

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 18 日 (18.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/118828 A1

(51) 国际专利分类号:
G06T 11/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/071098

(22) 国际申请日: 2019 年 1 月 10 日 (10.01.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201811525022.4 2018 年 12 月 13 日 (13.12.2018) CN

(71) 申请人: 深圳先进技术研究院 (SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。

(72) 发明人: 胡战利 (HU, Zhanli); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 杨永峰 (YANG, Yongfeng); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 李快 (LI, Kuai); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 梁栋 (LIANG, Dong); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 刘新 (LIU, Xin); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 郑海荣 (ZHENG, Hairong); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。

(74) 代理人: 深圳智趣知识产权代理事务所 (普通合伙) (SHENZHEN IPLUS)

(54) Title: GRADIENT DOMAIN-BASED LOW-DOSE PET IMAGE RECONSTRUCTION METHOD AND APPARATUS, DEVICE, AND MEDIUM

(54) 发明名称: 基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法、装置、设备及介质

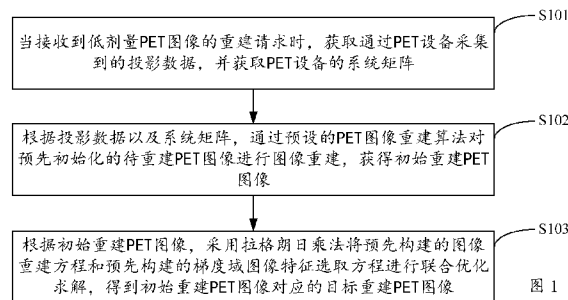


图 1

- S101 Upon receipt of a low-dose PET image reconstruction request, obtain projection data acquired by a PET device and a system matrix of the PET device
- S102 According to the projection data and the system matrix, perform, by means of a pre-determined PET image reconstruction algorithm, image reconstruction on a pre-initialized PET image to be reconstructed, so as to obtain an initial reconstructed PET image
- S103 According to the initial reconstructed PET image, use a Lagrange multiplier method to perform joint optimization solution on a pre-constructed image reconstruction equation and a pre-constructed gradient domain image feature selection equation, so as to obtain a target reconstructed PET image corresponding to the initial reconstructed PET image

(57) Abstract: A gradient domain-based low-dose PET image reconstruction method and apparatus, a device, and a medium. Said method comprises: according to projection data acquired by a PET device and a system matrix of the PET device, performing, by means of a PET image reconstruction algorithm, image reconstruction on a pre-initialized PET image to be reconstructed, so as to obtain an initial reconstructed PET image (S102); and according to the initial reconstructed PET image, using a Lagrange multiplier method to perform joint optimization solution on a pre-constructed image reconstruction equation and a pre-constructed gradient domain image

INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY (GENERAL PARTNERSHIP)); 中国广东省深圳市福田区梅林街道梅都社区梅林路48号理想公馆2427, Guangdong 518000 (CN)。

- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

feature selection equation, so as to obtain a target reconstructed PET image corresponding to the initial reconstructed PET image (S103). Said method improves the speed of reconstruction of a low-dose PET image, reduces artifacts of the reconstructed image, thereby improving the image quality of low-dose PET image reconstruction.

(57) 摘要: 一种基于梯度域的低剂量PET图像重建方法、装置、设备及介质, 该方法包括: 根据PET设备采集到的投影数据以及该PET设备的系统矩阵, 通过PET图像重建算法对预先初始化的待重建PET图像进行图像重建, 获得初始重建PET图像 (S102), 根据初始重建PET图像, 采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解, 得到初始重建PET图像对应的目标重建PET图像 (S103), 从而提高了低剂量PET图像的重建速度, 且降低重建图像的伪影程度, 进而提高了低剂量PET图像重建的图像质量。

基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法、装置、设备及介质

技术领域

5 本发明属于医学 PET 成像技术领域，尤其涉及一种基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法、装置、设备及介质。

背景技术

正电子发射断层成像(Positron Emission Tomography, 简称 PET)是一种发射
10 型成像技术(Emission Tomography, 简称 ET)，它通过把放射性药物注入体内的方法来显示不同组织的新陈代谢情况。PET 技术是继计算机断层成像(Computed Tomography, 简称 CT)和磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, 简称 MRI)之后应用于临床的一种新型影像技术，PET 技术在肿瘤学、心血管
疾病学、神经系统疾病研究、以及新药开发研究等领域中显示出卓越的性能。

15 在 PET 成像中，放射性药物实际上是个分子载体，它依附于特定的生理组织或病理过程。放射性物质在药物的带领下在人体内有目的的分布。PET 成像的目的实际上就是得到放射性物质在人体内部的分布图，它的工作原理是：将一些放射性核元素，如 O-15、C-11、N-13 和 F-18 等标记在人体代谢所需的化合物上，然后通过手臂静脉血管注射等方式输入受检者体内。标记化合物在参
20 与体内代谢的过程中，放射性核元素发生衰变，释放出正电子（带一个正电荷的电子），正电子与其周围的（带负电）电子发生湮灭，产生两个能量为 511keV 的伽马光子。这对光子在一条直线上朝相反的方向射出，利用体外的伽马照相机可以探测到特定区域放射的所有光子，然后设计一定的算法，就可以近似得到放射性物质在人体内部的分布情况。

25 由于在 PET 检查中使用的放射性药物会对近距离接触该药物的人员产生辐射，而受到辐射的人员患癌的几率会远高于正常人，同时放射性药物的消耗在

PET 检查的成本中占有一定比重。因此，根据国际放射防护委员会（
International Commission on Radiological Protection，简称 ICRP）提出的合理使用
低剂量（As Low As Reasonably Achievable，简称 ALARA）原则，在 PET 临
床诊断时，以期用最小的剂量获得满足临床需求的图像，尽量降低对患者的辐
射剂量。

然而，在对低剂量采样得到的测量数据进行 PET 图像重建时，现有传统的
PET 图像重建算法重建图像的速度慢，进而使得重建图像产生运动伪影，这些
伪影将会直接影响医生的诊断行为。

10 发明内容

本发明的目的在于提供一种基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法、装置、
设备及介质，旨在解决由于现有技术无法提供一种有效的低剂量 PET 图像重建
方法，导致低剂量 PET 图像重建速度慢、且重建图像质量差的问题。

一方面，本发明提供了一种基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法，所述
方法包括下述步骤：

当接收到低剂量 PET 图像的重建请求时，获取通过 PET 设备采集到的投
影数据，并获取所述 PET 设备的系统矩阵；

根据所述投影数据以及所述系统矩阵，通过预设的 PET 图像重建算法对预
先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建，获得初始重建 PET 图像；

根据所述初始重建 PET 图像，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方
程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解，得到所述初始重
建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

另一方面，本发明提供了一种基于梯度域的低剂量 PET 图像重建装置，所
述装置包括：

参数获取单元，用于当接收到低剂量 PET 图像的重建请求时，获取通过
PET 设备采集到的投影数据，并获取所述 PET 设备的系统矩阵；

初始重建单元,用于根据所述投影数据以及所述系统矩阵,通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建,获得初始重建 PET 图像; 以及

5 重建图像获得单元,用于根据所述初始重建 PET 图像,采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解,得到所述初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

另一方面,本发明还提供了一种计算设备,包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现如上述基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法所述的步骤。

10 另一方面,本发明还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如上述基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法所述的步骤。

本发明根据 PET 设备采集到的投影数据以及该 PET 设备的系统矩阵,通过 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建,获得初始重建 PET 图像,根据初始重建 PET 图像,采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解,得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像,从而提高了低剂量 PET 图像的重建速度,且降低重建图像的伪影程度,进而提高了低剂量 PET 图像重建的图像质量。

20

附图说明

图 1 是本发明实施例一提供的基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法的实现流程图;

图 2 是本发明实施例一中采用 Bregman 迭代方法对拉格朗日方程进行迭代求解的实现流程图;

25

图 3 是本发明实施例二提供的基于梯度域的低剂量 PET 图像重建装置的结

构示意图；

图 4 是本发明实施例二提供的基于梯度域的低剂量 PET 图像重建装置的优选结构示意图；

图 5 是本发明实施例二提供的基于梯度域的低剂量 PET 图像重建装置的又一优选结构示意图；以及

图 6 是本发明实施例三提供的计算设备的结构示意图。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

以下结合具体实施例对本发明的具体实现进行详细描述：

实施例一：

图 1 示出了本发明实施例一提供的基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法的实现流程，为了便于说明，仅示出了与本发明实施例相关的部分，详述如下：

在步骤 S101 中，当接收到低剂量 PET 图像的重建请求时，获取通过 PET 设备采集到的投影数据，并获取 PET 设备的系统矩阵。

本发明实施例适用于医学图像处理平台、系统或设备，例如个人计算机、服务器等。当接收到对低剂量 PET 图像进行重建的请求时，获取通过 PET 设备在低剂量条件下采集到的欠采样投影数据，并获取 PET 设备的系统矩阵，该系统矩阵是根据 PET 设备的几何结构信息计算得到的。

在步骤 S102 中，根据投影数据以及系统矩阵，通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建，获得初始重建 PET 图像。

在本发明实施例中，根据投影数据以及系统矩阵，通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行预设次数的迭代操作，以对待重建 PET 图像进行图像重建，获得初始重建 PET 图像，其中，待重建 PET 图像是

二维图像，预设的 PET 图像重建算法为最大似然期望最大算法(Maximum Likelihood Expectation Maximized, 简称 MLEM)或者有序子集期望值最大算法(Ordered Subset Expectation Maximization, 简称 OSEM)或者最大后验概率算法(Maximum A Posterior, MAP)。

5 在初始化待重建 PET 图像时，作为示例地，将待重建 PET 图像的像素值都初始化为零。

在步骤 S103 中，根据初始重建 PET 图像，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解，得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

10 在本发明实施例中，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程 $y_u = G_u m$ 和预先构建的梯度域图像特征选取方程

$\min_{D, \alpha} \sum_{i=1}^2 \sum_l \|D^{(i)} \alpha_l^{(i)} - R_l(\omega^{(i)})\|_2^2 \quad s.t. \|\alpha_l\|_0 \leq L$ 进行联立，得到对应的拉格

朗日方程 $\min_{D, \alpha, m} \sum_{i=1}^2 \sum_l \|D^{(i)} \alpha_l^{(i)} - R_l(\omega^{(i)})\|_2^2 + v_1 \|y_u - G_u m\|_2^2$

$s.t. \|\alpha_l\|_0 \leq L, \forall l, i; \omega^{(i)} = \nabla^i m, \forall i.$ ，再对该拉格朗日方程进行优化求解，最终得

15 到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像，其中， y_u 为投影数据， G_u 为

系统矩阵， m 为待重建 PET 图像（也即目标重建 PET 图像）， v_1 为预设的权重

参数， R_l 为图像块提取矩阵，即根据该 R_l 从梯度图像 ω 中提取 l 个图像块， D

为梯度图像 ω 的特征矩阵， α_l 为从梯度图像 ω 中提取出的第 l 个图像块对应的

特征向量， $\omega^{(i)}$ 表示初始重建 PET 图像对应的水平/垂直梯度图像， $i \in \{1, 2\}$ 表示

20 所述梯度图像 ω 的方向（水平/垂直）， L 表示对特征向量的稀疏度的控制系数。

在本发明实施例中，优选地，将特征向量稀疏度的控制系数 L 设置为 5，从而更好的降低通过学习到的特征矩阵和特征向量稀疏表示的 PET 图像的噪声。

在采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像

特征选取方程进行联合优化求解时, 优选地, 采用 Bregman 迭代方法对由图像重建方程和梯度域图像特征选取方程联立的拉格朗日方程进行迭代求解, 从而提高了 PET 图像的重建速度。

进一步优选地, 采用 Bregman 迭代方法将拉格朗日方程分解为梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数, 以对梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数进行迭代求解, 得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像, 从而进一步提高了 PET 图像的重建速度, 且提高重建得到的目标重建 PET 图像的图像质量。

优选地, 对拉格朗日方程分解得到的特征提取函数为

$$\{D^{(i)(k+1)}, \alpha_l^{(i)(k+1)}\} = \arg \min_{D, \alpha} \sum_l \|D^{(i)(k)} \alpha_l^{(i)(k)} - R_l(\omega^{(i)(k)})\|_2^2 \quad s.t. \|\alpha_l\|_0 \leq L, \text{ 获得的}$$

特征矩阵 D 和特征向量 α_l 用来作为下一轮迭代中对梯度图像 ω 进行更新的初始值, 从而将初始重建 PET 图像从图像域转换到梯度域, 对梯度域图像进行特征学习, 以通过学习到的特征矩阵和特征向量稀疏表示初始重建 PET 图像, 从而降低初始重建 PET 图像中的噪声, 进而提高后续 PET 图像的重建效果。其中,

k 为当前迭代次数。

优选地, 对拉格朗日方程分解得到的梯度图像更新函数为

$$\omega^{(i)(k+1)} = \frac{v_2[(b^{(i)})^k + (\nabla^{(i)} m)^{k+1}] + \sum_l R_l^T(D^{(i)})^k (\alpha_l^{(i)})^k}{v_2 + 1}, \text{ 获得的梯度图像 } \omega \text{ 用来}$$

作为下一轮迭代中对目标重建 PET 图像 m 进行重建的初始值, 从而降低后续重建的目标重建 PET 图像的伪影程度。其中, v_2 为预设的用来在 Bregman 迭代中控制迭代误差的权重, b 为 Bregman 迭代的误差校正值。

在本发明实施例中, 进一步优选地, 将 v_2 设置为 1, 从而进一步降低后续重建的目标重建 PET 图像的伪影程度。

优选地, 对拉格朗日方程分解得到的迭代误差校正函数

$$b^{k+1} = b^k + \nabla m^{k+1} - \omega^k, \text{ 获得的误差校正值 } b \text{ 用来作为下一轮迭代中对目标重建}$$

PET 图像 m 进行重建的初始值，从而提高重建得到的 PET 图像的图像质量。

优选地，对拉格朗日方程分解得到的 PET 图像重建函数 $(v_1 G_u^T G_u + v_2 \nabla^T \nabla)m = v_1 G_u^T y_u + v_2 \nabla^T (\omega^k - b^k)$ ， ω^k 为第 k 次迭代的梯度图像， b^k 为第 k 次迭代的误差校正值，从而提高重建得到的 PET 图像的图像质量。

5 如图 2 所示，优选地，通过下述步骤实现采用 Bregman 迭代方法对拉格朗日方程进行迭代求解：

在步骤 S201 中，根据预设的初始特征矩阵和预设的初始特征向量，使用梯度图像更新函数对初始重建 PET 图像对应的梯度图像进行更新。

10 在步骤 S202 中，根据更新后的梯度图像和迭代误差校正函数得到的误差校正值，使用 PET 图像重建函数将梯度图像从梯度域中恢复到图像域，得到目标重建 PET 图像。

在步骤 S203 中，判断当前迭代次数是否达到预设的迭代阈值。

在本发明实施例中，当当前迭代次数达到预设的迭代阈值（例如，50 次）时，执行步骤 S204，否则，跳转至步骤 S205。

15 在步骤 S204 中，输出目标重建 PET 图像。

在步骤 S205 中，将目标重建 PET 图像设置为初始重建 PET 图像，并根据预设的图像块提取矩阵，从初始重建 PET 图像对应的梯度图像中提取对应数量的图像块，梯度图像包括水平梯度图像和垂直梯度图像。

20 在本发明实施例中，首先将初始重建 PET 图像从图像域转换到梯度域，得到水平梯度图像和垂直梯度图像，根据预设的图像块提取矩阵，分别从水平梯度图像和垂直梯度图像中提取对应数量的水平图像块和垂直图像块。

在步骤 S206 中，对图像块进行特征学习，直至学习得到的梯度图像对应的特征矩阵和图像块对应的特征向量满足特征提取函数。

25 在本发明实施例中，分别对提取到水平图像块和垂直图像块进行特征学习，直至学习得到的水平/垂直梯度图像对应的水平/垂直特征矩阵和水平/垂直图像块对应的水平/垂直特征向量满足特征提取函数，其中，特征矩阵的每一列与每

个图像块对应的特征向量一一对应。

在步骤 S207 中，将特征矩阵和特征向量分别设置为初始特征矩阵和初始特征向量，将当前迭代次数增加 1 次，并跳转至步骤 S201，继续下一轮迭代，以重建 PET 图像。

- 5 通过上述步骤 S201-步骤 S207 实现对拉格朗日方程进行迭代求解，以得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像，从而降低重建图像的伪影程度，提高了低剂量 PET 图像重建的图像质量。

在本发明实施例中，根据 PET 设备采集到的投影数据以及该 PET 设备的系统矩阵，通过 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建，
10 获得初始重建 PET 图像，根据初始重建 PET 图像，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解，得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像，从而提高了低剂量 PET 图像的重建速度，且降低重建图像的伪影程度，进而提高了低剂量 PET 图像重建的图像质量。

15 **实施例二：**

图 3 示出了本发明实施例二提供的基于梯度域的低剂量 PET 图像重建装置的结构，为了便于说明，仅示出了与本发明实施例相关的部分，其中包括：

参数获取单元 31，用于当接收到低剂量 PET 图像的重建请求时，获取通过 PET 设备采集到的投影数据，并获取 PET 设备的系统矩阵；

- 20 初始重建单元 32，用于根据投影数据以及系统矩阵，通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建，获得初始重建 PET 图像；以及

重建图像获得单元 33，用于根据初始重建 PET 图像，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化
25 求解，得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

如图 4 所示，优选地，重建图像获得单元 33 包括：

迭代求解单元 331, 用于采用 Bregman 迭代方法对由图像重建方程和梯度域图像特征选取方程联立的拉格朗日方程进行迭代求解。

进一步优选地, 迭代求解单元 331 包括:

方程分解单元 3311, 用于采用 Bregman 迭代方法将拉格朗日方程分解为梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数, 以对梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数进行迭代求解, 得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

进一步优选地, 如图 5 所示, 方程分解单元 3311 包括:

梯度图像更新单元 51, 用于根据预设的初始特征矩阵和预设的初始特征向量, 使用梯度图像更新函数对初始重建 PET 图像对应的梯度图像进行更新;

PET 图像重建单元 52, 用于根据更新后的梯度图像和迭代误差校正函数得到的误差校正值, 使用 PET 图像重建函数将梯度图像从梯度域中恢复到图像域, 得到目标重建 PET 图像;

迭代次数判断单元 53, 用于判断当前迭代次数是否达到预设的迭代阈值; PET 图像输出单元 54, 用于是则, 输出目标重建 PET 图像;

图像块提取单元 55, 用于否则, 将目标重建 PET 图像设置为初始重建 PET 图像, 并根据预设的图像块提取矩阵, 从初始重建 PET 图像对应的梯度图像中提取对应数量的图像块, 梯度图像包括水平梯度图像和垂直梯度图像;

特征学习单元 56, 用于对图像块进行特征学习, 直至学习得到的梯度图像对应的特征矩阵和图像块对应的特征向量满足特征提取函数; 以及

参数设置单元 57, 用于将特征矩阵和特征向量分别设置为初始特征矩阵和初始特征向量, 并触发梯度图像更新单元 51, 继续下一轮迭代, 以重建 PET 图像。

在本发明实施例中, 基于梯度域的低剂量 PET 图像重建装置的各单元可由相应的硬件或软件单元实现, 各单元可以为独立的软、硬件单元, 也可以集成为一个软、硬件单元, 在此不用以限制本发明。具体地, 各单元的实施方式可

参考前述实施例一的描述，在此不再赘述。

实施例三：

图 6 示出了本发明实施例三提供的计算设备的结构，为了便于说明，仅示出了与本发明实施例相关的部分。

5 本发明实施例的计算设备 6 包括处理器 60、存储器 61 以及存储在存储器 61 中并可在处理器 60 上运行的计算机程序 62。该处理器 60 执行计算机程序 62 时实现上述基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法实施例中的步骤，例如图 1 所示的步骤 S101 至 S103。或者，处理器 60 执行计算机程序 62 时实现上述各装置实施例中各单元的功能，例如图 3 所示单元 31 至 33 的功能。

10 在本发明实施例中，根据 PET 设备采集到的投影数据以及该 PET 设备的系统矩阵，通过 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建，获得初始重建 PET 图像，根据初始重建 PET 图像，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解，得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像，从而提高了低剂量 PET 图
15 像的重建速度，且降低重建图像的伪影程度，进而提高了低剂量 PET 图像重建的图像质量。

本发明实施例的计算设备可以为个人计算机、服务器。该计算设备 6 中处理器 60 执行计算机程序 62 时实现基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法时实现的步骤可参考前述方法实施例的描述，在此不再赘述。

实施例四：

20 在本发明实施例中，提供了一种计算机可读存储介质，该计算机可读存储介质存储有计算机程序，该计算机程序被处理器执行时实现上述基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法实施例中的步骤，例如，图 1 所示的步骤 S101 至 S103。或者，该计算机程序被处理器执行时实现上述各装置实施例中各单元的功能，
25 例如图 3 所示单元 31 至 33 的功能。

在本发明实施例中，根据 PET 设备采集到的投影数据以及该 PET 设备的

系统矩阵,通过 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建,获得初始重建 PET 图像,根据初始重建 PET 图像,采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解,得到初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像,从而提高了低剂量 PET 5 图像的重建速度,且降低重建图像的伪影程度,进而提高了低剂量 PET 图像重建的图像质量。

本发明实施例的计算机可读存储介质可以包括能够携带计算机程序代码的任何实体或装置、记录介质,例如,ROM/RAM、磁盘、光盘、闪存等存储器。

以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明 10 明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种基于梯度域的低剂量 PET 图像重建方法，其特征在于，所述方法包括下述步骤：

当接收到低剂量 PET 图像的重建请求时，获取通过 PET 设备采集到的投影数据，并获取所述 PET 设备的系统矩阵；

根据所述投影数据以及所述系统矩阵，通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建，获得初始重建 PET 图像；

根据所述初始重建 PET 图像，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解，得到所述初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解的步骤，包括：

采用 Bregman 迭代方法对由所述图像重建方程和所述梯度域图像特征选取方程联立的拉格朗日方程进行迭代求解。

3、如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，采用 Bregman 迭代方法对所述拉格朗日方程进行迭代求解的步骤，包括：

采用 Bregman 迭代方法将所述拉格朗日方程分解为梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数，以对梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数进行迭代求解，得到所述初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

4、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，采用 Bregman 迭代方法对所述拉格朗日方程进行迭代求解的步骤，包括：

根据预设的初始特征矩阵和预设的初始特征向量，使用所述梯度图像更新函数对所述初始重建 PET 图像对应的梯度图像进行更新；

根据更新后的所述梯度图像和所述迭代误差校正函数得到的误差校正值，

使用所述 PET 图像重建函数将所述梯度图像从梯度域中恢复到图像域，得到目标重建 PET 图像；

判断当前迭代次数是否达到预设的迭代阈值；

是则，输出所述目标重建 PET 图像；

- 5 否则，将所述目标重建 PET 图像设置为所述初始重建 PET 图像，并根据预设的图像块提取矩阵，从所述初始重建 PET 图像对应的梯度图像中提取对应数量的图像块，所述梯度图像包括水平梯度图像和垂直梯度图像；

对所述图像块进行特征学习，直至学习得到的所述梯度图像对应的特征矩阵和所述图像块对应的特征向量满足所述特征提取函数；

- 10 将所述特征矩阵和所述特征向量分别设置为所述初始特征矩阵和所述初始特征向量，并跳转至使用所述梯度图像更新函数对所述梯度图像进行更新的步骤。

5、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述特征提取函数为 $\{D^{(i)(k+1)}, \alpha_l^{(i)(k+1)}\} = \arg \min_{D, \alpha} \sum_l \|D^{(i)(k)} \alpha_l^{(i)(k)} - R_l(\omega^{(i)(k)})\|_2^2$ ，且 $s.t. \|\alpha_l\|_0 \leq L$ ，其中，

- 15 R_l 为所述图像块提取矩阵，即根据所述 R_l 从所述梯度图像 ω 中提取 l 个图像块， D 为所述特征矩阵， α_l 为第 l 个图像块对应的特征向量， $\omega^{(i)}$ 表示所述初始重建 PET 图像对应的水平/垂直梯度图像， $i \in \{1, 2\}$ 表示所述梯度图像 ω 的方向（水平/垂直）， L 表示对所述特征向量的稀疏度的控制系数， k 为所述当前迭代次数。

6、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述梯度图像更新函数

- 20 $\omega^{(i)(k+1)} = \frac{v_2[(b^{(i)})^k + (\nabla^{(i)} m)^{k+1}] + \sum_l R_l^T (D^{(i)})^k (\alpha_l^{(i)})^k}{v_2 + 1}$ ，其中， v_2 表示 Bregman

迭代中控制迭代误差的权重， b 为 Bregman 迭代的误差校正值。

7、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述迭代误差校正函数 $b^{k+1} = b^k + \nabla m^{k+1} - \omega^k$ 。

8、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述 PET 图像重建函数

$(v_1 G_u^T G_u + v_2 \nabla^T \nabla) m = v_1 G_u^T y_u + v_2 \nabla^T (\omega^k - b^k)$, y_u 为所述投影数据, G_u 为所述系统矩阵, m 为所述待重建 PET 图像, v_1 为预设的权重参数, ω^k 为第 k 次迭代的梯度图像, b^k 为第 k 次迭代的误差校正值。

9、一种基于梯度域的低剂量 PET 图像重建装置, 其特征在于, 所述装置
5 包括:

参数获取单元, 用于当接收到低剂量 PET 图像的重建请求时, 获取通过 PET 设备采集到的投影数据, 并获取所述 PET 设备的系统矩阵;

初始重建单元, 用于根据所述投影数据以及所述系统矩阵, 通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建, 获得初始重建
10 PET 图像; 以及

重建图像获得单元, 用于根据所述初始重建 PET 图像, 采用拉格朗日乘法将预先构建的图像重建方程和预先构建的梯度域图像特征选取方程进行联合优化求解, 得到所述初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

10、如权利要求 9 所述的装置, 其特征在于, 所述重建图像获得单元包括:
15 迭代求解单元, 用于采用 Bregman 迭代方法对由所述图像重建方程和所述梯度域图像特征选取方程联立的拉格朗日方程进行迭代求解。

11、如权利要求 10 所述的装置, 其特征在于, 所述迭代求解单元包括:
方程分解单元, 用于采用 Bregman 迭代方法将所述拉格朗日方程分解为梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数,
20 以对梯度图像更新函数、迭代误差校正函数、PET 图像重建函数、以及特征提取函数进行迭代求解, 得到所述初始重建 PET 图像对应的目标重建 PET 图像。

12、如权利要求 11 所述的装置, 其特征在于, 所述方程分解单元包括:
梯度图像更新单元, 用于根据预设的初始特征矩阵和预设的初始特征向量, 使用所述梯度图像更新函数对所述初始重建 PET 图像对应的梯度图像进行更
25 新;

PET 图像重建单元, 用于根据更新后的所述梯度图像和所述迭代误差校正

函数得到的误差校正值，使用所述 PET 图像重建函数将所述梯度图像从梯度域中恢复到图像域，得到目标重建 PET 图像；

迭代次数判断单元，用于判断当前迭代次数是否达到预设的迭代阈值；

PET 图像输出单元，用于是则，输出所述目标重建 PET 图像；

- 5 图像块提取单元，用于否则，将所述目标重建 PET 图像设置为所述初始重建 PET 图像，并根据预设的图像块提取矩阵，从所述初始重建 PET 图像对应的梯度图像中提取对应数量的图像块，所述梯度图像包括水平梯度图像和垂直梯度图像；

- 特征学习单元，用于对所述图像块进行特征学习，直至学习得到的所述梯度图像对应的特征矩阵和所述图像块对应的特征向量满足所述特征提取函数；
10 以及

参数设置单元，用于将所述特征矩阵和所述特征向量分别设置为所述初始特征矩阵和所述初始特征向量，并触发所述梯度图像更新单元执行使用所述梯度图像更新函数对所述梯度图像进行更新的步骤。

- 15 13、一种计算设备，包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序，其特征在于，所述处理器执行所述计算机程序时实现如权利要求 1 至 8 任一项所述方法的步骤。

- 14、一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质存储有计算机程序，其特征在于，所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求 1 至 8 任一项所述方法的步骤。
20

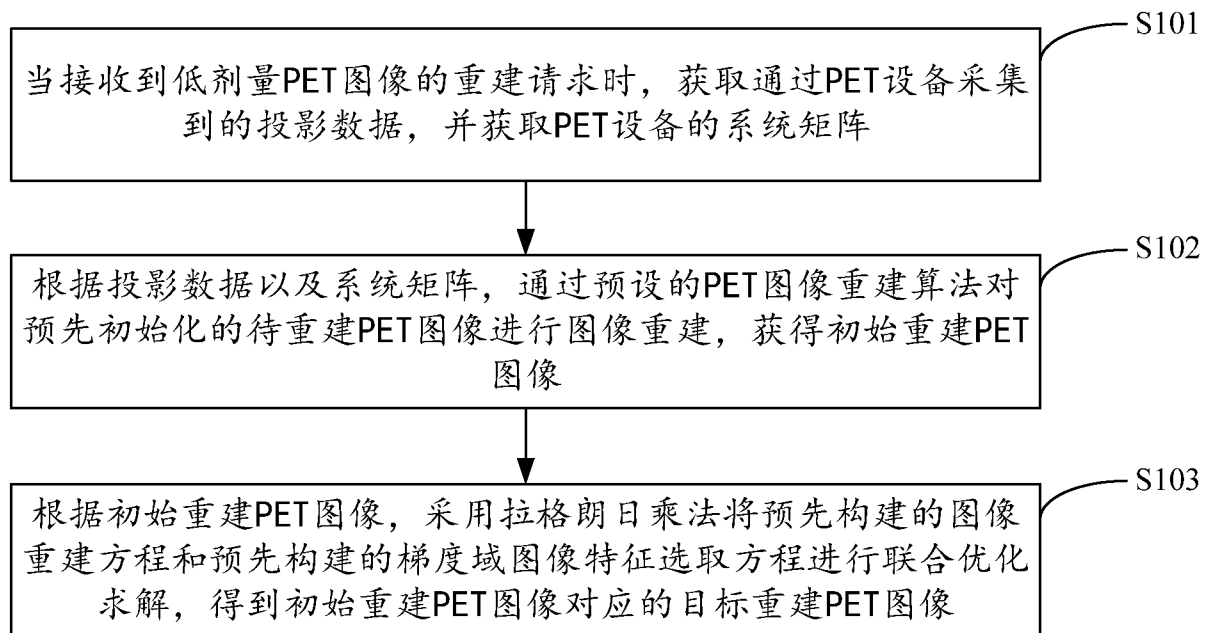


图 1

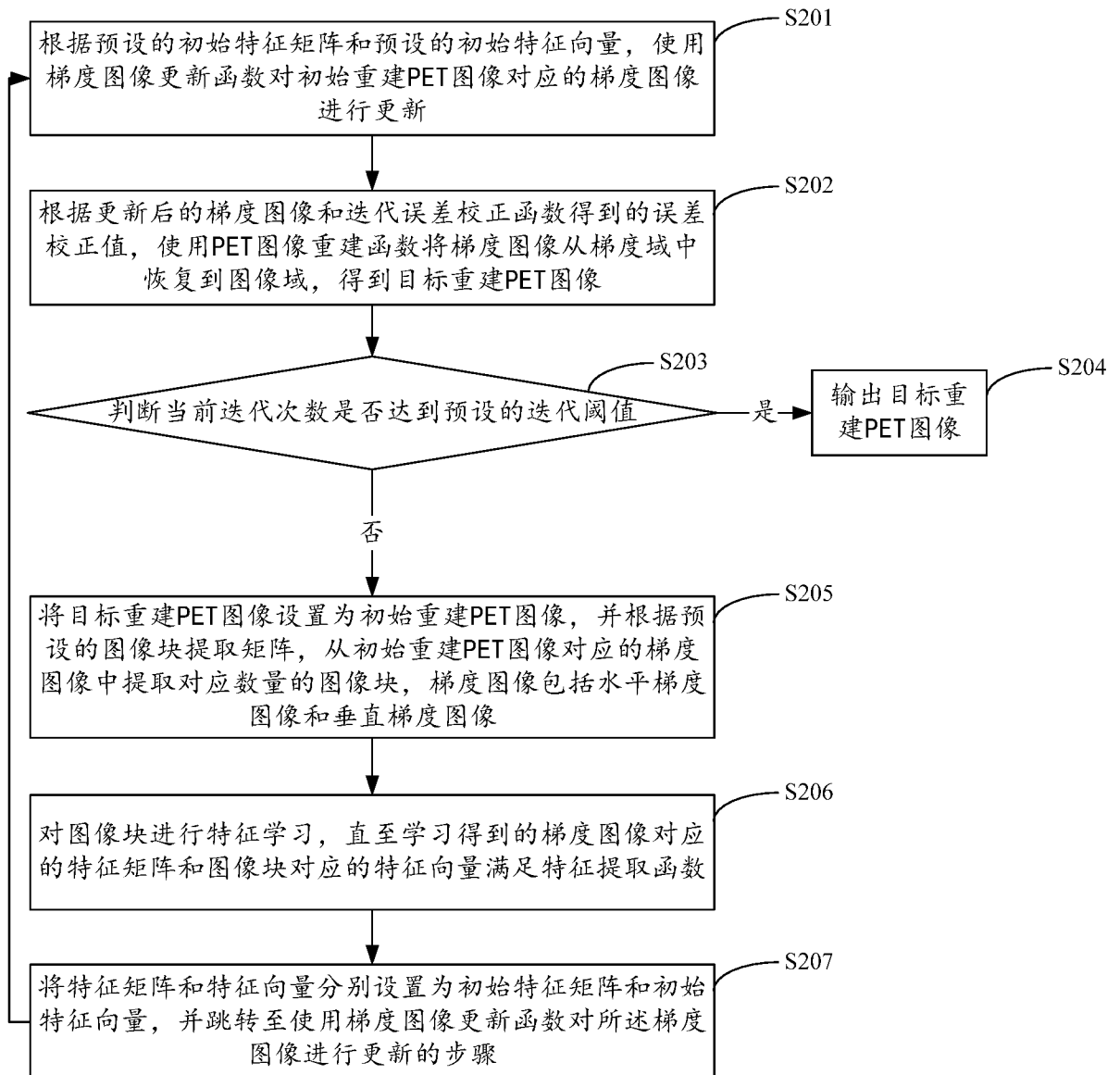


图 2

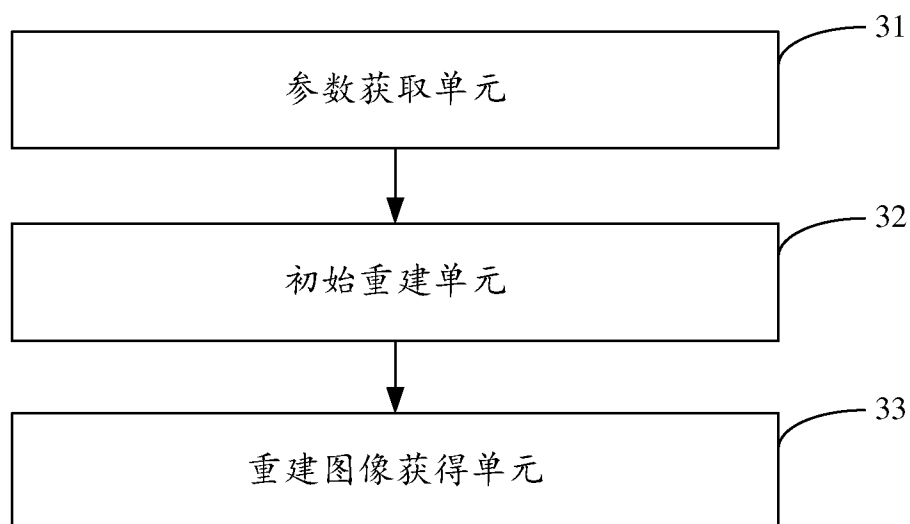


图 3

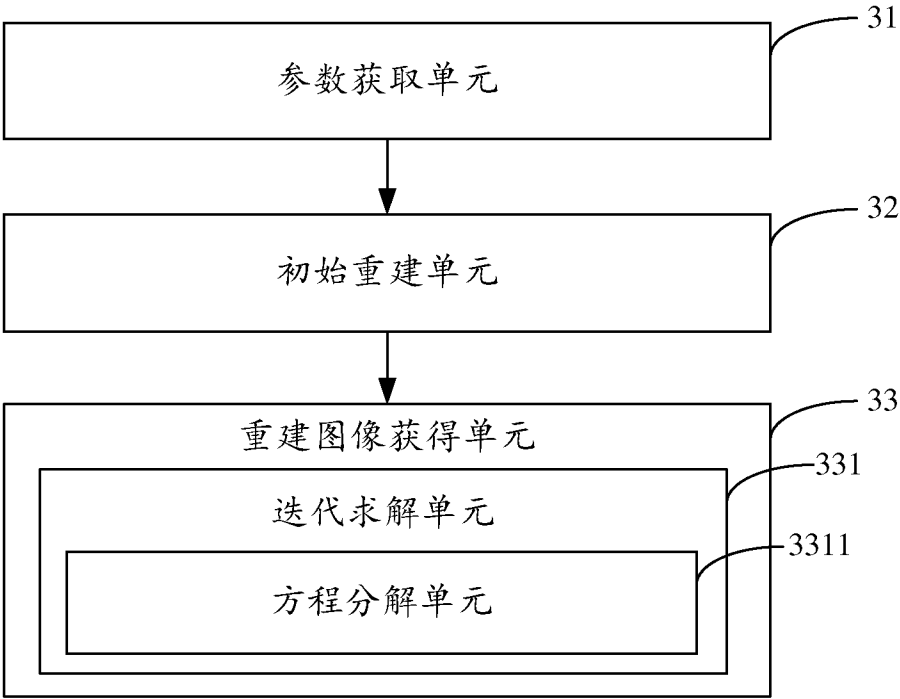


图 4

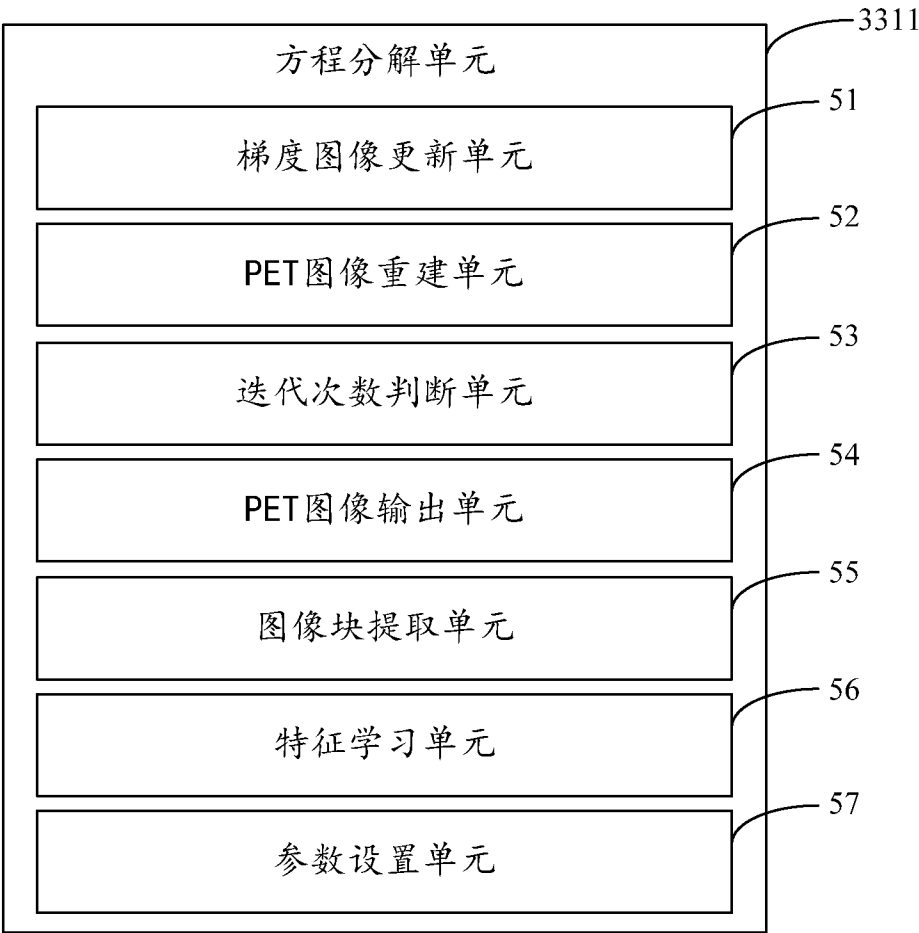


图 5

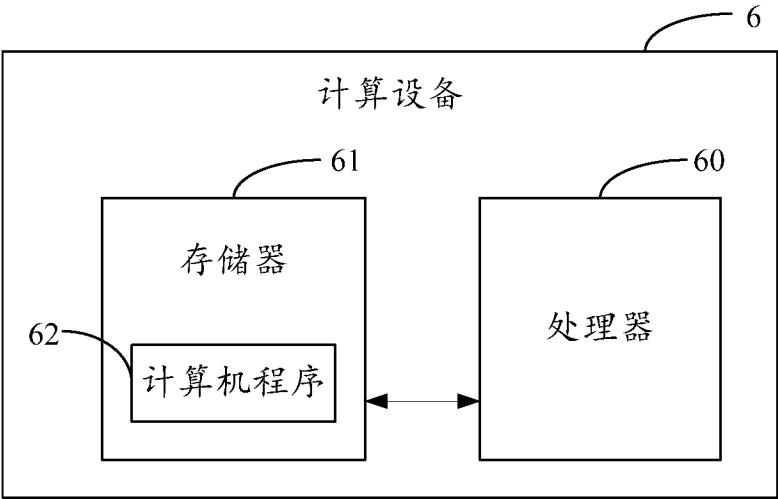


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/071098

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 11/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, IEEE, CNKI: 图像, 重建, PET, 低剂量, 梯度, 投影, 迭代, 拉格朗日, 特征向量, 矩阵, 伪影, image, reconstruct, low dose, gradient, projection, iteration, Lagrange, feature vector, matrix, artifact

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106056644 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 26 October 2016 (2016-10-26) description, paragraphs [0005]-[0013]	1-14
A	CN 103247061 A (SOUTHERN MEDICAL UNIVERSITY) 14 August 2013 (2013-08-14) entire document	1-14
A	CN 107845120 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 27 March 2018 (2018-03-27) entire document	1-14
A	US 2015193927 A1 (RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE) 09 July 2015 (2015-07-09) entire document	1-14
A	US 2013259343 A1 (SIEMENS CORPORATION) 03 October 2013 (2013-10-03) entire document	1-14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

12 May 2019

Date of mailing of the international search report

29 May 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/071098

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106056644	A	26 October 2016	None			
CN	103247061	A	14 August 2013	CN	103247061	B	15 February 2017
CN	107845120	A	27 March 2018	None			
US	2015193927	A1	09 July 2015	US	9600910	B2	21 March 2017
US	2013259343	A1	03 October 2013	US	8879811	B2	04 November 2014

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/071098

A. 主题的分类

G06T 11/00 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

G06T

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNPAT, WPI, EPDOC, IEEE, CNKI: 图像, 重建, PET, 低剂量, 梯度, 投影, 迭代, 拉格朗日, 特征向量, 矩阵, 伪影, image, reconstruct, low dose, gradient, projection, iteration, Lagrange, feature vector, matrix, artifact

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 106056644 A (深圳先进技术研究院) 2016年 10月 26日 (2016 - 10 - 26) 说明书第[0005]-[0013]段	1-14
A	CN 103247061 A (南方医科大学) 2013年 8月 14日 (2013 - 08 - 14) 全文	1-14
A	CN 107845120 A (深圳先进技术研究院) 2018年 3月 27日 (2018 - 03 - 27) 全文	1-14
A	US 2015193927 A1 (RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE) 2015年 7月 9日 (2015 - 07 - 09) 全文	1-14
A	US 2013259343 A1 (SIEMENS CORPORATION) 2013年 10月 3日 (2013 - 10 - 03) 全文	1-14

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 5月 12日

国际检索报告邮寄日期

2019年 5月 29日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

石爽

电话号码 86-(10)-53961413

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/071098

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	106056644	A	2016年 10月 26日	无	
CN	103247061	A	2013年 8月 14日	CN 103247061	B 2017年 2月 15日
CN	107845120	A	2018年 3月 27日	无	
US	2015193927	A1	2015年 7月 9日	US 9600910	B2 2017年 3月 21日
US	2013259343	A1	2013年 10月 3日	US 8879811	B2 2014年 11月 4日