

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2016.12.010

专题:数字诊疗装备研发

高精度低剂量乳腺专用CT成像技术

欧树同,朱磊

中国科学技术大学物理学院,安徽 合肥 230026

【摘要】早期检测与诊断是目前乳腺癌控制的最有效方法。本文主要介绍目前已获得科技部资助的重点研发专项项目:新一代乳腺专用CT系统的研发。与现有系统相比,新型的双能CT成像能更好地区分乳腺材料构成,提高检测与诊断准确度,其中单扫描双能CT成像方法更是革命性的技术突破。本文所提出的乳腺专用CT系统不仅在成像精度上有突破性提高,所需超低辐射剂量能更好地保护患者健康,而且该系统是针对国内市场的直立式结构而设计的,临床推广更为方便。

【关键词】乳腺癌;计算机断层成像;双能成像;乳腺成像

【中图分类号】R319

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)12-1229-04

New-generation breast CT system with high precision and low dose

OU Shutong, ZHU Lei

School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Early detection and diagnosis is the most effective method for the controlling of breast cancer. This paper introduces a research project funded by the Ministry of Science and Technology on the development of a new-generation breast CT system. Compared with the existing systems, the dual-energy CT imaging can better distinguish the composition of breast materials, and improve the detection and diagnostic accuracy. The single-scan dual-energy CT imaging method is a revolutionary technological breakthrough. The proposed system significantly improves the imaging accuracy of breast CT with ultra-low dose to better protect the patients. And the system is designed based on the vertical structure to better suit the clinical need.

Keywords: breast cancer; CT; dual-energy imaging; breast imaging

前言

乳腺癌是女性发病率最高的癌症。美国癌症协会调查报告显示2011年新诊断为乳腺癌患者共有28.8万人,在我国因乳腺癌死亡的患者接近4万人,虽然当前我国的乳腺癌发病率小于世界平均水平,但随着诊断水平的提高,我国乳腺癌发病率的增速为全球的两倍多。目前对晚期乳腺癌缺乏有效治疗手段(一期乳腺癌治疗生存率约为95%,三期即降为

25%),因此乳腺癌早期筛查与诊断已成为乳腺癌控制的最主要方法。

在西方发达国家,乳腺X光筛查是乳腺癌早期检测主流临床方法。虽然基于乳腺X光的乳腺癌筛查、诊断与治疗能有效降低乳腺癌死亡率,其缺点也非常明显。首先,病人舒适度不够理想;其次,成像质量不足以满足临床需要。由于乳腺X光是对三维物体投影取得二维图像,并不能获得在投影方向上物体景深信息,所以会造成各种软组织在所得图像中叠加。研究显示,无论是否使用碘造影剂,乳房专用CT成像均能有效监测乳房软组织异常区域,将乳房专用CT广泛应用于乳房癌早期检测与诊断已成为大势所趋。

中国科学技术大学物理学院医学物理课题组“直立式乳腺X光CT成像系统”研发项目获2016年

【收稿日期】2016-11-08

【基金项目】国家重点研发计划(2016YFC0101400)

【作者简介】欧树同,男,硕士,研究方向:企业管理,管理信息化,E-mail: ost_007@126.com

【通信作者】朱磊,男,博士,教授,研究方向:CT成像,肿瘤图像引导放射治疗,放射治疗的逆向治疗计划,肿瘤实时跟踪和荧光显微成像技术等,E-mail: leizhusg@ustc.edu.cn

科技部重点研发计划专项支持。该系统能把现有CT仪的辐射伤害降低一个数量级以上,实现“彩色”CT成像功能,数秒内完成三维图像构建,成功区分低至100 μm 的钙化物质与致密乳腺组织,将乳腺检测与诊断技术提升到国际领先的一个崭新高度,在我国预防乳腺癌的探索道路上迈出极为重要的一步。

1 现状介绍

我国乳腺癌防治工作面临着严峻的现实挑战。像北京这样的发达地区,仅有5.2%新发乳腺癌病例是通过定期筛查发现,与实现《中国癌症防治三年行动计划(2015~2017年)》要求乳腺癌早诊率达到50%的目标有天壤之别,究其原因主要是我国现有乳腺筛查与诊断技术的空间分辨率、噪声比、辐射剂量等主要参数存在重大缺陷,且病人筛查时的痛感与长时间等待等原因,在客观上也阻碍了病人参与筛查的主动性。

同期西方国家如美国通过筛查发现乳腺癌的比例却高达60%。这主要是因为,通过数十年的临床实践后,国际主流医学逐渐选择乳腺专用CT技术用于乳房癌早期检测与诊断。一些著名研究单位如加州大学戴维斯分校、安德森肿瘤中心等,乳腺专用CT技术上的研究体量丰富,在硬件参数与几何结构优化、低剂量高精度成像、数据矫正以及临床应用检测等领域代表着世界先进水平。

2 研究目标

本项目将研发乳腺专用CT系统,在系统设计、成像质量、辐射剂量、以及临床应用等全方面发展,与国际接轨,实现全球领先的乳腺CT成像效果。此外,课题组将自主创新,在成像信息以及系统小型化方面实现技术突破。目前CT成像的一个劣势是图像信息不够丰富,不同材料在同一幅CT图中可能有着相同的图像值。本项目提出了采用多能CT成像用于乳腺检测,能成功区分小至100 μm 的钙化物质与致密乳腺组织,如同黑白电视到彩色电视的跨越,这项国际最新技术将突破传统CT成像的局限,可以在传统黑白CT图像上将乳腺癌作彩色标记,极大提高乳腺检测的精度。目前国际上最先进的具有多能成像功能的CT系统(包括通用电气、西门子、飞利浦等公司产品)均通过对X光管或者探测器的改进实现多能CT成像,造价昂贵,且对外实行技术封锁。课题组发明了一种仅需在CT系统添置一块滤波板即能实现高精度多能CT成像的新方法,并获得多项专

利。这项CT成像领域革命性新技术已获得国际同行专家认可并逐渐推广。本项目将采用此技术,开发出全球第一台具有多能成像功能的乳腺专用CT系统。此外,系统采用小型化直立设计,具有成像时间短、操作简便的特点,是专门针对我国国情的个性化设计,能够充分满足国内市场需求。

3 研究技术与方法

图1总结了本项目拟解决的主要问题以及相应方法。除去采用常规硬化矫正,本项目拟用新型散射矫正实现高精度成像。为了避免现有方法中需要额外剂量或者计算时间长的缺点,本项目拟选用基于散射库函数^[1]或者源调制法^[2-4]的散射矫正。其中,库函数法用蒙特卡洛仿真预计算不同形状乳房造成的散射信号用于实际数据矫正,单组CT数据矫正时间不超过30 s。源调制法在X光源与物体间加入源调制板,依据源信号与散射信号的不同响应进行区分与矫正。

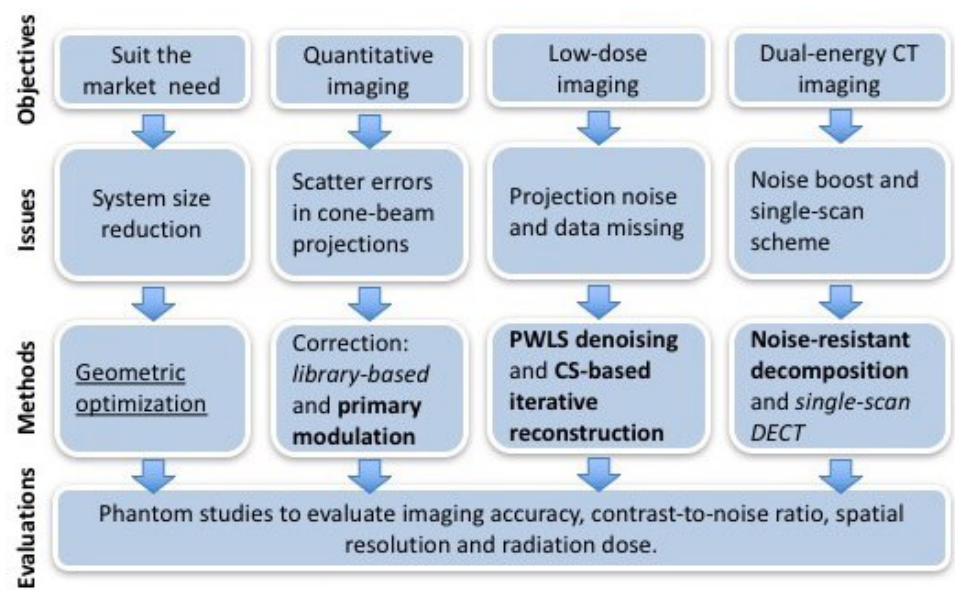
为实现低剂量成像,将用惩罚加权最小二乘法获得统计最优数据估计,抑制投影噪声^[5],并用加速压缩感知算法^[6-7]精确重建稀疏数据^[8-9]。针对迭代CT重建计算时间长的缺点,将采用快速算法提高收敛速度、减少每步迭代计算时间,并用显卡硬件加速^[9]。

双能CT成像的主要困难是材料分解对噪声极其敏感,可降低图像信噪比高达数十倍^[10-11],为此本项目拟采用融合迭代重建与材料分解的优化算法^[12]或者基于熵最小化的最新抗噪声算法^[13-14]。为了减少数据采集降低扫描时间,本项目突破性提出拓展原用于散射矫正的源调制法,根据不同投影线的不同X光能谱,将投影数据根据不同能谱分离后,分别使用迭代重建算法进行稀疏数据重建,实现单扫描双能CT成像。

系统小型化通过几何优化与直立式系统设计实现。现有乳腺专用CT扫描旋转半径较大,根本原因是为了减少散射信号,因而物体与探测器之间不宜过近^[15]。本项目通过高效散射矫正,使得系统小型化成为可能。传统俯卧式系统利用重力作用,在取像时让乳房自然下垂,易于成像。直立式系统成像原理一致,区别仅在于乳房由于重力作用下垂对成像的影响,本项目拟采用乳房托架解决这一问题,该解决方案已在文献[16]中详细论证其可行性。

4 预期收益

自20世纪90年代以来,中国的乳腺癌发病率增



Our published methods are shown in bold, and on-going researches are shown in italic, and underlines indicate the validation studies that have been completed by other research groups.

图 1 针对各项目目标项目拟解决问题以及采用方法

Fig.1 Summary of major goals of the project, related issues to be solved, methods and evaluation studies

长速度是全球的两倍多,城市地区尤为显著。目前,乳腺癌是中国女性发病率最高的癌症,癌症死亡原因位居第六。截至2008年,中国总计169 452例新发浸润性乳腺癌,44 908例死于乳腺癌,分别占全世界的12.2%和9.6%。如果这一趋势保持不变,2021年,中国乳腺癌患者将高达250万人,发病率将从不到60例/10万女性(年龄为55~69岁)增加到超过100例/10万女性。然而,我国乳腺癌防治投入严重不足,平均每例新发乳腺癌患者的治疗总费用为1 216美元,在172个国家中排名第103位。

本项目开发的乳腺专用CT系统成像精度高、所需剂量低,不仅性能位居世界前列,而且具有适合中国市场的小型化特点。长远来看,此项目能促进乳腺筛查与早期诊断的推广,从而大幅提高乳腺癌的治疗效果,同时能在医疗器械市场相对饱和的情况下,开辟具有广泛前景的新领域,因而有着巨大的潜在社会、经济效益。

5 结 语

本项目涉及的核心技术均通过前期验证证明其可行性,不仅有国际主流期刊文章发表,而且其中若干技术已开始临床测试,因此已经把潜在的技术风险最小化。课题组将于2018年完成新一代乳腺专用CT系统原型机的设计、组装与调试。该系统硬件部分包括乳腺CT扫描仪以及数据采集与控制平台。系统软件部分全部自主设计,包括投影数据降噪模

块、CT解析重建模块、迭代重建模块、显卡加速模块、多能CT成像、材料分解模块以及图像三维显示模块等,各模块整合入统一的用户友好图形用户界面,即便对CT成像理论零基础的用户也能完成流程化成像操作。

【参考文献】

[1]

SHI L, VEDANTHAM S, KARELLAS A, et al. Library based X-ray scatter correction for dedicated cone beam breast CT[J]. Med Phys, 2016, 43(8): 4529.

[2]

ZHU L. Local filtration based scatter correction for cone-beam CT using primary modulation[J]. Med Phys, 2016, 43(9): 6199.

[3]

GAO H, FAHRIG R, BENNETT N R, et al. Scatter correction method for X-ray CT using primary modulation: phantom studies [J]. Med Phys, 2016, 37(2): 934-946.

[4]

ZHU L, BENNETT N R, FAHRIG R. Scatter correction method for X-ray CT using primary modulation: theory and preliminary results[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2007, 25(12): 1573-1587.

[5]

ZHU L, WANG J, XING L. Noise suppression in scatter correction for cone-beam CT[J]. Med Phys, 2009, 36(3): 741-752.

[6]

ZHU L, XING L. Search for IMRT inverse plans with piecewise constant fluence maps using compressed sensing techniques [J]. Med Phys, 2009, 36(5): 1895-1905.

[7]

ZHU L, ZHANG W, ELNATAN D, et al. Faster STORM using compressed sensing[J]. Nat Methods, 2012, 9(7): 721-723.

[8]

NIU T, YE X, FRUHAUF Q, et al. Accelerated barrier optimization compressed sensing (ABOCS) for CT reconstruction with improved convergence [J]. Phys Med Biol, 2014, 59(7): 1801-1814.

[9]

NIU T, ZHU L. Accelerated barrier optimization compressed sensing (ABOCS) reconstruction for cone-beam CT: phantom studies [J]. Med Phys, 2012, 39(7): 3892-3893.

- [10] NIU T, DONG X, PETRONGOLO M, et al. Iterative image-domain decomposition for dual-energy CT [J]. Med Phys, 2014, 41(4): 041901.
- [11] PETRONGOLO M, DONG X, ZHU L. A general framework of noise suppression in material decomposition for dual-energy CT [J]. Med Phys, 2015, 42(8): 4848-4862.
- [12] DONG X, NIU T, ZHU L. Combined iterative reconstruction and image-domain decomposition for dual energy CT using total-variation regularization [J]. Med Phys, 2014, 41(5): 051909.
- [13] PETRONGOLO M, ZHU L. Erratum to "Noise suppression for dual-energy CT through entropy minimization" [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2015, 34(12): 2646.
- [14] PETRONGOLO M, ZHU L. Noise suppression for dual-energy CT through entropy minimization [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2015, 34(9): 2286-2297.
- [15] BOOTSMA G J, VERHAEGEN F, JAFFRAY D A. The effects of compensator and imaging geometry on the distribution of X-ray scatter in CBCT [J]. Med Phys, 2011, 38(2): 897-914.
- [16] VEDANTHAM S, KARELLAS A, EMMONS M M, et al. Dedicated breast CT: geometric design considerations to maximize posterior breast coverage [J]. Phys Med Biol, 2013, 58(6): 4099-4118.
- (编辑:谭斯允)



朱磊 2002年本科毕业于清华大学,并于2004、2007年分获美国斯坦福大学硕士、博士学位,毕业后在斯坦福大学医学院担任副研究员,2009年起为美国佐治亚理工大学医学物理系助理教授,于2015年获得终身教职(Tenure)并升任副教授,担任放射科学与工程实验室主任和医学成像与肿瘤放疗实验室主任。2015年入选中组部“青年千人计划”。朱磊博士目前共发表同行评审文章44篇,他引数1 000余次,会议记录22篇,国际会议报告94次,主持编写期刊学术专刊1次,学术专著2章节,获得美国专利6项,国际科研奖10余项,科研领域包括高精度以及低剂量CT成像、肿瘤图像引导放射治疗、放射治疗的逆向治疗计划、治疗中的肿瘤实时跟踪和荧光显微成像技术等。