

(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
2022 年 12 月 22 日 (22.12.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/262109 A1

(51) 国际专利分类号:
G16H 50/20 (2018.01)

穆礼德(MU, Lide): 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/113447

(74) 代理人: 杭州天勤知识产权代理有限公司 (HANGZHOU TIANQIN INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区竞舟路1号筑品金座501室, Zhejiang 310013 (CN)。

(22) 国际申请日: 2021 年 8 月 19 日 (19.08.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110682912.1 2021年6月18日 (18.06.2021) 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, IT, 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,

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 刘华锋(LIU, Huafeng); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(54) **Title:** HEART TRANSMEMBRANE POTENTIAL RECONSTRUCTION METHOD BASED ON GRAPH CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK AND ITERATIVE SHRINKAGE-THRESHOLDING ALGORITHM

(54) 发明名称: 基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法

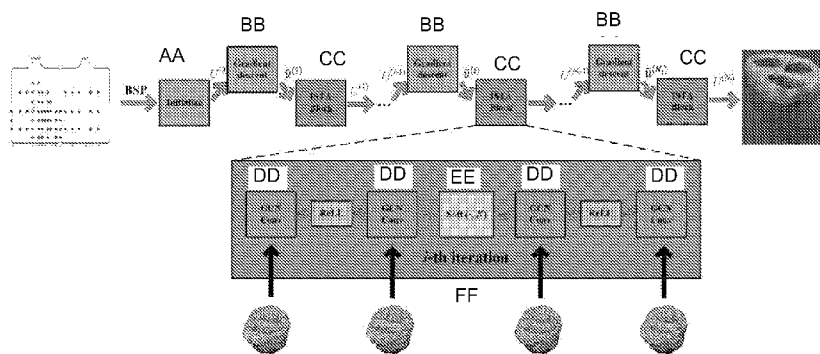


图 1

AA Initialize
BB Gradient descent
CC ISTA Block
DD GCN Conv
EE Soft(·, β)
FF i-th iteration

(57) **Abstract:** A heart transmembrane potential reconstruction method based on a graph convolutional neural network and an iterative shrinkage-thresholding algorithm, the method comprising: performing iterative reconstruction of the transmembrane potential of the heart by means of an iterative shrinkage-thresholding algorithm embedded in a graph convolutional neural network, using the graph convolutional neural network to extract association information between nodes in non-Euclidean data such as the transmembrane potential of the heart, while at the same time preserving rigorous mathematical calculation by the iterative shrinkage-thresholding algorithm, and obtaining, by means of multiple iterations, a solution for the transmembrane potential of the heart. On the basis of a reconstructed

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, 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))。

spatial-temporal sequence of the transmembrane potential of the heart, auxiliary diagnosis of arrhythmias such as ventricular pre-mature contractions, tachycardia and atrial fibrillation, as well as common cardiac diseases such as myocardial ischemia and myocardial infarction, can be performed, thus providing guidance for subsequent treatment and radio frequency ablation surgery.

(57) 摘要: 一种基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法, 通过嵌入图卷积神经网络的迭代阈值收缩算法对心脏跨膜电位进行迭代重建, 利用图卷积神经网络提取心脏跨膜电位这种非欧氏数据中节点之间的关联信息, 同时保留迭代阈值收缩算法严谨的数学计算, 经过多次迭代得到心脏跨膜电位的解。基于重建出的心脏跨膜电位的时空序列即可对心律失常中的室性早搏、心动过速、房颤以及心肌缺血和心肌梗死等常见心脏疾病进行辅助诊断, 为后续的治疗和射频消融手术提供指导。

基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法

技术领域

本发明属于心脏跨膜电位重建技术领域，具体涉及一种基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法。

背景技术

正常心律的紊乱，称为心律失常，已经成为了世界上发病率和致死率最高的疾病之一，由于心律失常往往会造成心肌机械运动的变化，因此心律失常也成为了室性早搏、心动过速、房颤、房早、心肌缺血、心肌梗死等心脏疾病以及心源性猝死的首要原因。根据世界卫生组织统计，每年全球有超过 1000 万人死于心律失常疾病，还有更多的人由于心律失常疾病变成残疾；虽然心律失常疾病在我国的发病率相对较低，但是由于巨大的人口基数，每年依然有超过 80 万人死于这种疾病。因此，准确地识别有风险的患者，并提供准确的诊断和指导治疗对于减小这类疾病致死率和提高治愈率有着非常重要的临床意义。

由于体表可测得的心电图信号是心脏表面电位的映射，近年来也有研究者提出了心脏电生理成像(Electrocardiographic Imaging, ECGI)技术，这种方法主要通过体表测得的多导联心电信号(一般大于 64 个电极)和心脏与躯干的几何模型逆向重建得到心脏表面的电生理活动信息，包括心脏跨膜电位、心脏心内膜和心外膜的细胞外电位、心脏表面的激活时序等。相比于目前临床上最为精确的侵入式方法，ECGI 技术可以用于无创地记录心脏的电生理活动，筛选和识别心律失常和心源性猝死高危患者，同时提供心脏中的实际空间异质性信息，并对心律失常疾病进行诊断和定位。

因此，若能够提高心脏表面电位的重建精度，同时减少算法的复杂度和计算时间，对于临床心律失常以及一些心脏缺血性疾病的诊断和治疗具有非常重要的意义。

发明内容

鉴于上述，本发明提供了一种基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法，在保留传统迭代阈值收缩算法严谨数学推理的基础上，充分利用了图卷积神经网络对于基于图的心脏细胞外电位数据的节点之间相互联系的特征，从而通过体表测得的多导联心电图数据对心脏跨膜电位时空分布进行重建，从而对一些心脏疾病进行诊断。

一种基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法，包括如下步骤：

(1) 对病人躯干部分进行增强 CT 平扫，采集得到病人胸腔轴向的增强 CT 切片图像；

(2) 根据所述增强 CT 切片图像建立心脏表面和躯干表面的有限元模型，求出体表电位与心脏跨膜电位之间的正向关系即 $\Phi = \mathbf{H}\mathbf{U}$ ，其中 Φ 为体表电位， $\mathbf{U}$ 为心脏跨膜电位， $\mathbf{H}$ 表示 Φ 与 $\mathbf{U}$ 之间的正向转换矩阵；

(3) 采集病人的多导联体表心电信号即 Φ ，并对心电信号进行滤波处理；

(4) 根据已获得的 Φ 以及 $\mathbf{H}$ ，对心脏跨膜电位信号进行初始化；

(5) 根据心脏跨膜电位信号初值，通过嵌入图卷积神经网络的迭代阈值收缩算法(Iterative Shrinkage Thresholding Algorithm, ISTA)对心脏跨膜电位进行重建。

进一步地，所述步骤 (1) 中 CT 平扫的范围需包括整个胸腔，同时记录下心脏和胸腔的空间几何位置以及胸腔表面的多导联心电图电极位置。

进一步地，所述步骤 (2) 的具体实现方式为：首先采用 Matlab 软件对多张胸腔轴向的增强 CT 切片图像进行左心室心内膜、右心室心内膜和心外膜的分割，同时利用 3D Slicer 软件对增强 CT 切片图像上的多导联电极位置进行标注，进一步通过有限元的方法可以得到心脏表面和躯干表面的有限元模型并进行配准；然后基于心脏和躯干表面的有限元模型，再通过边界元的方法可以得到心脏跨膜电位传播到胸腔表面的正向关系即 $\Phi = \mathbf{H}\mathbf{U}$ 。

进一步地，所述步骤 (3) 中使病人穿戴上分布有 64 导联电极的体表电位检测设备进行测量，采集获得病人的 64 导联体表心电信号，进而通过小波变换对该信号进行拉平和去噪处理。

进一步地，所述步骤（4）中对心脏跨膜电位信号进行初始化的公式如下：

$$\mathbf{u}^{(0)} = \mathbf{Q}_{init} \Phi$$

$$\mathbf{Q}_{init} = \arg \min_{\mathbf{Q}} \|\mathbf{Q}\Phi - \mathbf{U}\|_F^2 = \mathbf{U}\Phi^T (\Phi\Phi^T)^{-1}$$

其中： $\mathbf{u}^{(0)}$ 为心脏跨膜电位信号初值， $\|\cdot\|_F$ 表示F范数， ^{T} 表示转置， $\mathbf{Q}$ 表示 Φ 与 $\mathbf{U}$ 之间的反向转换矩阵。

进一步地，所述步骤（5）的具体实现方式如下：

5.1 将 ISTA 中的更新步骤映射到一个由固定数量的 block 级联组成的图卷积神经网络模型，每一个 block 对应于 ISTA 中的一次迭代；

5.2 通过将 L1 范数正则化中的正则化矩阵替换为 block 对应的非线性变换函数，建立以下目标重建方程：

$$\min_{\mathbf{U}} \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{U} - \Phi\|_2^2 + \lambda \|\Gamma(\mathbf{U})\|_1$$

其中： $\|\cdot\|_2$ 表示2范数， $\|\cdot\|_1$ 表示1范数， λ 为正则化系数， $\Gamma(\cdot)$ 为 block 对应的非线性变换函数；

5.3 通过 ISTA 来优化求解上述目标重建方程，ISTA 中的每一次迭代均分为两个步骤：第一个步骤是梯度下降，第二个步骤则是求解近端算子；

5.4 利用已有的数据样本对基于 ISTA 的图卷积神经网络模型进行训练，最后利用训练好的网络模型用于心电逆问题的求解，从而完成心脏跨膜电位的重建。

进一步地，所述步骤 5.1 中的 block 即通过使用一种通用的非线性变换函数对 $\mathbf{U}$ 进行稀疏化，其具体结构从输入到输出由图卷积层 G1、ReLU 激活函数 R1、图卷积层 G2、软阈值收缩算子、图卷积层 G3、ReLU 激活函数 R2、图卷积层 G4 依次连接组成。

进一步地，所述步骤 5.3 中梯度下降步骤的表达式如下：

$$\tilde{\mathbf{U}}^{(k)} = \mathbf{U}^{(k-1)} - t^{(k)} \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{U}^{(k-1)} - \Phi)$$

其中： t 表示步长， ^{T} 表示转置，上标 k 和 $k-1$ 表示迭代次数， k 为大于 0 的自然数， $\tilde{\mathbf{U}}$ 为通过梯度下降求得关于 $\mathbf{U}$ 的中间变量。

进一步地，所述步骤 5.3 中求解近端算子步骤的表达式如下：

$$\mathbf{U}^{(k)} = \arg \min_{\mathbf{U}} \frac{1}{2} \|\mathbf{U} - \tilde{\mathbf{U}}^{(k)}\|_2^2 + \lambda \|\Gamma(\mathbf{U})\|_1$$

其中： $\tilde{\mathbf{U}}$ 为通过梯度下降求得关于 $\mathbf{U}$ 的中间变量，上标 k 表示迭代次数， k 为大于 0 的自然数。

进一步地，所述图卷积层的实现方式满足以下分层传播规则：

$$\mathbf{G}^{(l+1)} = \sigma \left(\tilde{\mathbf{D}}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{D}}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{G}^{(l)} \mathbf{W}^{(l)} \right)$$

其中： $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \mathbf{I}_N$ ， $\mathbf{A}$ 为自连接的无向图的邻接矩阵， $\mathbf{I}_N$ 为单位矩阵， $\tilde{\mathbf{D}}$ 为度矩阵且其中对角线元素值 $\tilde{D}_{ii} = \sum_j \tilde{A}_{ij}$ ， $\tilde{A}_{ij}$ 为 $\tilde{\mathbf{A}}$ 中第 i 行第 j 列元素值，上标 l 和 $l+1$ 表示图卷积层序号， $\mathbf{G}$ 表示图卷积层的输出， $\mathbf{W}$ 为图卷积层中的权重矩阵， $\sigma(\cdot)$ 表示 ReLU 激活函数。

本发明通过嵌入图卷积神经网络的迭代阈值收缩算法对心脏跨膜电位进行迭代重建，利用图卷积神经网络提取心脏跨膜电位这种非欧氏数据中节点之间的关联信息，同时保留迭代阈值收缩算法严谨的数学计算，经过多次迭代得到心脏跨膜电位的解。本发明基于重建出的心脏跨膜电位的时空序列即可对心律失常中的室性早搏、心动过速、房颤以及心肌缺血和心肌梗死等常见心脏疾病进行辅助诊断，为后续的治疗和射频消融手术提供指导。

附图说明

图 1 为本发明基于嵌入图卷积神经网络的迭代阈值收缩算法流程示意图。

图 2 为本发明与现有 TV 算法对于室性早搏数据进行心脏跨膜电位重建的空间对比结果图。

图 3 为本发明与现有 TV 算法的对于室性早搏数据进行心脏跨膜电位重建的时间对比结果图。

图 4 为本发明与现有 TV 算法的对于心肌梗死数据进行心脏跨膜电位重建的空间对比结果图。

图5为本发明与现有TV算法的对于心肌梗死数据进行心脏激活时序重建的空间对比结果图。

具体实施方式

为了更为具体地描述本发明，下面结合附图及具体实施方式对本发明的技术方案进行详细说明。

本发明基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法，具体步骤如下：

(1) 对病人躯干部分进行增强CT平扫。

增强CT扫描的范围需要包括整个胸腔，同时记录下心脏和胸腔的空间几何位置以及胸腔表面的64导联心电图电极位置。

(2) 根据病人的躯干增强CT图像，得到心脏表面和躯干表面的有限元模型，求出多导联体表电位与心脏跨膜电位之间的正向关系： $\Phi = HU$ 。

首先通过matlab软件对多张胸腔轴向增强CT切片进行左心室心内膜、右心室心内膜和心外膜的分割，同时通过3D slicer软件对增强CT切片上的64导联电极位置进行标注，进一步通过有限元的方法可以得到心脏表面和躯干表面的有限元模型；然后基于心脏和躯干表面的有限元模型，再通过边界元的方法可以得到心脏跨膜电位传播到胸腔表面的正向关系。

(3) 采集病人的64导联体表心电图信号 Φ ，并对心电信号进行滤波。

在病人胸腔表面放置64个电极对躯干表面的心电信号进行测量，进一步通过小波变换对测得的64导联心电型号进行拉平和去噪处理。

(4) 根据已获得 Φ 和 H ，对心脏跨膜电位信号进行初始化，心脏跨膜电位初始化的公式为：

$$u^{(0)} = Q_{init} \Phi$$

其中： $Q_{init} = \arg \min_Q \|Q\Phi - U\|_F^2 = U\Phi^T (\Phi\Phi^T)^{-1}$ ，为初始化矩阵。

(5) 在已初始化的心脏跨膜电位信号的基础上，通过嵌入图卷积神经网络的迭代阈值收缩算法对心脏跨膜电位进行迭代重建。

如图 1 所示, 本发明利用图卷积神经网络对传统的迭代阈值收缩算法 ISTA 进行改进, 将 ISTA 更新步骤映射到一个由固定数量的阶段组成的深层网络结构, 每一个阶段对应于传统 ISTA 算法的一次迭代, 即通过使用一种通用的非线性变化函数对 $\mathbf{U}$ 进行稀疏化, 具体可以表现为四个图卷积层和 ReLU 激活函数。

首先, 将传统 L1 范数正则化中的正则化矩阵替换为上述的非线性变换, 可以表示为:

$$\min_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{U}_{TMP} - \Phi\|_2^2 + \lambda \|\Gamma(\mathbf{U}_{TMP})\|_1$$

然后, 通过 ISTA 算法来求解上述的约束最小化问题, 对于 ISTA 算法中的每一次迭代, 都分为两个步骤: 第一个步骤是梯度下降, 第二个步骤则是求解近端算子。在 ISTA-Net 中, 保留了第一梯度下降的步骤如下:

$$\tilde{\mathbf{U}}_{TMP}^{(i)} = \mathbf{U}_{TMP}^{(i-1)} - t^{(i)} \mathbf{H}^\top (\mathbf{H}\mathbf{U}_{TMP}^{(i-1)} - \Phi)$$

而对于如下式所示的第二个求解近端算子的步骤, 只保留了软阈值收缩计算的步骤, 在软阈值收缩的前后分别通过几个卷积层和 ReLU 激活函数来代替传统算法中正则化矩阵的计算步骤:

$$\mathbf{U}_{TMP}^{(i)} = \arg \min_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \|\mathbf{U}_{TMP} - \tilde{\mathbf{U}}_{TMP}^{(i)}\|_2^2 + \lambda \|\Gamma(\mathbf{U}_{TMP})\|_1$$

最后, 通过成对的数据对于 ISTA-Net 进行训练, 再将训练好的模型用于逆问题的求解。其中图卷积的实现方式满足下式所示的分层传播规则:

$$\mathbf{H}^{(l+1)} = \sigma \left(\tilde{\mathbf{D}}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{D}}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}^{(l)} \mathbf{W}^{(l)} \right)$$

其中: $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \mathbf{I}_N$ 为自连接的无向图的邻接矩阵, $\mathbf{I}_N$ 为单位阵, $\tilde{D}_{ii} = \sum_j \tilde{A}_{ij}$ 和 $\mathbf{W}^{(l)}$ 为

每一个图卷积层特有的可训练的权重矩阵, 即为网络中的主要参数; $\sigma(\cdot)$ 为每一层的激活函数, 例如 $\text{ReLU}(\cdot) = \max(0, \cdot)$ 等, $\mathbf{H}^{(l)} \in \mathbb{R}^{N \times D}$ 为第 l 层的激活矩阵即为这一层输出的结果, $\mathbf{H}^{(0)} = \mathbf{X}$, 第 0 层的激活值即为输入的数据。

以下具体实验过程中, 我们将本发明整个算法在 Windows 10(64 位)系统中

测试，其中 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i9-7900x CPU @ 3.30 GHz 3.31GHz，主机内存为 32GB RAM，显卡型号为 NVIDIA GeForce GTX 2080Ti，主要编程环境为 python 3.8。

为了验证本发明方法在心脏跨膜电位重建的精度和对于心脏疾病的诊断精度，我们应用了上述方法于室性早搏数据和心肌梗死数据，对心脏跨膜电位进行了重建。图 2 显示了本发明方法和现有 TV 算法的对于室性早搏数据进行心脏跨膜电位重建的空间对比结果，从本发明重建结果中可以清晰地看到室性早搏发生的位置。图 3 显示了本发明方法和现有 TV 算法的对于室性早搏数据进行心脏跨膜电位重建的时间对比结果，图 4 显示了本发明方法和现有 TV 算法的对于心肌梗死数据进行心脏跨膜电位重建的空间对比结果，从本发明重建结果中可以清晰地看到心肌梗死发生的位置及面积；图 5 显示了本发明方法和现有 TV 算法的对于心肌梗死数据进行心脏激活时序重建的对比结果。

上述对实施例的描述是为便于本技术领域的普通技术人员能理解和应用本发明，熟悉本领域技术的人员显然可以容易地对上述实施例做出各种修改，并把在此说明的一般原理应用到其他实施例中而不必经过创造性的劳动。因此，本发明不限于上述实施例，本领域技术人员根据本发明的揭示，对于本发明做出的改进和修改都应该在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种基于图卷积神经网络和迭代阈值收缩算法的心脏跨膜电位重建方法，包括如下步骤：

(1) 对病人躯干部分进行增强 CT 平扫，采集得到病人胸腔轴向的增强 CT 切片图像；

(2) 根据所述增强 CT 切片图像建立心脏表面和躯干表面的有限元模型，求出体表电位与心脏跨膜电位之间的正向关系即 $\Phi = \mathbf{H}\mathbf{U}$ ，其中 Φ 为体表电位， $\mathbf{U}$ 为心脏跨膜电位， $\mathbf{H}$ 表示 Φ 与 $\mathbf{U}$ 之间的正向转换矩阵；

(3) 采集病人的多导联体表心电信号即 Φ ，并对心电信号进行滤波处理；

(4) 根据已获得的 Φ 以及 $\mathbf{H}$ ，对心脏跨膜电位信号进行初始化；

(5) 根据心脏跨膜电位信号初值，通过嵌入图卷积神经网络的迭代阈值收缩算法对心脏跨膜电位进行重建。

2. 根据权利要求 1 所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤 (1) 中 CT 平扫的范围需包括整个胸腔，同时记录下心脏和胸腔的空间几何位置以及胸腔表面的多导联心电图电极位置。

3. 根据权利要求 1 所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤 (2) 的具体实现方式为：首先采用 Matlab 软件对多张胸腔轴向的增强 CT 切片图像进行左心室心内膜、右心室心内膜和心外膜的分割，同时利用 3D Slicer 软件对增强 CT 切片图像上的多导联电极位置进行标注，进一步通过有限元的方法可以得到心脏表面和躯干表面的有限元模型并进行配准；然后基于心脏和躯干表面的有限元模型，再通过边界元的方法可以得到心脏跨膜电位传播到胸腔表面的正向关系即 $\Phi = \mathbf{H}\mathbf{U}$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤 (3) 中使病人穿戴上分布有 64 导联电极的体表电位检测设备进行测量，采集获得病人的 64 导联体表心电信号，进而通过小波变换对该信号进行拉平和去噪处理。

5. 根据权利要求 1 所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤 (4) 中对心脏跨膜电位信号进行初始化的公式如下：

$$\mathbf{u}^{(0)} = \mathbf{Q}_{init} \Phi$$

$$\mathbf{Q}_{init} = \arg \min_{\mathbf{Q}} \|\mathbf{Q}\Phi - \mathbf{U}\|_F^2 = \mathbf{U}\Phi^T (\Phi\Phi^T)^{-1}$$

其中： $\mathbf{u}^{(0)}$ 为心脏跨膜电位信号初值， $\|\cdot\|_F$ 表示F范数， ^{T} 表示转置， $\mathbf{Q}$ 表示 Φ 与 $\mathbf{U}$ 之间的反向转换矩阵。

6. 根据权利要求1所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤(5)的具体实现方式如下：

5.1 将ISTA中的更新步骤映射到一个由固定数量的block级联组成的图卷积神经网络模型，每一个block对应于ISTA中的一次迭代；

5.2 通过将L1范数正则化中的正则化矩阵替换为block对应的非线性变换函数，建立以下目标重建方程：

$$\min_{\mathbf{U}} \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{U} - \Phi\|_2^2 + \lambda \|\Gamma(\mathbf{U})\|_1$$

其中： $\|\cdot\|_2$ 表示2范数， $\|\cdot\|_1$ 表示1范数， λ 为正则化系数， $\Gamma(\cdot)$ 为block对应的非线性变换函数；

5.3 通过ISTA来优化求解上述目标重建方程，ISTA中的每一次迭代均分为两个步骤：第一个步骤是梯度下降，第二个步骤则是求解近端算子；

5.4 利用已有的数据样本对基于ISTA的图卷积神经网络模型进行训练，最后利用训练好的网络模型用于心电逆问题的求解，从而完成心脏跨膜电位的重建。

7. 根据权利要求6所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤5.1中的block即通过使用一种通用的非线性变换函数对 $\mathbf{U}$ 进行稀疏化，其具体结构从输入到输出由图卷积层G1、ReLU激活函数R1、图卷积层G2、软阈值收缩算子、图卷积层G3、ReLU激活函数R2、图卷积层G4依次连接组成。

8. 根据权利要求6所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤5.3中梯度下降步骤的表达式如下：

$$\tilde{\mathbf{U}}^{(k)} = \mathbf{U}^{(k-1)} - t^{(k)} \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{U}^{(k-1)} - \Phi)$$

其中： t 表示步长， ^{T} 表示转置，上标 k 和 $k-1$ 表示迭代次数， k 为大于0的自然

数， $\tilde{\mathbf{U}}$ 为通过梯度下降求得关于 $\mathbf{U}$ 的中间变量。

9. 根据权利要求 6 所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述步骤 5.3 中求解近端算子步骤的表达式如下：

$$\mathbf{U}^{(k)} = \arg \min_{\mathbf{U}} \frac{1}{2} \|\mathbf{U} - \tilde{\mathbf{U}}^{(k)}\|_2^2 + \lambda \|\Gamma(\mathbf{U})\|_1$$

其中： $\tilde{\mathbf{U}}$ 为通过梯度下降求得关于 $\mathbf{U}$ 的中间变量，上标 k 表示迭代次数， k 为大于 0 的自然数。

10. 根据权利要求 7 所述的心脏跨膜电位重建方法，其特征在于：所述图卷积层的实现方式满足以下分层传播规则：

$$\mathbf{G}^{(l+1)} = \sigma \left(\tilde{\mathbf{D}}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{D}}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{G}^{(l)} \mathbf{W}^{(l)} \right)$$

其中： $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \mathbf{I}_N$ ， $\mathbf{A}$ 为自连接的无向图的邻接矩阵， $\mathbf{I}_N$ 为单位矩阵， $\tilde{\mathbf{D}}$ 为度矩阵且其中对角线元素值 $\tilde{D}_{ii} = \sum_j \tilde{A}_{ij}$ ， $\tilde{A}_{ij}$ 为 $\tilde{\mathbf{A}}$ 中第 i 行第 j 列元素值，上标 l 和 $l+1$ 表示图卷积层序号， $\mathbf{G}$ 表示图卷积层的输出， $\mathbf{W}$ 为图卷积层中的权重矩阵， $\sigma(\cdot)$ 表示 ReLU 激活函数。

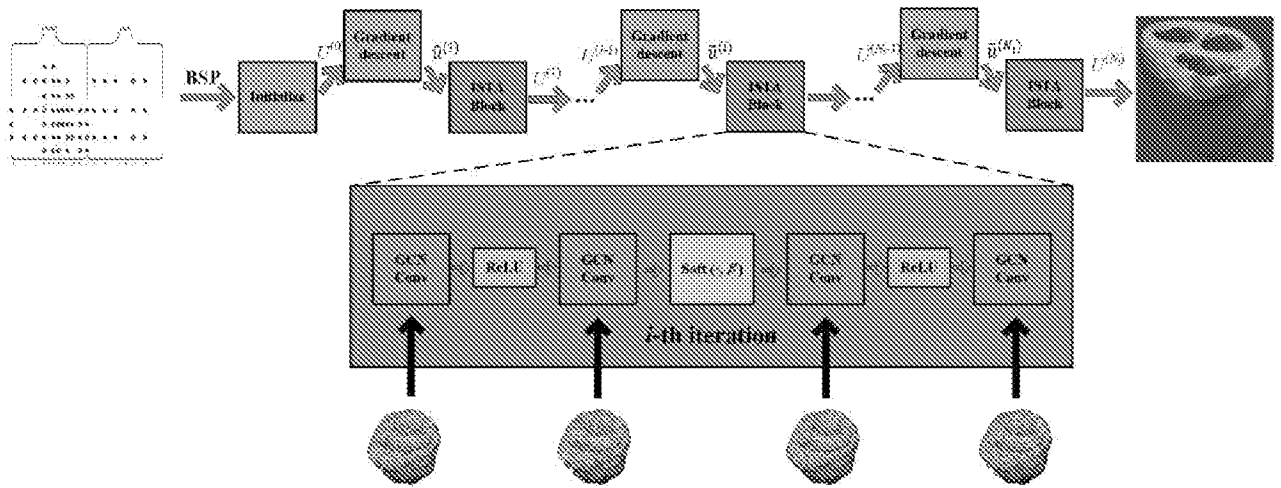


图 1

GISTA-Net
9 Iter

Ground Truth

TV

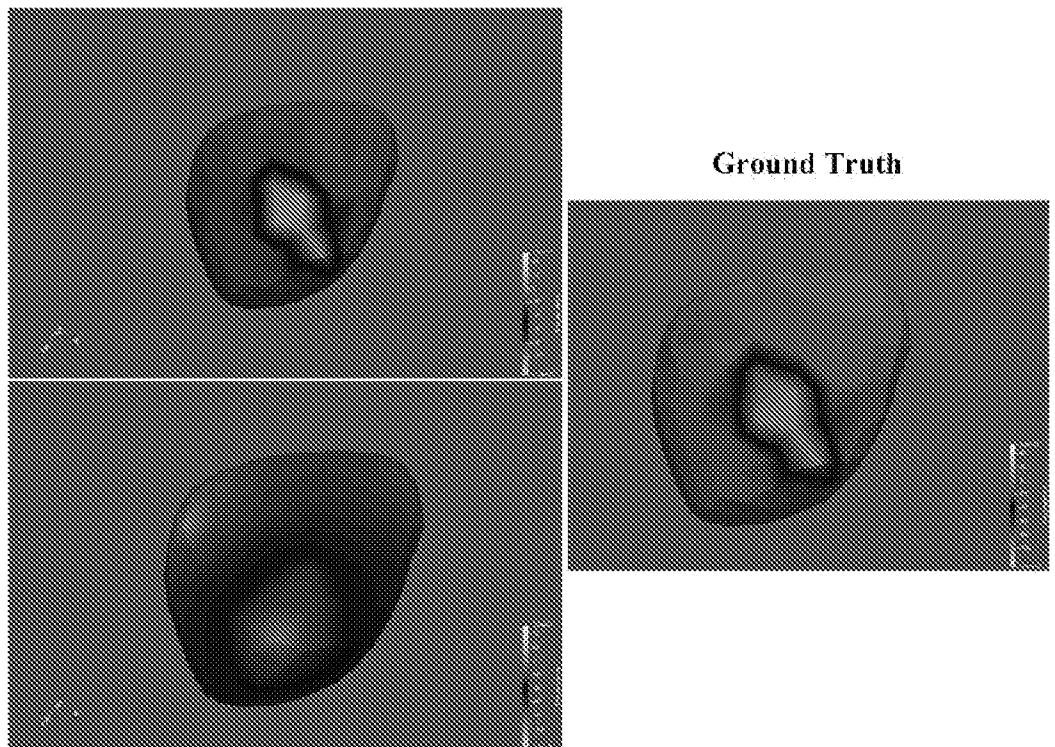


图 2

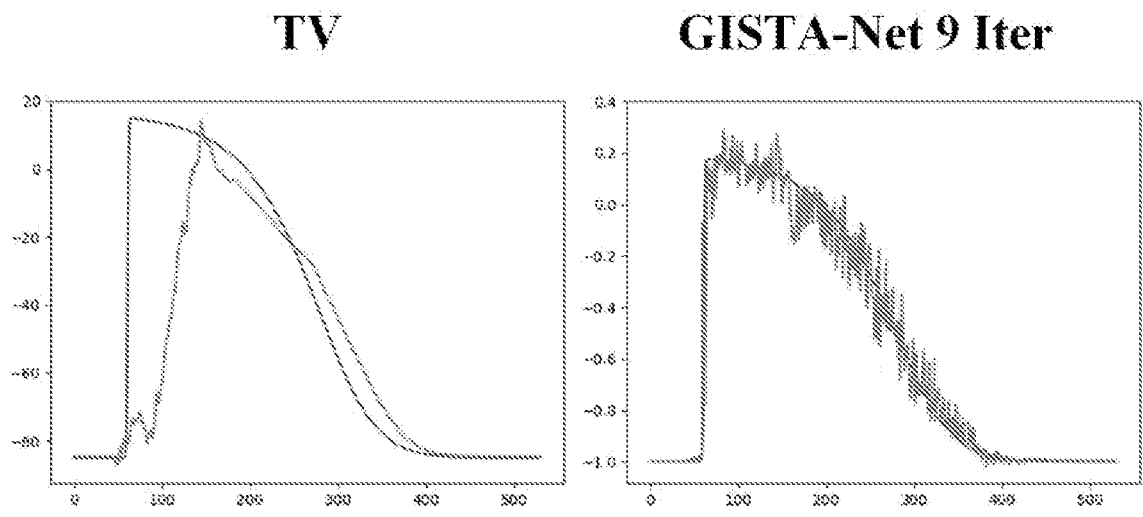


图 3

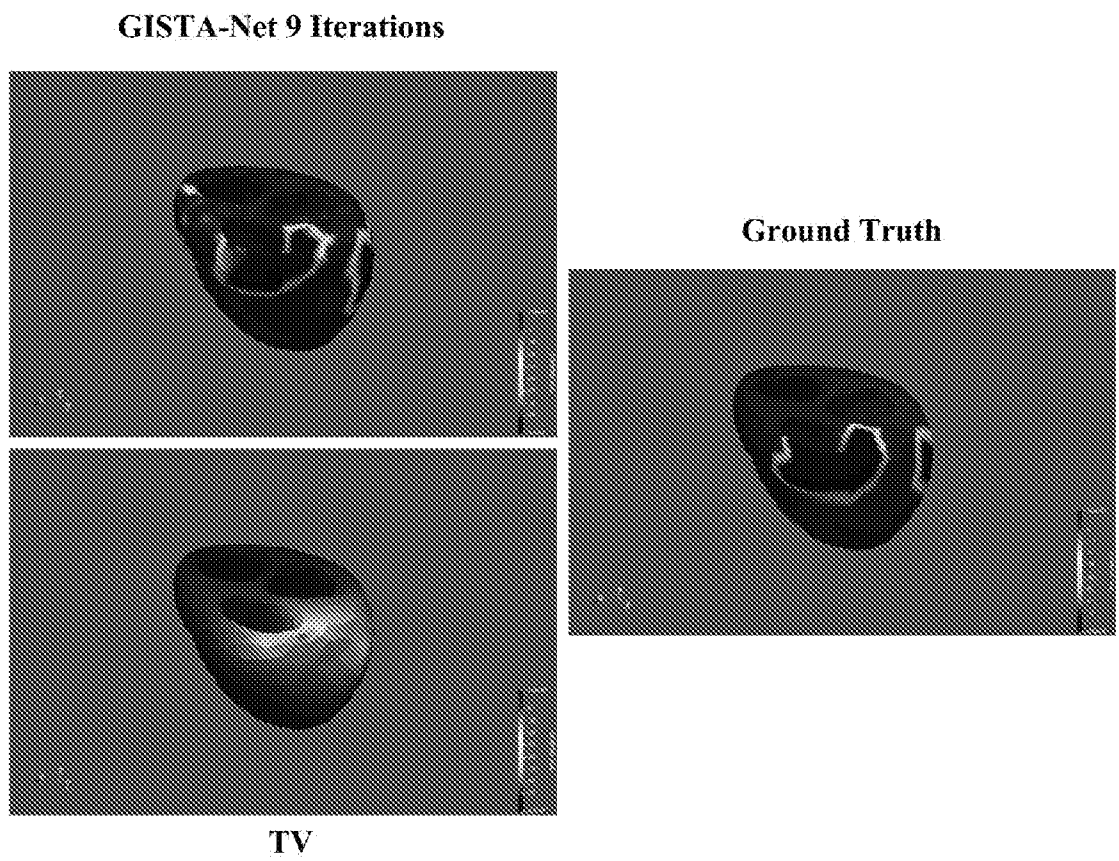


图 4

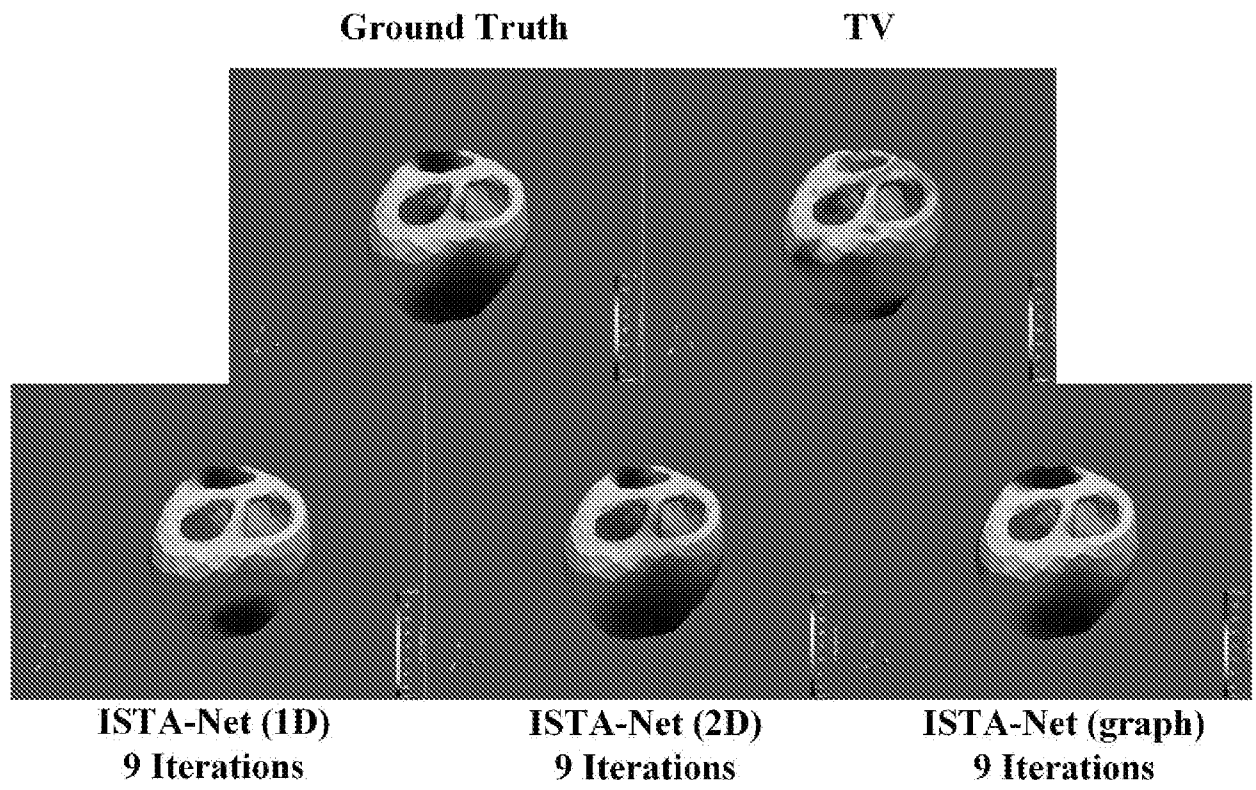


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/113447

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G16H 50/20(2018.01)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)

G16H

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)

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC, GOOGLE, IEEE: 图像, 卷积, 迭代, 跨膜电位, 重建, 迭代阈值收缩, 心脏, 卷积神经网络, reconstruct, convolution, neural network, iterative threshold shrinkage, torso, ISTA

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	XIE, Shuting et al. "Lnista-Net: Learning Nonlocal Regularized Iterative Shrinkage-Thresholding Network for Noninvasive Cardiac Transmembrane Potential Imaging" <i>IEEE</i> , 16 April 2021 (2021-04-16), pp. 183-186	1-10
A	CN 111261277 A (SHANGHAI TURING MEDICAL TECHNOLOGY CO., LTD.) 09 June 2020 (2020-06-09) entire document	1-10
A	CN 108806793 A (PING AN TECHNOLOGY (SHENZHEN) CO., LTD.) 13 November 2018 (2018-11-13) entire document	1-10
A	US 2018197317 A1 (GENERAL ELECTRIC COMPANY) 12 July 2018 (2018-07-12) entire document	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

04 March 2022

Date of mailing of the international search report

16 March 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
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/CN2021/113447

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111261277	A	09 June 2020	None			
CN	108806793	A	13 November 2018	WO	2019200753	A1	24 October 2019
US	2018197317	A1	12 July 2018	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/113447

A. 主题的分类

G16H 50/20 (2018.01) 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)

G16H

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))

CNKI, CNPAT, WPI, EPDOC, GOOGLE, IEEE: 图像, 卷积, 迭代, 跨膜电位, 重建, 迭代阈值收缩, 心脏, 卷积神经网络, reconstruct, convolution, neural network, iterative threshold shrinkage, torso, ISTA

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
X	Shuting Xie 等. "LNISTA-NET: LEARNING NONLOCAL REGULARIZED ITERATIVE SHRINKAGE-THRESHOLDING NETWORK FOR NONINVASIVE CARDIAC TRANSMEMBRANE POTENTIAL IMAGING" IEEE, 2021年4月16日 (2021 - 04 - 16), 第183-186页	1-10
A	CN 111261277 A (上海图灵医疗科技有限公司) 2020年6月9日 (2020 - 06 - 09) 全文	1-10
A	CN 108806793 A (平安科技深圳有限公司) 2018年11月13日 (2018 - 11 - 13) 全文	1-10
A	US 2018197317 A1 (GENERAL ELECTRIC COMPANY) 2018年7月12日 (2018 - 07 - 12) 全文	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

2022年3月4日

国际检索报告邮寄日期

2022年3月16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

授权官员

吴瑶

电话号码 86-10-53961339

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/113447

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	111261277	A	2020年6月9日	无	
CN	108806793	A	2018年11月13日	W0	2019200753 A1 2019年10月24日
US	2018197317	A1	2018年7月12日	无	