



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111788499 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 09

(21) 申请号 201980015666.5

(22) 申请日 2019.01.24

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111788499 A

(43) 申请公布日 2020.10.16

(30) 优先权数据  
62/622,413 2018.01.26 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2020.08.26

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/EP2019/051709 2019.01.24

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02019/145398 EN 2019.08.01

(73) 专利权人 皇家飞利浦有限公司  
地址 荷兰艾恩德霍芬

(72) 发明人 宋犀云 叶京汉 Y·毛 白传勇  
A·安德烈耶夫 G·道蒂  
L·罗曼诺夫 胡志强

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司  
72002  
专利代理师 刘兆君

(51) Int.Cl.  
G01T 1/17(2006.01)

(56) 对比文件  
Daube-Witherspoon, et al. Unified  
Deadtime Correction Model for PET.《IEEE,  
Transactions on medical imaging》.1991,第  
10卷(第3期),正文第1-9页,附图1-7.

审查员 石锐

权利要求书3页 说明书11页 附图5页

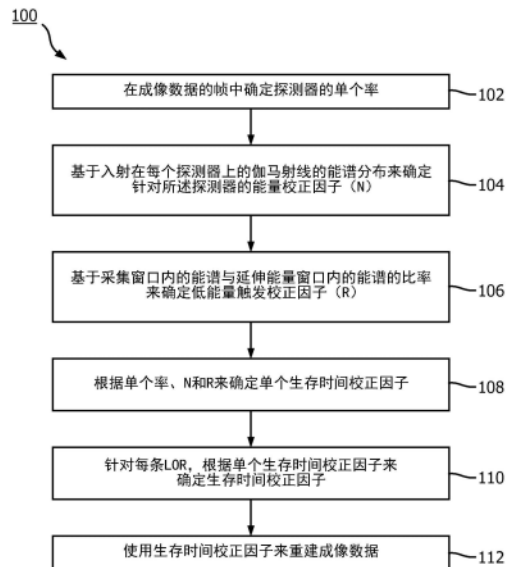
(54) 发明名称

在对各种对象和放射性分布的定量正电子  
发射断层摄影(PET)重建中的死时间校正方法

(57) 摘要

一种非瞬态计算机可读介质存储指令,所述  
指令能由包括至少一个电子处理器(20)的工作  
站(18)读取并运行以执行图像重建方法(100)。  
所述方法包括:在由多个辐射探测器(17)探测到  
的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个  
率;基于在采集成像数据的所述帧期间入射在每  
个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布来确定  
针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{wgt}$ );根  
据针对每个辐射探测器确定的所述单个率和所  
述能量校正因子来确定针对所述辐射探测器的  
单个生存时间校正因子;针对连接辐射探测器的  
对的多条响应线(LOR)中的每条LOR,根据所确定  
的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个  
生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时  
间校正因子;并且使用所确定的LOR生存时间校  
正因子来重建成像数据的所述帧。

CN 111788499 B



1. 一种非瞬态计算机可读介质,其存储指令,所述指令能由包括至少一个电子处理器(20)的工作站(18)读取并运行以执行图像重建方法(100),所述方法包括:

在由多个辐射探测器(17)探测到的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个率;

基于在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布来确定针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ ),其中,对所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )的确定包括:确定函数 $N(E)$ ,其中, $N(E)$ 是由能量 $E$ 的伽马射线产生的触发的统计计数,其中,确定所述函数 $N(E)$ 包括:对来自模拟源的辐射探测器中的能量沉积执行蒙特卡洛模拟,以获得每个能量 $E$ 处的 $N$ 的平均值;并且通过在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的所述能谱分布上对 $N(E)$ 求平均来确定针对所述辐射探测器的所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ );

基于在采集成像数据的所述帧期间入射在所述辐射探测器上的伽玛射线的所述能谱分布中的以下两个部分的比率来确定低能量触发校正因子( $R$ ):(i)落入采集能量窗口(In-Ewindow)中的部分与(ii)落入涵盖所述采集能量窗口和较低的触发能量窗口(Below-Ewindow)的延伸能量窗口(Full-Ewindow)中的部分;

根据针对每个辐射探测器确定的所述单个率、所述能量校正因子以及所述低能量触发校正因子来确定针对所述辐射探测器的单个生存时间校正因子;

针对连接辐射探测器的对的多条响应线(LOR)中的每条LOR,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时间校正因子;并且

使用所确定的LOR生存时间校正因子来重建成像数据的所述帧。

2. 根据权利要求1所述的非瞬态计算机可读介质,还包括:使用对根据成像数据的所述帧重建的初始图像执行的蒙特卡洛模拟来确定在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的所述能谱分布。

3. 根据权利要求1所述的非瞬态计算机可读介质,其中,相同的函数 $N(E)$ 用于针对所述多个辐射探测器中的每个辐射探测器确定所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )。

4. 根据权利要求1-3中的任一项所述的非瞬态计算机可读介质,其中,根据因每个辐射探测器对高于阈值的单个率的处理限制而导致的死时间因子来进一步确定针对所述辐射探测器的所述单个生存时间校正因子。

5. 根据权利要求1-3中的任一项所述的非瞬态计算机可读介质,其中,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子并且还根据取决于针对成像数据的所述帧的系统单个率的所述LOR的符合因子( $L_{\text{符合}}$ )来确定针对每条LOR的所述生存时间校正因子。

6. 一种图像重建方法(100),包括:

在由多个辐射探测器(17)探测到的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个率;

基于在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布来确定针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ ),其中,对所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )的所述确定包括:确定函数 $N(E)$ ,其中, $N(E)$ 是由能量 $E$ 的伽马射线产生的触发的统计计数,其中,确定所述函数 $N(E)$ 包括:对来自模拟源的辐射探测器中的能量沉积执行蒙特卡洛模拟,以获得每个能量 $E$ 处的 $N$ 的平均值;并且通过在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射

探测器上的伽马射线的所述能谱分布上对 $N(E)$ 求平均来确定针对所述辐射探测器的所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )；

基于在采集成像数据的所述帧期间入射在所述辐射探测器上的伽玛射线的所述能谱分布中的以下两个部分的比率来确定低能量触发校正因子(R)：(i) 落入采集能量窗口(In-Ewindow)中的部分与(ii) 落入涵盖所述采集能量窗口和较低的触发能量窗口(Below-Ewindow)的延伸能量窗口(Full-Ewindow)中的部分；

根据针对每个辐射探测器确定的所述单个率、所述能量校正因子以及所述低能量触发校正因子来确定针对所述辐射探测器的单个生存时间校正因子；

针对连接辐射探测器的对的多条响应线(LOR)中的每条LOR,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时间校正因子；

使用所确定的LOR生存时间校正因子来重建成像数据的所述帧；并且

执行以下操作中的至少一项：显示成像数据的所重建的帧,以及存储成像数据的所重建的帧。

7. 根据权利要求6所述的方法,还包括：使用对根据成像数据的所述帧重建的初始图像执行的蒙特卡洛模拟来确定在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的所述能谱分布。

8. 根据权利要求6所述的方法,其中,相同的函数 $N(E)$ 用于针对所述多个辐射探测器中的每个辐射探测器确定所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )。

9. 根据权利要求6-8中的任一项所述的方法,其中,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子并且还根据取决于针对成像数据的所述帧的系统单个率的所述LOR的符合因子( $L_{\text{符合}}$ )来确定针对每条LOR的所述生存时间校正因子。

10. 一种成像系统(10),包括：

图像采集设备(12),其包括多个辐射探测器(17)；以及

至少一个电子处理器(20),其被编程为：

在由多个辐射探测器探测到的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个率；

基于在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布来确定针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ ),其中,对所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )的所述确定包括：确定函数 $N(E)$ ,其中, $N(E)$ 是由能量E的伽马射线产生的触发的统计计数,其中,确定所述函数 $N(E)$ 包括：对来自模拟源的辐射探测器中的能量沉积执行蒙特卡洛模拟,以获得每个能量E处的N的平均值；并且通过在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的所述能谱分布上对 $N(E)$ 求平均来确定针对所述辐射探测器的所述能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )；

基于在采集成像数据的所述帧期间入射在所述辐射探测器上的伽玛射线的能谱分布中的以下两个部分的比率来确定低能量触发校正因子(R)：(i) 落入采集能量窗口(In-Ewindow)中的部分与(ii) 落入涵盖所述采集能量窗口和较低的触发能量窗口(Below-Ewindow)的延伸能量窗口(Full-Ewindow)中的部分；

根据针对每个辐射探测器确定的所述单个率、所述能量校正因子以及所述低能量触发校正因子(R)来确定针对所述辐射探测器的单个生存时间校正因子；

针对连接辐射探测器的对的多条响应线 (LOR) 中的每条LOR,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时间校正因子;并且

使用所确定的LOR生存时间校正因子来重建成像数据的所述帧。

11. 根据权利要求10所述的系统 (10), 其中, 所述至少一个电子处理器 (20) 被编程为:

使用对根据成像数据的所述帧重建的初始图像执行的蒙特卡洛模拟来确定在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的所述能谱分布。

## 在对各种对象和放射性分布的定量正电子发射断层摄影 (PET) 重建中的死时间校正方法

### 技术领域

[0001] 下文总体上涉及医学成像领域、发射成像领域、正电子发射断层摄影 (PET) 成像领域、单光子发射计算机断层摄影 (SPECT) 成像领域、医学图像解读领域、图像重建技术以及相关技术。

### 背景技术

[0002] 死时间和堆积是正电子发射断层摄影 (PET) 成像系统的常见问题,它们会导致视场 (FOV) 对放射性的非线性响应。死时间能够被定义为将两个输入信号分辨为单独事件的最短处理时间。当探测器仍在忙于处理前一个事件时,如果有一个新的有效事件到达,则可能会丢失新事件,从而导致计数损失。在堆积的情况下,一个以上的入射光子会在同一探测器中沉积能量,但会被触发为单个事件,这与死时间损失相似,并且会导致读出的能量高于实际的能量。这导致入射事件的堆积移位能谱。当事件的能量从最初低于能量窗口的下限阈值(例如,散射光子)被移位到能量窗口内时,会导致计数增加。当它将事件的能量从能量窗口内移位到能量窗口的上限阈值之上时,会导致计数损失。死时间和堆积的总的的影响能够被看作是“有效的”死时间(参见 Esther Vicente、Joaquin Lopez Herraiz 等人的“Improved dead-time correction for PET scanners: application to small-animal PET” (Physics in Medicine and Biology, 2013年3月)。通常,活跃性越高,因死时间导致的计数损失分数就越高。众所周知,总的死时间损失分数会随着对象大小、形状和放射性分布而变化(参见 Yamamoto S、Amano M、Miura S 等人“Deadtime correction method using random coincidence for PET” (J.Nucl.Med.27 1925-8)。

[0003] M.E.Daube Witherspoon和R.E.Carson的“Unified Deadtime Correction Model for PET” (IEEE Transactions on Medical Imaging 10,1991年,第3期,第267-275页)描述了已经开发出针对在具有二维探测器的PET扫描器中的发射和传输扫描的死时间的模型。该模型考虑了因单个损失和多个事件引起的符合损失以及因探测器块内的脉冲堆积导致的较高计数率下的位置错误。该模型适用于发射分布以及利用旋转传输源看到的空间变化的单个分布。还开发出了基于衰减发射研究来确定该模型的参数的自动流程。由于不同单个的能谱不同,因此发射和空白分布需要不同的单个死时间因子。该模型已经在 Scanditronix PC2048-15B扫描器上进行了发射和传输数据测试。

[0004] S.R.Meikle等人在“Positron emission Tomography”中的“quantitative Techniques in PET” (2005年1月1日, Springer-Verlag, ISBN978-1-85233-798-8, 第93-126页)中讨论了PET中的各种测量误差的来源。描述了校正这些误差来源的方法学方法,并且评价了这些方法学方法的相对优点及其对PET图像的定量准确性的影响。

[0005] B.Guerin等人的“Realistic PET Monte Carlo Simulation with Pixelated Block Detectors, Light Scattering, Random Coincidences and Dead-Time Modeling” (IEEE Transactions on Nuclear Science, 第55卷, 第3期, 第942-952页)描述了他们已经

开发出并验证了基于SimSET蒙特卡洛模拟软件对2D和3D正电子发射断层摄影(PET)成像中的随机符合、像素化块探测器、晶体元素之间的光共享以及死时间的真实模拟。通过与广泛用于PET建模的蒙特卡洛传输代码GATE以及在PET扫描器上得到的测量结果进行比较,验证了他们的模拟。方法:他们修改了SimSET软件以允许独立跟踪对象和隔膜中的单个光子,同时利用了现有的基于体素的衰减和活动分布以及在SimSET中实施的经经验证的重要采样技术。针对在探测器中相互作用的每个单个光子,计算相互作用点的能量加权平均值,应用模糊模型来考虑光共享并识别相关联的晶体。使用方差减小技术在每一个块中将探测器死时间建模为局部单个率的函数。将整个扫描器的电子死时间建模为即时符合率的函数。将通过该模拟预测的能谱与GATE进行比较。利用新的模拟以及SimSET对NEMA NU-2 2001性能测试进行模拟并将其与在Discovery ST (DST) 相机上做出的测量结果进行比较。结果:利用新的模拟在2D (3D) 中的模拟的空间分辨率(半高全宽EWHM)的误差为5.5% (6.1%),而利用SimSET的EWHM误差为42.5% (38.2%)。在2D中的模拟(测得)的散射分数为17.8% (21.3%),而在3D中的模拟(测得)的散射分数为45.8% (45.2%)。对于所有平面,2D和3D中的模拟的和测得的灵敏度在2.3%的范围内一致,并且在[0:80kBq/cc]的范围内在2D中和在[0:35kBq/cc]范围内在3D中的模拟的和采集的计数率曲线(包括NEC)在12.7%内。据描述,与SimSET软件相比,新的模拟产生了更为逼真的单个谱和符合谱、空间分辨率、全局敏感性以及病变对比度。

[0006] 为了获得定量结果,应当校正PET数据以解决因死时间导致的损失。

[0007] 在当前PET系统中部署的死时间校正通常是在图像重建阶段期间实施的。简而言之,这样的系统将因死时间导致的损失建模为所有探测器的总系统平均单个率(singles rate)(被称为系统单个率)的函数,以便区别于个体探测器的单个率。该方法基于两个假设:1)所有响应线(LOR)因死时间而经历的计数损失的量(或分数)相同;2)所有PET成像研究因死时间而经历的计数损失的量(或分数)相同,只要系统的单个率相同即可,而不管其大小、形状或放射性分布如何。更具体地,它采用根据对一个床位置处的采集开始和采集结束求平均的系统单个率,从死时间校正因子相对于系统单个率的查找表中搜索缩放因子,然后在重建期间将该内插的缩放因子等地应用于所有事件或所有LOR以用于死时间校正。该查找表是根据使用填充有均匀分布的放射性并被放置在PET系统的FOV的中心处的圆柱体体模(例如直径为20cm)的校准流程来预先生成的。然后,不管对象形状和放射性分布如何变化,查找表都用于所有顺序研究,直到被新的校准取代为止。

[0008] 上述方法有一些缺点。由于个体探测器(或探测器块)的单个率会随着对象的活动和衰减分布而变化,因此,死时间导致的损失也会随着每个探测器和LOR而变化。上面的方法忽视了这种差异并且假设所有LOR因死时间导致的损失分数相同。

[0009] 此外,死时间校准查找表是使用被放置在FOV中心处的特定均匀圆柱体体模的数据生成的,然后仅基于一个参数——系统单个率将被应用于各种患者/对象的所有顺序研究。在实践中,针对不同的设置(例如,使用较大的体模、线源、点源或不均匀的患者分布),即使系统单个率相同,实际的死时间损失也会与校准研究中观察到的情况明显不同。通常,查找表中描述的死时间校正因子相对于系统单个率之间的关系仅对类似于该均匀圆柱体体模设置的对象有效。当将其应用于其他设置或临床患者时,可能会导致明显的偏差。实际上,这是美国国家电气制造商协会(NEMA)准确性(相对计数率误差)测试的主要降级因素,

在该测试中,线源在冷气瓶背景中被偏心放置。

[0010] 下文公开了克服这些问题的新的且改进的系统和方法。

### 发明内容

[0011] 在一个公开的方面中,一种非瞬态计算机可读介质存储指令,所述指令能由包括至少一个电子处理器的工作站读取并运行以执行图像重建方法。所述方法包括:在由多个辐射探测器探测到的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个率;基于在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布来确定针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ );根据针对每个辐射探测器确定的所述单个率和所述能量校正因子来确定针对所述辐射探测器的单个生存时间校正因子;针对连接辐射探测器的对的多条响应线(LOR)中的每条LOR,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时间校正因子;并且使用所确定的LOR生存时间校正因子来重建成像数据的所述帧。

[0012] 在另一个公开的方面中,一种图像重建方法包括:在由多个辐射探测器探测到的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个率;基于在采集成像数据的所述帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布来确定针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ );基于在采集成像数据的所述帧期间入射在所述辐射探测器上的伽玛射线的所述能谱分布中的以下两个部分的比率来确定低能量触发校正因子(R):(i)落入采集能量窗口(In-Ewindow)中的部分与(ii)落入涵盖所述采集能量窗口和较低的触发能量窗口(Below-Ewindow)的延伸能量窗口(Full-Ewindow)中的部分;根据针对每个辐射探测器确定的所述单个率、所述能量校正因子以及所述低能量触发校正因子来确定针对所述辐射探测器的单个生存时间校正因子;针对连接辐射探测器的对的多条响应线(LOR)中的每条LOR,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时间校正因子;使用所确定的LOR生存时间校正因子来重建成像数据的所述帧;并且执行以下操作中的至少一项:显示成像数据的所重建的帧,以及存储成像数据的所重建的帧。

[0013] 在另一个公开的方面中,一种成像系统包括:图像采集设备,其包括多个辐射探测器;以及至少一个电子处理器,其被编程为:在由多个辐射探测器探测到的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个率;基于在采集成像数据的所述帧期间入射在所述辐射探测器上的伽玛射线的能谱分布中的以下两个部分的比率来确定低能量触发校正因子(R):(i)落入采集能量窗口(In-Ewindow)中的部分与(ii)落入涵盖所述采集能量窗口和较低的触发能量窗口(Below-Ewindow)的延伸能量窗口(Full-Ewindow)中的部分;根据所述单个率和所述低能量触发校正因子(R)来确定针对每个辐射探测器的单个生存时间校正因子;针对连接辐射探测器的对的多条响应线(LOR)中的每条LOR,根据所确定的由所述LOR连接的辐射探测器的所述对的单个生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时间校正因子;并且使用所确定的LOR生存时间校正因子来重建成像数据的所述帧。

[0014] 一个优点在于提供了具有改进的死时间校正的发射成像系统。

[0015] 另一个优点在于补偿了个体LOR之间的死时间变化以及不同成像对象之间的死时间变化。

[0016] 另一个优点在于补偿了不同成像参数(例如,较大的体模、线源、点源或不均匀的患者分布等)之间的死时间损失偏差。

[0017] 给定的实施例可以提供前述实施例中的零个、一个、两个、更多个或所有优点,并且/或者可以提供其他优点,这对于本领域普通技术人员在阅读和理解了本公开内容后将变得显而易见。

### 附图说明

[0018] 本公开内容可以采取各种部件和各种部件的布置以及各个步骤和各个步骤的安排的形式。附图仅出于图示优选实施例的目的,且不应被解释为对本公开内容的限制。

[0019] 图1图解性地示出了根据一个方面的图像重建系统;

[0020] 图2示出了图1的系统的示例性流程图操作;

[0021] 图3示出了图1的系统的另一示例性流程图操作;

[0022] 图4示出了针对图1的系统的N(E)关系的示例;并且

[0023] 图5示出了作为图1的系统的系统单个率 $\lambda_{\text{系统}}$ 的函数的 $L_{\text{符合}}$ 的示例。

### 具体实施方式

[0024] 在高计数率下对死时间的校正非常重要。在这种情况下,探测器探测伽马射线所花费的有限时间(即“死时间”)导致探测器丢失后续的伽马射线的可能性是不可忽略的。由于在PET中探测响应线(LOR),因此必须考虑针对每个涉及到的探测器的死时间。相比之下,其他一些成像模态(例如,单光子发射计算机断层摄影(SPECT))探测单个光子,使得仅针对单个探测器的死时间是相关的。能够使用针对每个探测器的“生存时间”的乘积来计算PET中511keV的伽马射线的探测概率,其中,生存时间是死时间的相反情况。除了个体探测器死时间以外,还可能在与生成沿着LOR的符合计数相关联的死时间分量。例如,该“符合”分量可以例如在符合探测单元(CDU)中捕获处理时间,以识别两个在时间上符合的探测事件并将它们匹配为符合计数。再次使用生存时间来确定乘积公式: $L_A \times L_B \times L_{\text{coin}}$ ,其中, $L_A$ 和 $L_B$ 是针对两个相应的探测器单独计算出的生存时间,并且 $L_{\text{coin}}$ 是与LOR符合形成相关联的生存时间分量。

[0025] 为了计算死时间,可用的数据可以是列表模式数据,即,带有时间戳的单个事件的列表。本文公开的实施例通过考虑其他因素,利用在列表模式数据中可用的(或者可根据列表模式数据推断出的)低水平信息来改进现有的死时间计算。

[0026] 首先,死时间可能比仅根据列表模式数据估计的死时间长,因为归因于由单条伽马射线触发了多个探测器而存在额外的死时间。在这种情况下,“额外”触发不会被记录为列表模式事件,因为计算出的能量不在“In-Ewindow”内,即,能量窗口大致以511keV为中心,在该能量窗口内的事件被视为511keV的伽马射线。但是,这些额外的触发会贡献于死时间,因为可能会丢失在额外的触发期间到达的另一条伽玛射线。为了考虑这些额外的触发,开发了“1对N”校正,它采用形式为N(E)的关系,其中,E是伽马射线能量,并且N(E)是统计学上发生的针对能量E的伽马射线的触发次数。在说明性实施例中,函数N(E)是通过蒙特卡洛模拟来估计的。这能够以一次模拟来完成,并且此后的1对N死时间校正使用所开发的N(E)函数。

[0027] 其次,死时间会受到关于低能量伽马射线的触发的影响。这些伽马射线落在“Below-Ewindow”范围内,该范围太低而无法被记录为列表模式事件,但是对信号进行积分以确定总能量太低所花费的时间又足够长。例如,当Ewindow的下限阈值为480keV时,考虑能量为450keV的事件。在这种情况下,450keV的伽马射线触发探测序列,该探测序列确定能量为450keV。由于该能量低于针对列表模式事件的下限阈值(480keV),因此将丢弃该能量。然而,这种处理会贡献于死时间,因为可能会丢失在处理450keV的伽马射线探测期间到达的另一条伽马射线。为了解决该影响,采用蒙特卡洛模拟来估计每个探测器单元的全窗口(即,In-Ewindow+Below-Ewindow)计数与所记录的(In-Ewindow)计数的比率R。

[0028] 可能会丢失计数的第三个影响归因于硬件限制。例如,一些PET系统在计数率极高时会因存储器限制溢出而丢失计数。在本文公开的一些实施例中,提供额外的死时间以适应这种硬件限制。

[0029] 任选地,考虑的第四个影响是温度,它能够通过使能量光子峰值移位来影响死时间。

[0030] 在本文公开的一些实施例中,根据体模测量结果来确定LOR校正。同样,这能够是对一种类型的探测系统的一次校准。

[0031] 虽然本文针对PET成像系统进行了描述,但是所公开的方法也能够与其他成像模态结合使用,例如,(以光子计数模式操作的)计算机断层摄影(CT)成像系统、单光子发射计算机断层摄影(SPECT)成像系统或混合式系统(例如,PET/CT或SPECT/CT成像系统等)。在诸如SPECT或CT之类的模态中,与成像相关的事件是单个的(而不是像在PET中那样是沿着LOR的符合),因此并不包含与符合方面有关的所公开的死时间校正因子。

[0032] 本文中使用的术语“In-Ewindow”(及其变体)是指其沉积的探测能量落在采集能量窗口内的光子。换句话说,在列表模式数据中包括能量处于In-Ewindow之内的事件;而在列表模式数据中并不包含能量处于In-Ewindow之外的事件。

[0033] 本文中使用的术语“Below-Ewindow”(及其变体)是指其能量下降到采集能量窗的下限阈值以下但是仍然足够高以触发PET探测器的光子。

[0034] 本文中使用的术语“Full-Ewindow”(及其变体)是指In-Ewindow与Below-Ewindow的组合。

[0035] 本文中使用的术语“所有入射单个”(及其变体)是指其能量足够高以触发探测过程的光子。所有入射单个既包括那些符合能量窗口准则的光子,又包括那些由于其能量处于Below-Ewindow而将被拒绝的光子。

[0036] 本文中使用的术语“探测器”(及其变体)是指在死时间方面属于同一处理单元的个体辐射探测器。根据PET系统的不同,它可以是单个探测器(晶体)或一组探测器。在SPECT的情况下,单个探测器合适地是与蜂窝状准直器或其他类型的辐射准直器的孔对准的探测器。

[0037] 本文中使用的术语“生存时间”(及其变体)是指在因死时间造成某种计数损失的情况下输出事件相对于输入事件的分数(或等效地,概率)。例如,生存时间的理论范围是0到1。生存时间为1对应于没有死时间。生存时间为0.8指示:在统计学上讲,探测器在80%的采集时间内可用,而由于处理探测触发的占用而在20%的采集时间内不可用。这些仅仅是说明性示例。

[0038] 本文中使用的术语“测得的单个率”（及其变体）是指从探测系统输出的满足能量窗口准则（即，“In-Ewindow”）的单个率。它可以直接来自采集（如果可用的话），也能够根据其他信息（例如，延迟的符合计数率）间接导出。这两者均被视为测得的单个率。

[0039] 本文中使用的术语“系统单个率( $\lambda_{\text{系统}}$ )”（及其变体）是指在所有探测器上测得的单个率之和。这是为了与个体探测器的测得的单个率区别开。

[0040] 本文中使用的术语“帧”（例如，“成像数据的帧”）指代在一定时间间隔内采集的成像数据集，其被重建以生成对应的重建图像（即，“帧图像”）。在多床PET成像的背景下，可以在固定的床位置处采集帧，在该多床PET成像中，每个这样的帧被重建以生成对应的帧图像，其中，帧图像被结合在一起以产生轴向延伸的最终重建图像。备选地，在“单床”PET成像的背景下，帧可以是对在单个床位置处的患者采集的整个数据集，其被重建以生成（单幅）对应的PET图像。在某些时间间隔后采集的帧也可能在时间上延伸，从而引起动态或门控PET。

[0041] 参考图1，示出了说明性医学成像系统10。如图1所示，系统10包括图像采集设备12。在一个示例中，图像采集设备12能够包括PET/CT成像系统的PET机架，该PET/CT成像系统还包括计算机断层摄影（CT）机架13。在其他示例中，图像采集设备12能够是没有CT部件的独立的PET扫描器。患者台（或病床）14被布置为将患者装载到PET机架12或CT机架13的检查区域16中。PET机架12包括辐射探测器17的阵列（在图1中以示意图形式来指示；通常，PET机架12的辐射探测器被布置为一系列PET探测器环，它们被布置为跨越轴向FOV）。

[0042] 系统10还包括具有典型部件的计算机或工作站或其他电子数据处理设备18，所述典型部件例如为至少一个电子处理器20、至少一个用户输入设备（例如，鼠标、键盘、轨迹球等）22以及显示设备24。在一些实施例中，显示设备24能够是与计算机18分离的部件。工作站18还能够包括一个或多个非瞬态存储介质26（例如，磁盘、RAID或其他磁性存储介质；固态驱动器、闪存驱动器、电可擦除只读存储器（EEROM）或其他电子存储器；光盘或其他光学存储设备；它们的各种组合等）。显示设备24被配置为显示包括一个或多个字段的图形用户接口（GUI）28，以用于从用户输入设备22接收用户输入。

[0043] 至少一个电子处理器20与一个或多个非瞬态存储介质26操作性连接，该一个或多个非瞬态存储介质26存储指令，该指令能由至少一个电子处理器20读取并运行以执行所公开的操作，包括执行图像重建方法或过程100。在一些示例中，图像重建方法或过程100可以至少部分地通过云处理来执行。

[0044] 参考图2，图像重建方法100的说明性实施例被图解性地示为流程图。为了开始该过程，图像采集设备12（例如，PET成像设备）由至少一个电子处理器20配置或控制为采集PET成像数据，该PET成像数据由辐射探测器17来探测。在102处，至少一个电子处理器20被编程为在由多个辐射探测器17探测到的成像数据的帧中确定所述辐射探测器的单个率。这可以使用针对PET系统的实时登记个体PET探测器的单个率的硬件来完成，或者可以根据所采集的列表模式PET成像数据来计算，例如，在一种方法中，通过对延迟的符合进行计数（即，通过使用“延迟的”符合时间窗口来利用PET成像扫描器的可用符合探测能力）来确定针对每条LOR的单个率，并且基于针对涉及该PET探测器的LOR的延迟的符合数据来确定针对给定的PET探测器的单个率。

[0045] 在104处，至少一个电子处理器20被编程为基于在采集成像数据的帧期间入射在

每个辐射探测器17上的伽马射线的能谱分布来确定针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )。为此,至少一个电子处理器20被编程为确定函数 $N(E)$ 的值,其中, $N(E)$ 是由能量 $E$ 的伽马射线产生的触发的统计计数。在一些实施例中, $N(E)$ 是通过以下操作确定的:对来自模拟源的辐射探测器中的能量沉积使用蒙特卡洛模拟以获得每个能量 $E$ 处的 $N$ 平均值,并且将结果得到的 $N(E)$ 函数存储为经验函数、查找表等。然后,至少一个电子处理器20被编程为通过在采集成像数据的帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布上对 $N(E)$ 求平均来确定针对所述辐射探测器的能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )。相同的函数 $N(E)$ 用于针对多个辐射探测器中的每个辐射探测器确定能量校正因子( $N_{\text{wgt}}$ )。

[0046] 在一些实施例中,至少一个电子处理器20被编程为使用对根据成像数据的帧重建的初始图像执行的蒙特卡洛模拟来确定在采集成像数据的帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布。

[0047] 在106处,至少一个电子处理器20被编程为基于在采集成像数据的帧期间入射在辐射探测器上的伽马射线的能谱分布中的以下两个部分的比率来确定低能量触发校正因子( $R$ ):(i)落入采集能量窗口(In-Ewindow)中的部分与(ii)落入涵盖采集能量窗口和较低的触发能量窗口(Below-Ewindow)的延伸能量窗口(Full-Ewindow)中的部分。在一些示例中,至少一个电子处理器20被编程为使用对根据成像数据的帧重建的初始图像执行的蒙特卡洛模拟来确定在采集成像数据的帧期间入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布。可以注意到,单个蒙特卡洛模拟能够产生用于确定用于步骤104的入射在每个辐射探测器上的伽马射线的能谱分布的信息以及用于每个操作106的比率 $R$ 的信息,并且将进一步意识到,可以反转操作104和106的顺序,并且/或者可以使用共同的蒙特卡洛模拟处理部件将操作104和106整合在一起。

[0048] 在108处,至少一个电子处理器20被编程为根据(来自102的)单个率、(来自104的)针对辐射探测器确定的能量校正因子以及(来自106的)低能量触发校正因子来确定针对每个辐射探测器的单个生存时间校正因子。在一些示例中,根据因每个辐射探测器对高于阈值的单个率的处理限制而导致的死时间因子来进一步确定针对所述辐射探测器的单个生存时间校正因子。

[0049] 在110处,至少一个电子处理器20被编程为:针对连接辐射探测器的对的多条LOR中的每条LOR,根据所确定的由LOR连接的辐射探测器的对的单个生存时间校正因子来确定针对所述LOR的生存时间校正因子。在一些示例中,还根据取决于针对成像数据的帧的系统单个率的LOR的符合因子( $L_{\text{符合}}$ )来确定针对每条LOR的生存时间校正因子。在另外的示例中,通过考虑与温度相关的能量峰值光子移位,根据温度传感器的温度值来进一步确定针对每个辐射探测器的单个生存时间校正因子。

[0050] 在112处,至少一个电子处理器20被编程为使用所确定的LOR生存时间校正因子来重建成像数据的帧。然后,至少一个电子处理器20被编程为控制显示设备24以显示重建的帧图像并且/或者控制非瞬态存储介质26以将临床图像存储在合适的数据库(例如,图片存档与通信系统)中。在多站成像的情况下,针对每个帧适当地重复图2的处理,并且在操作112中将结果得到的帧图像结合在一起,并且将结合的帧图像显示为轴向延伸的重建的PET图像。

[0051] 参考图3,用流程图图解性地示出了图像重建方法200的更详细的说明性实施例。

在202处, (例如由图像采集设备12) 采集要重建的成像数据。在204处, 确定图像采集设备12的单个率 $S_T$ 。在206处, 将单个率 $S_T$ 输入到符合生存时间模型以确定符合生存时间因子。在208处, 确定成像数据的延迟符合。在210处, 将延迟符合输入单个率模型以确定每个探测器17的测得的单个率。备选地, 可以从图像采集设备12的硬件获得每个探测器17的单个率。在212处, 执行对成像数据的初始重建以生成中间重建图像和衰减图。在213处, 将中间重建图像和衰减图输入到蒙特卡洛模拟器以确定Full-Ewindow与In-Ewindow的比率 $R_{214}$ 和能谱。在216处, 将能谱输入到1对N模型, 其中, N是用于确定N值的由能量的伽马射线产生的触发的统计计数。在218处, 将(来自210的) 测得的探测器单个采样率、(来自214的) 的Full-Ewindow与In-Ewindow的比率 $R$ 和(来自216的) N值输入到单个生存时间求解器以确定单个生存时间校正因子。在220处, 将(来自206的) 符合生存时间校正因子和(来自218的) 单个生存时间校正因子输入到三部件的组合器以确定在最终的图像重建操作中使用的LOR生存时间因子。

[0052] 示例

[0053] 在以下示例中, 将进一步详细描述图3的过程的各种操作的说明性实施方式。

[0054] 如本文所公开的, 每条LOR (使用其两个探测器标示为 $L(A, B)$ , 其定义对应的LOR) 的生存时间因子被建模为以下三个分量的乘积: 探测器A处的单个探测的生存时间, 探测器B处的单个探测的生存时间, 以及符合形成部分的生存时间, 如公式(1)所示:

$$[0055] \quad L(A, B) = L_{\text{单个}}(\lambda_{m,A}, E_A, R_A) \cdot L_{\text{单个}}(\lambda_{m,B}, E_B, R_B) \cdot L_{\text{符合}}(\lambda_{\text{系统}}) \quad (1)$$

[0056] 在该公式中,  $\lambda_{m,A}$ 和 $\lambda_{m,B}$ 分别是在探测器A和B处测得的单个率。 $E_A$ 和 $E_B$ 分别是在探测器A和B处的入射单个的能谱; $R_A$ 和 $R_B$ 分别是入射Full-Ewindow单个率与入射In-Ewindow单个A和B的比率; $L_{\text{单个}}$ 是作为 $\lambda_m$ 、 $E$ 和 $R$ 的函数的生存时间, 并且忽略了其他因素, 例如, 此时探测器传感器的温度。 $L_{\text{符合}}$ 是符合形成部分的生存时间, 其近似为测得的系统单个率 $\lambda_{\text{系统}}$ 的函数。

[0057] 针对每条LOR导出的单个生存时间将应用于对应的辐射探测器A、B (其探测事件) 中的所有像素。

[0058] 为了导出 $L_{\text{单个}}$ , 取决于实际系统, 通常使用不可瘫痪模型 (公式2)、可瘫痪模型 (公式3) 或混合的不可瘫痪模型与可瘫痪模型 (公式4) 来对每个探测器处的单个探测的生存时间进行建模。在这些公式中,  $\tau$ 是针对每个触发事件的平均有效处理时间,  $\lambda_{\text{事件}}$ 是每个探测器占总触发事件的比率, 并且 $\theta$ 是混合模型中不可瘫痪分量的部分。如果系统是完全可瘫痪的, 则 $\theta$ 为0。

$$[0059] \quad L_{\text{不可瘫痪}} = \frac{1}{1 + \lambda_{\text{事件}} \tau} \quad (2)$$

$$[0060] \quad L_{\text{可瘫痪}} = e^{-\lambda_{\text{事件}} \tau} \quad (3)$$

$$[0061] \quad L_{\text{混合}} \approx \theta \cdot L_{\text{不可瘫痪}} + (1 - \theta) \cdot L_{\text{可瘫痪}} \quad (4)$$

[0062] 在大多数研究中,  $\lambda_{\text{事件}} \tau$ 相对较小, 因此, 能够使用泰勒展开式将公式(2) - (4)近似为(5) - (7):

$$[0063] \quad L_{\text{不可瘫痪}} \approx 1 - \lambda_{\text{事件}} \tau + (\lambda_{\text{事件}} \tau)^2 \quad (5)$$

[0064] 
$$L_{\text{可瘫痪}} \approx 1 - \lambda_{\text{事件}} \tau + \frac{(\lambda_{\text{事件}} \tau)^2}{2} \quad (6)$$

[0065] 
$$L_{\text{单个}} = L_{\text{混合}} \approx 1 - \lambda_{\text{事件}} \tau + \left(\frac{1}{2} + \frac{\theta}{2}\right) (\lambda_{\text{事件}} \tau)^2 \quad (7)$$

[0066] 由于1)Below-Ewindow的光子贡献和2)1→N触发影响,  $\lambda_{\text{事件}}$  能够被视为:

[0067] 
$$\lambda_{\text{事件}} = \lambda_{\text{inci, in-Ewin}} \cdot R \cdot N + b \quad (8)$$

[0068] 其中,  $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}$  是在死时间损失之前的入射In-Ewindow单个率, R是入射Full-Ewindow单个率与入射In-Ewindow单个率的比率, N是归因于1对N触发影响的因子, b是本底率。

[0069] 根据定义, 我们有:

[0070] 
$$L_{\text{单个}} = \frac{\lambda_{\text{Meas}}}{\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}} \quad (9)$$

[0071] 其中,  $\lambda_{\text{Meas}}$  是已经减去了本底率b的测得的单个率。

[0072] 将公式(8)和(9)代入公式(7), 我们得到公式10:

[0073] 
$$\frac{\lambda_{\text{Meas}}}{\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}} = 1 - (\lambda_{\text{inci, in-Ewin}} \cdot R \cdot N + b) \cdot \tau + \frac{(1+\theta)}{2} \left( (\lambda_{\text{inci, in-Ewin}} \cdot R \cdot N + b) \cdot \tau \right)^2 \quad (10)$$

[0074] 该公式能够被重新布置成:

[0075] 
$$\lambda_{\text{Meas}} = \lambda_{\text{inci, in-Ewin}} \cdot \left( 1 - (\lambda_{\text{inci, in-Ewin}} \cdot R \cdot N + b) \cdot \tau + \frac{(1+\theta)}{2} \left( (\lambda_{\text{inci, in-Ewin}} \cdot R \cdot N + b) \cdot \tau \right)^2 \right) \quad (11)$$

[0076] 在该公式中,  $\lambda_{\text{Meas}}$ 、R、N和b能够被认为是在重建期间针对每个探测器为常数。那么, 公式(11)是未知变量  $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}$  的三次方程并且能够被进一步重新布置成:

[0077] 
$$\frac{(1+\theta)}{2} R^2 \cdot N^2 \cdot \tau^2 \lambda_{\text{inci, in-Ewin}}^3 + [(1+\theta)R \cdot N \cdot b \cdot \tau^2 - R \cdot N \cdot \tau] \lambda_{\text{inci, in-Ewin}}^2 + \left( 1 + \frac{(1+\theta)}{2} b^2 \cdot \tau^2 - b \cdot \tau \right) \lambda_{\text{inci, in-Ewin}} - \lambda_{\text{Meas}} = 0 \quad (12)$$

[0078] 通过针对每个探测器求解公式(12), 给出了入射In-Ewindow入射率的答案  $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}$ 。三次方程具有3个根, 即, 1个实根和2个共轭复数根或者3个实根。在死时间问题的场景中, 通常使用1个实根和2个共轭复数根的情况。唯一的实根是针对  $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}$  的解。一旦找到  $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}$ , 就能够使用上面的公式(9)来轻松地获得单个探测的生存时间  $L_{\text{单个}}$ 。在低计数率研究中, 单个探测的生存时间逼近1.0。为了避免在低计数率研究中由噪声引起的偏差, 能够在实践中使用公式(13)来计算生存时间:

[0079] 
$$L_{\text{单个}} = \min \left( \frac{\lambda_{\text{Meas}} + b}{\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}}, 1 \right) = \min \left( \frac{\lambda_{\text{Meas\_with\_bkg}}}{\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}}, 1 \right) \quad (13)$$

[0080] 遵循这个思想, 确定单个探测的生存时间的关键是针对每个探测器建立三次方程(12)。在该公式中, 本底率b和有效事件处理时间  $\tau$  通常对于给定的系统是稳定的。它们能够

根据校准动态研究进行拟合并被认为针对所有探测器是系统水平的常数。其他3个变量 $\lambda_{\text{Meas}}$ 、R和N随着探测器的不同而有所不同,具体取决于研究,因此必须按以下方法来得出。

[0081] 如前所述,能够在采集期间从探测器硬件(如果有的话)直接生成 $\lambda_{\text{Meas}}$ ,或者能够根据延迟符合来导出 $\lambda_{\text{Meas}}$ 。请注意,在 $\lambda_{\text{Meas}}$ 中已经减去了平均本底率b。

[0082] 为了确定N和R,针对给定的探测器系统模型,建立作为入射能量N(E)的函数的N的关系。由于撞击探测器的伽马光子能够将其能量沉积在多个位置或相邻的探测器单元处,因此它可能触发一个或多个(N)事件。N的平均值取决于探测器属性和入射光子能量。因此,针对给定的PET探测器模型,在空气中以各个发射能量(例如,511keV、500keV、475keV、450keV、...、100keV、50keV、25keV)执行从点源进行的探测器中的能量沉积的一系列蒙特卡洛模拟,获得在每个发射能量下每个初级光子的N的平均值,然后据此建立作为入射能量的函数的N的关系N(E)。针对给定的探测器系统模型,这是一次模拟工作。图4示出了关系N(E)的示例。

[0083] 在任何重建中,都执行初始重建以生成放射性分布的中间图像。

[0084] 使用中间图像和衰减图来执行正在运行的快速蒙特卡洛模拟,以针对每个探测器生成以下两项:入射 $\gamma$ 光子的能谱分布 $H(E_k)$ ;入射Full-Ewindow单个计数与入射In-Ewindow单个计数的比率。这是公式(12)所需的R值。

[0085] 根据能谱分布 $H(E_k)$ ,计算归一化能谱密度函数 $P(E_k)$ :

$$[0086] \quad P(E_k) = \frac{H(E_k)}{\sum_{k=1}^M H(E_k)} \quad (14)$$

[0087] 其中,M是能谱分箱数。

[0088] 使用来自步骤1的N(E)关系和来自步骤3的能谱密度函数 $P(E_k)$ 来计算针对每个探测器的加权N值:

$$[0089] \quad N_{\text{wgt}} = \frac{\sum_{k=1}^M P(E_k) \times N(E_k)}{\sum_{k=1}^M P(E_k)} \quad (15)$$

[0090]  $N_{\text{wgt}}$ 是公式(12)所需的N值。

[0091] 在公式(12)中针对每个探测器用 $\lambda_{\text{Meas}}$ 、R、N、 $\tau$ 和b进行替换,对该三次方程求解唯一的实根 $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}$ 。

[0092] 针对可能以极高计数率达到硬件限制(例如,存储器缓冲区溢出、因数据传输带宽引起的包掉落等)的PET系统,无法使用典型的不可瘫痪模型、可瘫痪模型或混合式模型对这种数据损失进行建模。在这些情况下,当测得的In-Ewindow率 $\lambda_{\text{Meas}}$ 和导出的触发事件率( $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}} \cdot R \cdot N$ )均高于某些上限阈值时,可基于经验模型对 $\lambda_{\text{inci, in-Ewin}}$ 应用额外调节。

[0093] 针对极低计数率研究,使用公式(9)或公式(13)来计算单个探测的生存时间 $L_{\text{单个}}$ 。

[0094] 为了导出 $L_{\text{符合}}$ ,将符合形成分量的生存时间 $L_{\text{符合}}$ 建模为系统单个率 $\lambda_{\text{系统}}$ 的函数。针对给定的PET相机模型,通过将结果与仅针对已知真相的单个探测死时间的校正结果进行比较,根据对均匀圆柱体体模的动态研究能够导出 $L_{\text{符合}}$ 与 $\lambda_{\text{系统}}$ 之间的响应关系。再次地,这是针对给定的PET相机模型的一次工作并且适用于所有研究。图5示出了 $L_{\text{符合}}(\lambda_{\text{系统}})$ 的示例。

[0095] 在进行任何其他研究的重建期间,将基于来自上述步骤1的响应函数以及实际的系统单个率来确定 $L_{\text{符合}}$ 并将其应用于所有事件和LOR。

[0096] 以上对 $L_{\text{单个}}$ 和 $L_{\text{符合}}$ 的推导仅考虑主要贡献因素。一些其他因素也可能会影响生存时

间。例如,传感器的温度变化可能会导致灵敏度变化和光子峰值移位。为了进一步提高准确性,能够将这些因素也包括在模型中或者在信息可用时用作调节。

[0097] 已经参考优选实施例描述了本公开内容。他人在阅读和理解前面的具体描述的情况下可以想到修改和替代。本文旨在将本发明解释为包括所有这样的修改和替代,只要它们落入权利要求书及其等价方案的范围内。

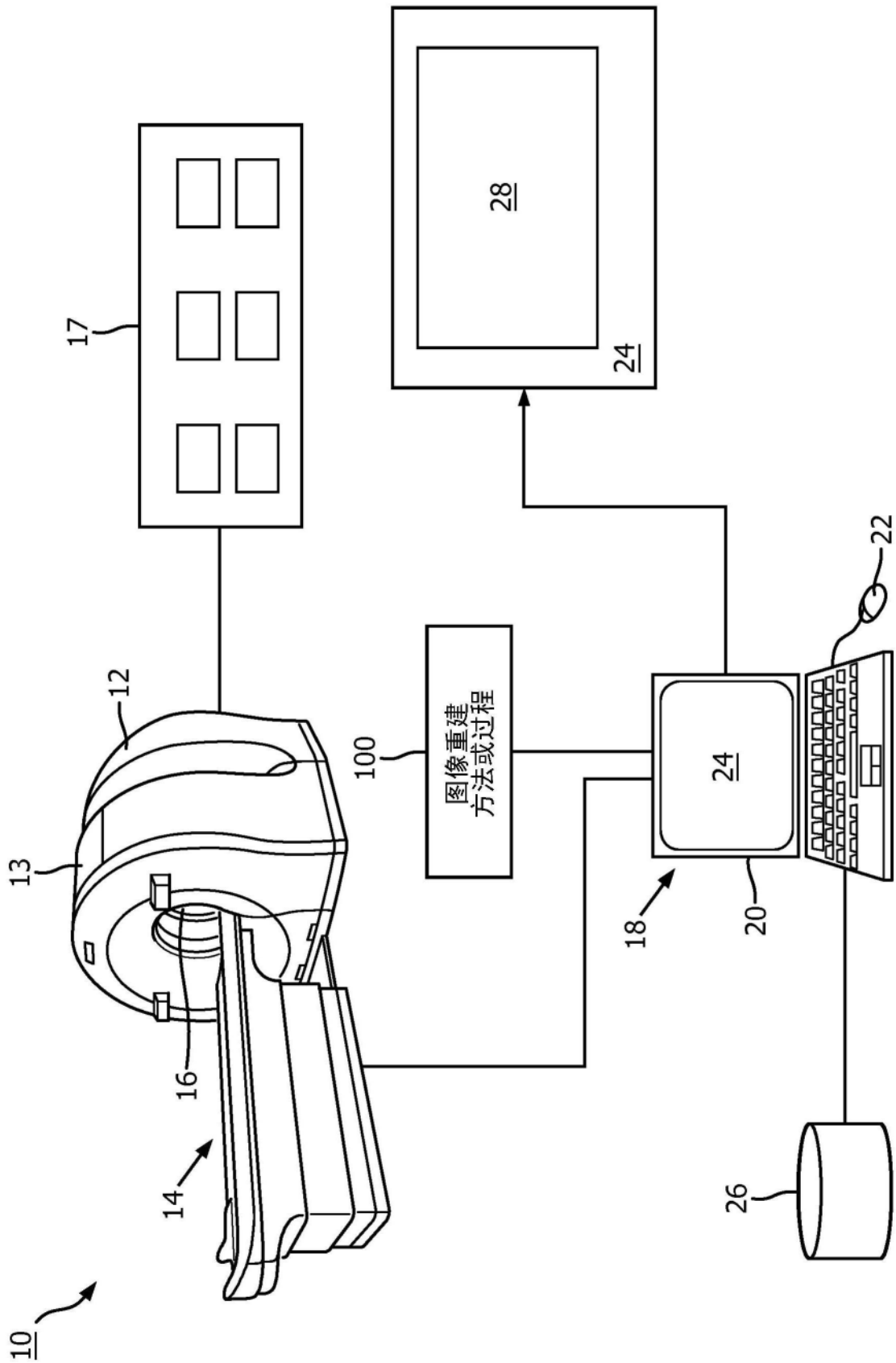


图1

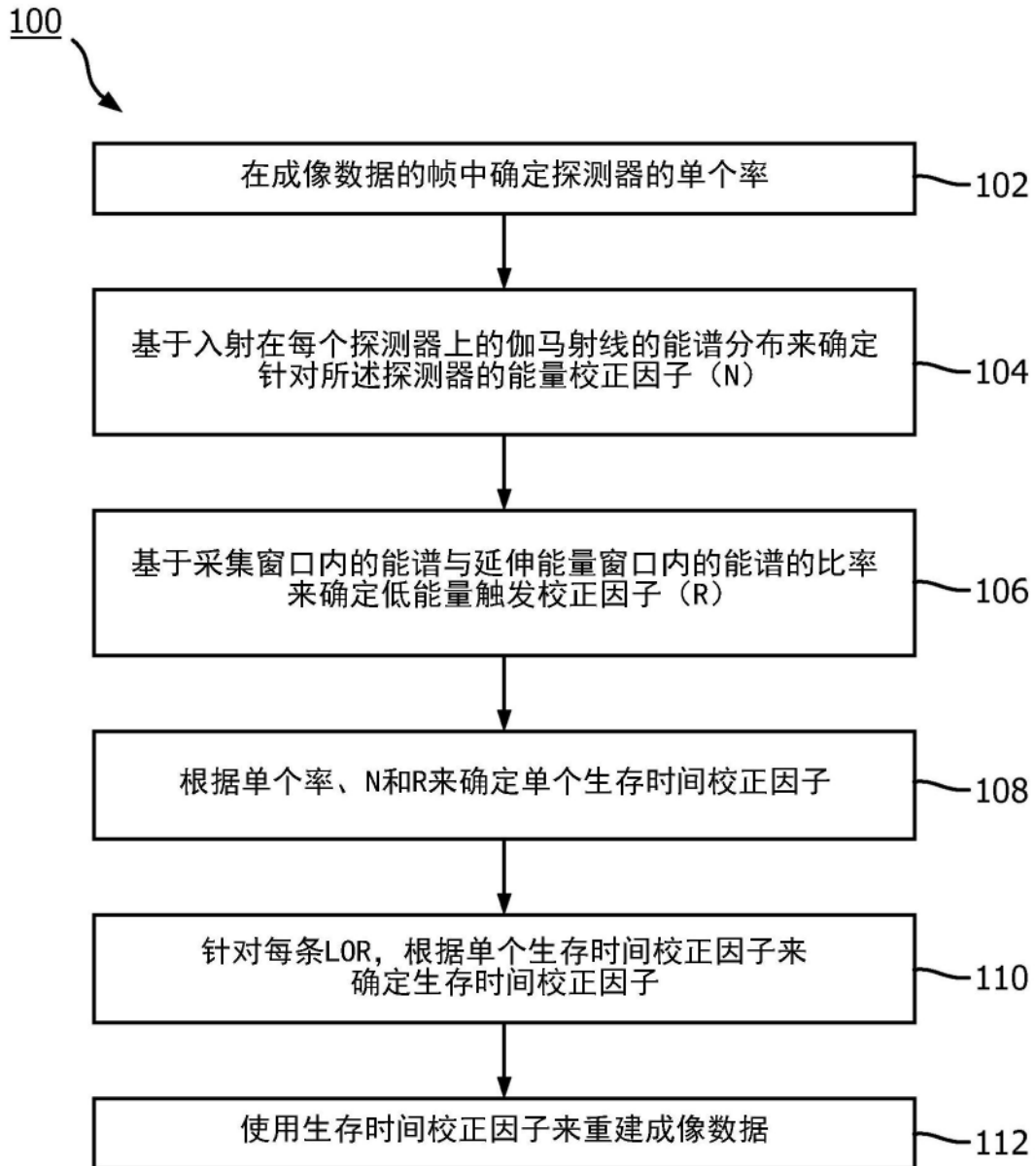


图2

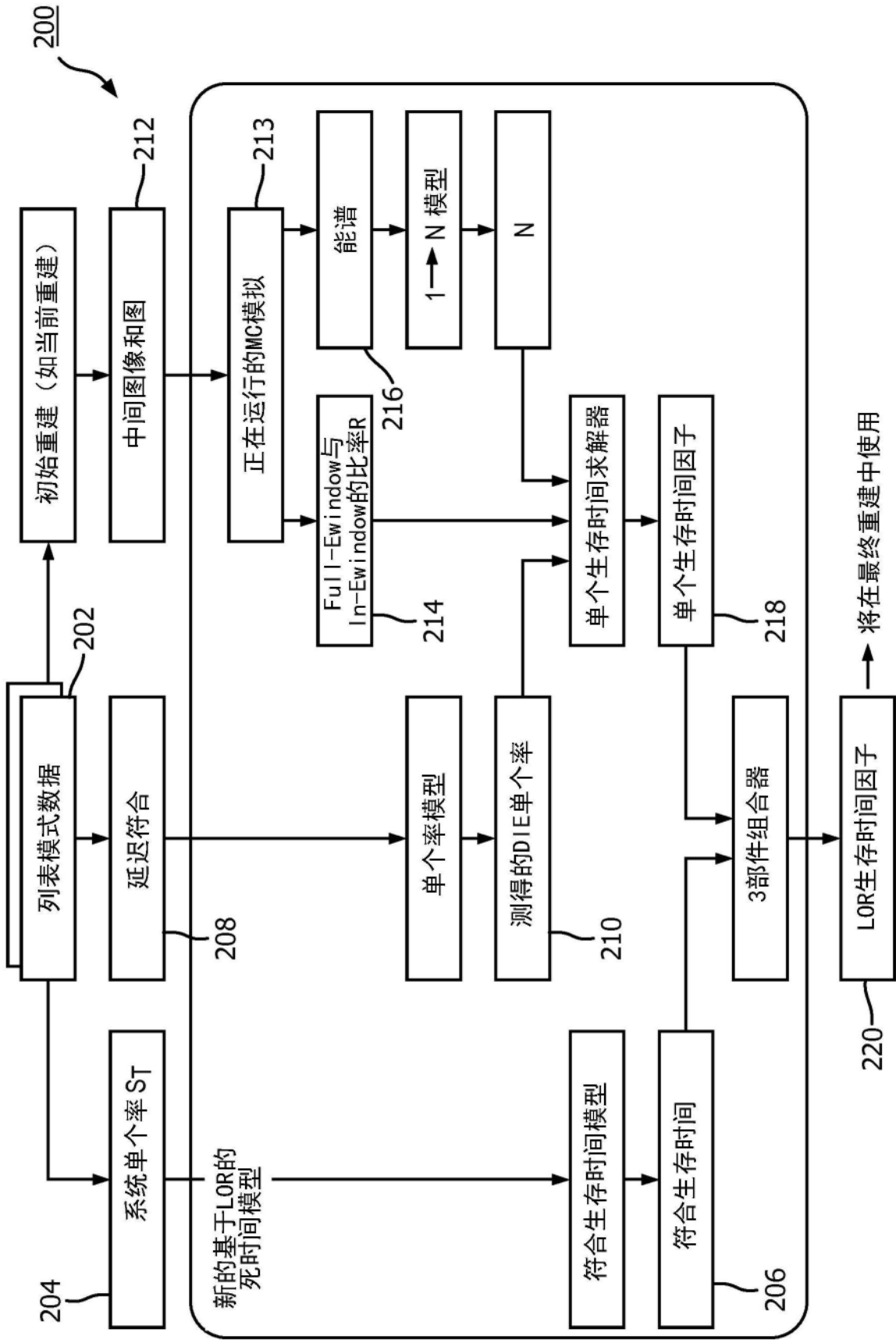


图3

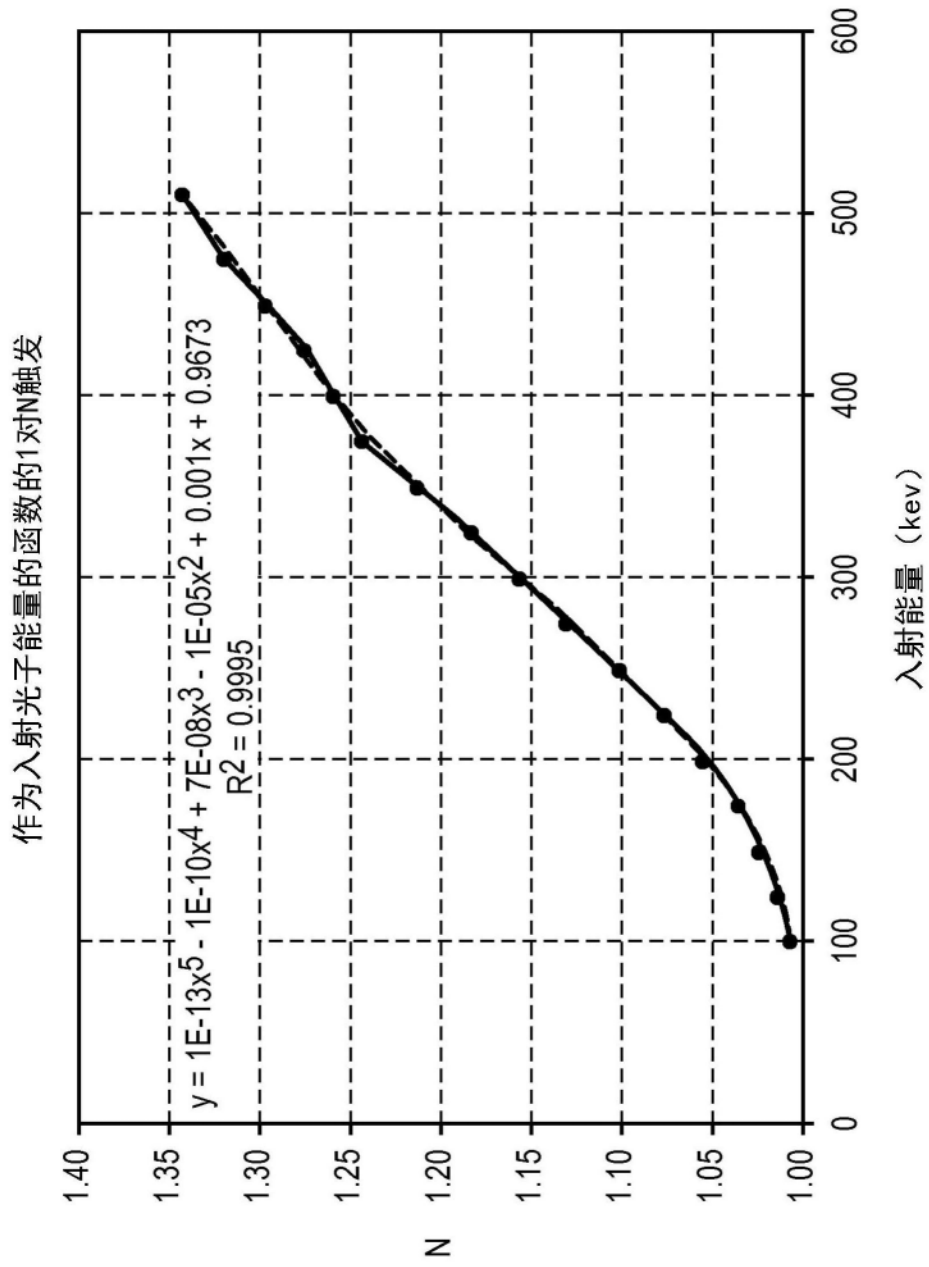


图4

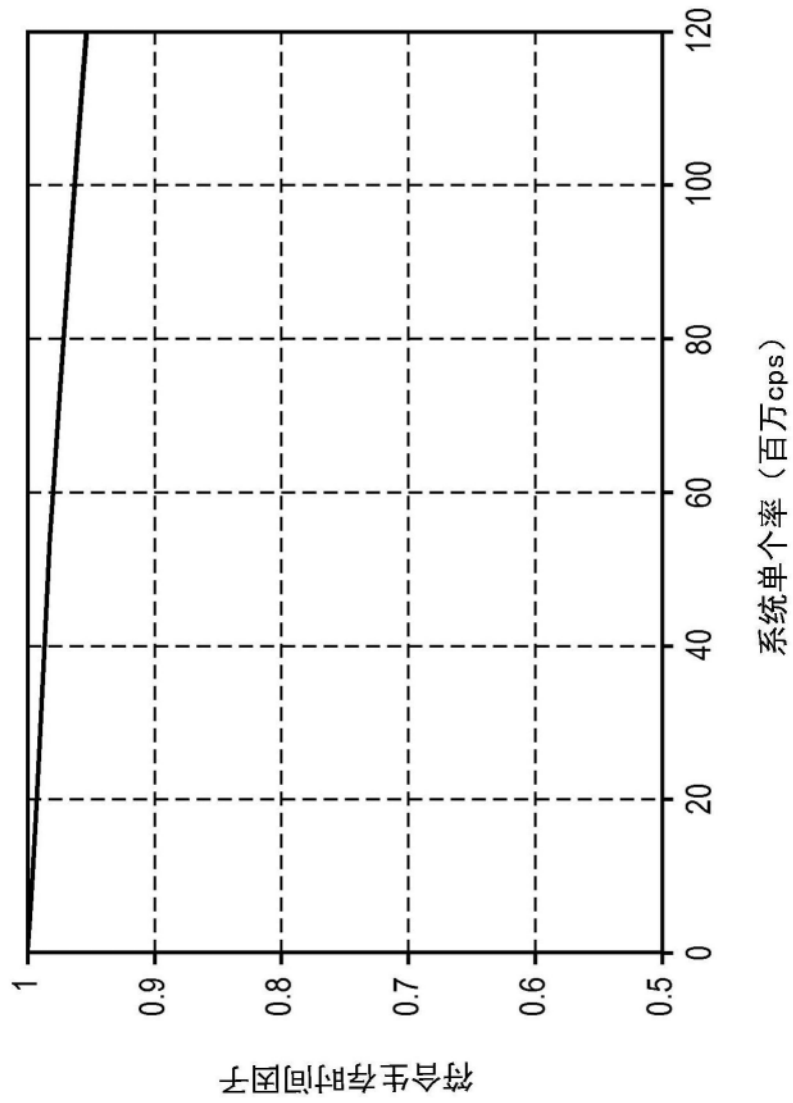


图5