

基于IEC标准的日本滨松SHR22000全身用 PET扫描仪性能测试*

田毅^{1;1)} 片部笃志² 刘华锋^{1;2)} 鲍超¹ 山下贵司²

1 (浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

2 (日本滨松光子学株式会社中央研究所 滨松 434-8601)

摘要 SHR22000是日本滨松光子学株式会社开发的人体全身用正电子发射断层扫描仪。扫描仪具有32层探测器环,二维采集可形成63个切片,病人孔径为60cm,单个体位数据采集时间为3—5min。扫描仪的轴向视野为22.5cm,经5个体位可以完成全身扫描,视野中轴10mm处平均横向分辨率可达到3.2mm。本文依照国际标准IEC 61675-1(亦即GB/T18988.1-2003)规定的各项指标对该扫描仪的空间分辨率、灵敏度、散射和计数率特性以及复原系数进行了测试,并给出结果数据。

关键词 正电子发射断层成像 性能评价 IEC标准

1 引言

正电子发射断层成像(PET)为从分子水平研究人体新陈代谢和疾病发生的机理提供了有效的途径。越来越多的人体全身用PET扫描仪被用于临床,以辅助医生对疾病进行早期发现或诊断、制定治疗方案以及评价治疗效果。随着PET在临床应用中不断深入,对PET技术的要求也不断提高。从原有代谢异常的明显标示到进一步准确的定位,以及最终的量化分析,PET扫描仪的空间分辨率、灵敏度、散射以及计数率特性等性能指标已经成为医生根据不同患者、不同疾病诊断需要或者不同示踪药物设定扫描参数的重要依据。

经过10余年的发展,对于PET装置的性能参数已经有了一套系统的评价指标及方法^[1, 2],我国也于2003年8月制定了基于IEC 61675-1国际标准的正电发射断层成像装置性能测试国家标准^[3]。本文基于IEC 61675-1标准,对位于浙江大学医学PET中心的HAMAMATSU SHR22000全身PET扫描仪进行了横向、轴向分辨率,计数率特性,断层成像灵敏度,散射

分数以及复原系数的测定,并给出了相应的实验描述及最终结果,希望通过这些工作,为国内相关科研及类似系统的性能评价提供一些参考。

2 实验方法与材料

2.1 SHR22000系统概述

HAMAMATSU SHR22000系统由机架/扫描床、信号处理单元,图像处理单元,操作计算机,电力控制单元构成。系统的扫描仪部分如图1(a)所示。扫描床宽790mm,长2793mm,高度可以在360—880mm之间调节,水平行程为1800mm。扫描床在水平及竖直方向均可以5mm/s以及30mm/s两种速度模式移动,以实现有效准确的病人对位。

系统的探测器采用紧凑的模块化结构,每个模块含有8个探测单元,各单元配以锗酸铋(BGO)晶体以及金属封装的位置敏感性光电倍增管(metal packaged PS-PMT)。单个PMT对应晶体阵列为8×4,晶体尺寸为2.8mm×6.95mm×30mm。96个探测器模块排列成直径为838mm的探测器环,如图1(b),并配有

2006-01-24 收稿

* 国家创新群体科学基金(60021201)和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题(LMOI-0403)资助

1) E-mail: tianyi@zju.edu.cn

2) E-mail: liuhf@zju.edu.cn

屏蔽长度为80mm、单层厚度为1.5mm的33层环形铅准直器。系统的病人孔径直径为60mm。轴向视野为22.4cm,可以覆盖人体整个头部或躯干的相当大部分,使得病人扫描具有较高的通量。

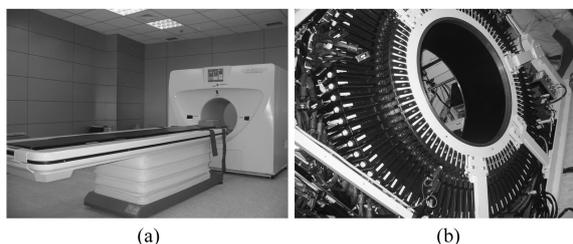


图1 HAMAMATSU SHR22000全身用扫描仪(a),探测器系统(b)

探测器环共有32层晶体环,二维模式下的数据采集经相对与相邻的晶体环间符合形成63层切片。系统对二维数据提供反投影滤波(FBP)、有序子集期望最大化(OSEM)、动态列作用极大似然估计(DRAMA)^[4]以及衰减系数加权的DRAM(AW-DRAM)^[4]4种重建方法^[3]。准直器环可通过计算机操作向后(扫描床进入的方向)移开,进而进行三维模式下的数据采集,三维数据经傅里叶重组(FORE)后可利用二维重建算法进行图像重建。系统视野中心横向分辨率小于4.0mm,延中轴的轴向分辨率小于4.0mm。

表1列出了HAMAMATSU SHR22000扫描仪的系统参数。

表1 HAMAMATSU SHR22000系统参数^[3, 5]

闪烁晶体材料	BGO(Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)
闪烁晶体尺寸	2.8mm×6.95mm×30mm
闪烁晶体总数	24576(3072/ring)
光电倍增管型号	Hamamatsu R8520-C12
光电倍增管总数	768
探测器环数	32
环间隔	7.2mm
探测器环直径	838mm
病人孔径	600mm
切片准直器长度	80mm
切片准直器厚度	1.5mm
切片准直器材料	铅
扫描床水平行程	1800mm
扫描床垂直移动范围	360—880mm
扫描床最大载重量	136kg
横向分辨率(FWHM)	视野中心<4.0mm
轴向分辨率(FWHM)	延中轴<4.0mm
轴向视野	224mm

系统附带校正用的放射源,用来进行归一化、空扫描以及透射扫描,以进行系统校正及衰减校正。校

正源选用⁶⁸Ge线状源(一根或一对可选),初始放射性强度为单根线源148MBq。校正源在不使用的情况下被收藏在机架下方的铅盒中以减少辐射或对发射扫描的干扰,使用时可通过机械装置从铅盒中移出,延直径为634mm的环形绕视野以2转/min的速度旋转。此外,系统还在机架上分别于探测器环前方的面板以及校正源转动的轨道上安装了激光定位装置,以实现扫描时病人的精确对位以及放射源转动的精确测量与控制。

2.2 空间分辨率测量

系统的横向空间分辨率测量采用¹⁸F灌注的线源作为放射源,将未稀释的¹⁸F溶液灌入内径为0.55mm不锈钢细管内,分别通过激光定标移动使之位于竖直方向距视野中心10mm,50mm以及100mm处测量,采集时间为6min。得到数据应用一个在投影数据尼奎斯特(Nyquist)频率截止的斜坡滤波函数,经滤波反投影(FBP)法重建。图像矩阵256×256,像素尺寸为0.6mm。各切片径向及切向的半高宽(FWHM)用线性内插法加以计算,进而得到所有切片范围内的平均值作为横向分辨率。

轴向分辨率用放射性活度为3.4MBq的²²Na点源,于横向视野中心处,以步长1mm沿中轴移动,在不同切片处加以测量。测量起始位置为32切片(视野中心),最终位置为63切片(视野最边缘),各切片处数据采集满足该处获取大于50000计数,扫描总用时41min。点源扫过的垂直切片为33,35,37,39,41,43,45,47,49,51,53,55,57,59,61,63,交叉切片为32,34,36,38,40,43,44,46,48,50,52,54,56,58,60,62。垂直切片与交叉切片的半高宽(FWHM)分别为各切片半高宽的平均值。

2.3 计数率特性测试

本次实验中,采用头部体模^[2, 3](均匀圆筒,直径200mm,容积9300ml,日本滨松光子学株式会社),对头部成像时散射条件下的计数率特性进行测定。实验使用放射性活度为313.7kBq/ml的¹¹C(半衰期20.375min)均匀溶液充满体模(圆筒内总的放射性活度为 2.9174×10^9 Bq),将体模中心对准总视野中心后,在212min(大于10个半衰期)内连续测量。测量帧幅对应的扫描时间为:最初1min/帧×40帧,随后2min/帧×34帧,最后4min/帧×26帧。

测得数据按照式(1)计算各帧平均放射性活度及对应的真符合计数率以及死时间计数损失^[2, 3],

$$A_{ave,i} = A_{cal} \frac{1}{\ln 2} \frac{T_{1/2}}{T_{acq,i}} \exp \left[\frac{T_{cal} - T_{0,i}}{T_{1/2}} \right] \left[1 - \exp \left(- \frac{T_{acq,i}}{T_{1/2}} \ln 2 \right) \right], \quad (1)$$

其中 $A_{ave,i}$ 为第 i 帧数据在其采集时间 $T_{acq,i}$ 内的平均放射性活度, A_{cal} 为 T_{cal} 测量开始前时刻测得的放射性活度, $T_{0,i}$ 为第 i 帧测量开始的时刻, $T_{1/2}$ 为所用核素的半衰期。

根据计算结果可绘制真符合计数率 (未经散射校正) 与死时间计数损失相对于平均放射性活度的关系曲线, 用线性插值法得到系统在死时间计数损失达到 20% 和 50% 时的平均放射性活度水平及真符合计数率 (未经散射校正)。

2.4 断层成像灵敏度测试

系统二维模式下断层成像灵敏度可以利用前面计数率特性测试中 81 帧到 100 帧采集的数据进行分析. 即相当于对充满均匀 ^{11}C 溶液的均匀圆筒 (头部体模, 同上) 进行 80min 采集, 平均放射性活度为 3.533kBq/ml。

三维模式下的灵敏度测试采用同样的均匀圆筒头部体模, 充满放射性活度为 0.16kBq/ml 的 ^{18}F 均匀溶液后, 采集 60min 得到数据. 采集过程中体模中心对准总视野的中心。

2.5 散射分数测量

散射分数测试在充满水的头部体模内 3 个不同半径位置放置灌注线源, 分别对其成像. 灌注线源的类型与空间分辨率测试中相同, 为内径 0.55mm 的不锈钢管, 灌入未经稀释的 ^{18}F 溶液, 放射性活度约为 1kBq/ml. 线源位于视野中心以及距视野中心 45mm, 90mm 时, 采集时间分别为 20min, 25min, 30min。

2.6 复原系数测量

在相同的头部体模中加入充满 ^{18}F 溶液的空心球体, 球体内径分别为 10mm, 13mm, 17mm, 22mm, 28mm, 37mm. 这些球体通过支架在头部体模内进行排列, 使所有的球心处于同一个径向平面内, 且均匀分布在同一圆周上. 在头部体模中充满水后, 使小球球心所在的平面位于系统中心切片处, 其圆心与视野中心重合, 进行数据采集. 使用的 ^{18}F 溶液放射性活度为 107.92kBq/ml, 数据采集时间为 120min。

上述实验结束后, 取出小球, 在头部体模 (仅均匀圆筒) 中充满放射性活度为 19.91kBq/ml 的 ^{18}F 溶液, 于原位采集数据, 时间为 60min. 然后使用一个尼奎斯特 (Nyquist) 频率截止的斜坡滤波函数, 经滤波反投影 (FBP) 法重建两次采集的图像. 对于含小球头部体模的图像, 用直径为 3.6mm 的感兴趣区 (ROIs) 对准每

个球的中心, 对不含小球的头部体模图像, 用直径为 150mm 的 ROI 对准均匀圆筒的中心, 取得 ROI 中每像素每秒的计数, 按 IEC 标准规定的方法计算复原系数。

3 性能测试结果

3.1 空间分辨率

系统横向分辨率测试中 0.55mm 灌注线源图像 (中心切片) 如图 2 所示。

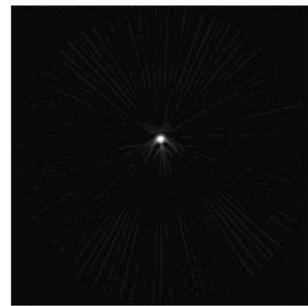


图 2 HAMAMATSU SHR22000 横向分辨率测试中心切片 (切片 32) FBP 重建图像, 灌注线源距视野中轴 10mm

径向、切向及轴向分辨率半宽高 (FWHM) 如表 2 所列。

表 2 HAMAMATSU SHR22000 空间分辨率 (mm)

横向分辨率 FWHM	径向	切向	平均值
距离中轴 10mm 处	3.2	3.1	3.2
距离中轴 50mm 处	3.0	3.8	3.4
距离中轴 100mm 处	4.3	3.9	4.1
轴向分辨率 FWHM	垂直切片	交叉切片	平均值
	3.5	3.5	3.5

3.2 计数率特性

系统计数率与死时间特性曲线如图 3 所示。

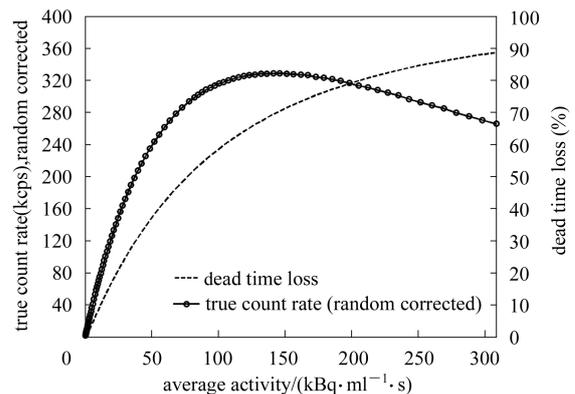


图 3 HAMAMATSU SHR22000 计数率与死时间损失特性曲线

用线性插值法可求得在20%死时间计数损失和50%死时间计数损失时的放射性活度水平及真符合计数率(未经散射校正), 见表3.

表3 HAMAMATSU SHR22000 计数率特性

死时间计数损失	平均放射性活度	计数率(未经散射校正)
50%	76.4kBq·ml ⁻¹ ·s	291 kcps
20%	23.5kBq·ml ⁻¹ ·s	143 kcps

3.3 断层成像灵敏度

二维及三维模式下系统的断层成像灵敏度如表4所列.

表4 HAMAMATSU SHR22000 断层成像灵敏度

数据采集模式	平均放射性活度	灵敏度
二维	1.2123kBq·ml ⁻¹ ·s	6.0kcps/(kBq/ml)
三维	0.1418kBq·ml ⁻¹ ·s	58.5kcps/(kBq/ml)

3.4 散射分数

散射分数测试中灌注线源位于不同位置时, 中心切片(32/63)的正弦图如图4所示. 线源位于各个位置时测量的平均放射性活度及最终散射分数结果如表5所示.

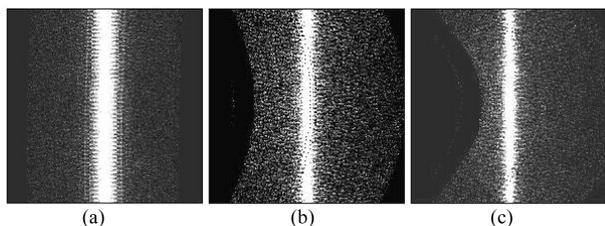


图4 灌注线源位于不同位置时中心切片正弦图

(a) 距中轴0mm; (b) 距中轴45mm; (c) 距中轴90mm.

表5 HAMAMATSU SHR22000 散射分数

灌注线源距视野中轴	平均放射性活度
0mm	0.9394 kBq·ml ⁻¹ ·s
45mm	0.4924 kBq·ml ⁻¹ ·s
90mm	0.3434 kBq·ml ⁻¹ ·s
平均散射分数	16%

3.5 复原系数

带有充满¹⁸F溶液的小球并充满水的头部体模, 以及小球取出后充满¹⁸F溶液的头部体模, 成像如图5(a), (c)所示, 相应图像中选择的感兴趣区如在图5(b), (d)标出.

对应ROI中单个像素的平均计数率、两次实验中使用的¹⁸F溶液样品在测量过程中的平均放射性活

度, 以及计算出的系统复原系数列于表6中.

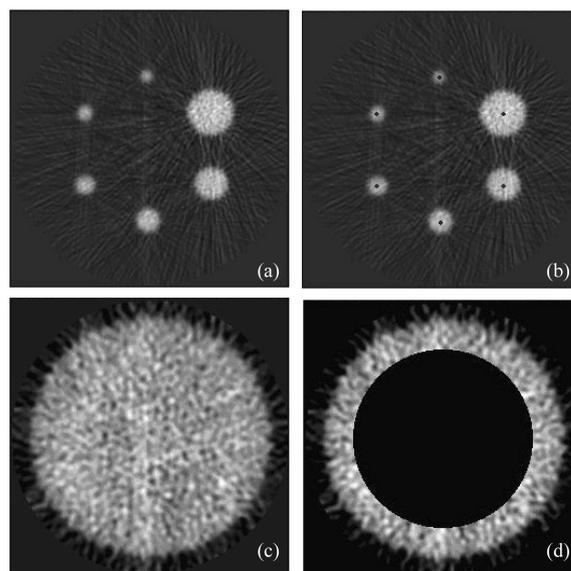


图5 含有充满¹⁸F溶液小球的头部体模重建图像(a), 相应感兴趣区示意(b), 充满¹⁸F的头部体模重建图像(c), 感兴趣区示意(d)

表6 HAMAMATSU SHR22000 复原系数

模型	ROI直径/ mm	ROI计数平均值/ (kBps/pixel)	溶液平均活度/ (kBq·ml ⁻¹ ·s)
小球	3.6	φ37mm小球: 220.68	75.66
		φ28mm小球: 212.72	
		φ22mm小球: 204.74	
		φ17mm小球: 201.25	
		φ13mm小球: 183.18	
		φ10mm小球: 169.19	
头部体模	150	49.99	16.58
复原系数			
37mm:	(220.68/75.66)/(49.99/16.58) =	0.97	
28mm:	(212.72/75.66)/(49.99/16.58) =	0.93	
22mm:	(204.74/75.66)/(49.99/16.58) =	0.90	
17mm:	(201.25/75.66)/(49.99/16.58) =	0.88	
13mm:	(183.18/75.66)/(49.99/16.58) =	0.80	
10mm:	(169.19/75.66)/(49.99/16.58) =	0.74	

4 结论

SHR22000系统参数经测试得到前述结果, 系统二维采集时灵敏度可达到6.0kcps/(kBq/ml), 距中轴10mm的平均横向分辨率可达到3.2mm, 图6给出一例全身扫描图像, 以供参考. 相信在今后该系统能发挥更大的作用, 为相关科研提供很好的显像依据.

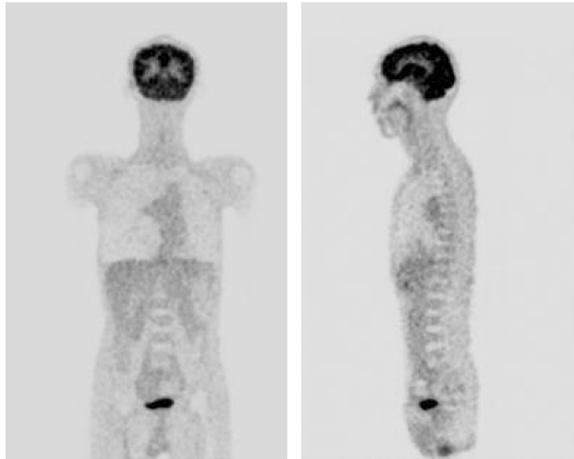


图 6 健康男性, 66 岁, 全身 ^{18}F -FDG 显像. 左: 冠状位(88 切片); 右: 矢状位(89 切片)

特别感谢日本滨松光子学株式会社的冈田裕之、清水启司、冈本俊以及杨桓先生在 PET 安装、调试以及性能测试过程中的全程协助, 也感谢浙江大学

医学 PET 中心的各位医师提供性能所需的同位素药物、纯净水以及其他支持.

参考文献(References)

- 1 Daube-Witherspoon M E, Karp J S, Casey M E et al. J. Nucl. Med., 2002, **43**(10): 1398—1409
- 2 International Standard. IEC 61675-1, 1998, 1—36
- 3 National Standards of P.R.China, GB/T 18988.1, 2003: 1—26 (in Chinese)
(中华人民共和国国家标准. GB/T 18988.1, 2003: 1—26)
- 4 Tanaka E, Kudo H. Phys. Med. Biol., 2003, **48**: 1405—1422
- 5 Hamamatsu Photonics K K. HAMAMATSU SHR22000 System Manual, 2004

Performance Evaluation of the HAMAMATSU SHR22000 Whole-Body PET Scanner Using the IEC Standard*

TIAN Yi^{1:1)} KATABE Atsushi² LIU Hua-Feng^{1:2)} BAO Chao¹ YAMASHITA Takaji²

1 (State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2 (Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K, Hamamatsu 434-8601, Japan)

Abstract SHR22000 is a whole-body PET scanner developed by Hamamatsu Photonics K.K. The scanner has a 600mm patient aperture and a 225mm axial FOV, which can cover the whole human head and large portion of the body so that a common whole-body scan can be accomplished within 5 bed position with a 3.2mm average transverse resolution at 10mm from the axis of FOV. The paper gives a system performance evaluation of this scanner using GB/T 18988.1-2003/IEC 61675-1:1998 standard, which includes the spatial resolution, tomographic sensitivity, count rate characteristic, scatter fraction and recovery coefficient. At last a human body scanning result is given as an imaging example.

Key words PET, performance evaluation, GB/T 18988.1 IEC 61675-1

Received 24 January 2006

* Supported by NSF of China for Innovative Research Groups (60021201) and Open Foundation by State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation in Zhejiang University, China (LMOI-0403)

1) E-mail: tianyi@zju.edu.cn

2) E-mail: liuhf@zju.edu.cn