs are modelled: flat panel structure and real clip-bracket structure. Two types of defects were simulated in each computer-based model: (1) a porous layer and (2) non-carbon elements. Software X-ray images with a dedicated in-house developed simulation platform have been generated. Three X-ray techniques were simulated: radiography, digital tomosynthesis and cone-beam computed tomography.

The results show that both types of defects (porosity and non-carbon elements) are detected by all three types of X-ray-based imaging techniques. However, digital tomosynthesis and cone-beam computed tomography provide significantly higher quality test images.

The authors demonstrate the practical usefulness of the computer methodology for generating models of aero-structural parts composed of CFRP. The developed software is a valuable tool in the design, testing and optimization of X-ray imaging techniques designed for use in non-destructive testing and testing of composite materials. It takes relatively little time to generate X-ray images of CFRP-based models, so that the results of the primary virtual optimization and testing are available extremely quickly and at a low cost.

The originality and scientific contribution of this work lies in the proposed innovative computer model of CFRP aero-structures designed for computer simulations of X-ray images. The model is characterized by the simplicity of its construction and generation, as well as, a realistic visual appearance of the simulated X-ray images.

- B4-05** A. Marinov, D. Ivanov, **Z. Bliznakov**, H. Bosman, I. Buliev, K. Bliznakova, (2016) *Application of Computational Phantoms and their 3D Print-outs for Educational Purposes*. In: Sontea V., Tiginyanu I. (eds) 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, (ICNBME 2015), 23-26 September 2015, Chisinau, Republic of Moldova, IFMBE Proceedings, vol. 55, pp. 493-496, Springer, Singapore, DOI: 10.1007/978-981-287-736-9_116

Приложение на компютърни модели и техните 3D физически копия за образователни цели

Тази публикация представя интересен подход за реализиране на част от образователния материал на един от модулите от Европейския курс EUTEMPE-RX за обучение на експерти по Медицинска физика. По-специфично, представен е подходът, използван в модула "Антропоморфни фантоми", чрез който се преподава атрактивно съдържанието на учебния материал от глава "Компютърните антропоморфни фантоми като прототипи на физически обекти". Също така се демонстрира приложимостта за възпроизвеждане на реални физически фантоми за използване в клиничната практика от техните компютърни модели. Този подход включва създаването на софтуерни антропоморфни фантоми и изпълнението на набор от операции за обработка на изображения, използвани за приготвяне на изходния файл на фантома в подходящ формат за печатане на 3D принтери.

Подходът се състои от следните стъпки:

- (а) Генериране на компютърния модел с помощта на софтуерния продукт, *BreastSimulator*. Софтуерното приложение за тази стъпка ще бъде на разположение за обучението на всеки участник. Демонстрации, организирани под формата на видео-анимации, съпътстват процеса на преподаване и ще се фокусират върху взаимодействието на студентите с интерфейса на софтуерния продукт, за да се генерират компютърни модели на млечна жлеза. Изходният файл от този софтуерен продукт, съдържа вокселизирана версия на компютърния модел.
- (б) Отваряне и прочитане файла на модела в програмната среда на MATLAB.
- (в) Извършване на подходяща пост-обработка на модела, като например подобряване на изображението чрез изглаждане на вокселния софтуерен модел и намаляване на възможните артефакти от вокселизацията в окончателната печатната версия.
- (г) Преобразуване на преработения модел до стереолитографски (STL) изходен файлов формат. Полученият STL файл може да се използва, както за отпечатване на физически модел така и за разработване на образователни материали.
- (д) Прочитане на STL файла от специализиран софтуер за 3D моделиране и изготвяне на компютърни анимации за визуализация на модела за целите на обучението на студентите.
- (е) Прочитане на STL файла от специализирани Computer Aided Design (CAD) или Computer Aided Manufacturing (CAM) софтуерни продукти, обработка на модела и добавяне на допълнителни поддържащи структури. Следващата стъпка е отпечатването на физически модел по време на обучението на студентите.

В тази статия е описано примерно реализиране на горния подход, чрез конструиране на софтуерен модел на млечна жлеза и нейното 3D принтиране. За целта, са били проектирани два малки компютърни модела на млечна жлеза, различаващи се по сложността на моделираните млечни канали. Тези софтуерни модели са обработени чрез използване на алгоритми, целящи подобряване на изображението с цел изглаждане на вокселизираната матрица. След това, моделът се преобразува в STL формат, използван за отпечатване на физическия 3D модел и за разработване на образователни материали.

Application of Computational Phantoms and their 3D Print-outs for Educational Purposes

This publication presents an interesting approach for the implementation of a part of the educational material of one of the modules from the European course EUTEMPE-RX for education and training of experts in Medical Physics. More specifically, the approach used in the module "Anthropomorphic phantoms" is presented, through which the content of the study material from the chapter "Computer anthropomorphic phantoms as prototypes of physical objects" is delivered attractively. The applicability for reproduction of real physical phantoms for use in clinical practice by their computer models is also demonstrated. This approach involves the creation of software anthropomorphic phantoms and the performance of a set of image processing operations used to prepare the phantom output file in a suitable format for printing with 3D printers.

The approach consists of the following steps:

- (a) Generating a computer-based model using the customized software tool, *BreastSimulator*. The software application for this step will be available for training of all the participants. Demonstrations organized in the form of video animations accompany the teaching process and will focus on the interaction of students with the interface of the software tool to generate computer models of the breast. The output file from the software tool contains a voxelized version of the computational model.
- (b) Open and read the model file in the MATLAB programming environment.
- (c) Perform appropriate post-processing of the model, such as image enhancement by smoothing the voxelized software model and reducing possible voxelization artefacts in the final printed version.
- (d) Conversion of the processed model to a stereolithographic (STL) output file format. The resulting STL file can be used, both for printing as a physical model and for developing educational materials.
- (e) Reading the STL file from dedicated software tool for 3D modelling and preparation of computer animations for visualization of a model for the purposes of students' education.
- (f) Read the STL file from dedicated Computer Aided Design (CAD) or Computer Aided Manufacturing (CAM) software products, process the model, and add additional support structures. The next step is to print the physical model during the students' training.

This article describes an exemplary implementation of the above approach by constructing a software model of the breast, subsequently followed by its 3D printing. For this purpose, two small size computer-based models of the breast were designed, having different complexity of the modelled mammary duct trees. These software models were processed using algorithms for image enhancement in order to smooth the voxelized matrix containing the models. Then, the models were converted to STL format, which is used both for printing the physical 3D models and for further development of educational materials.

- B4-06** Baneva Y., Bliznakova K., Cockmartin L., Marinov S., Buliev I., Mettievier G., Bosmans H., Russo P., Marshall N., **Bliznakov, Z.**, *Evaluation of a breast software model for 2D and 3D X-ray imaging studies of the breast*, Physica Medica, 41 (2017), pp. 78-86, DOI: 10.1016/j.ejmp.2017.04.024

Оценка на софтуерен модел на млечна жлеза за изследвания на двумерни и тримерни рентгенови изображения на женската гърда

Физическите и компютърните модели са от съществено значение за развитието, оптимизацията и оценката на съвременните рентгенови образни системи за диагностика на млечна жлеза, които могат да бъдат двуизмерни, като цифровата мамография, модалност с използване на контрастно вещество и т.н. или триизмерни, като например цифрова томосинтеза или компютърна томография на млечна жлеза. За всички тези техники е важно и физическите и компютърните модели на млечна жлеза да възпроизвеждат коректно рентгеновите и анатомичните характеристики на човешката тъкан с цел изследване на конкретни аспекти на веригата, по която се получава изображението.

Един такъв физически модел е разработен от екип на Университета в Льовен, Белгия, който модел създава структуриран мамографски фон и беше тестван както за двумерна мамография, така и за цифрова томосинтеза на гърдата. Този модел се състои от акрилни сфери, поставени в акрилен съд, напълнен с въздух или с вода. С цел оптимизиране на модела, софтуерен модел на физическия е разработен и използван в тази статия. Софтуерният модел представлява полуцилиндричен контейнер с размери: дебелина 48 mm и диаметър 200 mm, пълен с акрилни сфери с шест различни диаметъра: 15.88 mm, 12.70 mm, 9.52 mm, 6.35 mm, 3.18 mm и 1.85 mm. Четири изчислителни модела с компоненти, симулирани от различен материал: плексиглас, животинска мас, полиетилен, вода, жлезиста тъкан, са генерирани със специално софтуерно приложение, като за два от тях са налични и физически модели, които да се използват за сравнение. Експерименталните данни са получени на рентгенова машина Siemens Mammomat с детектор с размер 2800 x 3518 пиксела и размер на пикселите от 0.085 x 0.085 mm. Двумерни мамографски проекции и тримерни изображения на всеки един от тези софтуерни модели са симулирани със собствен софтуерен симулатор. Изображенията бяха сравнени субективно и обективно с налични експериментални данни. При обективното сравнение са изчислени параметри от изображенията като фрактална дименсия, статистики от втори ред, спектърен анализ.

Субективното и количественото сравнение показва много добро съвпадение между експериментални и симулирани проекции и томографски изображения на моделите. Моделите със сфери, симулирани от мастна тъкан и полиетилен показваха показатели близки до тези, генерирани от модела с вода, което ще се използва за изготвянето на нови физически модели на млечна жлеза.

Evaluation of a breast software model for 2D and 3D X-ray imaging studies of the breast

Physical and computational models are essential for the development, optimization and evaluation of modern X-ray imaging systems for the diagnosis of the breast, which can be two-dimensional, such as digital mammography, contrast energy, etc. or three-dimensional, such as digital tomosynthesis or computed tomography of the breast. For all these techniques, it is important that the physical and software models of the breast correctly reproduce the X-ray and anatomical characteristics of the human tissues in order to study specific aspects of the imaging chain.

One such physical model was developed by a team at the Katholieke University of Leuven, which created a structured mammography background and was tested for both planar mammography and three-dimensional breast tomosynthesis. This model consists of acrylic spheres placed in an acrylic container filled with either air or water. In order to optimize the model, a software model representing the physical one was developed and used in this study. The software model is a semi-cylindrical container with dimensions: thickness 48 mm and diameter 200 mm, filled with acrylic spheres with six different diameters: 15.88 mm, 12.70 mm, 9.52 mm, 6.35 mm, 3.18 mm and 1.85 mm. Four computational models with components simulated from different materials: Plexiglas, animal fat, polyethylene, water, glandular tissue, are generated with a dedicated in-house developed software application, and for two of them there are physical models to be used for comparison purposes. The experimental data were obtained from a Siemens Mammomat with a detector measuring 2800 x 3518 pixels and a pixel size of 0.085 mm.

Two-dimensional mammographic projections and three-dimensional images of each of these software phantoms are simulated with our own software simulator. The images were compared subjectively and objectively with available experimental data. In the objective comparison, parameters of the images such as fractal dimension, second-order statistics, spectral analysis parameters, etc. are calculated.

Subjective and quantitative comparison showed a very good relation match between experimental and simulated projections and tomographic images of the models. The models with spheres simulated by adipose tissue and polyethylene showed characteristics close to those generated by the model with water, which will be used to prepare new physical phantoms of the breast.

- B4-07** Dukov N., **Bliznakov Z.**, Buliev I., Bliznakova K. (2019) **Creation of Computational Breast Phantoms with Extracted Abnormalities from Real Patient Images.** In: Lhotska L., Sukupova L., Lacković I., Ibbott G. (eds) World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018, IFMBE Proceedings, vol. 68/1, pp. 213-217, Springer, Singapore, DOI: 10.1007/978-981-10-9035-6_38

Създаване на компютърни фантоми на женска гърда с извлечени патогенни аномалии от реални пациентни изображения

Ранното диагностициране на рак на гърдата може значително да увеличи вероятността за успешно лечение на заболяването. Поради това много усилия са насочени към подобряване на съществуващи техники за образна диагностика или изследвания на нови такива.

Настоящата работа представя подход за създаване на сложни компютърни модели на гърдата, с включени модели на туморни образувания на млечна жлеза.

За настоящото изследване са използвани томографски изображения от реални пациенти с лезии. Двадесет пациентски изображения са получени от университетската болница в Льовен, Белгия, използвайки рентгенова машина Siemens Mammomat Inspiration (85 x 85 μ m), докато 15 пациентски изображения са получени от Александровска болница, София, България, където е инсталирана рентгенова машина Giotto Tomo IMS (90 x 90 μ m). Тримерните образи от Siemens Mammomat Inspiration са получени от 26 проекционни изображения при компресиране на гърдата. При Giotto Tomo IMS, томограмите са реконструирани от 13 проекции на всяка една гърда. Тримерни туморни модели са сегментирани от тези томографски изображения. За тази цел е разработен полуавтоматичен алгоритъм, който алгоритъм прилага серия от обработка на срезове от томографските изображения, започвайки с нормализация и филтриране на изображенията за шум, прилагане на операции за сегментация, които включват бинаризация, морфологически операции, техника „region growing“ и интерполация. Сегментираните срезове се подреждат правилно и се съхраняват в тримерна вокселна матрица, съответстваща на желаната разделителна способност. Информация за лезията: размер на воксела, размер на матрицата, геометричен център и др. също се съхранява. След това моделите се вмъкват на различни места в компютърните модели на млечни жлеза. За тази цел се използва собственооръчно-разработен софтуер, *BreastSimulator*, за създаване на различни модели на физиологично здрави гърди, чрез различни параметри като форма, размер, характеристики на млечните канали, лигаменти на Купър, кожа, и т.н..

Примери за симулирани мамографски и томографски изображения от готови модели на млечна жлеза с лезии са представени, за да илюстрират потенциала от предложения подход. Чрез комбиниране на математически модели на гърди със сегментирани реални тримерни туморни образувания се постига създаването на реалистични компютърни модели. Подходът позволява симулиране на множество сценарии и неограничен брой случаи, които могат да се използват за моделиране и изследване на съществуващи или нови техники за образна диагностика на млечната жлеза.

Creation of Computational Breast Phantoms with Extracted Abnormalities from Real Patient Images

Early diagnosis of breast cancer can significantly increase the chance of successful treatment of the disease. Therefore, many efforts are being made to improve existing imaging techniques or investigation of new ones.

This work contributes to an approach for creating complex computational breast phantoms, including models of breast tumours.

For the present study, we used tomographic images from real patients with breast lesions. Twenty patient images were obtained from the University Hospital in Leuven, Belgium, using Siemens Mammomat Inspiration (85 x 85 μm), while 15 patient images were obtained from Alexandrovska Hospital, Sofia, Bulgaria, where Giotto Tomo IMS (90 x 90 μm) is installed. The three-dimensional images from Siemens Mammomat Inspiration were obtained from 26 projection images following breast compression. In Giotto Tomo IMS, tomograms were reconstructed from 13 projections from the left and right breast. 3D tumour models are segmented from these tomographic images. For this purpose, a semi-automatic algorithm has been developed. It applies a series of processing of regions from the tomographic images, starting with normalization and filtering of noise images, application of segmentation operations that include binarization, morphological operations, "region growing" technique, and interpolation. The segmented slices are arranged appropriately and stored in a 3D voxel matrix corresponding to the desired resolution. Information about the lesion: voxel size, matrix size, geometric centre, etc. are also stored. Further on, the models are inserted at different locations in the computational phantoms of the breast. For this purpose, we use our in-house developed software tool, *BreastSimulator*, to create different phantoms of healthy breasts, using different parameters, such as shape, size, characteristics of the duct trees, Cooper ligaments, skin, etc.

Examples of simulated mammographic and tomographic images from created breast phantoms with lesions are presented to illustrate the potential of the proposed approach. Combining computational breast modelling with segmented real 3D tumours leads to the creation of realistic computational phantoms. The approach allows the simulation of multiple scenarios and an unlimited number of cases that can be used to model, simulate and study existing or new techniques for breast imaging.

- B4-08** G. Esposito, G. Mettivier, K. Bliznakova, **Z. Bliznakov**, H. Bosmans, A. Bravin, I. Buliev, F. Di Lillo, D. Ivanov, M. Minutillo, A. Sarno, J. Vignero and P. Russo, *Investigation of the refractive index decrement of 3D printing materials for manufacturing breast phantoms for phase contrast imaging*, Physics in Medicine & Biology, 2019, Vol. 64(7), pp. 1-11, DOI: 10.1088/1361-6560/ab0670

Изследване на разликата в показателя на пречупване на материалите за 3D печат за производство на фантоми на женска гърда за фазово-контрастна образна диагностика

Тримерното моделиране на млечна жлеза се използва за целите на оптимизацията на системи за 2D и 3D образна диагностика. За тази цел, се използват компютърни и физически модели, които достатъчно точно възпроизвеждат сложността на анатомията на гърдата. Докато редица научни групи представят компютърни модели на млечна жлеза с различно ниво на анатомична сложност, физическите модели са едва в началото на разработването им. Една от възможностите за изготвяне на тримерни физически модели на млечна жлеза е чрез използването на технологията за 3D печат. Преди да се използва обаче, е необходима оценка на рентгеновите свойства на материалите, които се използват за 3D печат, на техните коефициенти на абсорбция β и пречупване δ .

Тази статия представя нов метод за оценка на рентгеновите свойства на дванадесет материала, използвани за 3D печат. Извършена е поредица от измервания при 30, 45 и 60 keV в Европейската синхротронна инфраструктура (Гренобъл, Франция) за оценка тези коефициенти по отношение на истинските тъкани на гърдата: мастна, жлезиста и туморна. Дванадесетте материала са шест фото-полимерни смоли: Black, Clear, Flex, Gray, Tough, и White и шест пластични материали: ABS, Hybrid, Nylon, PET-G, PLA и PVA. Тези икономични налични материали за двете различни технологии за 3D печат: моделиране чрез разтопено отлагане (FDM) и стереолитография (SLA) са избрани поради тяхната висока устойчивост на топлинни и механични натоварвания.

За показателя на пречупване δ , методът, който се използва е базиран на фазово контрастно изображение, от което се извлича δ чрез използване на алгоритъма на Паганин. Като еталонни материали в този алгоритъм са използвани жлезиста, мастна и кожна тъкани с известно съотношение δ / β . Въведена е процентна разлика $\Delta\delta$ за оценка на годността на печатащите материали като заместители на човешките тъкани. Точността на метода (около 4%) беше оценена въз основа на свойствата на плексиглас и найлон, реферирани като златен стандарт.

Резултатите показват че за изследваните фотонни енергии, ABS е добър заместител на мастната тъкан, Hybrid като заместител на жлезистата тъкан и PET-G за симулиране на кожата.

На базата на получените резултати се планира реализирането на физически модели на млечна жлеза, произведени чрез технология за моделиране чрез разтопено отлагане (FDM), използваща ABS, Hybrid и PET-G като заместители на мастната, жлезистата и кожната тъкан и втори фантом чрез технология на стереолитографията (SLA) със смоли Flex, Tough и Black.

Investigation of the refractive index decrement of 3D printing materials for manufacturing breast phantoms for phase contrast imaging

3D modelling of the breast is used for the purpose of optimizing systems for 2D and 3D x-ray imaging. For this purpose, digital and physical phantoms are used that accurately reproduce the complexity of the anatomy of the breast. While a number of scientific groups have produced computational phantoms of the breast with varying degrees of anatomical complexity, physical breast models are only at the beginning of their development. One of the possibilities for manufacturing three-dimensional physical models of the breast is through the use of 3D printing technology. However, before use, it is necessary to evaluate the X-ray properties of the materials used for 3D printing, their absorption coefficients β and refractive index δ .

This article presents a new method for evaluation of the X-ray properties of twelve materials used for 3D printing. A series of measurements were performed at 30, 45 and 60 keV at the European Synchrotron Radiation Facility to assess these coefficients in relation to the real breast tissues: adipose, glandular and tumour tissues. The twelve materials include six photopolymer resins: Black, Clear, Flex, Gray, Tough, and White and six plastic materials: ABS, Hybrid, Nylon, PET-G, PLA and PVA. These low-cost materials are available for use with two different 3D printing technologies: fused deposition modelling (FDM) and stereolithography (SLA). The materials were chosen because of their high heating resistance and mechanical properties.

For the refractive index δ , the method used is based on a phase contrast images from which δ is derived using Paganin's algorithm. Glandular, adipose and skin tissues with a known δ / β ratios are used as reference materials in this algorithm. A percentage difference $\Delta\delta$ was introduced to assess the suitability of printing materials as substitutes for human tissues. The accuracy of the method (about 4%) was evaluated based on the properties of Plexiglas and nylon referenced as a gold standard.

The results show that for the range of photon energies studied, ABS is a good substitute for the adipose tissue, while Hybrid is a substitute for the glandular tissue, and PET-G is a substitute for the breast skin.

Based on the obtained results, the implementation of physical breast phantoms, produced with the use of fused-deposition modelling technology (FDM), using ABS, Hybrid and PET-G as substitutes for adipose, glandular and skin tissues, is planned. A second phantom using stereolithography technology (SLA) is also planned employing Flex, Tough and Black resins.

- B4-09** Dukov, N., Bliznakova, K., Feradov, F., Buliev, I., Bosmans, H., Mettievier, G., Russo, P., Cockmartin, L., **Bliznakov, Z. Models of breast lesions based on three-dimensional X-ray breast images**, Physica Medica, 2019, 57, pp. 80-87, DOI: 10.1016/j.ejmp.2018.12.012, 2019

Модели на туморни образувания, базирани на триизмерни рентгенови изображения на женска гърда

Ракът на гърдата е най-често диагностицираният рак и водеща причина при смърт сред жените по света. Въпреки технологичния напредък, като цифровата мамография, националните програми за скрининг, както и въвеждането на системи за подпомагане на откриването, диагностиката на рак, скрит в плътен паренхим, все още остава предизвикателна задача.

Тази статия представя метод за създаване на компютърни модели на лезии на млечна жлеза, които лезии са с неправилни форми и са сегментирани от пациентски данни. За тази цел са използвани цифрови томосинтези на млечна жлеза и изображения на мастектомии, както и компютърна томография на цяла гърда. Разработеният подход включва шест основни стъпки: (а) нормализиране на интензивността на томографските изображения; (б) намаляване на шума на изображението; в) бинаризиране на лезията, г) прилагане на морфологични операции с цел допълнително намаляване на нивото на артефакти; (д) прилагане на техниката „разрастване на региони“ за сегментиране на лезията; и (е) създаване на окончателен 3D модел на лезия. Алгоритъмът е полуавтоматичен като първоначален избор на региона на лезията и стартовите позиции за започване на процеса разрастване на региони се извършват интерактивно. Софтуерен инструмент, изпълняващ всички необходими стъпки, е разработен в програмната среда MATLAB. Методът е тестван и оценен чрез анализ на анонимизирани изображения от цифрова томосинтеза на пациенти, диагностицирани с рак на гърдата.

Приложени са два вида оценка: а) чрез сравняване на сегментираните туморни лезии от автоматичното сегментиране и от очертаното такова от експерт-рентгенолози; (б) сравняване на обема на тумор с точно определени размери с този, получен след прилагане на алгоритъма за сегментиране върху синтетичен обем, получен от виртуално рентгеново изследване на томосинтеза с компютърен модел на гърда и въведен този основен модел на тумор.

Трима опитни рентгенолози участваха в оценката на три от сегментираните тумори. Те очертаха в срезове наличните туморни образувания. Резултатите бяха оценени чрез пет дефинирани показателя. Обективната оценка показва подобни стойности за алгоритъм-рентгенолог и рентгенолог-рентгенолог. Във всички случаи, обемите на лезиите, сегментирани от предложения алгоритъм, са по-малки от тези, очертани от експертите-рентгенолози. Друг избран случай на тумор беше въведен в компютърен модел на гърда, за да се тества алгоритъмът. Относителната разлика в обема между основния обем на тумора и този получен чрез прилагане на алгоритъма върху синтетичния томографски обем е 5%, което показва задоволителното представяне на предложения алгоритъм за сегментиране. Софтуерният инструмент, който беше разработен, се използва за създаване на модели на различни аномалии на гърдата, които след това се съхраняват в база данни с цел използване от изследователи, работещи в тази област.

Models of breast lesions based on three-dimensional X-ray breast images

Breast cancer is the most commonly diagnosed form of cancer and a leading cause of death amongst women worldwide. Despite technological advances, such as digital mammography, national screening programs, and the introduction of systems to support the early detection and diagnosis of cancer hidden in a dense breast parenchyma, it still remains a challenging task.

This paper presents a method for creation of computational models of the breast lesions that have irregularly shape and are segmented from real patient data. For this purpose, digital tomosynthesis of the breast and images of mastectomies were used, as well as computed tomography of the whole breast. The approach developed includes six main steps: (a) normalization of the intensity of the tomographic images; (b) image noise reduction; c) binarization of the lesion, d) application of morphological operations in order to further reduce the level of artefacts; (e) applying the "region growing" technique to segment the lesion; and (f) creating a final 3D model of the lesion. The algorithm is semi-automatic as the initial selection of the region of the lesion and the initial positions for starting the procedure for region growing are performed interactively. A software tool that performs all the necessary steps has been developed in MATLAB programming environment. The method was tested and evaluated by analysing anonymized images from digital tomosynthesis of patients diagnosed with breast cancer.

We applied two types of assessment: a) by comparison of the segmented tumour lesions from the automatic tumour segmentation and from the one outlined by radiologists; (b) comparison of the tumour volume with well-defined boundaries with that obtained after applying the segmentation algorithm to a synthetic volume obtained from a virtual X-ray examination of tomosynthesis with a computer model of the breast with the basic tumour model introduced.

Three experienced radiologists participated in the evaluation of three of the segmented tumours. They outlined the available tumours in the sections. The results were evaluated using five preliminary defined indicators. The objective evaluation showed similar values for the algorithm-radiologist and the radiologist-radiologist cases. In all cases, the volumes of lesions segmented by the proposed algorithm are smaller than those outlined by the experts. Another selected case of the tumour was introduced into a computational breast model to test the algorithm. The relative difference in volume between the main tumour volume and that obtained by applying the algorithm to the synthetic tomographic volume is 5%, which shows the satisfactory performance of the proposed segmentation algorithm. The software tool we developed is used to create models of various breast abnormalities, which are then stored in a dedicated database for further use by the researchers working in this specific field.

- B4-10** S. Daskalov, N. Okkalidis, J.M. Boone, S. Marinov, **Z. Bliznakov**, G. Mettievier, H. Bosmans, P. Russo, K. Bliznakova, (2020) ***Anthropomorphic Physical Breast Phantom Based on Patient Breast CT Data: Preliminary Results***. In: Henriques J., Neves N., de Carvalho P. (eds) XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing - MEDICON 2019, IFMBE Proceedings, vol. 76, pp. 367-374, Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-31635-8_44

**Антропоморфен физически фантом на женска гърда, базиран на пациентни данни от компютърна томография на женска гърда:
Предварителни резултати.**

Компютърните и физическите модели на антропоморфни млечни жлези се превърнаха в мощен инструмент, използван в изследванията на нови техники за образна диагностика на млечна жлеза, което включва цифрова томосинтеза, компютърна томография на гърда, фазово-контрастна мамография. В литературата, свързана с изготвянето на физически модели на млечна жлеза, много усилия са отделени за разработването на нови 3D печатни материали като фото-полимери, легирани с различна концентрация на TiO₂, калций, йод и цинк. Основно предизвикателство и изискване в областта на рентгеновите изображения на млечна жлеза е използването на материали с подобни коефициенти на рентгенова абсорбция като тези на гръдната тъкан, особено при типичния енергиен диапазон, използван в мамографията: до 45 kV.

В тази статия се описва нов подход за изработване на физически модел на гърда с реалистична форма, размер и рентгенови абсорбционни свойства. Подходът елиминира необходимостта от сегментиране на тъканите на гърдата директно, имитирайки радио-плътността на всеки воксел от изображението на компютърна томография. Този подход е базиран на предишна наша разработка за използването на променлива скорост на екструдирание на пластмасовите филаменти при създаване на 3D модели. За целта сме използвали томографски изображения на млечна жлеза на пациент, за да се създаде моделът чрез предложения подход. Използван е Albion CT с напрежение на рентгеновата тръба от 80 kV. Резолюцията на устройството е 672 пиксела x 656 пиксела, с дебелина на среза и размер на пикселите от 0,273 mm. Изчитаме стойността на Hounsfield Unit (HU) за всеки пиксел в изображението DICOM и след това се контролира скоростта на екструдирание на филamenta, за да се получи необходимото количество екструдирани материал. Принтерът, използван за производството на модела е базирна FDM технологията, модел T-Rex 2, с размери за печат 400 mm x 400 mm x 470 mm. Избран е филament PLA поради неговите подходящи характеристики за печат и рентгенови свойства. Полученият модел е сканиран на компютърен томограф и срезове от физическия модел и пациентската гърда са детайлно сравнени.

Сравнението показва сходен визуален вид на мамографските изображения на основните тъкани на гърдата: мастна и жлезиста, което също е добре подкрепено от визуалното сравнение на профилите, направени през избрани срезове. Резултатите от това проучване ще бъдат допълнително използвани при разработването на специален модел на млечна жлеза при изследвания с компютърна томография.

Anthropomorphic Physical Breast Phantom Based on Patient Breast CT Data: Preliminary Results

Computational and physical anthropomorphic phantoms of the breast have become a powerful tool used in research for new techniques of breast imaging, which includes digital tomosynthesis, breast computed tomography, and phase-contrast mammography. In the literature related to the preparation of physical models of the breast, many efforts have been devoted to the development of new 3D printed materials such as photo-polymers doped with different concentrations of TiO₂, calcium, iodine and zinc. A major challenge and requirement in the field of mammography is the use of materials with similar X-ray absorption coefficients as those of the breast tissue, especially in the typical energy range used in mammography: up to 45 kV.

This article describes a new approach for the development of a physical breast model with realistic shape, size, and X-ray absorption properties. The approach overcomes the need to segment breast tissue directly by mimicking the radio density of each voxel from a computed tomography image.

This approach is based on our previous study for use of variable speed extrusion of plastic fibres for the creation of 3D models. For this purpose, we used a tomographic image of a patient's breast to create the phantom using the proposed approach. Albion CT with an X-ray tube voltage of 80 kV was used. The resolution of the image is 672 pixels x 656 pixels, with a slice thickness and a pixel size of 0.273 mm. We read the value of the Hounsfield Unit (HU) for each pixel in the DICOM image and then control the extrusion rate of the thread to obtain the required amount of extruded filament. The printer used to manufacture the model is a Fused Deposition Modelling technology, model T-Rex 2, with print dimensions of 400 mm x 400 mm x 470 mm. The PLA filament was chosen because of its suitable printing characteristics and acceptable X-ray properties. The resulted phantom was scanned on a computed tomography and parts of the physical and patient breast images were compared in details.

The comparison showed a similar visual appearance of the mammographic images of the main tissues of the breast: adipose and glandular, which is also well supported by the visual comparison of the profiles made through the selected sections. The results of this study will be further exploited for the development of a dedicated breast phantom used in computed tomography studies.

Дата: 02.12.2020

Изготвил:



/ас. д-р инж. Живко Близнаков/