

[文章编号] 1005-9539(2002)02-0227-05

X射线成像技术的发展现状和趋势^{*}

苟量^{1,2} 王绪本¹ 曹辉¹

(1. 成都理工大学信息工程学院, 成都 610059; 2. 中国石油天然气集团公司地球物理勘探局)

[摘要] 医学影像学一直是诊断技术的热点, X射线成像设备是目前医学成像的主流设备之一, 传统平面成像正受到新兴数字成像技术的挑战。基于X射线穿透性成像技术的关键是X射线发生器、探测器和成像软件的开发与改进, 未来基于X射线成像技术的趋势是在减少对患者的辐射剂量的同时, 提取和处理更多的有效信息, 为医生提供更准确、分辨率更高的医学影像。

[关键词] X射线; X射线平面成像; X射线CT; 数字减影血管造影

[分类号] R318.6

[文献标识码] A

医学影像技术是医学诊断中最活跃的研究领域之一, 是信息技术与医学结合的交叉学科, 它通过各种途径提取人体组织和器官的有用信息构成影像, 作为诊断疾病的依据。医学影像技术多种多样, 按成像的维数可分为二维和三维成像; 按成像的实时性可分为电影和图片成像; 按成像机理又可分为X射线成像(X射线平面成像、X射线CT和数字减影血管造影)和非X射线成像(超声、磁共振和核医学成像)等。作者采用第三种分类方法, 并重点对基于X射线穿透性成像技术的发展现状和趋势进行综合评价与分析。

1 X射线平面成像

X射线穿透人体不同组织时会产生不同的衰减, 用检测器把这些不同强度的X射线记录下来, 就得到了三维人体的二维投影平面图像。尽管目前临床诊断中还广泛使用荧光屏等传统平面成像设备(X射线机), 但是随着信息技术的发展, 传统方法与数字技术相结合, 已派生出一系列数字成像技术。1981年^[1]日本富士公司推出数字化X射线成像技术(Computed Radiograph, 即CR)。CR技术采用影像板代替传统的胶片/增感屏来记录X射线, 再用激光激励影像板, 通过专用的读出设

备读出影像板存储的数字信号, 之后再计算机进行处理和成像。到1997年^[2], 又出现了直接数字化X射线成像技术(Direct Radiography, 即DR), DR技术的探测器可以迅速将探测到的X射线信号直接转化为数字信号输出, 而不需要CR中的激光扫描和专用的读出设备, 所以DR的实时性高于CR, 在动态成像领域颇具发展潜力。

目前平面成像呈现出数字技术与传统技术平分天下的情况, 但是影像技术的数字化大趋势却不容置疑。数字图像在采集、显示、存储和传输方面的优点不言而喻, 更为重要的是可以进行各种图像后处理, 如窗口调节、图像融合等等。此外, CR和DR的探测器对X射线的量子检测率高达60%以上(传统仅为20%~30%), 密度分辨率高达 $2^{10} \sim 14$ 灰阶(传统仅为 2^6 灰阶)^[3], 大大降低了对病人的辐射剂量。但是在医学影像技术飞速发展的今天, 传统技术继续存在并在某些方面占有优势, 不容忽视。短时间内, 任何数字成像技术在分辨率和实时性上都还无法与传统技术相比。X射线机的操作简易, 病人流通率高, 费用低廉; 而CR和DR设备昂贵, 如果产生X射线效率过低和胶片对X射线的敏感度不足这两项主要问题有重大突破, 传统成像技术的现状将会大有改观。

^{*} [收稿日期] 2001-03-16

[作者简介] 苟量(1962—), 男, 硕士生, 高级工程师, 计算机应用专业。(E-mail:bjw cgl@sohu.com)

国产 X 射线机空间分辨率一般为 6 LP/mm, 高档微焦点 X 射线机每毫米可达十几个线对, 每秒可获得 400 幅或更多的图像, 在日常各种动态功能检查中基本能满足国内中小医院的需求, 但与国际上的差距仍很大。主要产品仍使用焦点面积为 2 mm × 2 mm 的低速旋转阳极管; 三参量控制台靠手工操作, 自动化程度低; 专用机的品种不全; 80 kW 以上的设备性能不先进, 且没有形成规模化生产; 变频式 X 射线机近两年才刚投入生产, 在电路设计、元器件选用和制造工艺方面尚需逐步完善。相反, 国内 CR 技术趋于成熟, 影像板接收面积达 356 mm × 432 mm, 分辨率 10 LP/mm, 对 X 射线动态响应的线性范围达到 1 ~ 10⁶ [4], 灵敏度是 X 射线光屏片的 20 倍。中科医疗装备公司 1996 年已开发成功多功能数字化 X 射线机, 目前已有一定的市场占有率。对于 DR 技术而言, 国家医用放射设备“九五”重点发展的两大

课题是: (1) 研制优化能谱的 K 型增强复合靶, 使原有 40 kW 旋转阳极管的成像能力达到 50 kW 旋转阳极管的水平; (2) 利用现有的 αSiTFT 技术, 研制供探测器专用的面阵网络, 完成蒸镀硒转换膜的工艺方法; 完成读取和对探测器感应介质复位的控制技术; 完成成套的 DR 样机 [5]。在 2000 年成都医疗器械秋季博览会上东大阿尔派和万东公司都推出了自己的 DR。

国际上, 富士公司代表着 CR 系统的最高水平, 能够以 4000 像素/mm² 的高分辨率获取 356 mm × 432 mm 的激光打印胶片 [6]。DR 的空间分辨率比胶片低, 但在实际应用中可以满足大多数的诊断需求。目前 DR 成像速度约 15 s, 包括读出时间 4.5 s, 建像时间 10.5 s, 不能达到实时显像, 仅有一些小型 C 臂机可做到 6 帧/s。DR 和 CR 的某些性能 [7] 比较如表 1。

表 1 CR 和 DR 的性能对比表
Comparison between the characteristics of CR and DR

	空间 分辨率	密度 分辨率	像素矩阵总数 254 mm × 305 mm	探测器尺寸/mm	单幅图像 传递时间	安 装 条 件	探测器寿命	价格
DR	好 127 ℓm	好 12~16 bit	7.1 × 10 ⁶	305 × 406 356 × 432 432 × 432	5~10 s	固定在任何设备上, 更适合胸片连接拍片	长 (5~10 年)	与 CR 相当
CR	较好 140 ℓm	较好 10~12 bit	5.42 × 10 ⁶	各种尺寸	几分钟	可任意移动, IP 板更适合床边拍片	短(曝光 3000~ 5000 次)	与 DR 相当

CR 成像分为影像板接收 X 射线和读出信号两步, 不可能实现实时成像, 无法满足心脏等动态器官和结构的显示, 因此 CR 的发展方向只能是提高分辨率和减少对病人的照射剂量, 或是创造新的技术买点(如图像融合或数字减影)。DR 读出数字信号的时间短, 但是目前分辨率不够理想, 所以它的首要发展方向是提高分辨率和实现实时成像; 但是分辨率提高就意味着信息传输量加大, 这必然会影响它的实时性, 所以 DR 还必须在这两者之间选择好折中点。作者认为随着 DR 技术的成熟, DR 可能会取代 CR。

2 X 射线 CT

X 射线平面成像把具有三维结构的人体拍摄成二维的平面图像, 所以各种组织结构的影像必定相互重叠。若相邻的器官或组织之间如对 X 射线的吸收差别小, 则不能形成对比。X 射线 CT 是

以 X 射线沿患者身体某一截面(某一选定的体层)的不同方向上进行扫描, 探测器测定每条线上透过的 X 射线量, 形成一个投影。这些直线投影的集合形成一个“投影截面”, 每完成一次直线扫描, 探测器旋转一定角度(旋转角的大小根据所需图像分辨率来定), 再扫描一次, 取得另一个投影截面, 如此反复, 直到整个截面扫描结束。然后, 用计算机处理这个截面数字化后的 X 射线信息, 得出该截面组织各个单位容积的吸收系数, 重建图像, 是目前医学影像技术中体层摄影最为完善, 应用最多的技术。

中国已是全球第五大 CT 生产国 [9], 但主要为合资生产。1997 年东大阿尔派数字医疗公司研制成功了第一台国产 CT (CT-C 2000), 到 2000 年 5 月装机总量已经突破 120 台; 2000 年又成功地开发出中国第一台螺旋 CT (CT-C 3000), 其性能指标已达国外同类先进水平。X 射线管采用热

容量为 3.5 MHU 金属球管,螺旋扫描持续时间长达 90 s,数据采集为 668 路,带有数字滤波噪声降低和数据误差校正技术的并行 A/D 变换系统,动态范围 1:1 000 000,最大旋转速率 60 r/min,每周 1024 个采样点,层厚可达 1 mm 等等。

目前 CT 机的空间分辨率已发展到毫米数量级($0.35\text{ mm}^{[8]}$ 以下),而密度分辨率达 1/1000。今后 CT 的发展主要趋势是继续降低扫描剂量;提高扫描、重建和图像后处理速度;改善图像质量,特别是螺旋 CT 的图像质量;开发新的功能,如 CT 血管造影术和 CT 导向介入技术,方便操作,等等。

2.1 低剂量扫描

降低 X 射线剂量的措施主要有:

a. 降低扫描中 CT 球管电流。

b. 用固体检测器替代气体检测器。目前新型固体检测器转换率达 90% 左右^[10],并且具有低余辉和对环境的温、湿度要求降低等优点。

c. 分段设置扫描参数,以降低非兴趣区的剂量。

d. 增强扫描中应用密度自动跟踪系统,以减少与增强扫描无关的曝光及提高增强检查的效果。

e. 应用低剂量进行 CT 实时成像或通过减少扫描的层数(扫描范围满足临床要求便立刻停止扫描),减少对患者的扫描剂量、X 射线球管的损耗和造影剂的用量。

f. 采用大功率、高热容量和散热率的 CT 球管,在图像质量不变差和扫描剂量不增加的情况下持续扫描时间更长,曝光次数更多。目前有的产品持续扫描时间已达 90 s 和曝光次数 50 万次左右。

2.2 实时 CT 成像

在 CT 扫描下,实时观察人体横断面的解剖结构的变化对介入治疗有很大帮助,这对现有数据采集和重建速度、减少患者的扫描剂量提出了新的要求。第一代 CT 扫描一帧图像要 100 s 以上,目前速度达 6~8 帧/s,图像重建速度达到亚秒的数量级。电子束 CT 一帧 20~50 ms,因而检查运动器官(如心脏大血管等)能得到清晰的图像,实现了电影 CT。

2.3 多层螺旋 CT 成像

滑环技术日趋普及,采用该技术的螺旋 CT

成为发展的主流。GE、西门子、东芝公司等又在螺旋 CT 的基础上,2000 年推出了旋转一周可采集四层数据的多层螺旋 CT,这一技术代表着医用 CT 发展的趋势。它采用新型探测器,在纵向上扩展为二维探测器阵列,使数据采集速度大大提高,达 300 ms/层;提高了密度分辨率和空间分辨率,在相同的密度分辨率下降低 30% 以上的扫描电流值,空间分辨率也达 2.4 LP/mm,是单螺旋 CT 的两倍^[11];但是由于数据采集系统的限制,目前只能同时采集四层数据。

2.4 开发新功能和特殊 CT 机型

继续开发 CT 新的功能,拓展 CT 的应用范围,如血流灌注成像,用于强迫体位病人的坐式检查的机型,为危重、昏迷病人检查的移动式 CT,遥控 CT 等等。

2.5 三维 CT 成像

现有一些基于计算机平台使用多幅人体的二维断面图构成三维图像的软件,但并不是采集容积数据的真正三维成像,所以并没有给医生提供更多有用的信息。由于螺旋 CT 逐步普及,而多层螺旋 CT 也开始商业化,所以通过螺旋或多层螺旋 CT 采集的容积数据进行三维实时成像,也是 CT 发展的一大趋势。

2.6 显微 CT 成像

目前医学影像技术中 X 射线 CT 图像质量最好的,其分辨率也只能达到亚毫米级;但肿瘤学家需要的是一种能直接从图像中去分辨恶性、良性细胞和正常细胞间细微结构差异的、显微水平的 X 射线 CT。毫无疑问,显微 CT 将会成为 21 世纪医学影像技术的一个重大课题。

3 数字减影血管造影

数字减影血管造影(DSA)通过导管将造影剂注入到感兴趣区的血管中,采集注射前后的两组 X 射线信息,把这两组信息处理成相反的影像后再相减,消除不需要的软组织,而保留血管影像。

DSA 克服了常规 X 射线透视中其他部位对血管的重叠干扰,使感兴趣的血管更加清晰,并且具有数字影像的许多优点。DSA 每秒摄片数从十几幅到上百幅,类似于 X 射线电影,采用路图技术有利于作介入治疗,而这些普通血管造影都不可能完成。而且 DSA 插管时间短,使用普通血管造影一半的碘浓度时,密度分辨率仍高于后者,诊

断和治疗可一次完成,所以易于为病人接受。但是,DSA 的空间分辨率不如普通血管造影,造影区域受影像增强器尺寸的限制,对某些体部血管造影会感到区域过小,患者承受的 X 射线照射剂量比普通造影高,而且购买和维护费用昂贵。

目前国内开发 DSA 的实际性能指标差异较大,但个别机型已达到国际先进水平。如昆明惠翼计算机图像研究所与成都军区昆明总医院器械科联合研制的 Hydsa-1000 型数字减影机采用一体化设计,可脉冲曝光和连续曝光,分辨率达 1024×1024 ,最高采样速率为 60 帧/s,能够自动设置曝光最佳条件^[15]。

3.1 机械系统

DSA 已普遍采用三轴系统、L+C 臂设计,保证尽可能全方位地选择观察,减少死角,并且三轴系统设计也是旋转造影、计算机辅助血管最佳投射角度定位的基础。目前有的机型位置记忆能储存 100 多个体位,各种体位可按照医生需要事先预设^[12]。又如自动跟踪回放功能:当 C 型臂转到需要的角度时,系统能自动搜索并重放该角度已有的造影图像,也可根据图像自动地将 C 型臂转到该位置重新进行透视、造影。

3.2 X 射线系统

努力提高 X 射线球管的功率、热容量,改善 X 射线球管的冷却系统,力求延长曝光时间,避免因过热保护而中止工作。现今球管功率达 115 kW,热容量达 1.96 MHU,散热量达 1.96 kHU/min^[13]。在提高图像质量的同时,尽可能降低检查中的照射剂量,如在影像增强器上采用 CCD 数字摄像机,采用前面提到的 DR 探测器和低剂量脉冲透视技术、智能曝光技术、采集图像数字放大技术、自动滤过调整、自动剂量测量和显示系统等。例如 GE 公司在 1998 年推出的 DSA,具有高清晰度无闪烁监视器,超低剂量手动控制曝光,可提供最小的连续剂量,脉冲宽度可调到 1 ms,极大地降低了辐射剂量。

3.3 数据采集

目前数据采集达 $1024 \times 1024 \times 12$ 灰阶,但此采集只能做到 25 帧/s,对心脏系统没有临床价值。 512×512 图像采集可达 60 帧/s。监视器扫描达到 2046 线对,120 Hz。影像增强器分辨率可达 6.8 LP/mm。电视系统信噪比 S/N 达到 6000:1^[13]。目前,DR 技术中的平板探测器也出现在

DSA 设备上。可以预料,随着平板探测器技术的发展,其终将取代现有的胶片照相系统。

3.4 计算机系统和后处理软件

DSA 计算机系统的发展趋势是高度智能化,在有效保护患者安全和设备的同时,努力作到不依赖放射技术人员的帮助,使手术操作医生可以方便、准确、及时地调整造影的位置,达到最佳造影效果。

软件方面各大公司都有各自的新技术,归纳起来主要有:

a. 自动分析功能:冠状动脉及周围血管造影后,进行血管直径、病变范围及血流状况等等各种参数的分析。

b. 路图技术:为了便于复杂部位的插管及介入治疗时的对比要求,采用双屏幕、分割画面,或采用透视减影形式,实时进行前后、左右、静止或动态等各种方式的对比。

c. 造影剂跟踪摄影:在不中断血管中造影剂移动实时图像显示的同时,操作者可用交互式或用速度曲线自动控制造影剂跟踪摄影,在减影或非减影方式下都可实时地观察摄影图像。

d. 自动最佳角度定位系统:帮助操作者获得血管结构的最佳造影图像^[14]。

3.5 三维 DSA 成像

利用旋转血管造影技术,C 形臂围绕人体旋转 200° ^[15],甚至 360° ;旋转速度 $30^\circ/\text{s}$ ^[13],同时注射造影剂,并以较快的速度采集,如 12.5~25 帧/s,可得到旋转式三维血管成像。其优点是增加了观察角度,能够以最佳切线位观察病变,获得更多的诊断信息,减少造影剂注射和射线剂量。最近国际上较成功的一次三维 DSA 成像是采用模糊成像方式,不采集蒙片,一次成像,减少了检查时间,又降低了检查剂量。

3.6 一体化趋势

目前 DSA 有与其他设备进行一体化的趋势,如与超声设备的组合,与 CT 的组合等。这样使医生在血管造影的同时,可以得到其他设备提供的影像,进行互参互补;而且一体化设备节约了操作人员数、维护费用、场地,同时方便了临床,为介入治疗提供了更好的外部条件。

4 结 论

X 射线成像技术采集的信息量是各种成像技

术中最多、最准的,分辨率是最高的,它也是目前发展得最成熟的成像技术。基于 X 射线穿透性成像的关键是 X 射线发生器、探测器和相应的成像软件,即在减少对患者的辐射剂量的同时,提取更多更有效的信息,并最有效地处理这些信息。所以,X 射线透视成像技术发展的永恒主题是考虑 X 射线发生器的功率(增加透射 X 射线量,但也加大对病人的损伤)、增加持续扫描时间、完善聚焦系统(减少透射 X 射线量),同时还要考虑探测器的光电转换率(提高信息采集量),开发多功能、高效率的成像和分析软件。

[参 考 文 献]

[1] 刘玉清,李铁,陈焱货,等.放射学[M].北京:人民卫生出版社,1993.

[2] 贺又增.直接数字化 X 射线摄影[J].世界医疗器械,1998,(3):10-14.

[3] 曹厚德,蒋志新,张中柱.发展中的数字化 X 射线成像技术[J].世界医疗器械,1998,(9):40-43.

[4] 苏勉曾,董翊,阮慎康,等.计算 X 射线摄影系统[J].中国医疗器械杂志,1996,(4):235-236.

[5] 陈旭.我国医用 X 射线机的发展[J].世界医疗器械,2000,(5):67-70.

[6] 王骏.胸部 X 射线摄影技术的进展[J].世界医疗器械,2000,(2):69-70.

[7] 北京东健环亚医学工程技术有限公司.平板型数字化的放射医学影像技术[J].世界医疗器械,2000,(4):93-94.

[8] 陈惟昌,张朝宗,王自强,等.显微 CT(μCT)——医学 CT 未来的发展方向[J].CT 理论与应用研究,1998,(3):40-45.

[9] 袁启明.中国跻身全球五大 CT 生产国[J].世界医疗器械,2000,(11):76.

[10] 卫生部影像装备专家组.83 届北美放射学会医学影像学设备发展动态[J].中华放射学杂志,1998,(3):213-215.

[11] 陈素玲.X-CT 机的技术进展[J].医疗设备信息,2000,(3):31-32.

[12] 杜洛山.血管造影设备的发展及临床应用[J].世界医疗器械,1998,(3):22-27.

[13] 宋庆斌,凌峰.现代 DSA 设备在介入神经放射中的应用[J].世界医疗器械,1998,(3):28-29.

[14] 王佩裸,高育敦.血管造影系统中的新技术[J].中国医学影像学杂志,1997,(3):173-174.

[15] 艾民,阮兴云,王玉昆,等.数字减影的历史、现状和未来发展趋势[J].医疗装备,2000,(6):1-6.

THE PRESENT STATE AND FUTURE DEVELOPMENT OF
X-RAY IMAGING TECHNOLOGY

GOU Liang^{1,2}, WANG Xu-ben¹, CAO Hui¹

(¹.Chengdu University of Technology, China;

².Bureau of Geophysical Prospecting, China National Petroleum Corporation)

Abstract: Medical imaging has long been the hot topic of clinical medical sciences, the X-ray imaging equipment is a popular device of current medical imaging, and the digital imaging technology has become a challenge to the conventional plane imaging. The paper first discusses that the key of X-ray-based imaging is the generator and detector of X-ray and the improvement of imaging software, and then points out that the future development of medical imaging will aim at the capability of reducing radiation and handling more efficient and accurate data capacity.

Key words: X-ray; X-ray plane imaging; X-ray CT; digital subtraction angiography