

(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 1 月 30 日 (30.01.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/019684 A1

(51) 国际专利分类号:
G06T 11/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/071087

(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:
201810846916.7 2018年7月27日 (27.07.2018) 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)。 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 INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY (GENERAL PARTNERSHIP)); 中国广东省深圳市福田区

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

(54) 发明名称: 低剂量PET图像重建方法、装置、设备及存储介质

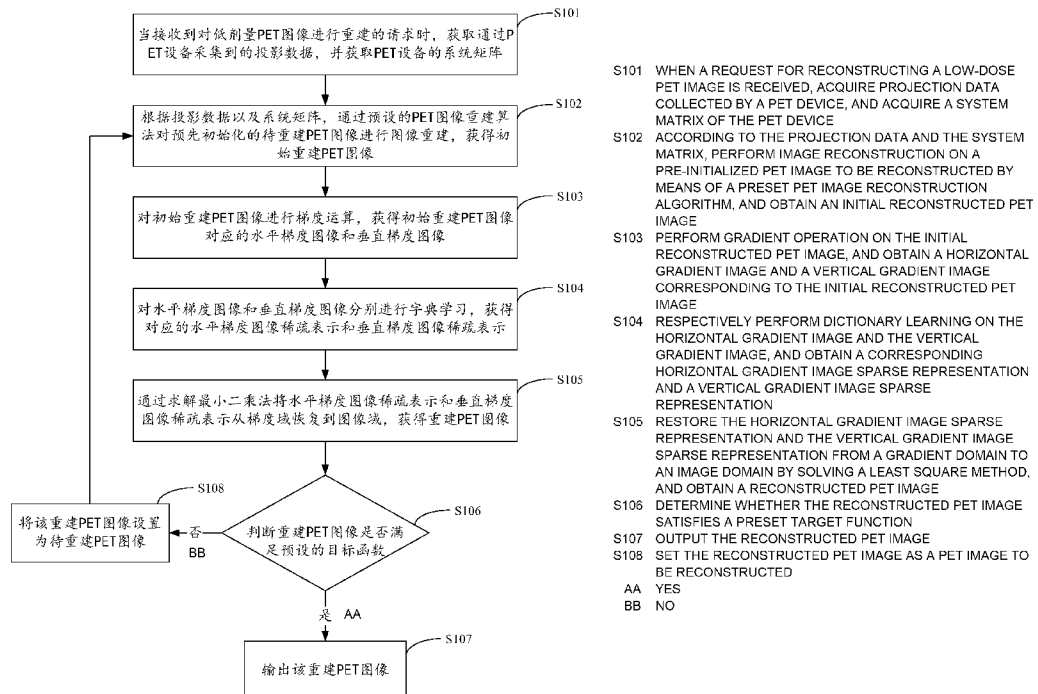


图 1

(57) Abstract: A low-dose PET image reconstruction method and apparatus, and a device and a storage medium, applicable to the technical field of PET imaging. The method comprises: according to collected projection data and a system matrix of a PET device, reconstructing a PET image to be reconstructed by means of a PET image reconstruction algorithm, and obtaining an initial reconstructed PET image; by means of a gradient operation and dictionary learning, respectively obtaining a horizontal gradient image sparse representation and a vertical gradient image sparse representation corresponding to the initial reconstructed PET image; restoring the

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))。

horizontal gradient image sparse representation and the vertical gradient image sparse representation from a gradient domain to an image domain; obtaining a reconstructed PET image; determining whether the reconstructed PET image satisfies a target function; if yes, outputting the reconstructed PET image; otherwise, continuing to perform operations of image reconstruction, gradient operation, and dictionary learning on the PET image to be reconstructed, so that the reconstructed speed of a low-dose PET image is improved, the artifact degree of the reconstructed image is reduced, and the image quality of low-dose PET image reconstruction is further improved.

(57) 摘要: 一种低剂量PET图像重建方法、装置、设备及存储介质, 适用PET成像技术领域, 该方法包括: 根据采集到的投影数据和PET设备的系统矩阵, 通过PET图像重建算法对待重建PET图像进行重建, 获得初始重建PET图像, 通过梯度运算和字典学习, 分别获得初始重建PET图像对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示, 将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域, 获得重建PET图像, 判断重建PET图像是否满足目标函数, 是则输出重建PET图像, 否则, 继续对待重建PET图像执行图像重建、梯度运算以及字典学习的操作, 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。

低剂量 PET 图像重建方法、装置、设备及存储介质

技术领域

5 本发明属于 PET 成像技术领域，尤其涉及一种低剂量 PET 图像重建方法、装置、设备及存储介质。

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。

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
15 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
20 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。

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
25 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。

5 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。

发明内容

10 本发明的目的在于提供一种低剂量 PET 图像重建方法、装置、设备及存储介质, 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, 本发明提供了一种低剂量 PET 图像重建方法, 所述方法包括下述步骤:

15 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;

20 对所述初始重建 PET 图像进行梯度运算, 获得所述初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像;

对所述水平梯度图像和所述垂直梯度图像分别进行字典学习, 获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示;

通过最小二乘法将所述水平梯度图像稀疏表示和所述垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域, 获得重建 PET 图像;

25 判断所述重建 PET 图像是否满足预设的目标函数, 是则, 输出所述重建 PET 图像, 否则, 将所述重建 PET 图像设置为所述待重建 PET 图像, 并跳转

到通过预设的PET图像重建算法对预先初始化的待重建PET图像进行图像重建的步骤。

另一方面，本发明提供了一种低剂量PET图像重建装置，所述装置包括：

参数获取单元，用于当接收到对低剂量PET图像进行重建的请求时，获取
5 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；

梯度图像获取单元，用于对所述初始重建PET图像进行梯度运算，获得所
10 述初始重建PET图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像；

字典学习单元，用于对所述水平梯度图像和所述垂直梯度图像分别进行字典学习，获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示；

重建图像获取单元，用于通过最小二乘法将所述水平梯度图像稀疏表示和所述垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建PET图像；以及

15 重建图像判断单元，用于判断所述重建PET图像是否满足预设的目标函数，是则，输出所述重建PET图像，否则，将所述重建PET图像设置为所述待重建PET图像，并触发所述初始重建单元执行通过预设的PET图像重建算法对预先初始化的待重建PET图像进行图像重建的步骤。

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
20 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低剂量PET图像重建方法所述的步骤。

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低剂量PET图像重建方法所述的步骤。

25 本发明根据采集到的投影数据和PET设备的系统矩阵，通过PET图像重建算法对待重建PET图像进行重建，获得初始重建PET图像，通过梯度运算和

字典学习，分别获得初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示，将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像，判断重建 PET 图像是否满足目标函数，是则输出重建 PET 图像，否则，继续对待重建 PET 图像执行图像重建、梯度运算以及字典学习的操作，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。

附图说明

图 1 是本发明实施例一提供的低剂量 PET 图像重建方法的实现流程图；

图 2 是本发明实施例二提供的低剂量 PET 图像重建装置的结构示意图；

图 3 是本发明实施例二提供的低剂量 PET 图像重建装置的优选结构示意图；以及

图 4 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，当接收到对低剂量 PET 图像进行重建的请求时，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。

5 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
10 (Ordered Subset Expectation Maximization, 简称 OSEM)或者最大后验概率算法(Maximum A Posterior, MAP)。

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，对初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得初始重建 PET
15 图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像。

在本发明实施例中，在对初始重建 PET 图像进行梯度运算时，优选地，根据预设的水平梯度图像公式对初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得该初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像，根据预设的垂直梯度图像公式对初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得该初始重建 PET 图像对应的垂直梯度图像，其中，
20 水平梯度图像公式为 $G_x(j,k)=\hat{f}(j,k+1)-\hat{f}(j,k)$ ，垂直梯度图像公式为 $G_y(j,k)=\hat{f}(j+1,k)-\hat{f}(j,k)$ ， $\hat{f}$ 为初始重建 PET 图像， j 和 k 分别为 $\hat{f}$ 中像素的坐标，从而通过梯度运算将初始重建 PET 图像从图像域转换到梯度域，提高了初始重建 PET 图像的稀疏性，进而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

在对初始重建 PET 图像进行梯度运算之前，优选地，对重建得到的初始重
25 建 PET 图像进行正约束，从而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

在步骤 S104 中，对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习，获得

对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示。

在本发明实施例中，对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习，获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示，由于医学图像的
近邻像素值具有相关性，即转换至梯度域中的图像比图像域中的图像更稀疏，
5 因此，对梯度域中的图像进行字典学习比对图像域中的图像进行字典学习，可以获得更稀疏的图像稀疏表示，从而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

在对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习时，优选地，根据水平梯度图像和垂直梯度图像，通过预设的字典训练算法（例如，K-SVD 算法）进行字典学习，再根据学习结束的字典，对水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度
10 图像稀疏表示进行更新，从而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

在对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习时，进一步优选地，根据预设的图像块数量对水平梯度图像和垂直梯度图像进行图像块提取，得到对应的水平梯度图像块和垂直梯度图像块，对水平梯度图像块和垂直梯度图像块进行字典学习，获得水平梯度图像块对应的稀疏表示和垂直梯度图像块对应的
15 的稀疏表示，由水平梯度图像块对应的稀疏表示构成水平梯度图像稀疏表示，由垂直梯度图像块对应的稀疏表示构成垂直梯度图像稀疏表示，从而通过自适应字典将全局图像的稀疏表示转换成基于图像块的稀疏表示，有效地捕捉初始重建 PET 图像的局部特征，并去除该图像的伪影和块效应，提高后续 PET 图像重建的成像效果。

20 在步骤 S105 中，通过最小二乘法将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像。

在本发明实施例中，通过最小二乘法将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示进行融合，以将初始重建 PET 图像从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像。

25 在步骤 S106 中，判断重建 PET 图像是否满足预设的目标函数。

在步骤 S107 中，输出重建 PET 图像。

在步骤 S108 中，将重建 PET 图像设置为待重建 PET 图像。

在本发明实施例中，当重建 PET 图像满足预设的目标函数时，执行步骤 S107，结束 PET 图像的重建过程，当重建 PET 图像不满足预设的目标函数时，执行步骤 S108，并跳转到步骤 S102 执行通过预设的 PET 图像重建算法对待重建 PET 图像进行图像重建。

在本发明实施例中，优选地，目标函数表示为：

$$\min_{f, D^i, \alpha_l^i} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_l \|R_l(\nabla^i f) - D^i \alpha_l^i\|_2^2 + v_1 \|Mf - g\|_2^2 \right\}, \text{ 其中, } g \text{ 为投影数据, } M \text{ 为系统矩阵, } f \geq 0, \|\alpha_l^i\|_0 \leq T_0, \forall l, i$$

阵， f 为待重建 PET 图像， v_1 为预设大于 0 的惩罚参数， ∇^1 和 ∇^2 表示水平方向和垂直方向的差分算子， $\nabla^i f$ 表示 f 的梯度图像， $\nabla^1 f$ 和 $\nabla^2 f$ 分别表示 f 的水平梯度图像和垂直梯度图像， $R_l(\nabla^i f)$ 为从 $\nabla^i f$ 中提取出的第 l 个图像块的向量表示， D 为预设的过完备字典， α_l^i 为第 l 个图像块所对应的稀疏系数， T_0 为每个图像块的稀疏度，通过自适应稀疏变换算法结合迭代重建算法，来实现重建图像对真实图像的不断逼近，从而降低在 PET 检查中使用的放射性药物的剂量，并提高了 PET 图像重建的成像效果。

在本发明实施例中，根据采集到的投影数据和 PET 设备的系统矩阵，通过 PET 图像重建算法对待重建 PET 图像进行重建，获得初始重建 PET 图像，通过梯度运算和字典学习，分别获得初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示，将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像，判断重建 PET 图像是否满足目标函数，是则输出重建 PET 图像，否则，继续对待重建 PET 图像执行图像重建、梯度运算以及字典学习的操作，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。

实施例二：

图 2 示出了本发明实施例二提供的低剂量 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 21，用于当接收到对低剂量 PET 图像进行重建的请求时，获取通过 PET 设备采集到的投影数据，并获取 PET 设备的系统矩阵。

5 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。

10 初始重建单元 22，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。

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(15 Ordered Subset Expectation Maximization，简称 OSEM)或者最大后验概率算法(Maximum A Posterior， MAP)。

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。

20 梯度图像获取单元 23，用于对初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像。

在本发明实施例中，在对初始重建 PET 图像进行梯度运算时，优选地，根据预设的水平梯度图像公式对初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得该初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像，根据预设的垂直梯度图像公式对初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得该初始重建 PET 图像对应的垂直梯度图像，其中，25 水平梯度图像公式为 $G_x(j,k)=\hat{f}(j,k+1)-\hat{f}(j,k)$ ，垂直梯度图像公式为

$G_y(j,k) = \hat{f}(j+1,k) - \hat{f}(j,k)$, $\hat{f}$ 为初始重建 PET 图像, j 和 k 分别为 $\hat{f}$ 中像素的坐标, 从而通过梯度运算将初始重建 PET 图像从图像域转换到梯度域, 提高了初始重建 PET 图像的稀疏性, 进而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

在对初始重建 PET 图像进行梯度运算之前, 优选地, 对重建得到的初始重建 PET 图像进行正约束, 从而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

字典学习单元 24, 用于对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习, 获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示。

在本发明实施例中, 对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习, 获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示, 由于医学图像的近邻像素值具有相关性, 即转换至梯度域中的图像比图像域中的图像更稀疏, 因此, 对梯度域中的图像进行字典学习比对图像域中的图像进行字典学习, 可以获得更稀疏的图像稀疏表示, 从而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

在对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习时, 优选地, 根据水平梯度图像和垂直梯度图像, 通过预设的字典训练算法 (例如, K-SVD 算法) 进行字典学习, 再根据学习结束的字典, 对水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示进行更新, 从而提高后续 PET 图像重建的成像效果。

在对水平梯度图像和垂直梯度图像分别进行字典学习时, 进一步优选地, 根据预设的图像块数量对水平梯度图像和垂直梯度图像进行图像块提取, 得到对应的水平梯度图像块和垂直梯度图像块, 对水平梯度图像块和垂直梯度图像块进行字典学习, 获得水平梯度图像块对应的稀疏表示和垂直梯度图像块对应的稀疏表示, 由水平梯度图像块对应的稀疏表示构成水平梯度图像稀疏表示, 由垂直梯度图像块对应的稀疏表示构成垂直梯度图像稀疏表示, 从而通过自适应字典将全局图像的稀疏表示转换成基于图像块的稀疏表示, 有效地捕捉初始重建 PET 图像的局部特征, 并去除该图像的伪影和块效应, 提高后续 PET 图像重建的成像效果。

重建图像获取单元 25, 用于通过最小二乘法将水平梯度图像稀疏表示和垂

直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像。

在本发明实施例中，通过最小二乘法将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示进行融合，以将初始重建 PET 图像从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像。

- 5 重建图像判断单元 26，用于判断重建 PET 图像是否满足预设的目标函数，是则，输出该重建 PET 图像，否则，将该重建 PET 图像设置为待重建 PET 图像，并触发初始重建单元 22 执行通过预设的 PET 图像重建算法对待重建 PET 图像进行图像重建步骤。

在本发明实施例中，优选地，目标函数表示为：

$$10 \quad \underset{f, D^i, \alpha_l^i}{\text{mix}} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_l \| R_l(\nabla^i f) - D^i \alpha_l^i \|_2^2 + v_1 \| Mf - g \|_2^2 \right\}, \text{ 其中, } g \text{ 为投影数据, } M \text{ 为系统矩}$$

$$\text{s.t. } f \geq 0, \| \alpha_l^i \|_0 \leq T_0, \forall l, i$$

阵， f 为待重建 PET 图像， v_1 为预设大于 0 的惩罚参数， ∇^1 和 ∇^2 表示水平方向和垂直方向的差分算子， $\nabla^i f$ 表示 f 的梯度图像， $\nabla^1 f$ 和 $\nabla^2 f$ 分别表示 f 的水平梯度图像和垂直梯度图像， $R_l(\nabla^i f)$ 为从 $\nabla^i f$ 中提取出的第 l 个图像块的向量表示， D 为预设的过完备字典， α_l^i 为第 l 个图像块所对应的稀疏系数， T_0 为每个图

15 像块的稀疏度，通过自适应稀疏变换算法结合迭代重建算法，来实现重建图像对真实图像的不断逼近，从而降低在 PET 检查中使用的放射性药物的剂量，并提高了 PET 图像重建的成像效果。

因此，如图 3 所示，优选地，梯度图像获取单元 23 包括：

梯度图获取子单元 231，用于根据预设的水平梯度图像公式和预设垂直梯度图像公式对初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得初始重建 PET 图像对应的

20 水平梯度图像和垂直梯度图像，其中，水平梯度图像公式为 $G_x(j, k) = \hat{f}(j, k+1) - \hat{f}(j, k)$ ，垂直梯度图像公式为 $G_y(j, k) = \hat{f}(j+1, k) - \hat{f}(j, k)$ ， $\hat{f}$ 为初始重建 PET 图像， j 和 k 分别为 $\hat{f}$ 中像素的坐标。

字典学习单元 24 包括：

图像块提取单元 241，用于根据预设的图像块数量对水平梯度图像和垂直梯度图像进行图像块提取，得到对应的水平梯度图像块和垂直梯度图像块；以及

字典学习子单元 242，用于对水平梯度图像块和垂直梯度图像块进行字典学习，获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示。

在本发明实施例中，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。

实施例三：

图 4 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。

本发明实施例的计算设备 4 包括处理器 40、存储器 41 以及存储在存储器 41 中并可在处理器 40 上运行的计算机程序 42。该处理器 40 执行计算机程序 42 时实现上述低剂量 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 S108。或者，处理器 40 执行计算机程序 42 时实现上述各装置实施例中各单元的功能，例如图 2 所示单元 21 至 26 的功能。

在本发明实施例中，根据采集到的投影数据和 PET 设备的系统矩阵，通过 PET 图像重建算法对待重建 PET 图像进行重建，获得初始重建 PET 图像，通过梯度运算和字典学习，分别获得初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示，将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像，判断重建 PET 图像是否满足目标函数，是则输出重建 PET 图像，否则，继续对待重建 PET 图像执行图像重建、梯度运算以及字典学习的操作，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。

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 4 中处理器 40 执行计算机程序 42 时实现低剂量 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：

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 S108。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，例如图 2 所示单元 21 至 26 的功能。

在本发明实施例中，根据采集到的投影数据和 PET 设备的系统矩阵，通过 PET 图像重建算法对待重建 PET 图像进行重建，获得初始重建 PET 图像，通过梯度运算和字典学习，分别获得初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示，将水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像，判断重建 PET 图像是否满足目标函数，是则输出重建 PET 图像，否则，继续对待重建 PET 图像执行图像重建、梯度运算以及字典学习的操作，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。

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：

当接收到对低剂量 PET 图像进行重建的请求时，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；

5 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；

对所述初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得所述初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像；

10 对所述水平梯度图像和所述垂直梯度图像分别进行字典学习，获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示；

通过最小二乘法将所述水平梯度图像稀疏表示和所述垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像；

15 判断所述重建 PET 图像是否满足预设的目标函数，是则，输出所述重建 PET 图像，否则，将所述重建 PET 图像设置为所述待重建 PET 图像，并跳转到通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建的步骤。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述目标函数表示为：

$$\min_{f, D^l, \alpha_l^i} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_l \|R_l(\nabla^i f) - D^l \alpha_l^i\|_2^2 + v_1 \|Mf - g\|_2^2 \right\}, \text{ 其中, } g \text{ 为所述投影数据, } M \text{ 为}$$

$$s.t. f \geq 0, \|\alpha_l^i\|_0 \leq T_0, \forall l, i$$

20 所述系统矩阵， f 为所述待重建 PET 图像， v_1 为预设大于 0 的惩罚参数， ∇^1 和 ∇^2 表示水平方向和垂直方向的差分算子， $\nabla^i f$ 表示所述 f 的梯度图像， $\nabla^1 f$ 和 $\nabla^2 f$ 分别表示所述 f 的水平梯度图像和垂直梯度图像， $R_l(\nabla^i f)$ 为从所述 $\nabla^i f$ 中提取出的第 l 个图像块的向量表示， D 为预设的过完备字典， α_l^i 为所述第 l 个图像块所对应的稀疏系数， T_0 为所述每个图像块的稀疏度。

3、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，对所述初始重建 PET 图像进

行梯度运算的步骤，包括：

根据预设的水平梯度图像公式和预设的垂直梯度图像公式对所述初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得所述初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像，其中，所述水平梯度图像公式为 $G_x(j,k) = \hat{f}(j,k+1) - \hat{f}(j,k)$ ，所述垂直梯度图像公式为 $G_y(j,k) = \hat{f}(j+1,k) - \hat{f}(j,k)$ ， $\hat{f}$ 为所述初始重建 PET 图像， j 和 k 分别为所述 $\hat{f}$ 中像素的坐标。

4、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，对所述水平梯度图像和所述垂直梯度图像分别进行字典学习的步骤，包括：

根据预设的图像块数量对所述水平梯度图像和所述垂直梯度图像进行图像块提取，得到对应的水平梯度图像块和垂直梯度图像块；

对所述水平梯度图像块和所述垂直梯度图像块进行字典学习，获得对应的所述水平梯度图像稀疏表示和所述垂直梯度图像稀疏表示。

5、一种低剂量 PET 图像重建装置，其特征在于，所述装置包括：

参数获取单元，用于当接收到对低剂量 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；

梯度图像获取单元，用于对所述初始重建 PET 图像进行梯度运算，获得所述初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像；

字典学习单元，用于对所述水平梯度图像和所述垂直梯度图像分别进行字典学习，获得对应的水平梯度图像稀疏表示和垂直梯度图像稀疏表示；

重建图像获取单元，用于通过最小二乘法将所述水平梯度图像稀疏表示和所述垂直梯度图像稀疏表示从梯度域恢复到图像域，获得重建 PET 图像；以及

重建图像判断单元，用于判断所述重建 PET 图像是否满足预设的目标函数，是则，输出所述重建 PET 图像，否则，将所述重建 PET 图像设置为所述待重建

PET 图像, 并触发所述初始重建单元执行通过预设的 PET 图像重建算法对预先初始化的待重建 PET 图像进行图像重建的步骤。

6、如权利要求 5 所述的装置, 其特征在于, 所述目标函数表示为:

$$\min_{f, D^l, \alpha_l^i} \{ \sum_{i=1}^2 \sum_l \| R_l(\nabla^i f) - D^l \alpha_l^i \|_2^2 + v_1 \| Mf - g \|_2^2 \}, \text{ 其中, } g \text{ 为所述投影数据, } M \text{ 为}$$

$$s.t. f \geq 0, \| \alpha_l^i \|_0 \leq T_0, \forall l, i$$

5 所述系统矩阵, f 为所述待重建 PET 图像, v_1 为预设大于 0 的惩罚参数, ∇^1 和 ∇^2 表示水平方向和垂直方向的差分算子, $\nabla^i f$ 表示所述 f 的梯度图像, $\nabla^1 f$ 和 $\nabla^2 f$ 分别表示所述 f 的水平梯度图像和垂直梯度图像, $R_l(\nabla^i f)$ 为从所述 $\nabla^i f$ 中提取出的第 l 个图像块的向量表示, D 为预设的过完备字典, α_l^i 为所述第 l 个图像块所对应的稀疏系数, T_0 为所述每个图像块的稀疏度。

10 7、如权利要求 5 所述的装置, 其特征在于, 所述梯度图像获取单元包括:

梯度图获取子单元, 用于根据预设的水平梯度图像公式和预设的垂直梯度图像公式对所述初始重建 PET 图像进行梯度运算, 获得所述初始重建 PET 图像对应的水平梯度图像和垂直梯度图像, 其中, 所述水平梯度图像公式为 $G_x(j, k) = \hat{f}(j, k+1) - \hat{f}(j, k)$, 所述垂直梯度图像公式为 $G_y(j, k) = \hat{f}(j+1, k) - \hat{f}(j, k)$, $\hat{f}$

15 为所述初始重建 PET 图像, j 和 k 分别为所述 $\hat{f}$ 中像素的坐标。

8、如权利要求 5 所述的装置, 其特征在于, 所述字典学习单元包括:

图像块提取单元, 用于根据预设的图像块数量对所述水平梯度图像和所述垂直梯度图像进行图像块提取, 得到对应的水平梯度图像块和垂直梯度图像块; 以及

20 字典学习子单元, 用于对所述水平梯度图像块和所述垂直梯度图像块进行字典学习, 获得对应的所述水平梯度图像稀疏表示和所述垂直梯度图像稀疏表示。

9、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 4 任一项所述方法的步骤。

10、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 4 任一项所述方法的步骤。

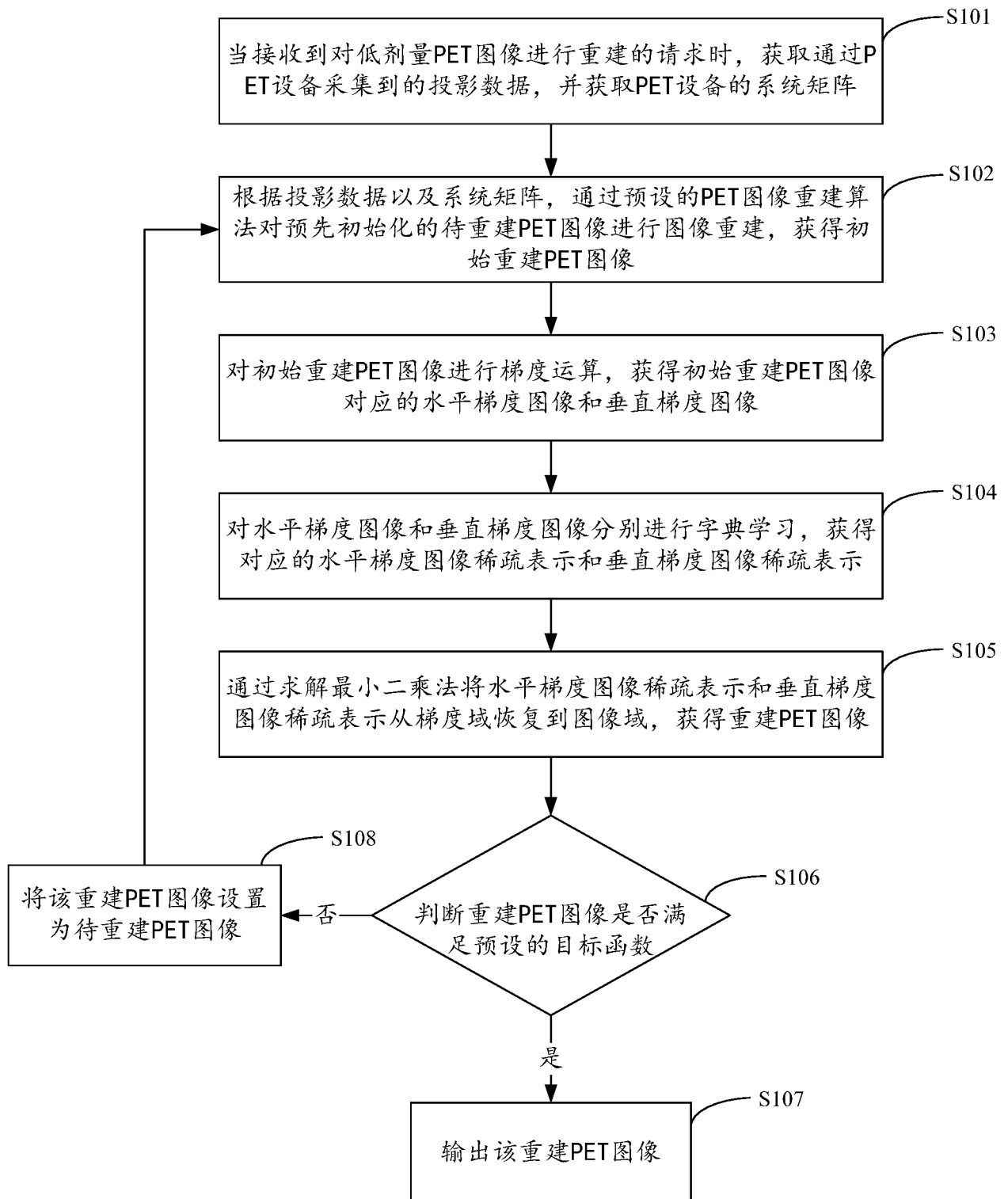


图 1

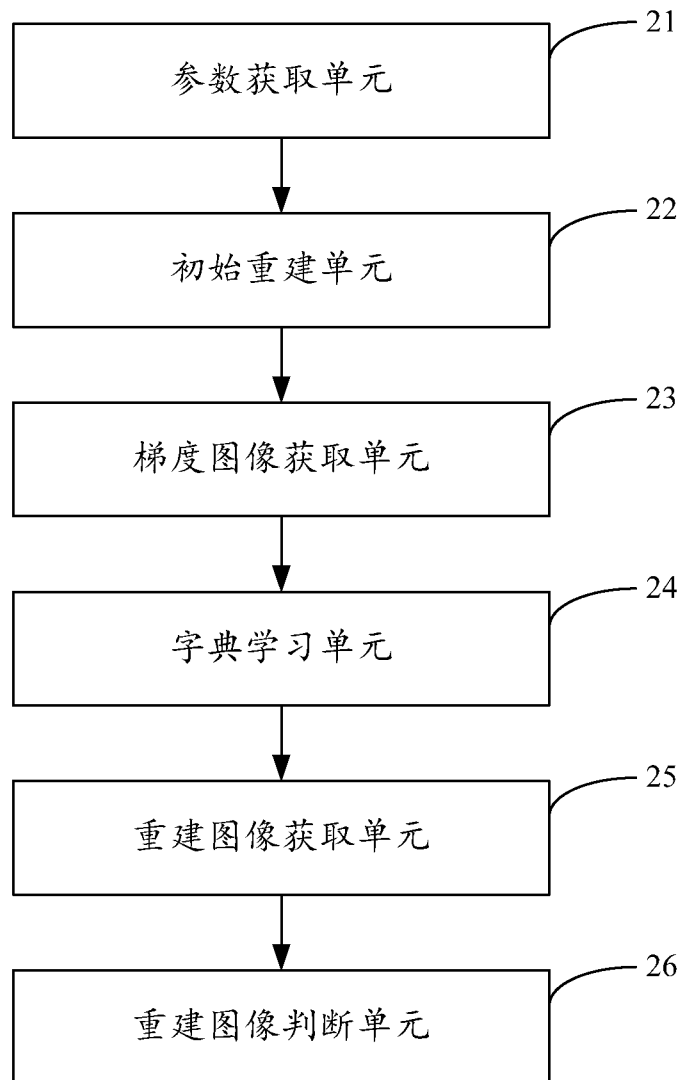


图 2

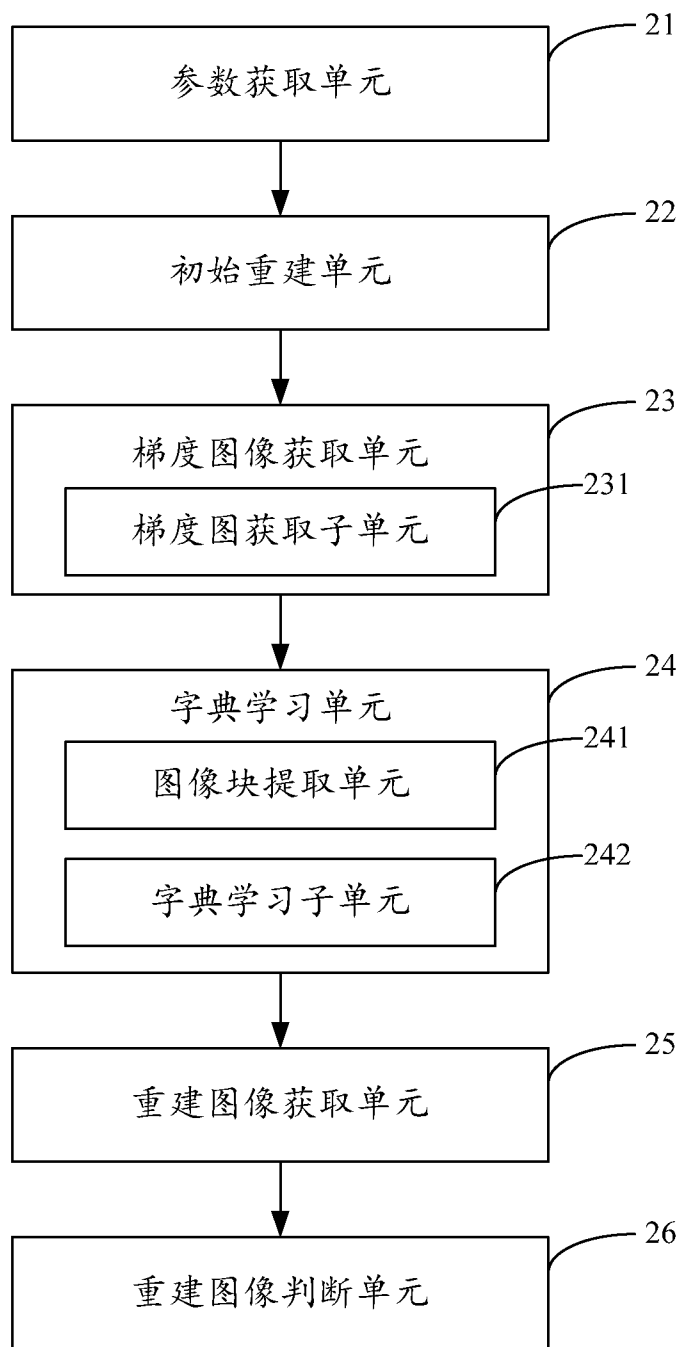


图 3

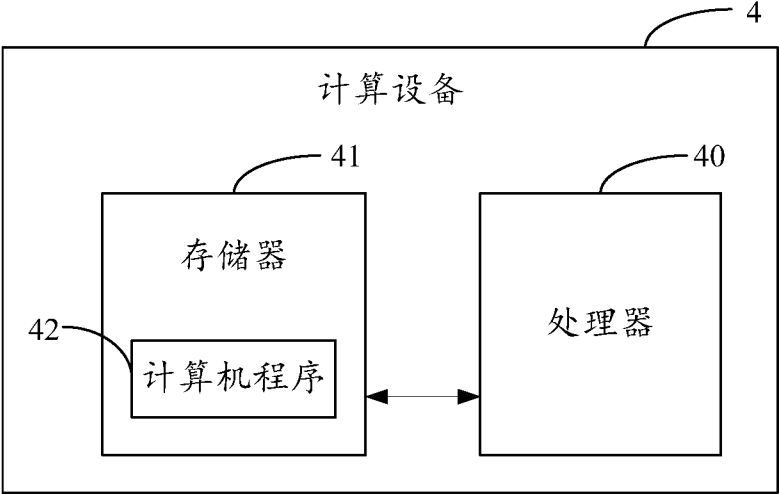


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/071087

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 图像, 重建, 梯度, 字典学习, 水平, 垂直, 稀疏, 最小二乘, 目标函数, image, reconstruction, gradient, dictionary, learning, horizontal, vertical, sparse, objective, function

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106023124 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 12 October 2016 (2016-10-12) description, paragraphs [0005]-[0026]	1-10
A	CN 103049923 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 17 April 2013 (2013-04-17) entire document	1-10
A	US 9689947 B2 (SIEMENS HEALTHCARE GMBH) 27 June 2017 (2017-06-27) entire document	1-10
A	谭莎 等 (TAN, Sha et al.). "基于自适应稀疏表达的并行磁共振重建方法 (Parallel Magnetic Resonance Imaging Reconstruction via Adaptive Sparse Representation)" 集成技术 (Journal of Technology Integration), Vol. 5, No. (3), 31 May 2016 (2016-05-31), ISSN: 2095-3135, pp. 54-59	1-10



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

16 April 2019

Date of mailing of the international search report

28 April 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/CN2019/071087

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	106023124	A	12 October 2016	None	
CN	103049923	A	17 April 2013	None	
US	9689947	B2	27 June 2017	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/071087

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))

WPI, EPDOC, CNPAT, CNKI: 图像, 重建, 梯度, 字典学习, 水平, 垂直, 稀疏, 最小二乘, 目标函数, image, reconstruction, gradient, dictionary, learning, horizontal, vertical, sparse, objective, function

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 106023124 A (上海交通大学) 2016年 10月 12日 (2016 - 10 - 12) 说明书第[0005]-[0026]段	1-10
A	CN 103049923 A (深圳先进技术研究院) 2013年 4月 17日 (2013 - 04 - 17) 全文	1-10
A	US 9689947 B2 (SIEMENS HEALTHCARE GMBH) 2017年 6月 27日 (2017 - 06 - 27) 全文	1-10
A	谭莎 等, “基于自适应稀疏表达的并行磁共振重建方法” 集成技术, 第5卷, 第3期, 2016年 5月 31日 (2016 - 05 - 31), ISSN: 2095-3135, 第54-59页	1-10

☐ 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 4月 16日

国际检索报告邮寄日期

2019年 4月 28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

受权官员

刘芬

传真号 (86-10)62019451

电话号码 86-(10)-53961434

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/071087

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	106023124	A	2016年 10月 12日	无	
CN	103049923	A	2013年 4月 17日	无	
US	9689947	B2	2017年 6月 27日	无	