



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113192004 B

(45) 授权公告日 2022. 01. 18

(21) 申请号 202110355228.2

(22) 申请日 2021.04.01

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113192004 A

(43) 申请公布日 2021.07.30

(73) 专利权人 温州医科大学附属第二医院(温州医科大学附属育英儿童医院)

地址 325000 浙江省温州市学院西路109号

(72) 发明人 吴信雷 卢孔场 陈徐亮 褚茂平

(74) 专利代理机构 温州共信知识产权代理有限公司 33284

代理人 施卡特

(51) Int. Cl.

G06T 7/00 (2017.01)

G06T 7/11 (2017.01)

G06T 7/136 (2017.01)

G06T 7/33 (2017.01)

G06T 7/62 (2017.01)

G16H 50/30 (2018.01)

A61B 5/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106570313 A, 2017.04.19

CN 111366487 A, 2020.07.03

CN 109907732 A, 2019.06.21

CN 108038848 A, 2018.05.15

CN 107085475 A, 2017.08.22

CN 108170905 A, 2018.06.15

CN 106974622 A, 2017.07.25

EP 1568698 A1, 2005.08.31

审查员 刘坛首

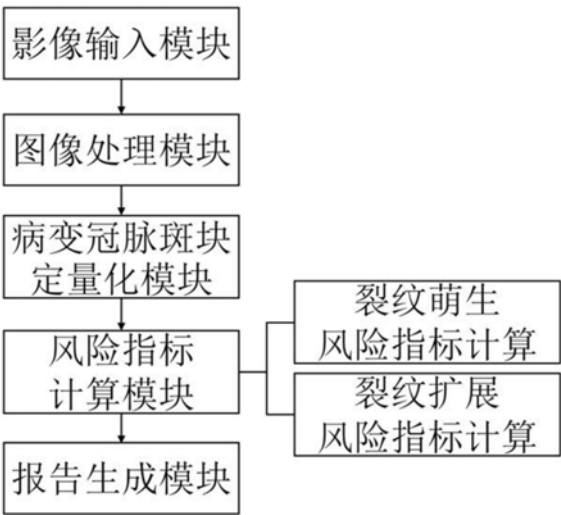
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法与斑块破裂风险量化的评估系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法与斑块破裂风险量化的评估系统,通过影像输入模块获取冠脉造影影像和腔内影像(如光学相干断层成像)等多模影像,采用图像处理技术分别在不同影像上对感兴趣血管或斑块进行分割配准,并量化获取病变冠脉斑块的解剖学指标,进一步计算基于时序冠脉造影计算浅表壁动力学指标分布并确定沿血管纵向的相对高风险位置进而获得浅表壁局部裂纹形成的疲劳风险系数。本发明通过结合冠脉多模态影像的解剖学指标,并进一步增加分别基于冠脉浅表的裂纹形成和基于横断面影像的斑块裂纹扩展风险量化评估,从而更加完整、全面的评估斑块破裂过程。



1. 一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:对冠脉造影时序序列影像进行血管浅表壁的力学功能学指标计算;

步骤2:根据心动周期中病变血管浅表壁力学功能学指标的分布结果,确定沿血管纵向的相对高风险位置,并计算浅表壁局部裂纹形成的疲劳风险系数;

步骤3:在上述相对高风险位置处,利用光学相干断层成像斑块横断面的虚拟裂纹扩展速率,同时结合斑块成分信息,获得虚拟裂纹扩展至斑块失效的风险系数;

步骤4:基于双线性风险累积理论,设定两部分的权重比例常数,计算斑块破裂过程中虚拟裂纹形成和扩展的风险系数总和,作为度量患者个体化斑块破裂风险的量化指标;

所述步骤3进一步包括:

步骤301:根据上述基于冠脉造影时序图像获得病变血管浅表壁力学功能学指标的分布结果,在血管纵向相对高风险位置处的OCT图像,从影像接收模块读取光学相干断层图像;

步骤302:根据不同斑块成分在OCT图像中的成像特征,对其成分轮廓进行区域分割,包括钙化、纤维、脂质、混合成分、巨噬细胞、胆固醇结晶;

步骤303:在横断面斑块组织成分分割的基础上,进一步实现各组织的网格离散化及利用有限元方法,实现应力应变的计算;

步骤304:在横断面应力应变最大值处,形成虚拟裂纹形成,并基于损伤断裂力学理论,计算虚拟裂纹的扩张速率以及扩展路径;

步骤305:根据上述虚拟裂纹行进方向及长度,结合横断面斑块成分信息,以及裂纹是否贯穿纤维帽并且直至斑块坏死核心,计算虚拟裂纹扩展的风险系数 P_{prop} :

$$P_{prop} = \frac{c_1 PB}{|\vec{a}| Th} (c_2 + \delta)$$
, 其中 δ 取值0或1,由虚拟裂纹是否到达斑块坏死核心决定; PB 为斑块负荷; $|\vec{a}|$ 为虚拟裂纹长度; Th 为纤维帽厚度; c_1, c_2 为常数, c_1 由斑块解剖信息和破裂机理决定,可通过标准标本实验或大样本数据统计确定; c_2 取值范围0~1,跟纤维帽炎症程度有关。

2. 根据权利要求1所述的一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法,其特征在于,所述步骤1进一步包括:

步骤101:由影像接收模块读取一右冠脉主支的造影时序影像,并以分叉解剖标志点确定感兴趣血管的起始与终止位置;

步骤102:选定一个完整周期中若干个特征时刻的造影图像,并对这些时刻下造影图像中感兴趣血管进行二维分割、三维重建;

步骤103:对相邻时刻不同形态的感兴趣血管以逐点配准原则建立管壁上点云的一一对应关系;

步骤104:根据上述血管点云的一一对应关系,选定一时刻为初始时刻,计算整个心动周期中病变血管浅表壁力学功能学指标;上述指标包括:针对二维血管轮廓,采用直径变化率、形态变化比值参数,而针对三维血管,采用局部应力应变极值指标。

3. 根据权利要求1所述的一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法, 其特征在于, 所述步骤2进一步包括: 结合相应指标的失效阈值, 计算该指标 $K_{\max}$ 与阈值 K 的比值作为冠脉浅表壁虚拟裂纹形成的疲劳风险系数 $P_{\text{int}}: P_{\text{int}} = \frac{K_{\max}}{K}$ 。

4. 根据权利要求2所述的一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法, 其特征在于, 所述步骤4进一步包括: 基于双线性风险累积理论, 考虑两部分的权重比例常数, 计算斑块虚拟裂纹形成和扩展的风险系数总和, 作为度量患者个体化斑块破裂风险的量化指标: $P_{\text{total}} = a_1 P_{\text{int}} + a_2 P_{\text{prop}}$, 其中 a_1, a_2 分别为虚拟裂纹形成和扩展两部分的权重比例常数。

5. 根据权利要求2所述的一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法, 其特征在于, 在所述步骤103中, 对于二维管腔轮廓的点云密度, 由两侧较短边决定: $\rho_{2D} = \frac{l_{\min}}{n}$; 而对于三维管壁结构化网格点云密度, 保持根据两点间周向距离与纵向距离的比例为0.8~1.1之间。

6. 根据权利要求2所述的一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法, 其特征在于, 在所述步骤103中, 可应用薄板样条鲁棒点匹配算法, 通过最小化薄板样条能量函数来实现二维管腔轮廓点的非刚性配准: $\text{minimize } E_{\text{TPS}}(f) = \sum_{a=1}^K (y_a - f(v_a))^2 + \lambda \iint \sum_{i,j=1,2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 dx_i dx_j$, 其中 f 是映射函数, v_a 是待配准点集, y_a 是对应点集, 为 $i, j = 1, 2$ 两个坐标方向。

7. 根据权利要求2所述的一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法, 其特征在于, 在所述步骤103中, 采用四维浅表壁动力学方法进行点配准, 通过最小化同构化网格节点距离总和来实现三维血管管壁点的配准: $\text{minimize } \begin{cases} f(\mathbf{X}^1) = \mathbf{X}_i^1 - \mathbf{X}_i^N; & i = 1, \dots, n \\ f(\mathbf{X}^k) = \mathbf{X}_i^k - \mathbf{X}_i^{k-1}; & k = 2, \dots, N \end{cases}$, 其中 $\mathbf{X}$ 是每个构型下所有节点的全局笛卡尔坐标分量组成的行向量 $\{x_1, x_2, x_3\}^T; i = 1, \dots, n$ 为节点id号, n 为最大节点号; $k = 1, \dots, N$ 为心动周期中时间上离散的构型, N 为最大构型数。

8. 根据权利要求1所述的一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法, 其特征在于, 在所述步骤302中, 因OCT穿透能力弱而导致三层膜结构成像不全的局限, 可根据血管近、远端正常节段的外中内膜直径大小以及当前横断面的所在层数, 通过插值获得当前层外中内膜直径大小, 以构建完整的斑块横断面模型。

一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法与斑块破裂风险量化的评估系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于冠脉影像的斑块破裂风险的简化计算方法与系统,属于医疗技术领域。

背景技术

[0002] 斑块破裂继发闭塞性血栓形成是急性冠脉综合征的主要发病机制。对斑块破裂风险的量化评估,将有助于临床工作者制定患者个体化的防治策略以提高冠心病患者的远期预后。目前,识别易损斑块的评估方法主要分两类,分别是基于影像学解剖学量化指标评估,与基于影像的计算功能学评估。第一类评估方法包括通过血管造影量化冠脉解剖结构的SNYTAX积分、基于腔内影像诊断薄帽纤维瘤易损斑块等,但这些方法对远期总体主要不良心脏事件预测的准确度和特异性较差。例如,GW Stone等(Stone GW, Maehara A, Lansky AJ, et al. A prospective natural-history study of coronary atherosclerosis[J]. New Engl J Med, 2011, 364:226-235.) 利用血管内超声-虚拟组织学影像确诊为薄帽纤维瘤斑块的595例患者中,在平均3.4年随访后的结果显示,后期发生不良事件的仅有26例,约为4.9%。

[0003] 尽管第二类评估方法在基于患者个体化影像的基础上通过功能学指标的计算以期提高对高危斑块识别的准确度,但仍然存在一些局限。专利文献CN106570313A:公开了一种基于冠脉造影三维重建后逐点映射函数实现心动周期血管壁的动力学计算,从而获得浅表壁在体应力以用于斑块稳定性的评估。然而,该方法基于多个关键时刻下的三维重建,存在工作量大、实现复杂、且可能因局部几何重建精度导致最终计算结果存在误差。此外,该方法专注于冠脉浅表壁而未能考虑斑块内部的受力状态,进而不能全面评估冠脉斑块的破裂风险。

[0004] 专利文献CN201610749900.5:公开了一种由头颈动脉粥样硬化斑块引起的脑梗死风险的评估方法,该方法通过高分辨率磁共振扫描,定量确定斑块特征,并构建斑块三维模型进而计算其形变和载荷;再根据不同斑块特征结合相应的破裂相关和血栓形成相关危险系数,进而计算出破裂和血栓形成的总风险数值。但由于心动周期中冠脉形态随时间的多变性,使得该方法不能很好地适用于冠脉斑块的风险评估。

[0005] 总之,上述系统软件及专利文献虽然从不同影像来源和相应的计算方法方面获得斑块稳定性的评估方法,但单一影像来源不能完整呈现病变冠脉斑块浅表壁撕裂裂纹贯穿纤维帽的斑块破裂过程。因此,仍然需要提供一种基于冠脉多模影像对病变冠脉斑块的浅表壁裂纹形成和横断面扩展的斑块破裂风险量化的计算方法和系统。

发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明提供了一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法与斑块破裂风险量化的评估系统。

[0007] 本发明的技术方案是：

[0008] 一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法与斑块破裂风险量化的评估系统,包括以下步骤：

[0009] 步骤1:对冠脉造影时序序列影像进行血管浅表壁的力学功能学指标计算；

[0010] 步骤2:根据上述心动周期中病变血管浅表壁力学功能学指标的分布结果,确定沿血管纵向的相对高风险位置,并计算浅表壁局部裂纹形成的疲劳风险系数；

[0011] 步骤3:在上述相对高风险位置处,利用光学相干断层成像(Optical Coherence Tomography, OCT)斑块横断面的虚拟裂纹扩展速率,同时结合斑块成分等解剖学信息,获得虚拟裂纹扩展至斑块失效的风险系数；

[0012] 步骤4:基于双线性风险累积理论,设定两部分的权重比例常数,计算斑块破裂过程中虚拟裂纹形成和扩展的风险系数总和,作为度量患者个体化斑块破裂风险的量化指标。

[0013] 作为优选,所述步骤1进一步包括：

[0014] 步骤101:由影像接收模块读取一右冠脉主支的造影时序影像,并以分叉解剖标志点确定感兴趣血管的起始与终止位置；

[0015] 步骤102:选定一个完整周期中若干个特征时刻的造影图像,并对这些时刻下造影图像中感兴趣血管进行二维分割、三维重建；

[0016] 步骤103:对相邻时刻不同形态的感兴趣血管以逐点配准原则建立管壁上点云的一一对应关系；

[0017] 步骤104:根据上述血管点云的一一对应关系,选定一时刻为初始时刻,计算整个心动周期中病变血管浅表壁力学功能学指标;上述指标包括:针对二维血管轮廓,采用直径变化率、形态变化比值参数,而针对三维血管,采用局部应力应变极值指标。

[0018] 作为优选,所述步骤2进一步包括:结合相应指标的失效阈值,计算该指标 $K_{\max}$ 与阈值 K 的比值作为冠脉浅表壁虚拟裂纹形成的疲劳风险系数 P_{int} : $P_{\text{int}} = \frac{K_{\max}}{K}$ 。

[0019] 作为优选,所述步骤3进一步包括：

[0020] 步骤301:根据上述基于冠脉造影时序图像获得病变血管浅表壁力学功能学指标的分布结果,在血管纵向相对高风险位置处的OCT图像,从影像接收模块读取光学相干断层图像；

[0021] 步骤302:根据不同斑块成分在OCT图像中的成像特征,对其成分轮廓进行区域分割,包括钙化、纤维、脂质、混合成分、巨噬细胞、胆固醇结晶；

[0022] 步骤303:在横断面斑块组织成分分割的基础上,进一步实现各组织的网格离散化及利用有限元方法,实现应力应变的计算；

[0023] 步骤304:在横断面应力应变最大值处,形成虚拟裂纹形成,并基于损伤断裂力学理论,计算虚拟裂纹的扩张速率以及扩展路径；

[0024] 步骤305:根据上述虚拟裂纹行进方向及长度,结合横断面斑块成分信息,以及裂纹是否贯穿纤维帽并且直至斑块坏死核心,计算虚拟裂纹扩展的风险系数 P_{prop} ：

$P_{prop} = \frac{c_1 PB}{|a|Th}(c_2 + \delta)$, 其中 δ 取值 0 或 1, 由虚拟裂纹是否到达斑块坏死核心决定; PB 为斑块负荷; $|a|$ 为虚拟裂纹长度; Th 为纤维帽厚度; c_1, c_2 为常数, c_1 由斑块解剖信息和破裂机理决定, 可通过标准标本实验或大样本数据统计确定; c_2 取值范围 0~1, 跟纤维帽炎症程度有关。

[0025] 作为优选, 所述步骤 4 进一步包括: 基于双线性风险累积理论, 考虑两部分的权重比例常数, 计算斑块虚拟裂纹形成和扩展的风险系数总和, 作为度量患者个体化斑块破裂风险的量化指标: $P_{total} = a_1 P_{int} + a_2 P_{prop}$, 其中 a_1, a_2 分别为虚拟裂纹形成和扩展两部分的权重比例常数。

[0026] 作为优选, 在所述步骤 103 中, 对于二维管腔轮廓的点云密度, 由两侧较短边决定:

$\rho_{2D} = \frac{l_{min}}{n}$; 而对于三维管壁结构化网格点云密度, 保持根据两点间周向距离与纵向距离的比例为 0.8~1.1 之间。

[0027] 作为优选, 在所述步骤 103 中, 可应用薄板样条鲁棒点匹配算法, 通过最小化薄板样条能

量函数来实现二维管腔轮廓点的非刚性配准: $\text{minimize } E_{TPS}(f) = \sum_{a=1}^K (y_a - f(v_a))^2 + \lambda \iint \sum_{i,j=1,2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 dx_i dx_j$,

其中 f 是映射函数, v_a 是待配准点集, y_a 是对应点集, 为 $i, j = 1, 2$ 两个坐标方向。

[0028] 作为优选, 在所述步骤 103 中, 采用四维浅表壁动力学方法进行点配准, 通过最小化同

构化网格节点距离总和来实现三维血管管壁点的配准: $\text{minimize } \begin{cases} f(\mathbf{X}^1) = \mathbf{X}_i^1 - \mathbf{X}_i^N; & i = 1, \dots, n \\ f(\mathbf{X}^k) = \mathbf{X}_i^k - \mathbf{X}_i^{k-1}; & k = 2, \dots, N \end{cases}$,

其中 $\mathbf{X}$ 是每个构型下所有节点的全局笛卡尔坐标分量组成的行向量 $\{x_1, x_2, x_3\}^T$; $i = 1, \dots, n$ 为节点 id 号, n 为最大节点号; $k = 1, \dots, N$ 为心动周期中时间上离散的构型, N 为最大构型数。

[0029] 作为优选, 在所述步骤 302 中, 因 OCT 穿透能力弱而导致三层膜结构成像不全的局限, 可根据血管近、远端正常节段的外中内膜直径大小以及当前横断面的所在层数, 通过插值获得当前层外中内膜直径大小, 以构建完整的斑块横断面模型。

[0030] 与现有技术相比, 本发明的有益效果在于: 通过基于冠脉多模影像, 利用计算力学理论真对冠脉斑块破裂由浅表壁撕裂裂纹贯穿纤维帽的全过程, 实现分别由裂纹形成和裂纹扩展两部分组成的风险定量化评估。本发明弥补了基于单一模态影像的斑块风险评估的不足, 使得更全面地量化评估斑块的破裂风险。

附图说明

[0031] 图 1 是本发明具体实施例的基于冠脉多模影像的斑块破裂风险量化方法的系统框架图;

[0032] 图 2 是本发明具体实施例的基于冠脉造影的心动周期冠脉浅表壁的动力学指标计算结果示意图;

[0033] 图 3 是本发明具体实施例的基于光学相干断层成像横断面斑块裂纹扩展失效结果示意图;

[0034] 图 4 是本发明具体实施例的基于多模影像影像的病变冠脉斑块的力学指标与虚拟

裂纹形成及扩展的风险量化曲线示例结果图。

具体实施方式

[0035] 下面结合附图对本发明实施例进行详细描述。本领域技术人员应当知晓,下述具体实施例或具体实施方式,是本发明为进一步解释具体的发明内容而列举的一系列优化的设置方式,而这些设置方式之间均是可以相互结合或者相互关联使用的,除非在本发明明确提出了其中某些或某一具体实施例或实施方式无法与其他的实施例或实施方式进行关联设置或共同使用。同时,基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例,都属于本发明保护的范围。

[0036] 实施例1:

[0037] 本发明提供基于冠脉多模影像的患者个体化斑块破裂过程中裂纹形成和扩展的风险量化指标的简化计算方法,下面以一具体实例在以冠脉造影和光学相干断层成像分别作为冠脉多模影像的来源,对本发明的计算方法进行详细说明。本领域技术人员应当明了,本实施例中仅是作为一示例而采用特定狭窄程度病变血管的冠脉影像以及特定斑块成分的OCT影像数据,不应将这一具体病变冠脉及斑块类型或相应的影像模态作为对本发明保护范围的限定而理解。

[0038] 本发明在一具体实施方式中,该方法介绍如下:

[0039] 步骤1,对冠脉造影时序序列影像进行血管浅表壁的力学功能学指标计算;

[0040] 步骤2,根据上述心动周期中病变血管浅表壁力学功能学指标的分布结果,确定沿血管纵向的相对高风险位置(其中相对高风险位置是指根据力学功能学指标的计算结果,由整段血管计算结果分布情况,采用中位数或上分位阈值,来确定结果大于上述阈值的血管中的位置即为相对高风险位置),并计算浅表壁局部裂纹形成的疲劳风险系数;

[0041] 步骤3,在上述相对高风险位置处,利用OCT斑块横断面的虚拟裂纹扩展速率,同时结合斑块成分等解剖学信息,获得虚拟裂纹扩展至斑块失效的风险系数;

[0042] 步骤4,基于双线性风险累积理论,考虑两部分(两部分包括第一部分和第二部分,第一部分为基于造影动态学管壁的力学功能学指标用于评估在血管浅表的破裂风险;第二部分为基于血管内光学相干断层成像由斑块内部脂质核心产生裂纹扩展到血管表壁的破裂风险)的权重比例常数,计算斑块破裂过程中虚拟裂纹形成和扩展的风险系数总和,作为度量患者个体化斑块破裂风险的量化指标。

[0043] 在一具体的实施方式中,所述步骤1进一步包括:

[0044] 步骤101,由影像接收模块读取一右冠脉主支的造影时序影像,并以分叉解剖标志点确定感兴趣血管的起始与终止位置。优选地,含完整心动周期且两体位间角度差大于 25° 的冠脉造影,并以美国心脏病协会定义17节段的标志点为参考;

[0045] 步骤102,选定一个完整周期中若干个特征时刻,(其中,特征时刻依据心动周期、血管运动特性或者心电图来确定,如舒张末、收缩末或舒张中等心动时相)的造影图像,并对这些时刻下造影图像中感兴趣血管进行二维分割、三维重建等。优选地,如心动周期中舒张末、快速射血帧、收缩末、快速流入末和静息末等特征时刻。

[0046] 步骤103,对相邻时刻不同形态的感兴趣血管以逐点配准原则建立管壁上点云的一一对应关系。优选地,针对二维血管轮廓,采用薄板样条鲁棒点匹配算法进行点非刚性配

准,而针对三维血管管壁,采用四维浅表壁动力学方法进行点配准;

[0047] 步骤104,根据上述血管点云的一一对应关系,并选定一时刻为初始时刻,计算整个心动周期中病变血管浅表壁力学功能学指标;这些指标包括:如针对二维血管轮廓,采用直径变化率、形态变化比值等参数(图2),而针对三维血管,采用局部应力应变极值等指标;优选地,初始时刻选定为静息末或收缩末等。

[0048] 图2是描述根据示例实施方案的基于冠脉造影的心动周期二维冠脉浅表壁的动力学指标计算结果示意图。根据二维冠脉造影确定心动周期中的几个关键时刻图像并进行轮廓分割,再利用薄板样条鲁棒点匹配算法对不同时刻的轮廓点进行非刚性配准,然后计算相邻时刻间的直径变化率(步骤102~104),用于评估冠脉浅表的裂纹形成风险系数的计算。例如,三副造影图中黄色小横线代表在这一直径在不同时刻下的长度变化,对应下面板图中黄色竖线(该直径)与三条曲线(三个心动时相的直径长度序列)相交时即为其直径大小。

[0049] 在一具体的实施方式中,所述步骤2进一步包括:

[0050] 步骤201,结合相应指标(相应指标是力学功能性指标,如血管浅表壁应力、应变)的失效阈值,计算该指标 $K_{\max}$ 与阈值 K 的比值作为冠脉浅表壁虚拟裂纹形成的疲劳风险系数 P_{int} :

$$[0051] \quad P_{\text{int}} = \frac{K_{\max}}{K};$$

[0052] 这里,相应的阈值 K 可由采用大样本数据失效的截断值或标准标本失效时获得该指标数值。

[0053] 在一具体的实施方式中,所述步骤3进一步包括:

[0054] 步骤301,根据上述基于冠脉造影时序图像获得病变血管浅表壁力学功能学指标的分布结果,在血管纵向相对高风险位置处的OCT图像,从影像接收模块读取光学相干断层图像;优选地,OCT图像管腔冲血干净,轮廓无断层;

[0055] 步骤302,根据不同斑块成分在OCT图像中的成像特征,对其(即不同斑块成分,如脂质、纤维、钙化等)成分轮廓进行区域分割,包括钙化、纤维、脂质、混合成分、巨噬细胞、胆固醇结晶等成分;优选地,自动分割可通过大样本深度学习,识别OCT图像中的各成分;

[0056] 步骤303,在横断面斑块组织成分分割的基础上,进一步实现各组织的网格离散化及利用有限元方法,实现应力应变的计算;优选地,以管腔受压后形态改变原则,斑块外膜增加一层厚度相当的脂肪垫结构并施加固约束等边界条件,并以横断面管腔表面的应力应变分布应与上述浅表壁在该处的分布结果相一致为收敛准则,计算横断面应力应变;

[0057] 步骤304,在横断面应力应变最大值处,形成虚拟裂纹形成,并基于损伤断裂力学理论,计算虚拟裂纹的扩张速率以及扩展路径(图3);优选地,采用扩展有限元法进行虚拟裂纹行进,损伤准则可为最大主应力或最大主应变准则;

[0058] 步骤305,根据上述虚拟裂纹行进方向及长度,结合横断面斑块成分信息,以及裂纹是否贯穿纤维帽并且直至斑块坏死核心等关键因素,计算虚拟裂纹扩展的风险系数 P_{prop} :

$$P_{\text{prop}} = \frac{c_1 PB}{|a|Th} (c_2 + \delta)$$

[0059] 这里, δ 取值0或1, 由虚拟裂纹是否到达斑块坏死核心决定; PB 为斑块负荷; $|\bar{a}|$ 为虚拟裂纹长度; Th 为纤维帽厚度; C_1, C_2 为常数, C_1 由斑块解剖信息和斑块破裂机理决定, 可通过标准标本实验或大样本数据统计确定; C_2 取值范围0~1, 跟纤维帽炎症程度有关。

[0060] 图3是描述根据示例实施方案的基于光学相干断层成像横断面斑块裂纹扩展失效结果示意图。由基于二维造影冠脉浅表壁裂纹形成计算结果后确定的某高风险位置处的光学相干断层成像, 再利用斑块成分分割、网格生成、有限元模型构建、边界条件施加等(步骤301~304), 计算出虚拟裂纹扩展结果, 用于评估斑块内部的裂纹扩展风险系数的计算。例如, 该示例裂纹扩展由浅表直至坏死核心, 则 δ 取值为1, 代表高风险程度。

[0061] 在一具体的实施方式中, 所述步骤4进一步包括:

[0062] 步骤401, 基于双线性风险累积理论, 考虑两部分的权重比例常数, 计算斑块虚拟裂纹形成和扩展的风险系数总和(图4), 作为度量患者个体化斑块破裂风险的量化指标:

$$P_{total} = a_1 P_{int} + a_2 P_{prop}$$

[0063] 这里, a_1, a_2 分别为虚拟裂纹形成和扩展两部分的权重比例常数。

[0064] 图4是根据示例实施方案的基于多模影像影像的病变冠脉斑块的力学指标与虚拟裂纹形成及扩展的风险量化曲线示例结果图。例如, 四条双折线代表四例不同的冠脉斑块, 横坐标是斑块风险量化指标, 其风险程度斑块A<B<C<D。第一个折线点落在虚线上, 代表冠脉浅表壁裂纹形成的风险系数; 而第二个折线点落在上方的实线上, 则代表冠脉斑块经裂纹形成后并发生扩展失效后的风险系数。例如, 斑块B的第一个折点处为 $a_1 P_{int}|_B$ 是冠脉浅表壁裂纹形成的风险系数, 其值小于斑块A; 但在裂纹扩展时, 斑块B的风险系数急剧增大, 使得斑块风险总系数反而大于斑块A。

[0065] 在一具体的实施方式中, 所述步骤103中, 对于二维管腔轮廓的点云密度, 则由两侧较短边(这里的两侧较短边指的是造影图像中血管的两侧边界, 弯曲血管的内侧轮廓总长度小于外侧轮廓总长度)决定: $\rho_{2D} = \frac{l_{min}}{n}$; 而对于三维管壁结构化网格点云密度, 则保持

根据两点间周向距离与纵向距离的比例为0.8~1.1之间;

[0066] 在一具体的实施方式中, 所述步骤103中, 可应用薄板样条鲁棒点匹配算法(应用配准算法中权威实用的“薄板样条鲁棒点匹配算法”来实现步骤103中的“逐点配准建立管壁上点云的一一对应关系”, 建立不同心动时刻下, 上一时刻血管上点与下一时刻上点的匹配问题), 通过最小化薄板样条能量函数来实现二维管腔轮廓点的非刚性配准:

$$[0067] \quad \text{minimize} \quad E_{TPS}(f) = \sum_{a=1}^K (y_a - f(v_a))^2 + \lambda \iint \sum_{i,j=1,2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 dx_i dx_j$$

[0068] 这里 f 是映射函数, V_a 是待配准点集, y_a 是对应点集, 为 $i, j = 1, 2$ 两个坐标方向;

[0069] 在一具体的实施方式中, 所述步骤103中, 采用四维浅表壁动力学方法进行点配准, 通过最小化同构化网格节点距离总和来实现三维血管管壁点的配准:

$$[0070] \quad \text{minimize} \quad \begin{cases} f(\mathbf{X}^1) = \mathbf{X}_i^1 - \mathbf{X}_i^N; & i = 1, \dots, n \\ f(\mathbf{X}^k) = \mathbf{X}_i^k - \mathbf{X}_i^{k-1}; & k = 2, \dots, N \end{cases}$$

[0071] 这里 X 是每个构型下所有节点的全局笛卡尔坐标分量组成的行向量 $\{x_1, x_2, x_3\}^T$;

$i=1, \dots, n$ 为节点id号, n 为最大节点号; $k=1, \dots, N$ 为心动周期中时间上离散的构型, N 为最大构型数。

[0072] 在一具体的实施方式中, 所述步骤302中, 因OCT穿透能力弱而导致三层膜结构成像不全的局限, 可根据血管近、远端正常节段的外中内膜直径大小以及当前横断面的所在层数, 通过插值获得当前层外中内膜直径大小, 以构建完整的斑块横断面模型。

[0073] 实施例2:

[0074] 在本具体的实施例中, 本发明还提供了一种基于冠脉多模影像裂纹形成和扩展的简化计算方法与斑块破裂风险量化的评估系统(如图1所示), 该系统包括:

[0075] 影像输入模块, 主要用于对冠脉多模影像的输入, 包括冠脉造影和冠脉腔内影像(光学相干断层成像、血管内超声成像等);

[0076] 图像处理模块, 主要用于对感兴趣血管进行关键帧图像筛选、图像增强、轮廓分割、斑块成分识别、网格生成、以及多模影像之间的空间位置对应关系等;

[0077] 病变冠脉斑块定量化模块, 主要用于解剖学指标的描述, 包括基于造影的直径狭窄率, 最小管腔直径面积等; 以及基于腔内影像的斑块负荷, 脂质、钙化成分评分、炎症程度等指标;

[0078] 风险指标计算模块, 包括两个子模块: 即虚拟裂纹形成风险指标和虚拟裂纹扩展风险指标。前者是基于冠脉造影计算的, 而后者是基于血管腔内影像斑块横断面计算的。这两部分风险指标具体的计算方法如实施例1所述; 并进一步对虚拟裂纹形成风险指标和虚拟裂纹扩展风险指标进行加权, 以获得病变血管斑块破裂的总风险指标;

[0079] 报告生成模块, 主要用于可视化显示病变冠脉斑块定量化指标以及斑块潜在破裂的风险量化指标。后者根据斑块虚拟裂纹形成和扩展的风险指标绘制两线性图提示斑块破裂的风险程度。

[0080] 优选地, 所述图像处理模块包括半自动或全自动筛选感兴趣影像, 例如半自动或全自动排除轮廓断层、造影跳框等缺陷图像, 或筛选快速射血帧等关键图像; 并在基于造影冠脉浅表裂纹形成风险指标计算完成的同时, 半自动或全自动筛选(定位于)相对高风险位置处的斑块横断面影像;

[0081] 优选地, 所述系统包括通过图像分割配准传统算法或深度学习算法, 根据解剖标志点及中心线坐标生成多模影像间的空间位置对应关系, 并且还包括呈现半自动或全自动血管轮廓的快速分割和斑块成分识别, 并快速计算病变冠脉斑块定量化指标;

[0082] 优选地, 所述系统计算虚拟裂纹形成和扩展以及总风险系数指标, 同时给出相应的参考指标, 用于比较斑块潜在破裂的风险等级。

[0083] 当系统运行时, 影像输入模块同时获取冠脉造影和腔内影像数据, 首先通过冠脉造影影像对感兴趣血管进行分割等处理, 获得病变血管管腔的解剖学定量化指标, 再利用配准算法实现血管浅表壁的力学功能学指标计算, 并用于生成虚拟裂纹形成系数; 接着通过确定血管纵向的相对高风险位置处, 同样通过图像分割或模式识别对斑块成分进行定量化描述, 再对斑块横断面的损伤断裂力学计算, 获取虚拟裂纹扩展路径和风险系数; 然后汇总病变冠脉斑块的定量化解剖指标, 以及虚拟裂纹形成、扩展及总风险指标; 最后生成基于冠脉多模影像解剖学以及力学功能学的综合评估斑块破裂风险报告。本发明结合冠脉造影和腔内成像的多模影像为基础的斑块裂纹形成与扩展的风险量化, 使得对冠脉斑块的风险

评估更全面、完整。

[0084] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,所述的程序可存储于一计算机可读取存储介质中,该程序在执行时,可包括如上述各方法的实施例的流程。其中,所述的存储介质可为磁碟、光盘、只读存储记忆体(Read-Only Memory,ROM)或随机存储记忆体(Random Access Memory,RAM)等。

[0085] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

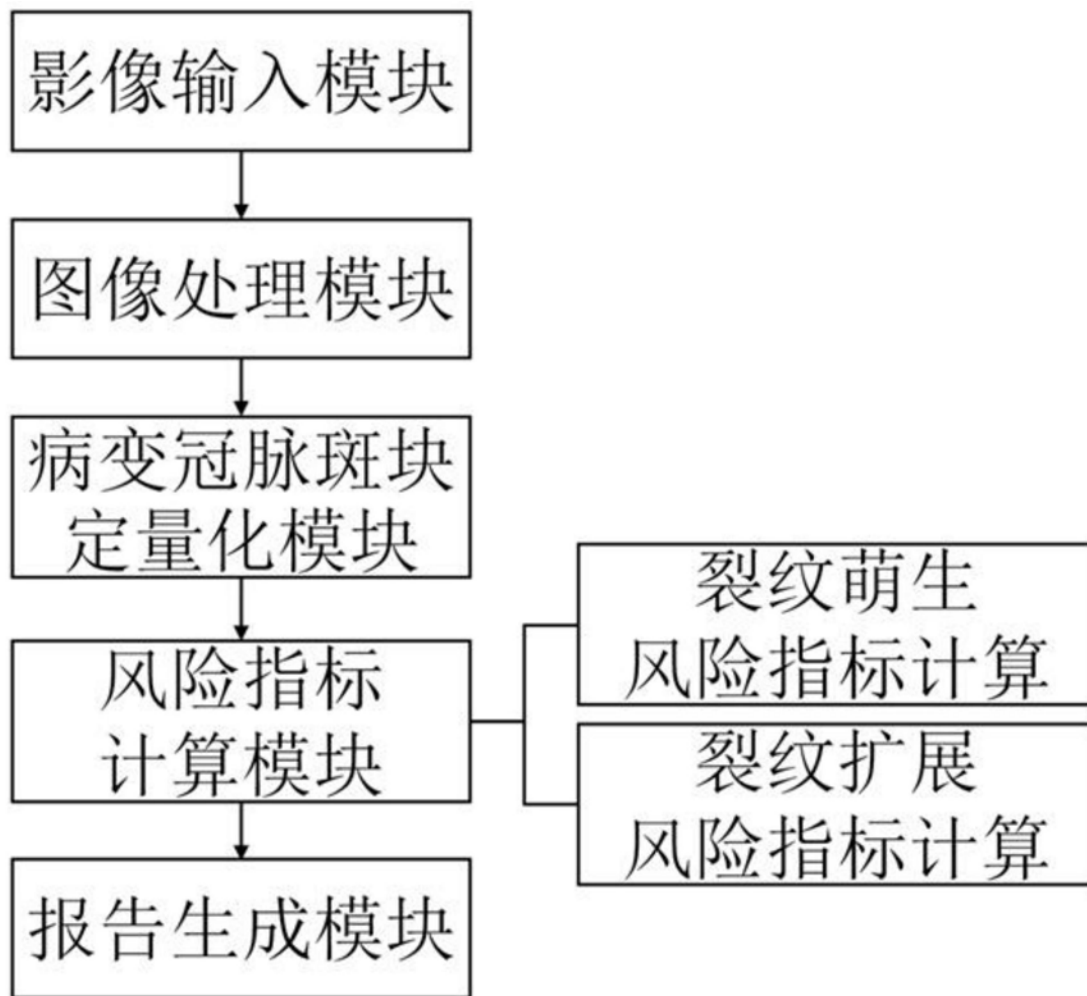


图1

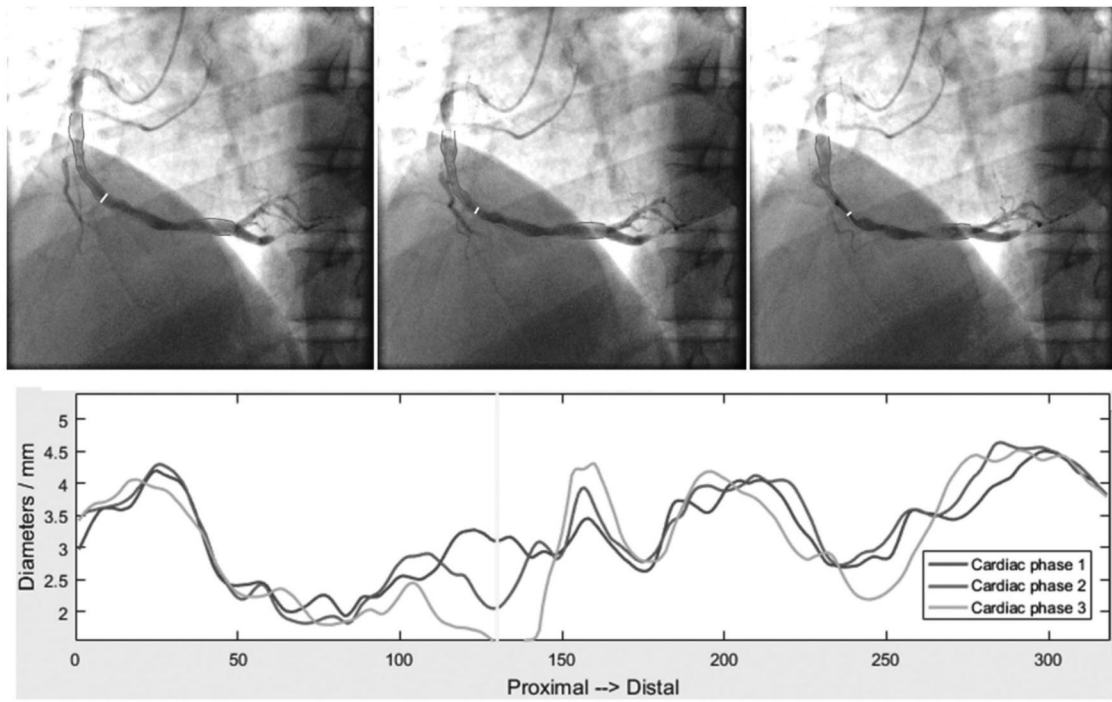


图2

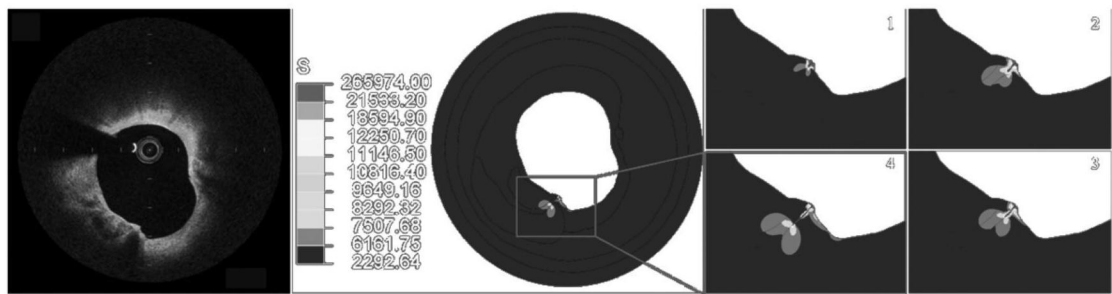


图3

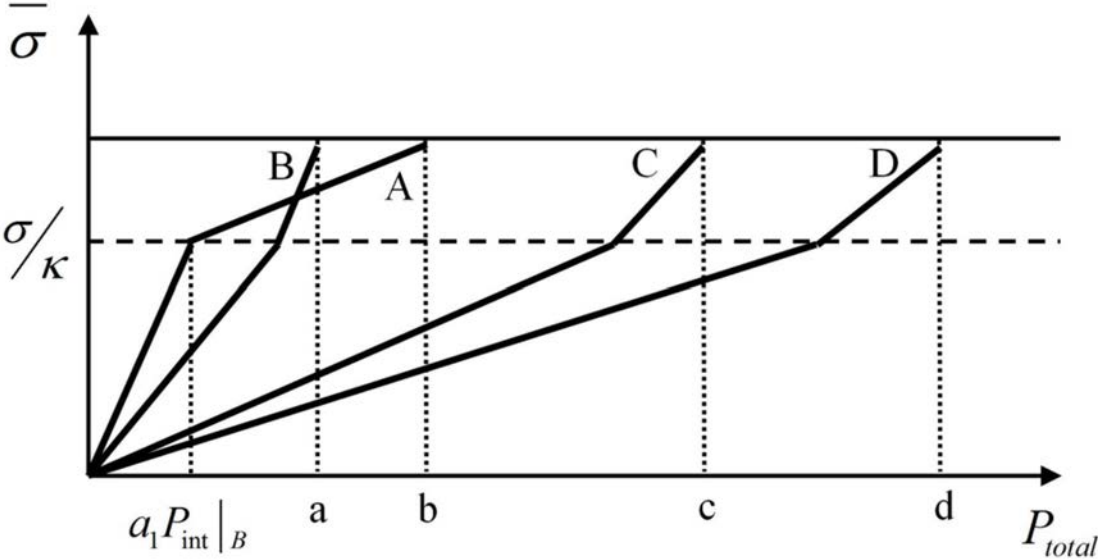


图4