



基于计数型探测器的多能谱CT成像

邢宇翔

清华大学工程物理系

2013-10-14

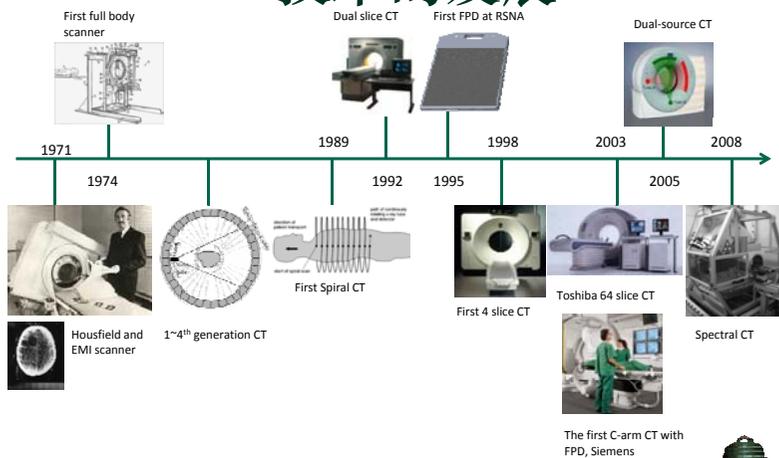


主要内容

- 传统CT成像→多能谱CT成像
- 多能谱CT成像的物理基础和方法
- 基于光子计数探测器的多能谱CT成像的优势
- 多能谱CT成像的应用和发展前景
- 发展多能谱CT成像的研究方向和需求



CT技术的发展



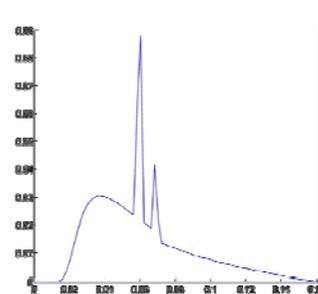
单能谱



多能谱



CT成像的物理基础

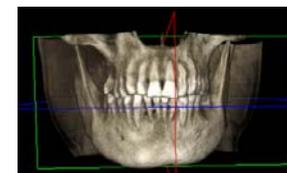
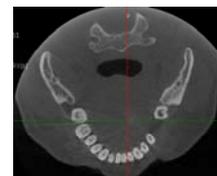


比尔定律

$$I_{\text{gray}} = \int_0^{\text{EM}} I_0(E) \exp\left(-\int_{y_0}^{y_1} \mu(y, E) dy\right) dE$$

$$\int_{y_0}^{y_1} \mu(y, E) dy = \sum_{i=1}^N w_i \mu_i(E)$$

$$I_{\text{gray}} = I \exp\left(-\sum_{i=1}^N w_i \bar{\mu}_i\right) \text{ 用单能近似}$$



图像来自北京朗视仪器有限公司

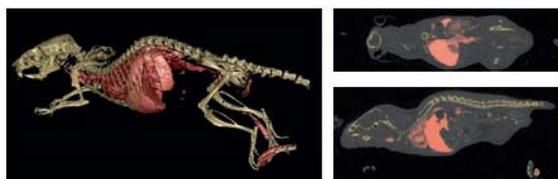


多能谱CT

Multi-energy X-ray CT
 spectroscopic or spectral CT
 Energy selective X-ray CT
 Energy sensitive X-ray CT
 Energy-discriminated X-ray CT

提高图像的分辨能力

- 信噪比
- 射线硬化伪影
- 对比度 $\begin{cases} \text{低} \rightarrow \text{高} \\ \text{无} \rightarrow \text{有} \end{cases}$

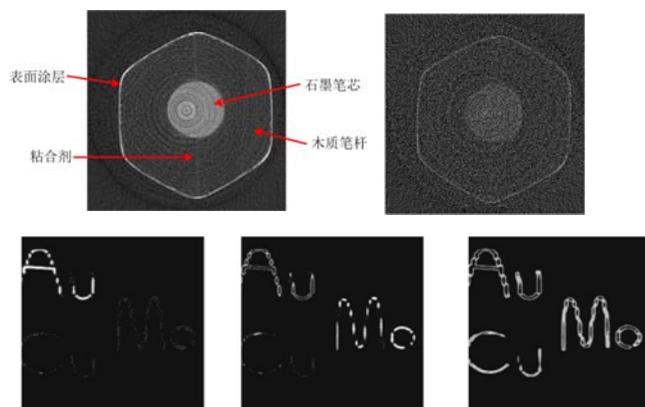


主要内容

- 传统CT成像 \rightarrow 多能谱CT成像
- 多能谱CT成像的物理基础和方法
- 基于光子计数探测器的多能谱CT成像的优势
- 多能谱CT成像的应用和发展前景
- 发展多能谱CT成像的研究方向和需求



能量分辨的作用

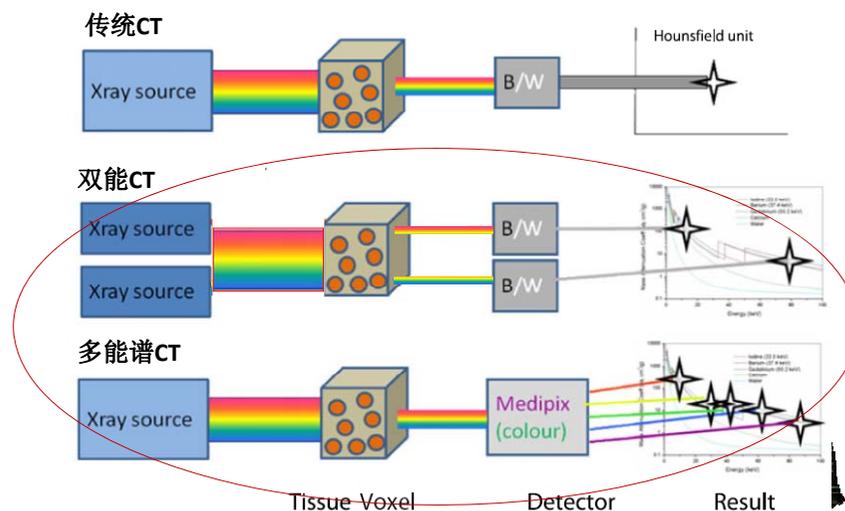


不同的能量带来不同的对比度、不同的物质分辨

-- Images from Hidenori Mimura et al, Novel X-ray imaging using a CdTe sensor
 沈乐等, 能谱CT成像系统设计与重建



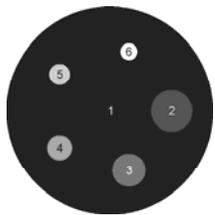
能量分辨的作用



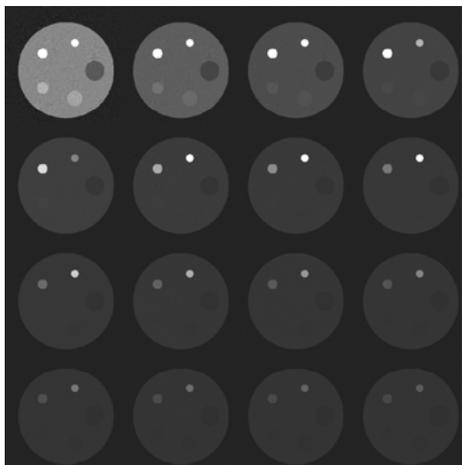
Tissue-Voxel Detector Result



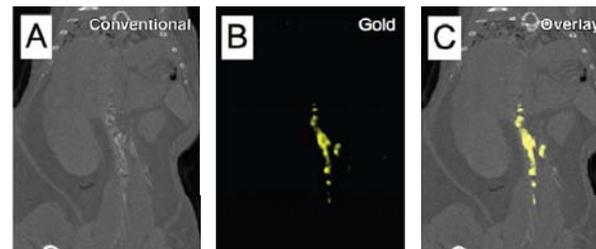
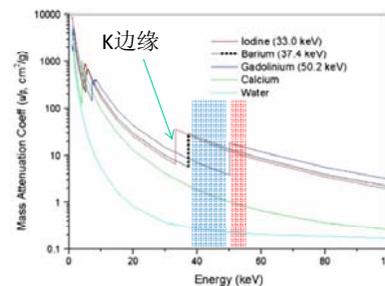
能谱CT图像



- 1. PMMA
- 2. Polyethylene (PE)
- 3. Water
- 4. Blood
- 5. Bone
- 6. Iohexol contrast (碘海醇)



K边缘成像



---- David P. Cormode et al, Radiology, 2010



能谱信息分解

$$\mu(E) = \sum_{\tau=1,2,\dots} a_{\tau} \phi_{\tau}(E)$$

基函数
分解系数

$$\mu(E) = a^{PE} \phi^{PE}(E) + a^C \phi^C(E)$$

光电效应 康普顿效应

平均衰减系数

$$I_{gray} = \int_0^{EM} I_0(E) \exp\left(-\int_{y_0}^{y_1} \mu(y, E) dy\right) dE$$

单能谱

$$I_{S_1} = \int_{S_1} I_0^{S_1}(E) \exp(-\mu(E)) dE$$

$$I_{S_2} = \int_{S_2} I_0^{S_2}(E) \exp(-\mu(E)) dE$$

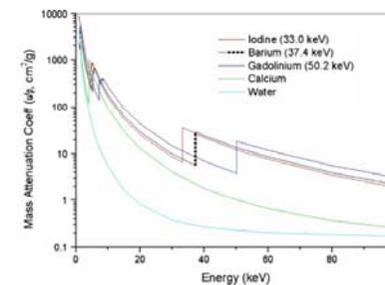
...

多能谱数据

基图像



能谱信息分解



$$\mu(E) = a^{PE} \phi^{PE}(E) + a^C \phi^C(E) + a^{Cntr} \mu^{Cntr}(E)$$

光电效应 康普顿效应 造影剂曲线

光电效应

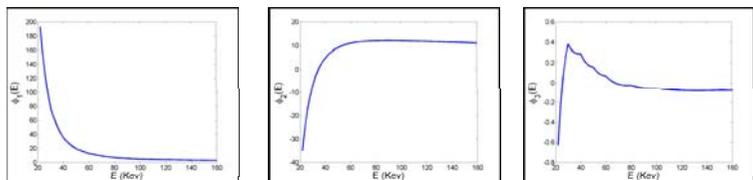
康普顿效应

造影剂曲线



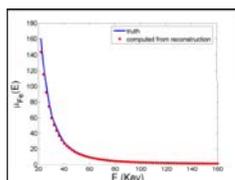


能谱信息合成

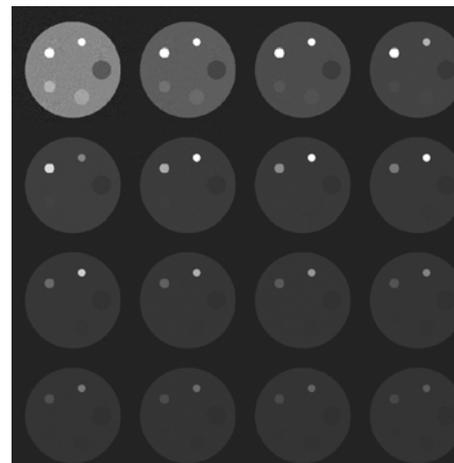


基函数

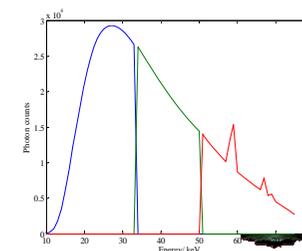
$$\mu(E) = \sum_{\tau=1,2,\dots} a_{\tau} \phi_{\tau}(E)$$



能谱信息合成-虚拟单能图像



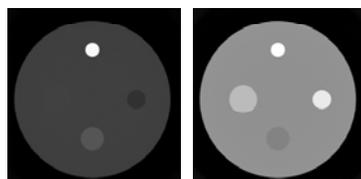
12keV ~ 72keV



能谱信息合成-物质分辨

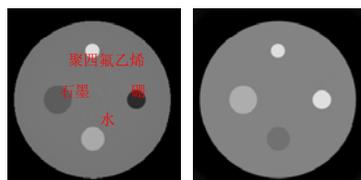
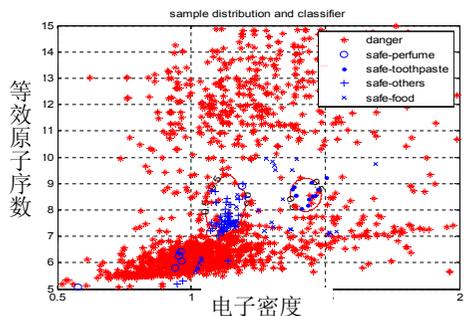
基图像/衰减曲线

$$z^{\text{eff}} = \frac{\text{等效原子序数}}{\text{电子密度 } \rho_e} = 2.94 \sqrt{c_1 z_1^{2.94} + c_2 z_2^{2.94} + \dots}$$



光电系数

康普顿系数



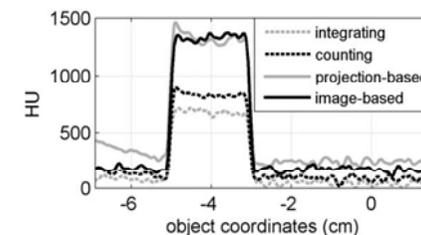
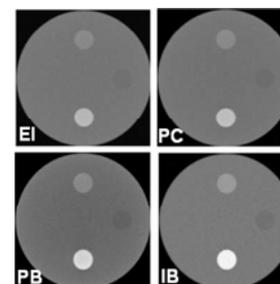
原子序数

电子密度



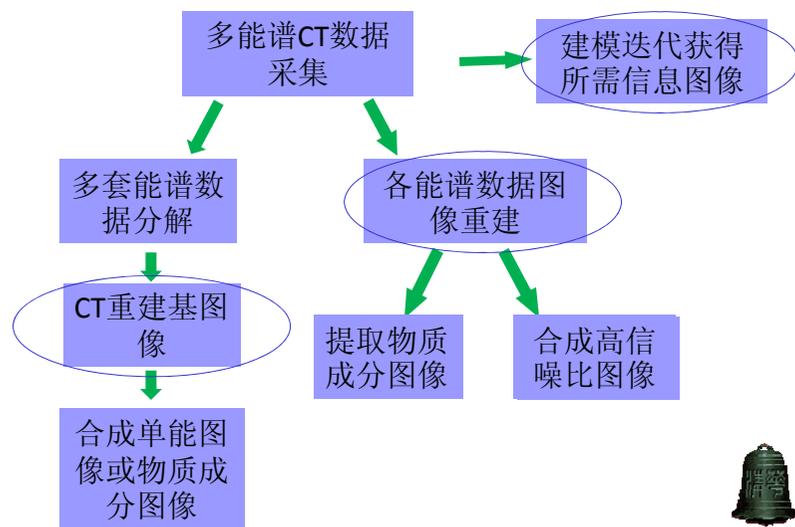
能量加权成像

- 低能数据具有高的对比度分辨率，高能图像具有高的信噪比。对不同能像的数据或者CT图像赋予一定的权重，可以合成对比度和信噪比较好的图像。





能谱CT数据处理方式



主要内容

- 传统CT成像→多能谱CT成像
- 多能谱CT成像的物理基础和方法
- 基于光子计数探测器的多能谱CT成像的优势
- 多能谱CT成像的应用和发展前景
- 发展多能谱CT成像的研究方向和需求

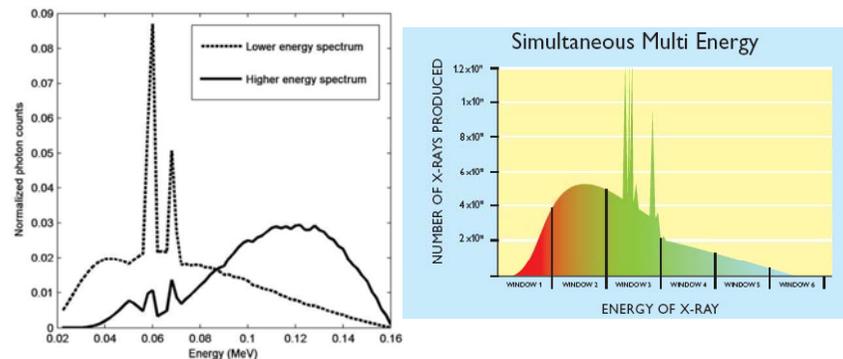


基于光子计数探测器的多能谱CT成像优势

- 不同能量的各个能谱的数据同时采集，数据不需要配准；
- 能谱之间的重叠区域少（甚至接近于零），数据的相关性小，信息量大；
- 能谱可以通过阈值任意选择，方便优化；
- 在电子学容许情况下，可以设置大量能窗数目。
- 计数方式一方面极大降低了电子学噪声，另一方面使数据的泊松分布噪声性质更加明确，有利于重建建模。



能谱相关性和能窗优化

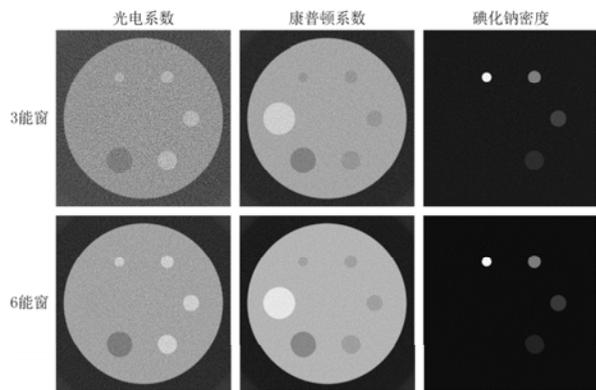


具有高时间分辨率的光子计数探测器，对每个光子入射时间单独处理获取其能量信息，因此可以用于采集不同能量范围内的光子数信息。时光子计数探测器也具有很好的空间分辨率，可用于能谱CT成像。





能窗数目对重建质量的影响



$$\mu(E) = \sum_{\tau=1,2,\dots} a_{\tau} \phi_{\tau}(E)$$

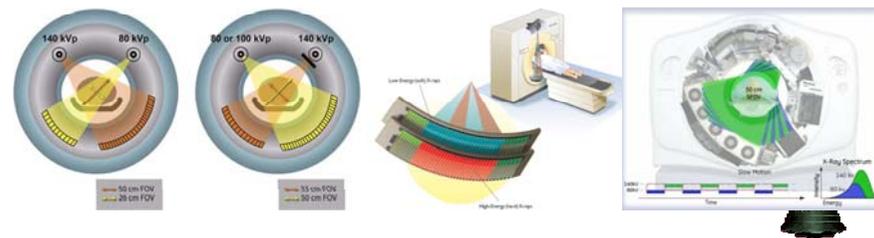
*理想探测器响应情况下



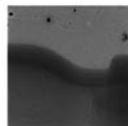
系统复杂度

双能信息采集:

- 双光源双探测器
- 三明治式探测器 (伪双能)
- 能够快速变换能量的光源
- 渐变能量的双能数据采集



基于光子计数探测器的能谱CT系统



(a)

(c)

(b)

(d)



主要内容

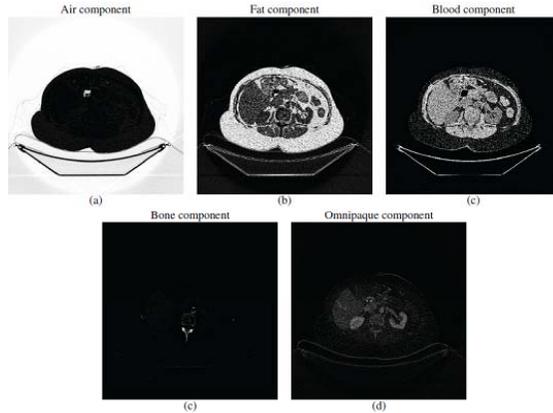
- 传统CT成像 → 多能谱CT成像
- 多能谱CT成像的物理基础和方法
- 基于光子计数探测器的多能谱CT成像的优势
- **多能谱CT成像的应用和发展前景**
- 发展多能谱CT成像的研究方向和需求





多能谱CT的应用-- 材料分解重建

- 利用两组或多组能谱数据，可以重建出不同材料的分解图像，例如软组织和骨质。

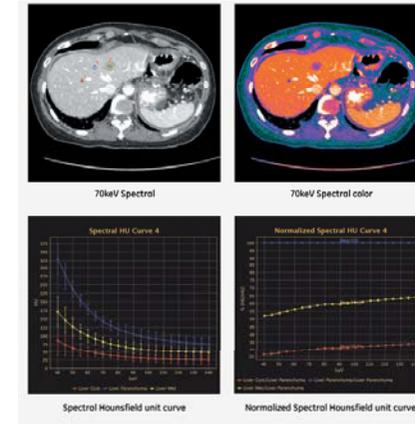


-- Images from Paulo R. S. Mendonca et al, SPIE 2010

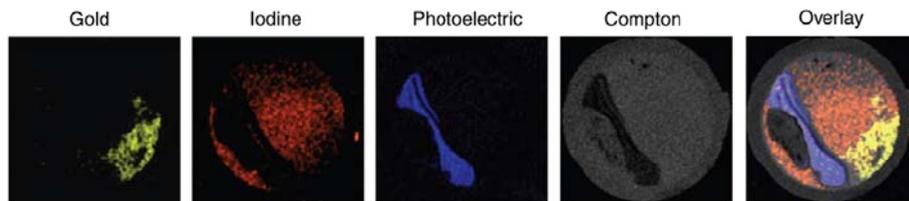
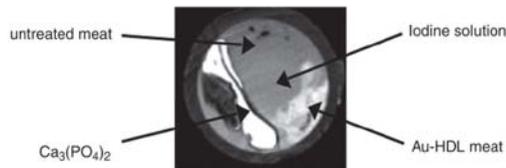


多能谱CT的应用— 彩色CT

- 利用能谱CT得到的单能图像，可以按照预先设定好的颜色编码合成出一幅彩色图像。



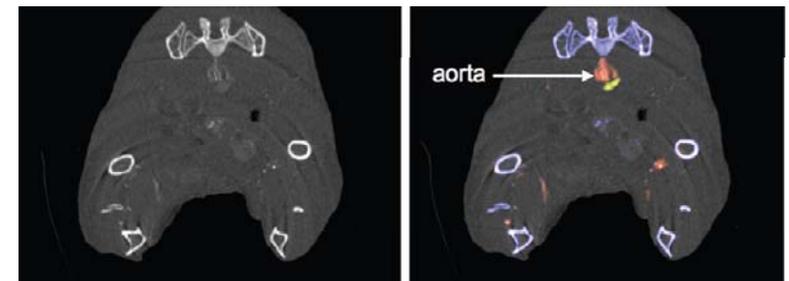
多能谱CT的应用— 材料分解和彩色CT



Images from D. P. Cormode et al, Radiology, 2010



多能谱CT的应用— 材料分解和彩色CT 心血管成像



注入 Au-HDL 和 碘乳化剂对心血管成像
黄色: 金, 红色: 碘, 蓝色: 光电效应, 灰色: 康普顿

Images from D. P. Cormode et al, Radiology, 2010



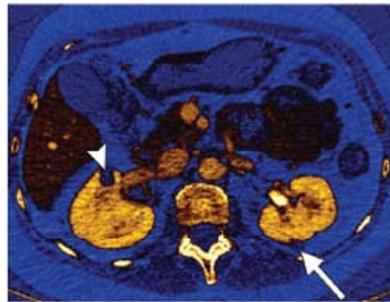


多能谱CT的应用— 材料分解和彩色CT

腹部检查



传统对比材料增强CT图像：
左肾有高密度缺陷(病变)，
右肾有低密度病变(两个箭头所示)



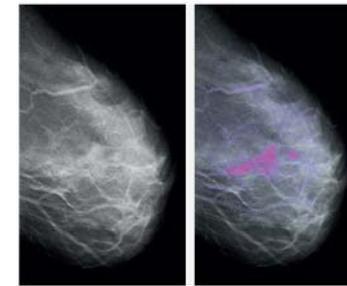
碘成分图像(黄色是碘血管对比造影剂)，
双肾的病变都没有碘成分，因此都是无血性的。

-- Images From A. G. Silva et al, Radio Graphics, 2011



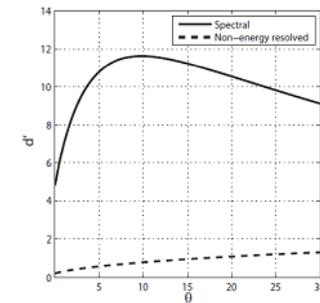
多能谱CT的应用— 双能乳腺层析

- 对比增强的能谱层析相对于普通层析对于肿瘤的检测能力可以提高近10倍。



传统层析

使用造影剂的多能谱层析



检测率曲线

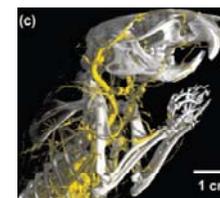


多能谱CT的应用前 景和潜力

医学应用前景：

- 物质/材料区分
- 信噪比

功能扩展
减少剂量
提高成像效率



- 图像的骨头部分去除，消除骨头部分对图像的干扰，提高诊断鲁棒性
- 钙质的量化估计
- 增强软骨、韧带等的显示
- 肾结石的区分
- 虚拟去造影剂图像生成
- 肿瘤/囊肿定性
- 减少某些成像如肠镜所需的预准备工作
- 钙化斑的定性
- 多造影剂同时成像
- ...

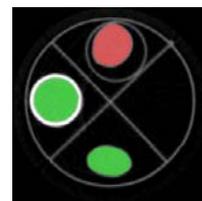
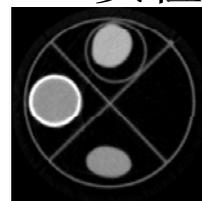
Image from P. V. Granton, Med. Phys. 2008



能谱CT的应用— 安检



行李安检



液体安检



图像来自同方威视公司





主要内容

- 传统CT成像→多能谱CT成像
- 多能谱CT成像的物理基础和方法
- 基于光子计数探测器的多能谱CT成像的优势
- 多能谱CT成像的应用和发展前景
- 发展多能谱CT成像的研究方向和需求



发展多能谱CT的研究方向

- 硬件：
 - 光子计数探测器的成本
 - 探测器面积
 - 光子计数率
 - 探测器的串扰 (charge sharing)、死时间、稳定性等
- 方法
 - 系统建模和优化
 - 能谱信息分解与合成
 - 局部能谱CT
- 挖掘更多针对性的应用

$$I_s = \int_s I_0^s(E) \exp(-\mu(E)) dE$$



参考文献

- http://clinical.netforum.healthcare.philips.com/us_en/Explore/White-Papers/CT/Exploring-the-spectrum-Advances-and-potential-of-spectral-CT
- Experimental feasibility of multi-energy photon-counting K-edge imaging in pre-clinical computed tomography, *Phy Med Bio*, 2008
- Implementation of dual- and triple-energy cone-beam micro-CT for postreconstruction material decomposition, *Med. Phys*, 2008
- Atherosclerotic Plaque Composition: Analysis with Multicolor CT and Targeted Gold Nanoparticles, *Radiology*, 2010
- Spectroscopic (multi-energy) CT distinguishes iodine and barium contrast material in MICE, *Eur Radiol*, 2010
- A reconstruction method for dual high-energy CT with MeV X-rays, *IEEE tran Nucl. Sci.*, 2011
- 多能谱X射线成像技术及其在CT中的应用, *CT理论与应用研究*, 2011
- Statistical Reconstruction of Material Decomposed Data in Spectral CT, *IEEE tran Med Imag*, 2013
- 能谱CT成像系统设计与重建, *清华大学硕士论文*, 2013
- A General Adaptive Decomposition method for Multi-Energy Spectral CT, *IEEE NSS-MIC*, 2013



谢谢大家!

