



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106716179 B

(45)授权公告日 2019.08.20

(21)申请号 201580051424.3

(22)申请日 2015.09.17

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106716179 A

(43)申请公布日 2017.05.24

(30)优先权数据
62/053,863 2014.09.23 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.03.23

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/IB2015/057160 2015.09.17

(87)PCT国际申请的公布数据
W02016/046703 EN 2016.03.31

(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 S·X·王 T·L·劳伦斯

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

代理人 孟杰雄 王英

(51)Int.Cl.
G01T 1/29(2006.01)

(56)对比文件
CN 101111781 A,2008.01.23,
CN 103908280 A,2014.07.09,
CN 101163988 A,2008.04.16,
CN 101006363 A,2007.07.25,
CN 101467067 A,2009.06.24,
Paul D. Reynolds 等.《Convex
Optimization of Coincidence Time
Resolution for a High-Resolution PET
System》.《IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL
IMAGING》.2011,第30卷(第2期),

审查员 韩光皓

权利要求书3页 说明书9页 附图4页

(54)发明名称

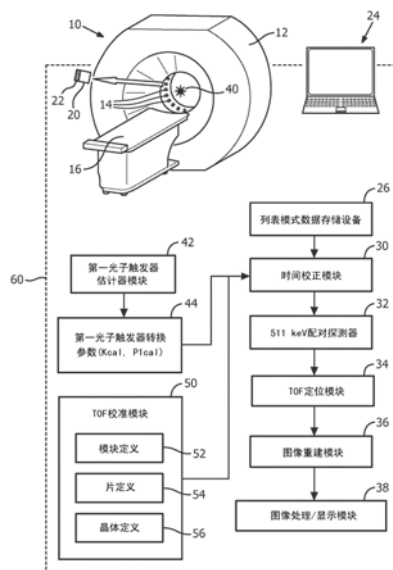
数字正电子发射断层摄影中的飞行时间校准

(57)摘要

用于TOF正电子发射断层摄影(TOF PET)扫描器的辐射探测器元件的飞行时间(TOF)校正结果是通过由对由校准数据定义的超定方程组进行求解来生成的,所述校准数据是由所述TOF PET扫描器从位于所述TOF PET扫描器的等中心点处的点源采集的,所述超定方程组被合适地表示为矩阵方程 $\overline{\Delta t} = CS$,其中, $\overline{\Delta t}$ 表示TOF时间差,C是对所述辐射探测器元件进行编码的关系矩阵,并且S表示所述TOF校正结果。关系矩阵C的伪逆 C^{-1} 可以被计算以求解 $S = C^{-1}\overline{\Delta t}$ 。能够通过由探测器单元识别C中的所述辐射探测器元件来生成针对特定类型的探测器单元的TOF校正结果。

另外,多光子触发的时间戳能够基于 $\sqrt{P1/Pm}$ 被调节为第一光子触发,其中,P1是使用第一光

子触发的平均光子计数,并且Pm是使用多光子触发的光子计数。



1. 一种飞行时间正电子发射断层摄影 (TOF PET) 成像系统, 包括:

TOF PET扫描器 (10), 其包括辐射探测器元件 (14); 以及

电子数据处理设备 (60), 其被编程为:

操作所述TOF PET扫描器以采集基于湮灭事件数据的校准数据, 所述湮灭事件数据是针对发生在位于所述TOF PET扫描器的等中心点处的点源 (40) 中的正负电子湮灭事件而被采集的, 其中, 每个湮灭事件数据包括对探测由所述湮灭事件发射的两条相反指向的511keV伽马射线的所述辐射探测器元件的识别结果和由所述湮灭事件发射的所述两条相反指向的511keV伽马射线的探测结果之间的时间差,

通过对由所述校准数据定义的超定方程组进行求解来生成针对所述辐射探测器元件的TOF校正结果 (92、102、112、122),

操作所述TOF PET扫描器以采集包括从成像对象采集的511keV伽马射线探测事件的列表模式成像数据,

通过将所述TOF校正结果应用于所述列表模式成像数据来生成校正的列表模式成像数据, 并且

重建所述校正的列表模式成像数据以生成所述成像对象的至少部分的重建图像。

2. 根据权利要求1所述的TOF PET成像系统, 其中, 所述电子数据处理设备被编程为通过包括以下的操作来生成针对所述辐射探测器元件的所述TOF校正结果:

对对应于所述校准数据的正负电子湮灭事件的超定方程组进行求解, 所述方程使所述正负电子湮灭事件的时间差与针对所述辐射探测器元件的所述TOF校正结果相关, 其中, 方程的数量大于TOF校正结果的数量。

3. 根据权利要求1-2中的任一项所述的TOF PET成像系统, 其中, 所述电子数据处理设备被编程为通过包括以下的操作来生成针对所述辐射探测器元件的所述TOF校正结果:

针对S对矩阵方程 $\overline{\Delta t} = CS$ 进行求解, 其中, $\overline{\Delta t}$ 存储所述校准数据的时间差, C是对所述辐射探测器元件的所述识别结果进行编码的关系矩阵, 并且S存储所述TOF校正结果。

4. 根据权利要求3所述的TOF PET成像系统, 其中, 所述求解包括计算所述关系矩阵C的伪逆 C^{-1} 并且计算 $S = C^{-1}\overline{\Delta t}$; 并且/或者

其中, 所述求解包括使用奇异值分解 (SVD) 计算所述关系矩阵C的伪逆 C^{-1} 并且计算 $S = C^{-1}\overline{\Delta t}$ 。

5. 根据权利要求3-4中的任一项所述的TOF PET成像系统, 其中, 所述电子数据处理设备被编程为通过包括以下的操作来生成针对所述辐射探测器元件的TOF校正结果:

基于将辐射探测器元件分配到探测器单元的探测器单元定义将所述辐射探测器元件分组成探测器单元, 并且构建所述关系矩阵C以由探测器单元对所述辐射探测器元件的所述识别结果进行编码; 并且

针对S对超定方程组 $\overline{\Delta t} = CS$ 进行求解, 其中, S存储针对所述探测器单元的所述TOF校正结果。

6. 根据权利要求5所述的TOF PET成像系统, 其中, 所述探测器单元定义包括以下中的至少一个: (i) 探测器模块定义, (ii) 探测器片定义, 其中, 探测器片是探测器模块的部件, 以及 (iii) 闪烁体晶体定义, 其中, 每个探测器片包括一个或多个闪烁体晶体。

7. 根据权利要求6所述的TOF PET成像系统,其中,所述电子数据处理设备被编程为:
使用所述探测器模块定义来执行所述分组的操作和所述求解的操作,以生成模块水平的TOF校正结果(102);

将所述模块水平的TOF校正结果应用于所述校准数据,以生成模块TOF校正的校准数据;并且

使用对所述模块TOF校正的校准数据进行操作的探测器片定义来执行所述分组的操作和所述求解的操作,以生成片水平的TOF校正结果(112);

将所述片水平的TOF校正结果应用于所述模块TOF校正的校准数据,以生成模块TOF校正的校准数据和片TOF校正的校准数据;并且

针对对所述模块TOF校正的校准数据和所述片TOF校正的校准数据进行操作的闪烁体晶体定义执行所述分组的操作和所述求解的操作,以生成闪烁体晶体水平的TOF校正结果(122)。

8. 根据权利要求1-7中的任一项所述的TOF PET成像系统,其中,所述电子数据处理设备被编程为操作所述TOF PET扫描器以使用多光子触发来采集列表模式成像数据,并且所述电子数据处理设备还被编程为:

将所述列表模式成像数据的时间戳调节为将使用第一光子触发获得的值。

9. 根据权利要求1-7中的任一项所述的TOF PET成像系统,其中,所述电子数据处理设备被编程为根据以下公式将使用多光子触发采集的所述列表模式成像数据的时间戳 TS_m 调节为估计的第一光子触发的时间戳 TS_1 :

$$TS_1 = TS_m - a\sqrt{\frac{b}{P_m}}$$

其中,a和b是常数,并且 P_m 是针对使用多光子触发采集的列表模式成像数据的光子计数。

10. 根据权利要求1-7中的任一项所述的TOF-PET成像系统,其中,至少一个辐射探测器元件包括闪烁体和与所述闪烁体耦合的光探测器;并且其中,所述电子数据处理设备(60)被编程为通过以下来估计成像辐射探测事件的第一光子触发的时间戳:

基于由所述辐射探测器元件使用第一光子触发采集的校准数据来确定针对利用第一光子触发进行操作的所述辐射探测器元件的平均光子计数 P_1 ;

确定针对由所述辐射探测器元件在对象的成像期间使用多光子触发探测到的成像辐射探测事件的光子计数 P_m ;并且

基于 P_1 和 P_m 的值来估计针对所述成像辐射探测事件的第一光子触发的时间戳。

11. 一种方法,包括:

通过对由基于湮灭事件数据的校准数据定义的超定方程组进行求解来生成针对飞行时间正电子发射断层摄影(TOF PET)扫描器(10)的辐射探测器元件(14)的飞行时间(TOF)校正结果(92、102、112、122),所述校准数据是由所述TOF PET扫描器针对发生在位于所述TOF PET扫描器的等中心点处的点源(40)中的正负电子湮灭事件而采集的;其中,每个湮灭事件数据包括对探测由所述湮灭事件发射的两条相反指向的511keV伽马射线的所述辐射探测器元件的识别结果和由所述湮灭事件发射的所述两条相反指向的511keV伽马射线的探测结果之间的时间差;并且

使用所生成的TOF校正结果来校正由所述TOF PET扫描器(10)从成像对象采集的列表模式成像数据的时间戳;

其中,所述生成的操作和所述校正的操作由电子数据处理设备(60)执行。

12. 根据权利要求11所述的方法,其中,所述生成的操作包括:

对所述511keV伽马射线探测事件执行时间窗处理,以识别对应于正负电子湮灭事件的511keV伽马射线探测事件对;并且

对超定方程组 $\Delta t_d = s_i + s_j$ 进行求解,其中,d标引第d个511keV伽马射线探测事件对,i和j标引探测到第d个511keV伽马射线探测事件对的两个辐射探测器元件, Δt_d 指代所述511keV伽马射线探测事件对的伽马射线探测结果之间的时间差, s_i 指代针对第i个辐射探测器元件的所述TOF校正结果,并且 s_j 指代针对第j个辐射探测器元件的所述TOF校正结果。

13. 根据权利要求12所述的方法,其中,所述生成的操作包括:

由矩阵方程 $\overline{\Delta t} = CS$ 表示所述超定方程组 $\Delta t_d = s_i + s_j$,其中, $\overline{\Delta t}$ 表示所述511keV伽马射线探测事件对的TOF时间差,C是对探测到每个511keV伽马射线探测事件对的所述辐射探测器元件进行编码的关系矩阵,并且S表示所述TOF校正结果;并且

针对S对所述矩阵方程 $\overline{\Delta t} = CS$ 进行求解,以生成所述TOF校正结果。

14. 根据权利要求11-13中的任一项所述的方法,其中所述生成包括:

由探测器单元基于将所述TOF PET扫描器的辐射探测器元件分配到探测器单元的探测器单元定义来对所述校准数据进行分组;并且

对由所述校准数据定义的所述超定方程组进行求解,其中,所述辐射探测器元件由探测器单元基于所述分组在所述校准数据中进行识别,以便生成针对所述探测器单元的TOF校正结果;

其中,所述探测器单元定义将所述TOF PET扫描器的辐射探测器元件分配到以下中的至少一个:(i)探测器模块,(ii)在探测器模块内的探测器片,和(iii)在探测器片内的闪烁体晶体。

15. 根据权利要求14所述的方法,其中,所述生成包括相继地针对探测器模块、探测器片和闪烁体晶体重复所述分组和所述求解,其中,每个相继的重复作用于由通过先前的重复生成的所述TOF校正结果进行校正的所述校准数据。

数字正电子发射断层摄影中的飞行时间校准

技术领域

[0001] 以下内容总体上涉及正电子发射断层摄影 (PET) 领域,包括飞行时间 (TOF) PET,并且涉及使用PET、伽玛相机,或另一基于射线发射的成像技术的医学成像等;并且涉及辐射探测器时间戳电路领域、辐射探测事件时间戳领域和相关的领域。

背景技术

[0002] 在正电子发射断层摄影 (PET) 医学成像中,放射性药物被施予给要被成像的对象。放射性药物包括发射正电子的放射性同位素,并且在正负电子湮灭事件中正电子与负电子组合,每个正负电子湮灭事件发射两条相反指向的511keV伽马射线(也被称为伽马粒子,这些术语在本文中可互换地使用)。PET扫描器包括被设置在对象周围通常形成辐射探测器的包围环的辐射探测器。能量和时间窗处理被应用于探测到的辐射事件以识别符合(或几乎符合,即,在从正负电子湮灭事件的位置到各自的探测器的伽马射线的TOF内)的511keV辐射探测事件。

[0003] 在常规的PET中,每个这样的511keV伽马射线对定义了各自的探测器处的探测事件之间的“响应线”,并且知晓正负电子湮灭事件沿着该线被定位。这种定位足以使用合适的重建技术(例如,滤波反投影、迭代前向-后向投影、各种傅里叶变换图像重建技术等)来重建对象中的放射性药物分布的图像。

[0004] 在飞行时间 (TOF) PET中,进一步的分辨率改善通过基于构成的511keV探测事件之间的差(如果有的话)确定正负电子湮灭事件沿着响应线的定位来获得。例如,如果两个511keV探测事件精确地同时发生,那么正负电子湮灭事件被定位在两个探测器之间的相等距离处。另一方面,如果探测器“A”有时在探测器“B”之前探测其511keV事件,那么正负电子湮灭事件被定位为与靠近探测器“B”相比更靠近探测器“A”,并且量化的时间差使得能够沿着响应线对事件进行量化的定位。

[0005] TOF分辨率、准确性和精确性取决于被分配到符合对的511keV探测事件的时间戳(的差)的准确性。由于光速很高(大约 3×10^{10} cm/s,或0.03cm/皮秒),几十皮秒或更好的量级的时间戳准确性是优选的,以便提供沿着响应线的有用的TOF定位。这难以实现跨过足够大以接收医学对象的探测器的环绕阵列。时间变化能够由于探测器响应时间的差而以探测器元件或晶体水平(亦即,在包括闪烁体晶体的辐射探测器具有耦合的光学探测器的情况下以闪烁体水平)发生,或者由于电信号传播时间的差或其他因素而以更高水平(例如,模块水平)发生。

[0006] 在采用闪烁体的辐射探测器的情况下,获得精确时间戳的另一困难在于闪烁事件的串联性质。当伽马射线被闪烁体晶体吸收时,生成一阵光(闪烁),这阵光随着时间而延长并且具有一些有限的光子发射对时间的分布图,所述光子发射对时间的分布图被光电倍增管(PMT)、基于半导体的光电探测器,或其他光探测器被读取为在闪烁迸发的时间上的光子计数。用于时间戳的触发器必须关于这种分布进行定义。各种触发器能够被使用,例如,在接收到第一光子时触发时间戳(第一光子触发器),或在两个(或更多个)光子的时间窗口内

接收时触发时间戳(多光子触发器)。由于TOF准确性取决于511keV探测对的相对时间戳,在原理上任何触发器都能够被使用,只要它跨探测器被均匀地应用。实际上,第一光子触发提供了最佳的时间分辨率,但是以更高的噪声为代价,这是因为探测器暗流针对闪烁触发器能够更容易被弄错。多光子触发噪声较小,但是提供了更差的分辨率。

发明内容

[0007] 本申请提供了克服这些问题和其他问题的新的且改善的系统和方法。

[0008] 根据一个方面,公开了一种飞行时间正电子发射断层摄影(TOF PET)成像系统,包括:TOF PET扫描器,其包括辐射探测器元件;以及电子数据处理设备,其被编程为:操作所述TOF PET扫描器以采集基于湮灭事件数据的校准数据,所述湮灭事件数据是针对发生在位于所述TOF PET扫描器的等中心点处的点源中的正负电子湮灭事件而被采集的,其中,每个湮灭事件数据包括对探测由所述湮灭事件发射的两条相反指向的511keV伽马射线的所述辐射探测器元件的识别结果和由所述湮灭事件发射的所述两条相反指向的511keV伽马射线的探测结果之间的时间差;通过对由所述校准数据定义的超定方程组进行求解来生成针对所述辐射探测器元件的TOF校正结果;操作所述TOF PET扫描器以采集包括从成像对象采集的511keV伽马射线探测事件的列表模式成像数据;通过将所述TOF校正结果应用于所述列表模式成像数据来生成校正的列表模式成像数据;并且重建所述校正的列表模式成像数据以生成所述成像对象的至少部分的重建图像。所述TOF校正结果可以通过针对S对矩阵方程 $\overline{\Delta t} = CS$ 进行求解来生成,其中, $\overline{\Delta t}$ 存储所述校准数据的时间差,C是对所述辐射探测器元件的所述识别结果进行编码的关系矩阵,并且S存储所述TOF校正结果。该矩阵方程可以例如通过计算所述关系矩阵C的伪逆 C^{-1} 并且计算 $S = C^{-1}\overline{\Delta t}$ 来求解。

[0009] 根据另一方面,在前述段落中阐述的TOF PET成像系统中,所述TOF PET扫描器被操作为使用多光子触发来采集列表模式成像数据,所述电子数据处理设备可以被进一步编程为将所述列表模式成像数据的时间戳调节为将使用第一光子触发获得的值。在一种方法中,将使用多光子触发采集的所述列表模式成像数据的时间戳 TS_m 调节为估计的第一光子触发的时间戳 $TS_1 = TS_m - a\sqrt{\frac{b}{P_m}}$,其中,a和b是常数,并且 P_m 是针对使用多光子触发采集的列表模式成像数据的光子计数。

[0010] 根据另一方面,在TOF PET成像系统中,至少一个辐射探测器元件包括闪烁体和与所述闪烁体耦合的光探测器。所述电子数据处理设备被编程为通过以下的操作来估计所述成像辐射探测事件的第一光子触发的时间戳:基于由所述辐射探测器元件使用第一光子触发采集的校准数据来确定针对利用第一光子触发进行操作的所述辐射探测器元件的平均光子计数 P_1 ;确定针对由所述辐射探测器元件在对象的成像期间使用多光子触发探测到的成像辐射探测事件的光子计数 P_m ;并且基于 $\sqrt{P_1/P_m}$ 值来估计针对所述成像辐射探测事件的第一光子触发的时间戳。在一些实施例中,所述第一光子触发的时间戳的所述估计包括计算:

$$[0011] \quad TS_1 = TS_m - a \sqrt{\frac{P1}{Pm}}$$

[0012] 其中, TS_m 是使用多光子触发的所述成像辐射探测事件的时间戳, a 是常数, 并且 TS_1 是所估计的第一光子触发的时间戳。在一些实施例中, 针对利用第一光子触发进行操作的所述辐射探测器元件的所述平均光子计数 $P1$ 是通过将高斯分布拟合到由所述辐射探测器元件使用第一光子触发采集的每事件的光子计数的直方图来确定的。

[0013] 根据另一方面, 一种方法包括: 通过对由校准数据定义的超定方程组进行求解来生成针对 TOF PET 扫描器的辐射探测器元件的 TOF 校正结果, 所述校准数据是由所述 TOF PET 扫描器从位于所述 TOF PET 扫描器的等中心点处的点源采集的; 并且使用所生成的 TOF 校正结果来校正由所述 TOF PET 扫描器从成像对象采集的成像数据的时间戳。这些操作由电子数据处理设备合适地执行。在一种方法中, 所述 TOF 校正结果是从包括每个均与所述 TOF PET 扫描器的辐射探测器元件相关联的 511keV 伽马射线探测事件的校准数据通过包括以下的操作而生成的: 对所述 511keV 伽马射线探测事件执行时间窗处理, 以识别对应于正负电子湮灭事件的 511keV 伽马射线探测事件对; 并且对超定方程组 $\Delta t_d = s_i + s_j$ 进行求解, 其中, d 标引第 d 个 511keV 伽马射线探测事件对, i 和 j 标引探测到第 d 个 511keV 伽马射线探测事件对的两个辐射探测器元件, Δt_d 指代所述 511keV 伽马射线探测事件对的伽马射线探测结果之间的所述时间差, s_i 指代针对第 i 个辐射探测器元件的所述 TOF 校正结果, 并且 s_j 指代针对第 j 个辐射探测器元件的所述 TOF 校正结果。所述 TOF 校正结果能够针对具体类型的探测器单元通过以下而被生成: 由探测器单元基于将所述 TOF PET 扫描器的辐射探测器元件分配到探测器单元的探测器单元定义对所述校准数据进行分组, 并且对由所述校准数据定义的所述超定方程组进行求解, 其中, 所述辐射探测器元件由探测器单元基于所述分组在所述校准数据中进行识别。所述探测器单元定义可以将所述 TOF PET 扫描器的辐射探测器元件分配到探测器模块、在探测器模块内的探测器片、或在探测器片内的闪烁体晶体, 并且所述分组和所述求解可以相继地针对探测器模块、探测器片和闪烁体晶体进行重复, 其中, 每个相继的重复作用于由通过先前的重复生成的所述 TOF 校正结果进行校正的校准数据。

所述方法任选地还包括: 基于 $\sqrt{P1/Pm}$ 值将由辐射探测器元件使用多光子触发采集的所述成像数据的 511keV 伽马射线探测事件的时间戳调节为对应于第一光子触发的调节的时间戳, 其中, $P1$ 是针对使用第一光子触发的所述辐射探测器元件的平均 511keV 伽马射线探测光子计数, 并且 Pm 是所述成像数据的所述 511keV 伽马射线探测事件的光子计数。

[0014] 一个优点在于辐射探测器的时间戳电路中的改善的时间分辨率。

[0015] 另一优点在于由于改善的 TOF 分辨率而改善的 TOF PET 图像质量。

[0016] 另一优点在于 TOF PET 系统的更快的 TOF 校准。

[0017] 在阅读和理解了以下详细描述后, 本领域普通技术人员将意识到本发明的又另外的优点。

附图说明

[0018] 本发明可以采取各种部件和部件的布置, 以及各个步骤和步骤的安排的形式。附

图仅出于图示优选实施例的目的,并不被解释为对本发明进行限制。

[0019] 图1图解性示出了包括TOF校准和事件时间戳方面的数字飞行时间正电子发射断层摄影(数字TOF PET)成像系统。

[0020] 图2图解性示出了图1的TOF PET系统的第一光子触发器估计器模块的操作。

[0021] 图3标绘了使用第一光子触发以及被拟合到峰值的高斯获得的能量谱。

[0022] 图4图解性示出了图1的TOF PET系统的TOF校准模块的操作。

[0023] 图5图解性示出了由图4的TOF校准模块执行的TOF校准优化的矩阵公式。

[0024] 图6图解性示出了用于以模块、片和晶体水平生成TOF校正结果的合适过程。

具体实施方式

[0025] 参考图1,飞行时间正电子发射断层摄影(TOF PET)扫描器10包括扫描器壳体12,所述扫描器壳体12支撑围绕检查区域被布置为环的辐射探测器14。针对人类对象的成像,检查区域合适地为被定尺寸为接收俯卧的人类对象的水平膛。对象支撑件16被布置为使得人类对象能够被装载到处于水平位置的检查区域中。以图示性范例的方式,TOF PET扫描器10可以是还包括未在本文中描述的透射型计算机断层摄影(CT)扫描能力的Vereos数字PET/CT扫描器(可从荷兰埃因霍温的Koninklijke Philips N.V获得)。辐射探测器14被配置为探测511keV辐射,并且以图示性范例的方式(参见图1的左上部的插图),可以采用与光学探测器22(例如,数字硅光电倍增管(SiPM)阵列、模拟雪崩光电二极管阵列、光电倍增管(PMT)探测器等)耦合的闪烁体晶体20。在图示性图1中,图解性地指示了辐射探测器14在典型的商用TOF PET扫描器中,辐射探测器被线性的膛或被设置在扫描器壳体内部的膛覆盖,并且在外部不可见。

[0026] 在操作中,对象被施予包括正电子发射的放射性同位素的放射性药物。放射性药物可以被设计为在感兴趣器官或组织(例如,脑、肺、肿瘤等)中聚集。对象经由对象支撑件16被装载到检查区域中,并且辐射探测器14被操作为探测511keV伽马射线。为此目的,辐射粒子被辐射探测器14的闪烁体晶体20吸收,所述辐射粒子在闪烁体晶体20中生成一阵光(闪烁)。闪烁包括由辐射探测器的一个或多个光学探测器22探测到的一阵光子。辐射探测器包括估计粒子能量的能量集成电路(例如,采用光子计数)和在针对辐射探测事件的时间戳时生成的时间戳电路。估计的能量优选进行窗处理,以估计不对应于511keV伽马射线的探测事件。为此目的,辐射探测器14优选包括机载数字处理能力,以将时间戳和能量估计结果生成成为数字值。结果得到的事件数据被卸载到电子数据处理设备(例如,计算机24)并且优选以存储每个事件的时间戳和能量以及探测器信息的列表模式数据的方式被存储在数据存储设备26中。

[0027] 由TOF PET扫描器10生成的列表模式数据的时间戳信息会由于闪烁体晶体和/或光学探测器之间的响应速度的差、由于辐射探测器模块之间的电子信号处理传播速度的差等而具有误差。为了对此进行补偿,电子数据处理设备24被编程为实施时间校正模块30,所述时间校正模块30将TOF校准(待进行描述)应用于辐射探测器生成的时间戳。511keV配对探测器32检查列表模式数据(优选具有由模块30执行的时间校正结果)以识别符合的511keV对。为此目的,511keV配对探测器32将时间窗口合适地应用于列表模式事件数据,以探测发生在对应于针对由同一正负电子湮灭事件发射的相反指向的511keV伽马射线的TOF

行进时间的最大可能差的小时间窗口内发生的事件对。511keV配对探测器32也可以利用其他信息来对列表模式数据进行滤波,以识别对应于正负电子湮灭事件的511keV对——例如,由于由正负电子湮灭事件发射的两条伽马射线沿相反的方向行进,因此同一探测器模块上的两个在时间上符合的511keV探测事件不能由检查区域中的正负电子湮灭事件所生成。TOF定位模块34对所识别的符合的511keV探测对进行处理,以确定沿着连接两个探测事件的响应线的TOF定位信息,以便生成由图像重建模块36使用合适的重建算法(例如,滤波反投影、迭代前向-后向投影、各种傅里叶变换图像重建技术等)重建的TOF PET数据,以生成对象的(或对象的更有限的视场的)重建图像。所重建的图像被图像处理/显示模块38例如用来执行在医学上有用的诊断、监测,或其他分析。

[0028] 在前述的成像数据采集、预处理和重建中,时间校正模块30应用在对象成像期之前生成的TOF校准校正结果。在本文中公开的方法中,TOF校准校正结果是基于由TOF PET扫描器10针对点源40的采集的校准数据来生成的,所述点源40(在校准过程期间)位于TOF PET扫描器10的等中心点处。TOF PET扫描器10的等中心点被定义为如下:对于发生在等中心点处的任何正负电子湮灭事件,由湮灭事件生成的两条相反指向的伽马射线具有到其各自的辐射探测器相等的(地面实况)TOF行进时间。换言之,针对TOF PET扫描器10的等中心点处的任何正负电子湮灭事件探测到的伽马射线对的两条伽马射线应当精确地同时被探测到。然而,针对两个伽马射线探测事件由辐射探测器14分配的实际时间戳可以由于探测器响应时间的差、探测器电子器件中的信号传播的差等而是不同的。在成像数据采集期间,时间校正模块30应用TOF校准校正结果以对这些影响进行补偿。

[0029] 继续参考图1,在校准期间位于TOF PET扫描器10的等中心点处的点源40可以例如是Na-22点源。更一般地,点源40是小元件,其紧凑性是足够的,以至于发生在点源40中的任何地方的所有正负电子湮灭事件都能够被认为已经发生在TOF PET扫描器10的等中心点处。例如,在一些实施例中,公开的TOF校准技术使得在300皮秒以下的TOF分辨率能够获得。以0.03cm/ps行进的光在300皮秒内行进9cm,因此对于该范例,点源40在尺寸(例如,直径)上应当小于9cm,并且更优选地在尺寸上应当小于5cm,并且更优选地在尺寸上应当小于1cm。

[0030] 在图1的图示性系统中,两个定时调节在TOF校准期间被生成。一个将使用多光子时间戳触发器生成的时间戳调节为将使用单光子时间戳触发器生成的时间戳。该调节由在本文中进一步详细描述的第一光子触发器估计器模块42执行,并且生成此后被时间校正模块30应用于采集到的对象成像数据的第一光子触发器转换参数44。该调节是任选的,但是如果被使用,则有利地使得针对列表模式成像数据的时间戳能够响应于多光子(例如,两个光子)触发器而被生成,以便减少噪声的影响,同时至少部分地恢复将响应于第一光子触发而由时间戳获得的更好时间分辨率。

[0031] 第二定时调节是考虑探测器响应时间的变化并且考虑不同的探测器单元之间的信号传播的变化的TOF校正,并且由在本文中进一步详细描述的时间校正模块50执行。TOF校准模块50有利地对单个采集期中从点源40采集的数据进行操作,并且这种采集到的校准数据能够使用不同的探测器单元分组进行再处理以生成针对不同的探测器单元的TOF校正。在图示性范例中,辐射探测器14被假设为被构建为一组探测器模块,并且存在针对每个探测器模块的TOF校正,所述TOF校正对信号传播延迟或与该模块相关联的其他因素进行校

正。为此目的,模块定义52识别与每个模块相关联的辐射探测器元件。在一个图示性范例中,存在18个模块,但是预期更多或更少的模块。在每个探测器模块内,辐射探测器元件被物理地布局在一组片上(例如,电路板、或在整体SiPM阵列的情况下为硅晶片等)。在一个图示性范例中,每个模块包括20个这样的片,使得整个探测器环具有 $20 \times 18 = 360$ 个片,其中,每个片的辐射探测器由片定义54来识别。在闪烁体晶体被采用的实施例中,另一TOF校正可以与每个闪烁体晶体相关联,这是因为不同的闪烁体晶体可以具有不同的响应时间。晶体定义56通过晶体识别辐射探测器的分组。一般而言,每个探测器片包括一个或多个闪烁体晶体。这些仅仅是图示性范例,并且其他探测器单元类型可以基于诸如辐射探测器环的物理布局和构造的因素而被有用地定义。

[0032] 图1的TOF PET成像是图示性范例,并且预期众多变型。例如,在一个变型中,辐射探测器14是模拟设备,并且模拟信号(例如,对应于由光学探测器22生成的光子计数的脉冲)被卸载到计算机24,所述计算机24然后生成能量估计结果和初始时间戳,所述初始时间戳然后通过时间校正模块30的操作进行更改。更一般地,数据处理操作可以在TOF PET扫描器10的机载电子器件与(一个或多个)机外电子数据处理设备(例如,计算机)24、或云计算资源等之间被各种分配,并且这在图1中由表示TOF PET扫描器10与(一个或多个)机外电子数据处理设备24(其中一些可以是基于云的)的组合的处理硬件的通用电子数据处理设备60图解性表示。

[0033] 将进一步意识到,在本文中公开的TOF PET校准和成像数据处理技术可以由存储以下指令的非瞬态存储介质来实施,所述指令能由电子数据处理设备60读取并运行以执行所公开的技术。这样的非瞬态存储介质可以包括硬盘驱动器或其他磁性存储介质、光盘或其他光学存储介质、基于云的存储介质(例如,RAID磁盘阵列)、闪存或其他非易失性电子存储介质等。

[0034] 继续参考图1并且进一步参考图2和图3,描述了第一光子触发器估计器模块42的图示性实施例。该定时调节估计将响应于第一光子触发器而基于使用多光子(例如,两个光子)触发器实际获得的时间戳而获得的时间戳。结果得到的调节的时间戳具有针对第一光子触发所预期的改善的分辨率,但是没有伴随的与触发从闪烁迸发接收到的第一光子相关联的增加的噪声。参考图2,在第一操作70中,能量谱是针对每个辐射探测器元件使用第一光子触发来采集的。图3标绘了这样的能量谱S,其中,每个事件的光子计数在横坐标上而具有该光子计数的总事件的数量在纵坐标上。在图2中指示的操作72中,在本文中被指代为P1的光子计数质心针对每个探测器元件来被确定。在图示性实施例中,操作72使用根据以下公式的高斯拟合来执行:

$$[0035] \quad G = a_0 + a_1 e^{-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad (1)$$

[0036] 其中, a_1 和 a_2 是线性常数, x 是横坐标参数, μ 是拟合的质心(或平均值),而 σ^2 是拟合的变量。参数 a_0 、 a_1 、 μ 和 σ^2 是拟合的,并且操作72的输出是拟合的质心 $P1_{cal} = \mu$ 。在图3中,还标绘了拟合的高斯G,其中,拟合的校准质心 $P1_{cal}$ 由垂直线来指示。将认识到,质心 $P1_{cal}$ 指代当事件探测使用第一光子触发来触发时针对辐射探测器元件的最可能的光子计数。更一般地,预期采用其他分布和/或拟合表达式以用于确定光子计数质心(或平均值)。

[0037] 继续参考图2,在操作74中,能量谱是针对每个辐射探测器元件使用将在成像数据

采集期间使用的多光子(例如,两个光子)触发来采集的。方程(1)(或另一合适的质心或平均值函数)也被应用于该谱,产生用于多光子触发的质心 $P_m = \mu$ 。根据使用多光子触发实际测量的时间戳 TS_m 估计用于第一光子触发的时间戳 TS_1 的TOF调节 $\Delta t_{m \rightarrow 1}$ 然后由以下公式给出(在图示性情况下采用方程(1)作为质心函数):

$$[0038] \quad \Delta t_{m \rightarrow 1} = k \sqrt{\frac{P_1}{P_m}} \quad (2)$$

[0039] 如果另一质心函数被采用,则方程(2)被相应地合适地调节。针对常数 k 的校准值 k_{cal} 是在通过拟合针对分别在操作70、74中采集的校准数据的时间戳 TS_1 和 TS_m 的操作76中根据经验确定的。用于列表模式成像数据的TOF调节 $\Delta t_{m \rightarrow 1}$ 然后被应用以如下逼近第一光子触发:

$$[0040] \quad TS_1 = TS_m - \Delta t_{m \rightarrow 1} = TS_m - k_{cal} \sqrt{\frac{P_{1,cal}}{P_m}} \quad (3)$$

[0041] 其中,最右侧的表达式是用于采用方程(1)和(2)的图示性范例。为了一般化,对于使用多光子触发被采集为成像数据的部分的给定的列表模式事件,使用第一光子触发的时间戳通过以下来估计:(i)获得针对使用多光子触发采集的成像数据事件的实际光子计数 P_m (即,或对应于,列表模式数据的能量估计部分);并且(ii)应用使用该 P_m 并使用分别在操作72和操作76中生成的校准值 $P_{1,cal}$ 和 k_{cal} 的表达式(3)(或等同物)。

[0042] 方程(3)的TOF调节是任选的。如果被应用,它有利地提供了与第一光子触发类似而无伴随的增加的噪声的改善的分辨率。然而,在其他预期的实施例中,该TOF调节被省略,并且测量的时间戳 TS_m 在没有该调节的情况下被使用。

[0043] 返回参考图1,由TOF校准模块50执行的合适的过程需要从等中心点处的点源采集符合数据集,测量相反探测器的511keV探测时间戳的差以得到TOF差,将该差分布到这些探测器的时钟,并且迭代地重复该过程直至到达收敛。这种方法较慢,这是因为该过程必须被迭代直至每个探测器元件被充分地采样,这能够利用现有的TOF PET扫描器系统在一小时内很好地完成。该方法的明显分布性质还要求使用散射圆柱体并掩蔽最强信号。使用不来自等中心点的散射事件和由于掩蔽的峰值造成的更嘈杂数据降低了校准准确性。校准的迭代性质也要求多次数据采集。额外地,如果校准以不同的硬件水平(例如,晶体、片、模块)被执行,那么包括迭代数据采集的迭代过程必须针对每个水平进行重复。

[0044] 继续参考图1并且进一步参考图4和图5,本文中公开了由TOF校准模块50合适地实施的改善的TOF校准方法,所述TOF校准模块50对来自点源40的单个数据集进行操作,并且能够再处理该数据集多次以针对每个感兴趣探测器单元(例如,模块、片、晶体)生成校准结果。参考图4,在操作80中,列表模式校准数据使用TOF PET扫描器10来收集,其中,点源40位于等中心点处。在操作82中,在操作80中生成的列表模式数据由511keV配对探测器32来处理(参见图1,在这里处理完成而不应用时间校正模块30),以针对每个均具有TOF差 Δt 的正负电子湮灭事件生成数据集。在没有损失一般性的情况下,这些正负电子湮灭事件被标引为 $d=1, \dots, M$,其中, M 是数据集中的正负电子湮灭事件的数量。为了图示,第 d 个正负电子湮灭事件由三个值来表示:识别探测到第 d 个正负电子湮灭事件的两条相反指向的511keV伽马射线的各自的识别探测器元件的第一探测器元件识别器值 $e_{d,i}$ 和第二探测器元件识别器

值 $e_{d,j}$;以及TOF偏移 Δt_d (其一般为指示哪个探测器元件 $e_{d,i}$ 或 $e_{d,j}$ 首先探测到其事件的带符号的值)。在操作84中,正负电子湮灭事件相应于感兴趣探测器单元而被分组(例如通过基于模块定义52的模块,或通过基于片定义54的片,或通过基于晶体定义56的晶体,参见图1)。实际上,这将探测器元件识别器值 $e_{d,i}$ 和 $e_{d,j}$ 变换为探测器单元识别器 $p_{d,i}$ 和 $p_{d,j}$,其中(在该范例中将模块用作感兴趣单元), $p_{d,i}$ 识别探测器元件 $e_{d,i}$ 所属于的探测器模块,而 $p_{d,j}$ 识别探测器元件 $e_{d,j}$ 所属于的探测器模块。

[0045] 结果得到的信息能够由在本文中被指代为长度M的 $\overline{\Delta t}$ 的时间差86的向量和通过在本文中被指代为编码探测器单元信息 $p_{d,i}$ 和 $p_{d,j}$ 的C的关系矩阵88来表示。例如,在一种合适的形式中,关系矩阵C是 $M \times N$ 维的二元矩阵,其第d行都具有0值,除了第i列和第j列中具有1值,以编码在探测第d个正负电子湮灭事件中涉及的两个探测器单元 $p_{d,i}$ 和 $p_{d,j}$ 。在该注释中,M个行对应于M个正负电子衰变事件,而N个列对应于N个感兴趣单元(例如,N个模块、或N个片、或N个晶体,取决于感兴趣单元)。

[0046] 由于该矩阵形式适当,在操作90中,TOF校准通过求解以下矩阵方程来确定:

$$[0047] \quad \overline{\Delta t} = CS \quad (4)$$

[0048] 对于偏斜向量S,其中,S具有对应于经历TOF校准的N个单元(模块、片或晶体)的长度N。图5图解性表示方程(4)。对于第d个正负电子湮灭事件,方程(4)能够被写为:

$$[0049] \quad \Delta t_d = c_{d,i}S_i + c_{d,j}S_j \quad (5)$$

[0050] 其中, $c_{d,i}=1$,并且 $c_{d,j}=1$ (因此对探测器信息进行编码),并且关系矩阵C的第d行的所有其他元素都具有零值。因为 $M > N$,并且更典型地 $M \gg N$,所以断定由矩阵方程(4)表示的方程组是超定的,并且能够在最小二乘优化的意义上进行求解以确定偏斜向量S的N个元素,这然后是针对N个探测器单元的TOF校正结果。利用矩阵形式,解能够被写为:

$$[0051] \quad S = C^{-1} \overline{\Delta t} \quad (6)$$

[0052] 其中, C^{-1} 是(非平方)关系矩阵C的伪逆,这是因为关系矩阵C具有 $M \times N$ 维,其伪逆 C^{-1} 具有 $N \times M$ 维。各种方法能够被用于获得方程(6)的解——一种合适的方法是采用奇异值分解(SVD),其为矩阵处理库(例如,Matlab[®](其可从MathWorks, Inc., Natick, MA, USA获得))中的标准函数。输出是优化的偏斜向量92,其元素识别针对N个感兴趣单元(例如,模块、片或晶体)的TOF校正结果。尽管表达式(4)–(6)采用矩阵形式,但是更一般地,用于求解超定方程组的任何方法都能够被采用。

[0053] 回来参考图1,时间校正模块30如下应用由TOF校准模块50生成的TOF校正值。考虑具有时间戳TS(在有或没有表达式(3)的 $\Delta t_{m \rightarrow i}$ 调节的情况下)的且由探测器元件e采集的列表模式数据。适当的单元定义(模块定义52、片定义54、或晶体定义56)被提及以确定对应的探测器单元(这里在没有损失一般性的情况下由探测器单元标引i来指代),并且时间戳TS通过 $TS + s_i$ 来进行校正,其中,向量元素 s_i 是来自从表达式(6)输出的优化的偏斜向量S获得的针对探测器单元i的TOF校正结果的。

[0054] 应当理解,在本文中参考图4和图5以及表达式(4)–(6)描述的TOF校准方法的数学形式能够以多种不同的方式进行修改而不改变其基本性质。例如,各种向量和矩阵能够进行各种转置,同时仍然产生等价的结果。一般而言,由TOF校准模块50执行的校准需要:(1)收集正负电子湮灭事件的数据集,其中,每个湮灭事件数据包括对探测到的湮灭事件的两

个探测器元件的识别结果和在两个探测器元件处的511keV伽马射线探测事件之间的TOF差 Δt ; (2) 将探测器元件分配到其各自的探测器单元(例如,模块、片、晶体); (3) 使用关系矩阵C对湮灭事件的探测器单元进行编码; 并且(4) 对 $\overline{\Delta t} = CS$ 形式的方程的超定系统进行求解以获得由S表示的TOF校正结果, 其中, $\overline{\Delta t}$ 存储湮灭事件时间差 Δt 。在一些图示性实施例中, 操作(4) 需要计算关系矩阵C的伪逆 C^{-1} 并且采用 $S = C^{-1}\overline{\Delta t}$ 形式的解。然而, 也预期其他方法, 例如, 应用Levenberg-Marquardt最小二乘优化来优化由 $\overline{\Delta t} = CS$ 表示的方程的超定系统的参数S。

[0055] 继续参考图5并且进一步参考图6, 在要在多个探测器单元水平(例如, 模块、片和晶体水平) 下应用TOF校正的实施例中, 合适的方法是将图5的过程以“从上到下”的方式应用于每个探测器单元水平, 在最大单元处开始并且向下工作到最小探测器单元。该方法利用由更大探测器单元引入的TOF偏移可能大于由更小水平单元引入的TOF偏移的预期。图6提供了针对在本文中描述的PET探测器环的图示性范例, 其中, 辐射探测器元件14被布置到模块、(在模块内的)片和(在片内的)晶体中。在操作100中, 由图4的操作82输出的采集到的正负电子湮灭事件数据根据图4操作84、90以模块水平进行处理, 以生成模块水平的TOF校正结果102。在操作104中, 模块水平的TOF校正结果102被应用于校准数据, 使得数据针对以模块水平引入的TOF偏移进行校正。然后, 在操作110中, 具有被应用的模块水平的TOF校正结果的正负电子湮灭事件数据再次根据图4的操作84、90以片水平进行处理, 以生成片水平的TOF校正结果112。在操作114中, 片水平的TOF校正结果112被额外地应用于校准数据, 使得数据针对以模块水平和片水平引入的TOF偏移进行校正。最后, 在操作120中, 具有被应用的模块水平和片水平的TOF校正结果的正负电子湮灭事件数据再次根据图4的操作84、90以晶体水平进行处理, 以生成晶体水平的TOF校正结果122。在随后的成像数据的处理(未在图6中示出) 期间, 模块水平、片水平和晶体水平的校正结果102、112、122被应用于列表模式成像数据(或者, 备选地, 这些校正结果能够被离线组合以创建针对每个探测器元件的组的模块+片+晶体TOF校正结果以及然后被应用以校正结果列表模式成像数据的组的TOF校正结果)。这些校正结果被图1的时间校正模块30应用, 在此之后, 511keV配对探测器32被应用以识别对应于正负电子湮灭事件的511keV伽马射线对, 并且TOF定位和图像重建如参考图1所描述的那样被执行。

[0056] 已经参考优选实施例描述了本发明。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。

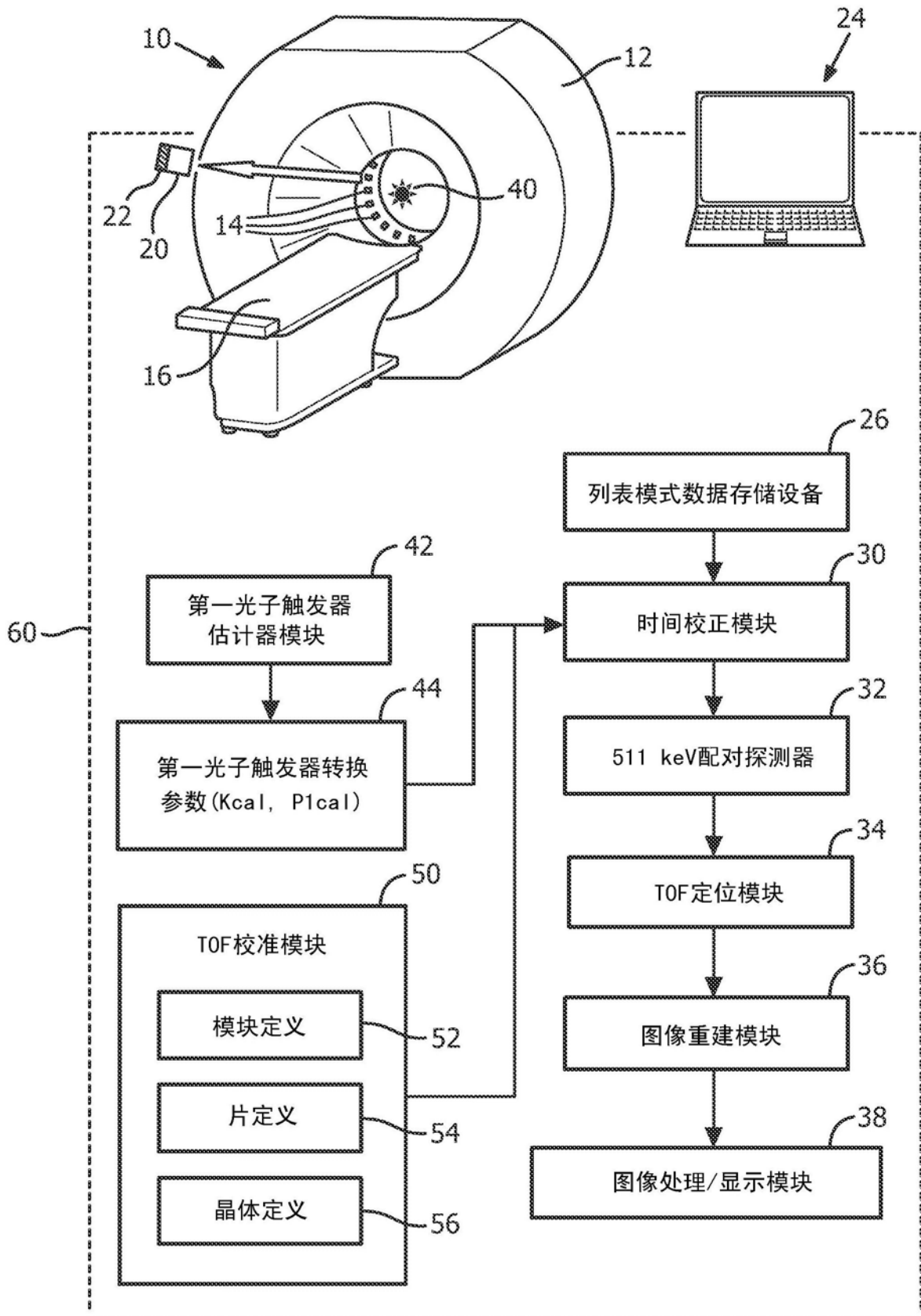


图1

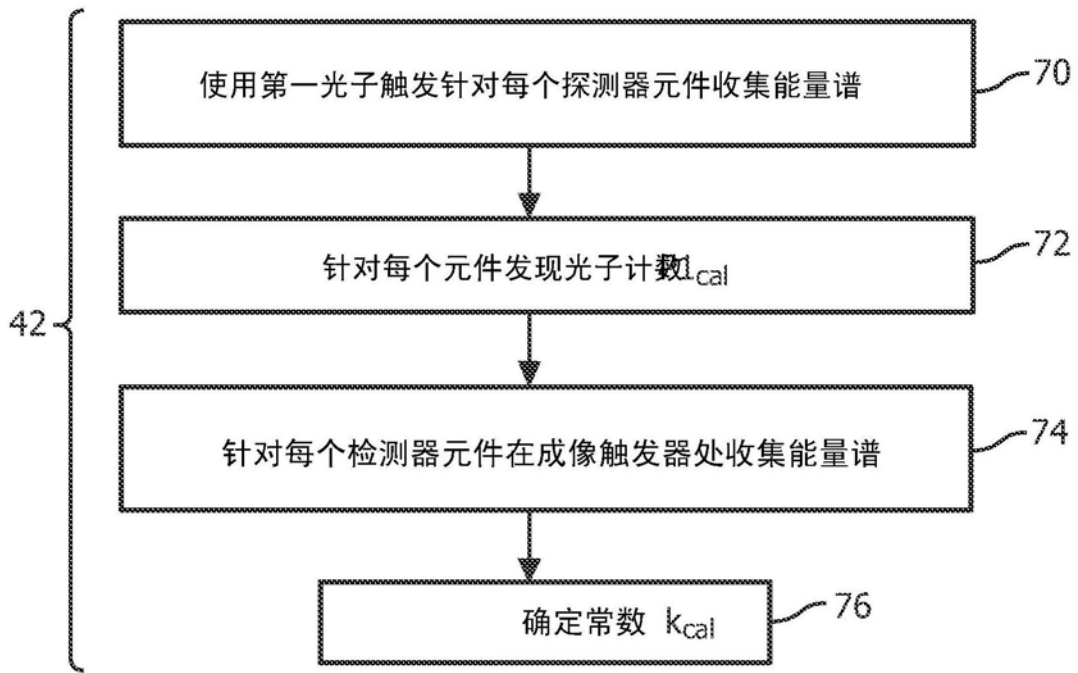


图2

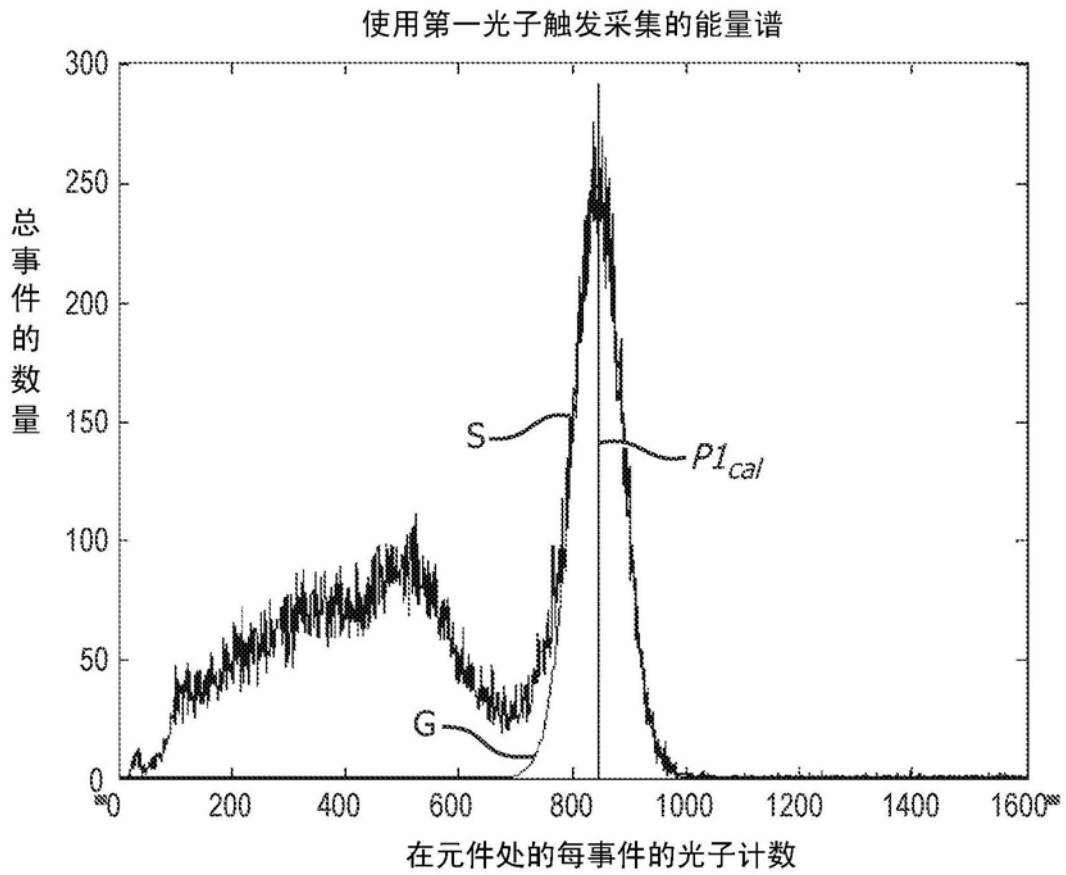


图3

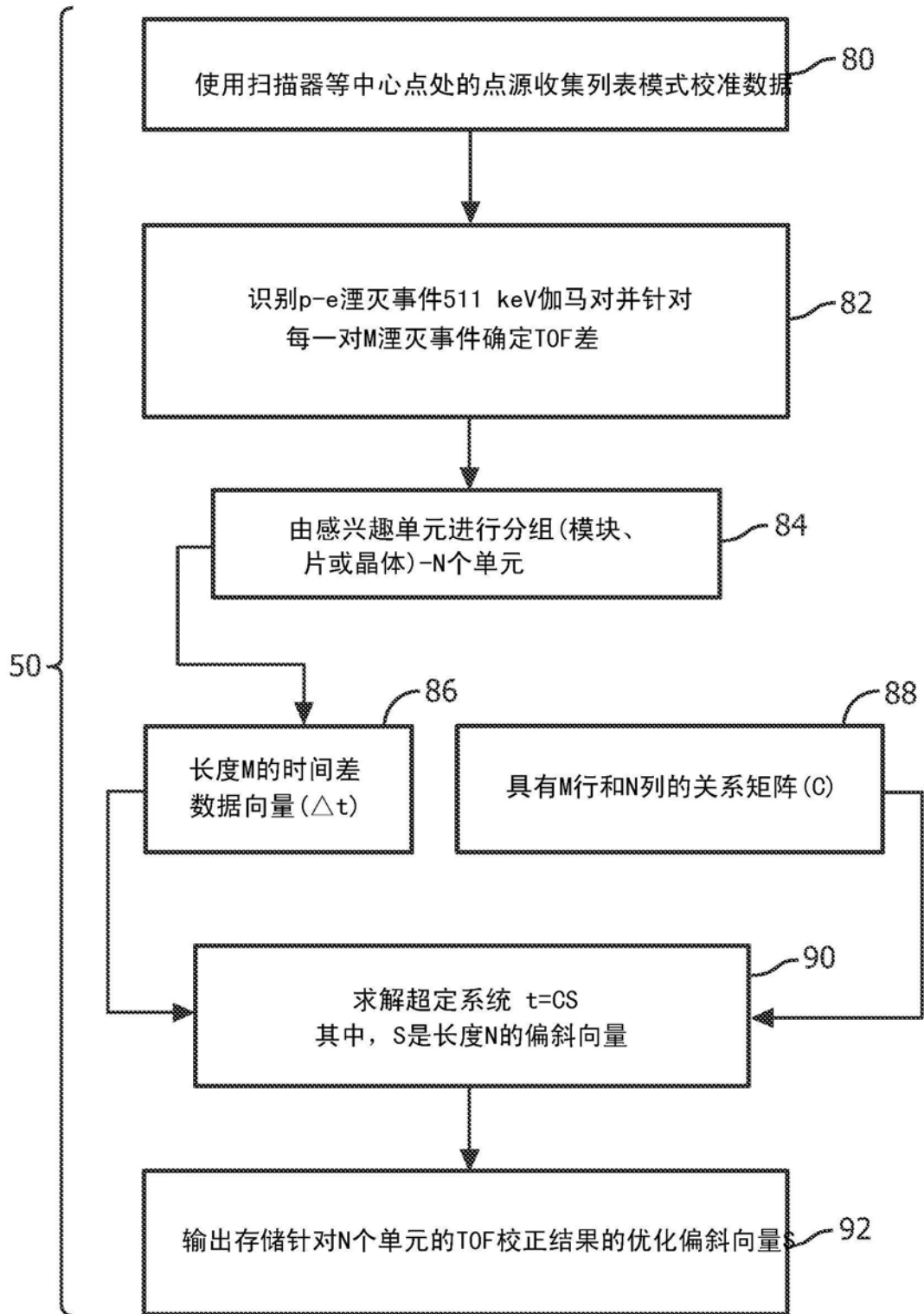


图4

$$\begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ \Delta t \\ \vdots \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1, 1 & \cdots & 1, N \\ \vdots & & \vdots \\ M, 1 & \cdots & M, N \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ S \\ \vdots \\ N \end{pmatrix}$$

图5

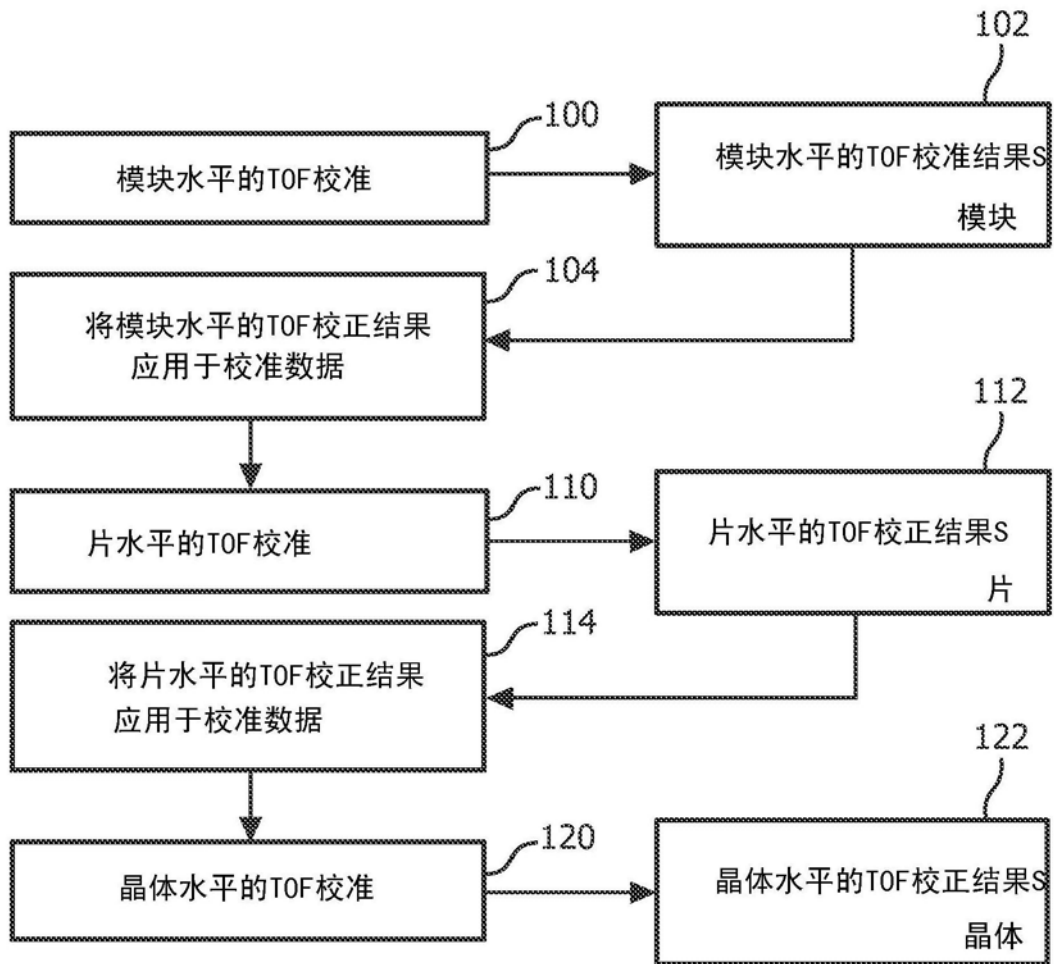


图6