

医学影像仿真人体模型及其临床应用

薛莹,王瑞,李进丹,李志林,廖承德

云南省肿瘤医院(昆明医科大学第三附属医院)放射科,云南昆明 650118

【摘要】仿真人体模型是根据人体参数,用与人体组织具有相同或相近散射和吸收系数的“组织等效材料”制成的具有骨骼、肌肉、脏器的人体模型。它包括数字化虚拟人体模型、物理实体模型和二者结合的物理数学模型等3种类型。仿真体模在临床工作中应用广泛,可用于确定CT扫描方式及最佳扫描方案、优化患者的辐射剂量、设备评价及质量控制以及用于血管成像和对比剂注射方案研究。仿真体模模拟人体参数能避免不必要的辐射危害,未来在CT图像质控、设备评价、方案研究等方面前景十分可观。

【关键词】仿真人体模型;图像质量;医学影像技术;剂量优化

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)05-0592-04

Introduction and clinical application of anthropomorphic phantom for medical imaging

XUE Ying, WANG Rui, LI Jindan, LI Zhilin, LIAO Chengde

Department of Radiology, Yunnan Cancer Hospital (the Third Affiliated Hospital of Kunming Medical University), Kunming 650118, China

Abstract: Anthropomorphic phantom, a human body model with bones, muscles and viscera, is made of tissue-equivalent materials with the same or similar scattering and absorption coefficients of human tissues, including 3 types, namely computational human phantom, anthropomorphic radiant phantom, and the combination of both. Anthropomorphic phantom which is widely used in clinical practice can be used for the formulations of CT scanning mode and the best protocol, radiation dose optimization, equipment evaluation and quality assessment, and the research on angiography and contrast injection scheme. Anthropomorphic phantom can simulate human body parameters and avoid unnecessary radiological hazards, having a promising prospect in CT image quality assessment, equipment evaluation and protocol research in the future.

Keywords: anthropomorphic phantom; image quality; medical image technology; dose optimization

前言

随着医学影像技术学的迅猛发展,有关设备性能评价改进和辐射剂量的研究刻不容缓,为了避免危险实验对人类生命和健康的威胁,仿真人体模型(Anthropomorphic Phantom)应运而生。体模由类似人体辐射衰减系数的材料制成,其一般作用是模拟辐射与全身组织或器官的相互作用^[1],经过结果的评估分析^[2],可用作医学成像设备或应用程序的性能评价工具^[3]。医学影像仿真体模在临床中的应用主要有以下4个方面:CT扫描方式及最佳扫描方案的确定;患者剂量优化;设备评价及质量控制;血管成像

及对比剂注射方案研究。时至今日,各种类型的影像体模已被广泛应用于放射诊断、核医学和放射治疗领域。

1 仿真人体模型原理

仿真体模之所以能够近似地模拟在放射成像中真实人体,是因为仿真体模是根据人体自身参数,利用与人体组织散射和吸收系数相似的组织等效材料制成具有骨骼、肌肉、脏器的人体模型,因而实现了几何形体仿生、材料仿生、内部结构仿生、物理能量传递过程仿生和生物信息传感仿生^[4-5]。

2 仿真人体模型的分类

仿真人体模型包括数字化虚拟人体模型、物理实体模型和二者结合的物理数学模型。

2.1 数字化虚拟人体模型

数字化虚拟人体模型是一种用于数字化分析的人体模型,能够模拟人体主要组织器官^[6],建立数学

【收稿日期】2020-10-18

【基金项目】云南省卫生健康委员会医学学科带头人培养计划(D-2018009)

【作者简介】薛莹,技师,E-mail: 869993087@qq.com

【通信作者】廖承德,博士,主任医师,E-mail: 846681160@qq.com

模型,以便在医疗照射中对肿瘤靶体积和人体重要器官所接受剂量进行估算,是人体解剖学的简单化和数字化,便于实现辐射剂量的测量和计算的标准化,已经成为放射治疗和辐射防护医学成像和剂量学的重要研究工具^[7]。这种模型逐渐提高了对人体内部解剖结构的仿真度,并且种类繁多,从儿童到青年再到成人,无论男性、女性,甚至是孕妇,数字体模大大促进了人体辐射剂量的数字化运算^[8]。有学者提出放射治疗计划采集的图像仅需覆盖目标体积,而在临床实践中医生感兴趣的可能是扫描范围之外的正常组织,为解决这一问题而开发了一种与患者身高、体质量相匹配的5种体型的数字化人体模型^[9]。这些全身模型是基于患者的CT图像开发制作的,包含多个不同的器官和组织。使用多边形网格体素,体素化的体模转换成三维立体图像,包含器官轮廓的三维立体结构文件。此方法结合患者和体模的图像,提高了拟人模型的真实感,且提供了器官接受辐射剂量的数据^[10-11]。但稍显不足的是,数字化仿真体模和真实患者之间存在不可避免的差异。

2.2 物理实体模型

在医学影像领域中应用最为广泛的当属辐照仿真人体模型,在放射诊断、放射治疗、核医学技术等领域中发挥重要作用。QRM公司制造的LIVER-PHANTOM™肝脏体模实现了基本的几何形体仿生及物理能量传递的仿生,它由3个可调节部分组成:仿真人体腹部、肝脏嵌入体和脾脏嵌入体。其中肝脏嵌入体中包含了尺寸、形态、密度各不相同的球形病变结节,可用于CT检查中对肝脏部分低对比度细节的显示,也可用于对测试电脑辅助诊断程序。Koivisto等^[12]设计出一个具有呼吸运动的拟人化聚乙烯醇(PVA)肝脏模型,允许应用不同的运动模式和形状/大小,因此能够模拟患者的适当呼吸运动和针头偏转^[11]。KOYOTO KAGAKU公司研究并销售各种应用于超声、放疗、乳腺、X线、CT、核磁共振等领域不同型号的商用仿真体模^[12-14]。如型号为PH-4的用于X线和CT成像的CTU41仿真躯干体模,由聚氨酯树脂构成软组织和器官,由环氧树脂构成骨骼,包含了人造骨骼、脑室、眼球、肺血管、心脏、气管、肺、肾、胆囊、胰腺、脾脏、输尿管、膀胱、前列腺、直肠、乙状结肠等模拟器官,甚至能够显示气管的全部分支、肺血管的4级分支以及肝门静脉,是一个能够用于CT螺旋扫描、包含完整躯干解剖结构的“一体化”仿真模型。每一个器官都有特定的原始CT值,与临床中人体吸收辐射剂量近似,能够得到仿真度极高“人体”CT图像,是目前临床应用最广泛的辐照仿真人体模型之一。

近年来,随着3D打印技术的快速发展,物理实体

仿真体模的应用更加广泛^[15-16]。打印仿真体模最大的挑战是图像噪声,如果体模中噪声较大将大大降低体模的可用性,因此必须找到残余噪声含量与细节结构之间的平衡。美国食品与药品管理局曾为评估乳腺DBT成像系统对微钙化的检测性能,用羊皮纸和碘掺杂墨水,通过3D打印而创建逼真乳房体模,通过6个月的多次试验,模体的再现性和稳定性极强,实现了对FFDM、DBT、SM 3种成像方法的对比评估^[17]。物理模型的设计在过去几年中已经发展到用电磁设备验证真实患者和环境的模拟,以便最小化物理实验建模中的误差^[18]。

2.3 二者结合的物理数学模型

将物理实体模型和数字化虚拟模型相结合的“物理数学模型”具有形态参数、遗传参数、组织等效参数、结构功能参数,是一种对外界有反应特性的信息化、数字化、智能化的“仿生假人”,体现出虚拟人体模型和仿真人体模型的结合和发展趋势。虚拟人体模型是通过图像的虚拟重建获得可视化的生理解剖信息,而仿真人体模型是描述治疗过程的物理模型,具有视觉真实性、可触摸性、可试验性^[19]。因此,将实物物理模型、计算机图形仿真和数字化仿真三者结合后,仿真人体模型的真实性和可测试性正好弥补了虚拟人体模型的不足(虚拟性、不可测试性),其置信度达到95%,能为临床所接受并进入实用阶段^[20]。

3 仿真体模临床应用

3.1 确定CT扫描方式及最佳扫描方案

临床为提高影像质量并满足日益增多的工作量,需要针对不同的扫描部位制定出最佳的CT扫描方案。仿真体模高度拟人化并且可重复使用,可作为患者的“替身”进行扫描方式、最佳扫描方案的测试^[21]。Kadesjö等^[22]使用二维检查(全景和根尖片)和锥形束计算机断层扫描(CBCT),比较儿童受检阻生犬齿的辐射剂量,所使用的就是拟人化的10岁儿童模型。2016年,日本学者Shohji等^[23]依照2014年影像学指南腹部扫描协议,对与日本人体型相似的仿真体模进行扫描,分析CTDIvol(容积剂量指数)-CT值曲线,通过分析腹部图像质量,制定出适合日本人的腹部扫描协议。临床CT技师以此为基础对患者进行检查,不但图像质量好,也能切实降低患者所接受的辐射剂量。美国学者Cannella等^[24]为探讨单源双能量CT预测非尿酸结石分类的准确性,将经皮肾镜取石术后回收的结石置于拟人全身体模中,分别使用40、70、140 keV扫描,用红外光谱法测定结石成分,验证了单源双能量CT对分析结石成分的独特价值。

3.2 患者剂量优化

随着CT技术的不断发展,临床X线影像检查频率和总辐射剂量都有较大增加。美国医学会统计显示1980年全美CT检查人数为360万,到1998年增至3300万。在英国CT检查人次仅为总人数的4%,但辐射剂量却占到受检者总辐射剂量的40%。我国CT设备绝对数量已达世界第3,较高的辐射剂量可能产生确定效应(组织反应),并增加随机效应发生的概率。CT医疗辐射已成为重要公共卫生领域关注的话题。近年来世界范围内,提倡在保证诊断前提下尽量降低辐射剂量。仿真人体模型模拟了正常人体形态及解剖,包括腰腹部的脊椎弧度,组织和皮肤的厚度、位置等,所以CT辐射对体模的影响更加接近真实人体情况。应用仿真体模,避免了在系统校验以及模拟实验过程中给患者带来的辐射效应,可以准确、有效地实现剂量优化^[25]。Elter等^[26]在磁共振引导放射治疗研究中开发了一种可反复调节的仿真体模,在磁共振和CT扫描中使用拟人化对比材料填充,在三维剂量测量中则使用聚合物剂量测定凝胶填充。可在该模型中设置模拟患者体内部分解剖变异,包括代表肿瘤和周围危险器官的2个PG结构和另外5个结构。随后进行辐射实验,得到相应的剂量检测结果。美国得克萨斯大学Matveev^[27]构建了另一种组织剂量等效、CT和磁共振均可用的、可运动的拟人化胸部体模模拟肺癌患者,动态模型的外壳由可充水丙烯酸构成,包含几个胸部区域内辐射敏感器官,肿瘤结构由液体聚氯乙烯塑料制成,周围肺组织由凡士林和微型泡沫聚苯乙烯球的混合物组成。

3.3 设备评价及质量控制

CT ACR 46TM体模实现了对物理能量传递的仿生,由空气、水、骨骼以及丙烯酸和聚乙烯材料构成,内含有多种模块,其中一种模块通过设置不同尺寸且与背景材料仅相差6 HU的结节实现低对比度研究,其优势在于仅用单一体模就能够实现多种参数的测试,如空间分辨率、CT值准确度、层厚、图像均一性、噪声等,在CT日常质量评价(Quality Assessment)中不可或缺,可用于放射科日常设备评价和设备维修^[28]。

2014年,塞奎拉和玛雅制作了两个拟人化的甲状腺模型,分别为OSCT和OSAP。OSCT是一个模拟人体甲状腺、由聚甲基丙烯酸甲酯制作而成的模型。OSAP使用聚合丙烯酸树脂作为等效材料,模拟人体颈部和甲状腺的形状,包括气管、食管和颈椎。两个模型的大小和形状对照50岁妇女甲状腺制作,均含有可分离的甲状腺功能亢进、甲状腺功能减退以及正常甲状腺模块。此甲状腺拟人模型可用作

SPECT和 γ 相机的设备校准和图像质量控制^[1]。美国Genetech公司使用胸部肿瘤模型评估了7台PET扫描仪,该模型具有9个直径7~20 mm的球形病变模块,评估了设备的图像重建、病变检测和恢复系数,其中两台设备不符合质控标准,确定了其他5台扫描仪能充分检出病变并且有可靠可量化的重建算法^[29]。也有学者使用具有不规则形状和不均匀放射示踪剂摄取的合成损伤的拟人模型,用于评价使用不同体积分割方法和重建设置对放射特征的再现性和稳定性的影响^[30]。

3.4 血管成像及对比剂注射方案研究

随着仿真体模技术的发展,已不仅应用于CT平扫,在CT增强甚至是血管成像中也初现优势。近年来CTA仿真体模在血管成像领域得到广泛应用,利用在CTA仿真体模内注射碘对比剂,模拟血管成像过程,并调整对比剂注射方案(如更改对比剂注射速率、对比剂注射用量或使用双流注射方案等),最终依据血管成像质量确定最佳的对比剂注射方案。这样的实验研究规避了人体发生对比剂过敏反应的风险,能够测试出最佳的对比剂注射方案。

4 小结

仿真体模在医院设备评价、CT检查质量控制和剂量管理中应用最为广泛,对日常工作、科学研究、提高图像质量都是不可或缺的,有效避免了对患者的辐射损害^[31]。但仿真体模也有其局限性:首先,对于肿瘤及动态血管成像还存在困难,不能够实现对肿瘤血供的动态显示;其次体模无法模拟人体脉搏和呼吸情况;而且体模价格昂贵,不能够实现在放射影像领域的全面应用。随着研制仿真体模的材料和技术日趋完善,仿真体模将受到更多的认识 and 关注。

【参考文献】

- [1] AMIN N A, ABUALROOS N J, ZAINON R. Fabrication of anthropomorphic thyroid-neck phantom for dosimetry study in nuclear medicine [J]. Radiat Phys Chem, 2019. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.108462.
- [2] YOON S, HENRY R W, BOULEY D M, et al. Characterization of a novel anthropomorphic plastinated lung phantom [J]. Med Phys, 2008, 35(12): 5934-5943.
- [3] MOLINEU A, HERNANDEZ N, NGUYEN T, et al. Credentialing results from IMRT irradiations of an anthropomorphic head and neck phantom [J]. Med Phys, 2013, 40(2): 022101.
- [4] 张春红, 林大全. 探析我国仿真人体模型中的仿生技术 [J]. 机械, 2009, 36(1): 1-3.
ZHANG C H, LIN D Q. Analysis of biomimetic technology in human simulation model in China [J]. Machinery, 2009, 36(1): 1-3.
- [5] PELICANO A C, CONCEIÇÃO R C. Development of a 3D anthropomorphic phantom generator for microwave imaging applications of the head and neck region [J]. Sensors, 2020, 20(7): 2029.
- [6] 皮一飞. 数字化人体模型开发及其在CT图像自动分割中的应用 [D].

- 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- PI Y F. Development of digital human model and its application in automatic segmentation of CT images [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [7] GIACOMETTI V, GUATELLI S, BAZALOVA-CARTER M, et al. Development of a high resolution voxelised head phantom for medical physics applications[J]. *Phys Med*, 2017, 33: 182-188.
- [8] 李彩霞, 林大全, 王远萍. 数字化的虚拟人体和仿真人体模型的发展及医学应用[J]. *中国医学影像技术*, 2005, 21(11): 1764-1766.
- LI C X, LIN D Q, WANG Y P. Development and medical application of digital virtual human body and simulated human body model[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2005, 21(11): 1764-1766.
- [9] IRNSTORFER N, UNGER E, HOJREH A, et al. An anthropomorphic phantom representing a prematurely born neonate for digital X-ray imaging using 3D printing: proof of concept and comparison of image quality from different systems[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 14357.
- [10] BAKIC P R, ZHANG C, MAIDMENT A D, et al. Development and characterization of an anthropomorphic breast software phantom based upon region-growing algorithm[J]. *Med Phys*, 2011, 38(6 Part 1): 3165-3176.
- [11] DE JONG T L, MOELKER A, DANKELMAN J, et al. Designing and validating a PVA liver phantom with respiratory motion for needle-based interventions[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2019, 14(12): 2177-2186.
- [12] KOIVISTO J H, WOLFF J E, KILJUNEN T, et al. Characterization of MOSFET dosimeters for low-dose measurements in maxillofacial anthropomorphic phantoms[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(4): 266-278.
- [13] RADOJCIC D S, RAJLIC D, CASAR B, et al. Evaluation of two-dimensional dose distributions for pre-treatment patient-specific IMRT dosimetry[J]. *Radiol Oncol*, 2018, 52(3): 346-352.
- [14] STEINMANN A, STAFFORD R J, SAWAKUCHI G, et al. Developing and characterizing MR/CT-visible materials used in QA phantoms for MRgRT systems[J]. *Med Phys*, 2018, 45(2): 773-782.
- [15] CARTON A K, BAKIC P, ULLBERG C, et al. Development of a physical 3D anthropomorphic breast phantom[J]. *Med Phys*, 2011, 38(2): 891-896.
- [16] ABDULLAH K A, MCENTEE M F, REED W, et al. Development of an organ-specific insert phantom generated using a 3D printer for investigations of cardiac computed tomography protocols[J]. *J Med Radiat Sci*, 2018, 65(3): 175-183.
- [17] IKEJIMBA L C, SALAD J, GRAFF C G, et al. A four-alternative forced choice (4AFC) methodology for evaluating microcalcification detection in clinical full-field digital mammography (FFDM) and digital breast tomosynthesis (DBT) systems using an inkjet-printed anthropomorphic phantom[J]. *Med Phys*, 2019, 46(9): 3883-3892.
- [18] WOOD S, KRISHNAMURTHY N, SANTINI T, et al. Design and fabrication of a realistic anthropomorphic heterogeneous head phantom for MR purposes[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0138168.
- [19] IQBAL K, GIFFORD K A, IBBOTT G, et al. Comparison of an anthropomorphic PRESAGE[®] dosimeter and radiochromic film with a commercial radiation treatment planning system for breast IMRT: a feasibility study[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2014, 15(1): 363-374.
- [20] KUZMIN G A, MILLE M M, JUNG J W, et al. A novel method to extend a partial-body CT for the reconstruction of dose to organs beyond the scan range[J]. *Radiat Res*, 2018, 189(6): 618-626.
- [21] HAMILTON D G, MCKENZIE D P, PERKINS A E. Comparison between electromagnetic transponders and radiographic imaging for prostate localization: a pelvic phantom study with rotations and translations[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2017, 18(5): 43-53.
- [22] KADESJÖ N, LYNDS R, NILSSON M, et al. Radiation dose from X-ray examinations of impacted canines: cone beam CT vs two-dimensional imaging [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2018, 47(3): 20170305.
- [23] SHOHI T, KATO Y, YANANO N, et al. Analysis of image quality of abdominal CT protocol with the use of body phantom adapted to the Japanese size[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2016, 207(1): 183-189.
- [24] CANNELLA R, SHAHAIT M, FURLAN A, et al. Efficacy of single-source rapid kV-switching dual-energy CT for characterization of non-uric acid renal stones: a prospective *ex vivo* study using anthropomorphic phantom[J]. *Abdom Radiol*, 2019, 45(4): 1092-1099.
- [25] HIDALGO A, DAVIES J, HORNER K, et al. Effectiveness of thyroid gland shielding in dental CBCT using a paediatric anthropomorphic phantom[J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2015, 44(3): 20140285.
- [26] ELTER A, DORSCH S, MANN P, et al. End-to-end test of an online adaptive treatment procedure in MR-guided radiotherapy using a phantom with anthropomorphic structures[J]. *Phys Med Biol*, 2019, 64(22): 225003.
- [27] MATVEEV V I. A theory of inelastic collisions of atoms with multiply charged ions[J]. *J Phys B Atom Mol Optical Phys*, 1991, 24(16): 3589-3597.
- [28] XIE X, ZHAO Y, SNIJDER R A, et al. Sensitivity and accuracy of volumetry of pulmonary nodules on low-dose 16- and 64-row multi-detector CT: an anthropomorphic phantom study[J]. *Eur Radiol*, 2012, 23(1): 139-147.
- [29] CHRISTIAN P E, WILLIAMS S P, BURRELL L, et al. Optimization of ⁸⁹Zr PET imaging for improved multisite quantification and lesion detection using an anthropomorphic phantom[J]. *J Nucl Med Technol*, 2020, 48(1): 54-57.
- [30] GALLIVANONE F, INTERLENGHI M, D'AMBROSIO D, et al. Parameters influencing PET imaging features: a phantom study with irregular and heterogeneous synthetic lesions[J]. *Contrast Media Molecular Imaging*, 2018, 2018: 5324517. DOI: 10.1155/2018/5324517.
- [31] 林大全, 王远萍, 王鹏. 发展仿真人体模型技术, 保障人类的健康与安全-仿真人体模型过去, 现在与未来[C]//2007中国科协年会. 武汉: 2007.
- LIN D Q, WANG Y K, WANG P. Development of human simulation technology to ensure human health and safety: the past, present and future of human simulation[C]//2007 China Association for Science and Technology Annual Conference. Wuhan: 2007.

(编辑: 黄开颜)