

Medical imaging physics and technologies

BAO Shang-lian, ZHANG Huai-ling

(The Research Center for Tumor Diagnosis and Therapical Physics and Lab of Medical Physics and Engineering,
Peking University, Beijing 100871, China)

[Abstract] The physics and technologies (P&T) of medical imaging is one of the main branches of medical physics, which deal with the problems on physics, algorisms, as well as the designs of imaging facilities both for hardware and software in medicine. The information on medical imaging could be used to make the therapeutical plan, monitoring the treatment processing, and verification of the plan via reconstruction of the data during therapy. Therefore, medical imaging is not only used for diagnosis, but also for therapy, as well as for basic research and education. The frontal of medical imaging is functional imaging, which is used for physiological and psychological imaging for human subject. But all physiological and psychological information of human subjects is related with biological molecules and genetic expression in vivo, which is the frontal of medical imaging physics. That means molecular and anti-nucleic acid imaging will be the most important direction of medical imaging. Use of modern technology has speeded up the change of medical organization reformation process.

[Key words] Medical imaging; Imaging physics; Critical technologies

医学影像物理和技术

包尚联, 张怀岭

(北京大学肿瘤物理诊疗技术研究中心暨医学物理和工程北京市重点实验室, 北京 100871)

[摘要] 医学影像物理和技术是医学物理学的重要分支, 重点解决成像、图像处理与分析以及医学图像在临床应用中的物理问题、算法和软硬件设计。治疗中的医学影像可以用于制定治疗计划、在治疗过程实施影像监督, 以及通过对治疗监督时采集的数据的图像重建实现对治疗计划的验证。广泛用于疾病诊断、治疗、教学和科研的医学影像是人体信息的载体。当前医学影像的世界前沿是功能成像, 主要内容是对人的生理和心理功能的成像。无论生理还是心理成像, 都和人体内的生物大分子合成及其行为特征以及基因的表达有关, 所以, 对人体内生物大分子和基因反义核酸水平上的动态成像是整个成像领域研究的前沿。这些成像方法和技术的发展以及在医疗机构中的广泛使用, 将引起医学领域新的革命并促进医疗机构的重大改革。

[关键词] 医学成像; 成像物理; 关键技术

[中图分类号] R445; R312; R-1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2004)01-0118-04

1 引言

医学影像物理和技术是医学物理学的重要分支^[1]。人体成像包括对健康人的成像和对病人的成像, 前者主要用于科学研究和教学, 后者主要用于医学临床的诊断和治疗。这里所指的医学影像物理研究的对象包括对健康人和病人的成像、对成像数据处理与分析, 以及应用在内。

传统的医学影像科室称为放射医学(radiology), 当时, 主要指 X 射线的成像并用于诊断。最近几十年来, 非电离辐射

的成像, 例如核磁共振成像和超声成像的广泛使用, 已经使得 radiology 成为一个过时的名词, 而形成现在的医学影像 (medical imaging)。而随着科学的不断进步, 用于诊断和治疗的医学影像已经成为人体信息的重要组成部分, 对医学影像信息的仓储、通讯传输、安全和综合分析已经成为新的学科内容, 医学影像开始归入到医学信息学的范畴 (medical informatics), 而且成为医学信息学的主要内容。现在的问题是, 目前已经广泛使用的成像工具主要是 X 射线成像、 γ 射线成像, 磁共振成像 (MRI) 和超声成像 (UI) 四种模态, 按照物质波和人体组织的不同作用机制, 每种模态只能获取人体的一部分信息, 而局部的信息还不足于得到准确的诊断结论, 也不能完全解决治疗过程的可视化监督过程。这就存在两个新的学科发展方向: 多种模态影像信息之间的配准、融合和综合分析, 以及新的成像模态的研究和发展。

所以, 医学影像物理和技术学科主要研究和发展新的成

[基金项目] 本文得到国家自然科学基金 (10275003、10175004) 和北京市自然科学基金重点项目 (3011002) 的资助。

[作者简介] 包尚联 (1945—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师。研究方向: 医学物理, 包括医学影像物理和放疗物理的研究和教学。

E-mail: bao@pku.edu.cn

[收稿日期] 2003-12-25

像模态,研究如何更有效地采集人体正常的和病理的信息并广泛应用于医学临床诊疗和基础医学的教学和科研。目前,我国医学影像物理还没有形成学科,教育部的学科目录上还没有医学物理学科,更没有医学影像物理学科。物理学和医学的结合在医疗机构内还没有形成相应的制度,各种零星地加入医疗结构的物理和工程技术人员由于得不到重视很快离开。但是,无论是诊断还是治疗都非常需要懂得医学的物理工作者形成一种对病人共同负责的机制——建立适合中国国情的医学物理师制度。

从医学影像物理学的要解决的问题来看,目前最迫切是要研究和解决与疾病无创伤诊断和放疗有关的影像学问题,处理与分析医学图像在临床应用有关的物理问题、算法,设计各种新的软硬件满足临床的需要是当前最迫切的问题。所以,医学影像物理和技术学科的发展对提高医学影像的临床诊断水平、为治疗提供更多更准确的信息、为人体科学的基础研究和医疗设备的开发都具有重要意义。治疗中的医学影像可以用于制定治疗计划、对治疗过程实施影像监督,以及通过对治疗过程采集数据的图像重建实施对治疗计划的验证。所以医学影像不仅用于疾病诊断,而且用于治疗,还用于与人体有关的教学和科研工作。

当前医学影像物理和技术学科的发展前沿是功能成像,主要内容是对人的生理和心理功能的成像。生理成像又称为参数成像,是生理参数在体内的分布,这种分布不能通过对采集数据的直接重建得到,必须通过分析和计算才能得到。对心理成像的情况更为复杂,因为涉及到对实验的精确设计,对成像设备的设定以及对被试的控制。但是,对心理成像的临床应用,例如通过心理成像实现对精神性疾病的诊疗是 21 世纪医学影像发展的重要内容。无论生理还是心理成像,都和人体内的生物大分子的合成、它们的行为特征以及与基因表达关系密切。所以,对人体内生物大分子和基因反义核酸水平上的动态成像是整个成像领域研究中科学界最受重视的科学问题。这些成像方法和技术的发展以及在医疗机构中的广泛应用,将引起医学领域新的革命并促进医疗机构的重大改革。

2 对目前各种医学成像模态现状的分析

按照成像时使用物质波的不同,我们把医学影像分成不同的成像模态,目前在临床广泛使用的是四种成像模态。

2.1 X 射线成像 X 射线成像模态分为平面 X 射线成像和断层成像(X-CT)。X 射线成像自从 100 多年前 Roentgen 发现 X 射线的同时,首先在人体成像及医学中得到了广泛应用成为医学影像物理发展史上的里程碑。利用人体不同器官和组织对 X 射线的吸收可以用组织密度进行表征的概念之后,平面 X 射线透视、了 X 射线照相术,为人体骨骼和内脏器官的疾病或损伤进行诊断和定位,同时也把胶片带进了医学成像的领域,使之成为 100 多年来图像显示和信息存贮的工具。随着 X 射线显像增强技术的发明和发展,X 射线的血管造影术和其他脏器的专用 X 线机相继诞生,扩大了 X 线成像的应用范围,例如,在血管造影技术中,有创的 X 射线的血管造影仍然是所有其他方法的金标准。数字化的 X 线机技术的出

现是对传统的 X 线机和胶片作为探测器的否定,是为了方向,主要产品包括直接数字化的 X 线机(DR)、通过荧光转化并用 CCD 成像的 X 线机和用图像板的 X 线机(CR)两类三种产品。全世界的方向是 DR,但是 DR 目前的空间分辨率和探测器的稳定性还不能完全满足临床的需要,其价格也令大多数用户无法承受。

X 射线断层成像(X-CT)发明于 20 世纪 70 年代,是传统影像技术中最为成熟的成像模式之一,其速度已经快到可以对心脏实现动态成像,加上显像增强剂的 X-CT 成像,也可以用于对血管病变及其血脑屏障是否被病灶破坏进行检查,属于功能成像的范畴。但是,医生应该在病人接收剂量和片厚之间进行折衷选择,空间分辨率和对比度的进一步提高也受到了很多制约。而多模态集成的成像装置 PET/CT、MRI/CT、电子直线加速器/CT 等相继问世,为用户提供了更多的选择和可能性。在软硬件水平上的多模态医学影像信息的整合集成是今后这个行业发展的方向之一。我们认为在软件水平上的集成实际上比硬件的集成更具有灵活性,在中国不一定采用硬件集成的技术发展路线。各种专业化的 CT 技术血管造影、骨密度测量等方面也开辟了新的用途。真实意义上的三维空间 X 射线断层成像(volume CT)的实验室样机已经问世,图像的空间分辨率已经达到 0.1 mm 的水平。

2.2 核磁共振成像(MRI) 核磁共振成像(MRI)集中体现了各种高新技术在医学成像设备中的应用,发展于 20 世纪 70 年代。由于这种成像设备具有在任意方向上的多切片成像、多参数和多核素成像、整个空间的真三维数据采集、结构和功能成像以及没有放射性等优点,MRI 受到世人的广泛重视,不断在扩展新的用途,其技术尚在迅速发展过程中。

目前各种各样的 MRI 设备产品都已经大量地进入市场,其中包括高场超导系统、低场开放系统和快速成像系统。在技术上,多线圈并行

采集已经成为当前技术的重要发展方向之一,而气体成像(^3He 、 ^{129}Xe)已经成为肺部显像的商业选件。目前 MRI 的功能成像(fMRI)是 MRI 设备应用的前沿领域,主要应用包括人脑认知功能成像,用于揭示大脑工具机制的认知心理实验测量;目前已经开始把功能成像的技术广泛应用于大脑功能性疾病的诊断,并为肿瘤等占位性病变提供功能信息,从而更为准确地判断肿瘤发展的阶段、弥散的程度并在治疗过程中作为保护人脑正常功能的可视化工具。作为脑认知心理基础研究的 MRI 设备的主磁场场强越来越高,已经达到 10 Tesla 的水平,系统的复杂程度,对设备的维护和功能开发,对受试安全保护都已经成为一个重要的研究领域给予发展。在数据采集方面,今后的发展有可能借助微电子技术实现在体素水平上的并行采集和不依赖于梯度的编码技术,使得 MRI 成像的速度进一步提高。

2.3 核医学成像(NMI) NMI 也包括平面和断层成像两种方式,目前平面的 γ -相机已经处于被淘汰的水平上,临床广泛使用的成像设备以单光子计算机断层成像(SPECT)和正电子断层成像(PET)为主,而动物 PET 主是用于基础研究。

目前 PET 在临床上的应用主要限于用 ^{18}F 去氧葡萄糖为

靶分子的代谢参数成像,主要用于肿瘤的诊断,其次,PET 在心脏动态成像和神经系统疾病的诊断方面也有一定的应用。

核医学成像在最近的一个亮点是分子成像。目前分子水平的成像主要是指用放射性核素标记的化合物分子在人体内浓度分布信息的可视化。这些图像是人体内微观分子的宏观分布。在宏观水平上通过统计学分析后得到的关于该分子的分布,结合人类已经掌握的生化知识,分析这些生化过程,从而确定该生化分子在人体内的功能,并根据这些功能分析该化学分子在人体内和人体的相互作用(机制),或者归纳出对该化学分子是否对人体有利或者有害的结论(药物的药理和毒性的研究)。

人体的病变有些是通过基因突变开始的,从基因调控下的大分子运动的紊乱开始,长期的紊乱引起脏器功能的变化,这种变化在脏器发生器质性变化之前就发生了,例如代谢紊乱、血流变化、血容积的变化等。但是主要从事结构诊断的影像设备例如 X-CT、超声波检查以及大部分 MRI 设备都不可能对这些紊乱进行测量,能够定量地测量这种紊乱的成像工具是核医学成像设备。这就是医学临床上常说的早期诊断。能够实现早期诊断是核医学影像设备得以发展的主要原因。拿癌症来说,根据统计学方法的研究结果,发射型 CT (SPECT)可以比 X-CT 提前三个月诊断出癌症,正电子 CT (PET)一般比 SPECT 还要早三个月诊断出癌症。很多癌症发展得非常快,半年时间就足以挽救,至少延长一个人的生命。从原理上来说,X-CT 诊断病人的根据是 X 射线通过人体时,人体组织对 X 射线不同的吸收系数,而核医学影像设备的诊断依据的是人体内的放射性强度以浓度的方式在脏器和组织中的分布,因而可以用于研究和开发新药物。因为带有放射性标记的药物可以自动寻找和浓集在需要探测和研究的人体组织或者脏器上,根据放射性强度的分布及其随时间的变化规律就可以知道特定组织或者脏器内对这种药物特异性吸收、及其代谢的规律,可以更好地理解病理,同时满足对这些药物的药理和毒性的进行评估的研究目标。

核医学成像的优点是特异性好,是代谢、功能和分子成像,能够用于早期诊断;其缺点是空间分辨率差,病理和周围组织的相互关系很难准确定位。如何克服这些缺点,发扬它的优势,是医学物理工作者的一个重要任务,通过 PACS (picture achieving communication system)技术实现的多模态医学影像信息的整合集成是发展的方向^[2]。把核医学成像叠加在诸如 X-CT 成像、MRI 高分辨率结构图像上进行定位是目前比较流行的方法。所以,医学图像配准、分割和融合在医学成像方面的应用是这个领域内一个重要的方面。

2.4 超声波成像(UI) UI 是非电离辐射的成像模式,也包括平面和断层成像两类产品,但是以二维成像的功能为主,加上血液流动的彩色杜普勒超声成像仪在内,这类产品都已经市场上广泛使用,而三维成像技术和产品都还不太普及,而且这里所说的三维不是真三维,而是把二维切片叠加之后形成的准三维图像。但是,目前 UI 仪器正具有超过 X 射线成像的发展势头,成为医学影像中使用最为广泛的医学工具。超声波成像的优点是安全可靠、价格低廉,所以在诊断/介入

治疗和预后影像检测中都得到了迅速发展,成为四大医学影像之一,数量上增长最快。

超声成像的缺点是图像对比度差、信噪比不好、图像的重复性依赖于操作人员。因为超声波的发射和接收都是通过换能头实现的,而换能头掌握在操作员的手上。目前的 UI 设备也都在换能器之后就开始数字化,之后的工作都是在数字后之后进行的。

3 关于医学软件问题

3.1 基本情况分析 上面提到的所有硬件设备都需要医学软件的支持,其内容包括以下三个方面的工作^[3]。

第一个层次的工作是和硬件紧密结合在一起的软件,主要承担对成像装置运动部件的控制、对数据的采集、图像预处理和重建,以及对采集的临床数据进行的分析。从长远来看,软硬件结合的发展是必要的。因为只有这样,企业才能具备全面的竞争力,并保持企业的持续发展。

第二个层次的软件主要是对医疗器械产生的数据进行分析处理的软件。这种软件必须在医学物理人员、软件编程人员和医生紧密合作的情况下才能完成。但是,中国的医院还没有建立把这三部分人员结合起来的体制,使得我国对现有商业应用软件的开发明显滞后。

第三类软件是以医学信息的整合为目标的软件,这种软件也必须和医生共同完成,但是不完全依赖于医生,从而具有相对的独立性。为某种特定的医疗过程或者医学信息进行管理的软件属于这类软件,例如 PACS。很多其它应用软件,例如基于医学影像的计算机辅助诊断系统、手术模拟系统、手术计划系统、手术导航系统、放疗治疗计划系统、社区医疗监护系统、远程诊断系统、家庭医学信息系统等软件,加上各种专用医学影像工作站的软件及其和 PACS 技术的结合,已经成为一个规模很大的医学软件产业群。

3.2 PACS PACS 是医学影像技术整合集成并进一步开拓影像资源应用范围的重要技术手段。以各种成像设备为节点,采集多模态医学影像信息,通过各种专用图像工作站的分析处理,满足临床工作的需要。这些软件及其相应的图像工作站通过医院的 PACS 连接起来,构成局域网中的节点。这些图像工作站也可以在医院中以影像诊断为主的科室内部使用,把几台设备的数据采集、图像传输存贮在一个共同的软件包下实现资源共享,这些科室的医生可以把商业设备上采集的数据,通过在和病人接诊的过程中,完成对病人信息的录入,做出科学的诊断并打印诊断报告。这种图像工作站还能方便地把同一病人不同成像模式采集的数据通过图像配准和融合的方法实现诊断信息的综合集成,提高对病人的诊断准确率。

4 医学影像物理和技术学科今后的发展^[4,5]

不同的成像模式所得到的医学影像有很多共同的地方,根据把物理问题和 IT 行业的问题相结合,更好地为医疗服务的原则,重点需要开展的工作如下:①研究和发展用于成像的物质波产生装置,包括物质波源产生的新原理和关键技术,目的是在提高波源产生物质波的效率的同时,改善物质波的束流品质,满足成像的需要;②对物质波和人体组织发生相互作用

用的规律建模,通过模型参数的最佳化,改善从影像提取信息的数量、质量和速度,减少误诊率和定位误差;③研究探测物质波的探测器、传感器或者换能器等关键部件,使得它们具有更好的灵敏度和分辨率(空间和时间分辨率)以及为治疗的定位能力;④把探测到的信号放大、成形并实现数字化,在计算机记录的编码过程中防止失真,开展提高信号传输效率和保真度的方法学研究,这方面的技术越来越采用大规模集成电路的方法实现,小型化、可靠性、模块化和即插即用是发展的目标;⑤快速、高效地实现图像重建和显示,满足影像诊断和治疗中的影像监督需要;⑥消除噪声和伪影,提高图像质量并减少治疗时的定位误差;⑦设计新的成像和放疗系统,测量它们的性能指标,研究更好的质量控制和剂量计算的方法;⑧发展适合中国医疗机构特点的 PACS 系统,和医疗机构的数字化关键技术。

在医学图像应用领域,广泛开展以下几个方面的科学和技术问题的研究:①在脑功能成像研究中的应用,这是 21 世纪最具挑战性并可能有很多重大突破的研究领域;②在临床诊断中的应用,在提高解剖学精度的基础上,重点发展人体生理和心理信息的采集和分析,发展包括功能信息在内的基于医学影像的计算机辅助诊断技术(MICAD)^[6]、虚拟内窥镜技术等;③在临床治疗方面,发展外科手术模拟、制订医学影像导引下的外科手术计划、增加介入治疗和放疗中的影像监督水平,和对治疗计划执行情况的验证;④在教学和人才培养中解决如何准确表达人体生理、心理和解剖结构的建模。

目前,医学影像设备需要继续提高成像速度、影像的空间和时间分辨率,改善影像的对比度,而在分子和基因水平实现人体成像成为当前发展的新热点。在基因序列公布之后,为了搞清楚基因和人体内的生物大分子之间的关系,疾病和基因表达及其与生物大分子之间的关系,在人体整体水平上开展基因反义核酸的分子成像成为医学成像今后发展的重要方向。而核医学成像在这方面具有优势,目前的成像设备主要是单光子断层成像(SPECT)和正电子断层成像(PET),但是由于空间分辨率差和受到放射性标记药物的限制,为实现这个目标需要对设备所做的改进工作还很多。今后核医学成像将越来越受到重视^[7]。

磁共振成像(MRI)也可以提供分子水平的成像信息,这就是核磁共振谱成像(MRIS),这也是一个可以和核医学成像进行竞争的分子成像领域,只是制造人体内生物分子相似的 MRI 敏感的靶分子物质方面,MRIS 没有 PET 成像那么灵活,但是 MRIS 的空间分辨率比核医学高。而 MRIS 是测量人体内源性生化分子的一种技术手段。而外源性的分子成像主要依赖于从体外注入的显像增强剂,一般必须是磁性溶液,因为血脑屏障的原因,很难用于大脑成像,除非是对病理状态的检查。

分子水平的成像也是新药开发的重要工具,无论功能磁共振成像(fMRI)还是 PET/SPECT,都是当前开发新药所必不可少的工具,因为用放射性标记的药物进行的药物病理和毒性的研究是目前活体水平研究的最重要的工具,这些工具

的使用可以大大缩短新药开发的时间周期和成本。但是,国内的药厂还没有意识到这个问题,国内的药厂还没有把这些现代化工具用上,也没有相应的人才给药厂的新药开发提供服务。

从科学和关键技术角度,在上述工作的开展过程中都要解决医学影像的快速采集,在四维空间的分析,把解剖、生理和心理信息整合在一起,实现宏观和微观的同时成像,以及实时显示技术。但是,目前任何一种成像工具只能获取人体的部分信息,局部的或者部分的信息还不足以为准确诊断提供足够依据,所以肿瘤的活检还不能取消。由于在图像中还夹带了伪影和噪声,所以正确使用成像工具、不断改进医学图像的质量,研究和发展新的成像工具,是医学影像物理工作者在今后相当长的一段时间内需要努力完成的工作,尤其是在临床应用时面对设备的质量控制和质量监督技术,以及医学影像格式的标准化、信息的兼容性方面的工作,以及图像信息和生化信息、基因信息的综合分析,需要对人体具有更深层次的理解,和更高水平上组织协调。

[参考文献]

- [1] Bao SL. Modern Medical Imaging Physics[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2003.
包尚联. 现代医学影像物理学[M]. 北京:北京大学医学出版社, 2003.
- [2] Zhu CL. Modern Medical Imaging[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2000.
朱翠玲. 现代医学影像学[M]. 济南:山东科学技术出版社, 2000.
- [3] Tian J, Bao SL, Zhou MQ. Medical Image Processing and Analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
田捷,包尚联,周明全. 医学影像处理与分析—原理与方法[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [4] Bao SL. Present and foreground of the equipment for medical imaging diagnosis and radiotherapy[C]. Proceeding on Development Strategy of Nuclear Technology and its Application, 2003:86-94.
包尚联. 医学影像诊断和放疗设备的现状和前景[C]. 全国“核技术及应用”发展战略研讨会论文集, 2003:86-94.
- [5] Bao SL. The development trend of medical imaging science and corresponding equipment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(S5):8-11.
包尚联. 新世纪医学影像学及其影像诊断设备的发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(S5):8-11.
- [6] Bao SL, Xie YQ, Zhou XD, et al. Research on segmentation for the medical image based computer aided diagnosis[J]. Chin J Med Phys, 2003, 20(2):83-86.
包尚联,谢耀钦,周晓东,等. 基于医学影像计算机辅助诊断的分割方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2003, 20(2):83-86.
- [7] Bao SL, Huang XR, Zou RL. PET imaging and its development proposal in China[J]. China Medical Device, 2003, 9(5):17-20.
包尚联,黄新瑞,邹润磊. PET 成像及其在中国发展的建议[J]. 中国医疗器械信息, 2003, 9(5):17-20.