



(10) 授权公告号 CN 110709136 B

(45) 授权公告日 2022. 05. 31

(21) 申请号 201880037735.8

(22) 申请日 2018.06.07

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110709136 A

(43) 申请公布日 2020.01.17

(30) 优先权数据  
17174939.3 2017.06.08 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2019.12.06

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/EP2018/065096 2018.06.07

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02018/224623 EN 2018.12.13

(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 A·A·伊索拉 C·诺伊基兴

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司  
72002

专利代理师 孟杰雄

(51) Int.Cl.  
G16H 20/10 (2018.01)  
A61N 5/10 (2006.01)

(56) 对比文件  
CN 103038669 A, 2013.04.10  
EP 2260902 A1, 2010.12.15  
US 2014018607 A1, 2014.01.16  
CN 105664376 A, 2016.06.15  
CN 105413068 A, 2016.03.23  
CN 103933672 A, 2014.07.23  
CN 102247660 A, 2011.11.23  
EP 2525323 A1, 2012.11.21

审查员 詹文慧

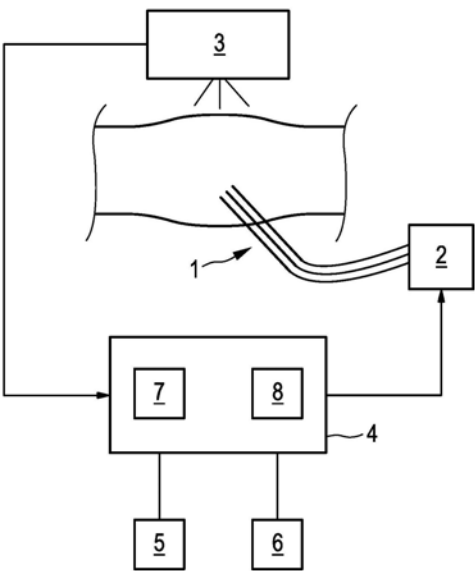
权利要求书3页 说明书14页 附图3页

(54) 发明名称

用于放射治疗处置的处置计划生成

(57) 摘要

本发明涉及一种用于规划放射治疗处置的系统。所述系统获得根据量化由辐射分量提供的辐射量的参数的值生成的第一处置计划,获得改变递送到至少一个体积元素的辐射剂量的指令,并且针对辐射分量中的每个,基于指令并基于辐射分量对递送到至少一个体积元素的辐射剂量的贡献来直接计算由辐射分量提供的辐射量的变化。为了观察参数值的上阈值和/或下阈值,通过以下来计算经更新的参数值:将所确定的变化迭代地添加到参数值,直到参数值达到阈值或直到实现期望的剂量变化。



1. 一种用于规划对患者身体的区域中的目标结构的放射治疗处置的系统,其中,被递送到所述区域的辐射包括多个辐射贡献,所述多个辐射贡献是能够基于处置计划来个体地控制的,并且其中,所述系统包括规划单元,所述规划单元被配置为:

-获得根据参数的值生成的第一处置计划,所述参数的值量化由辐射分量提供的辐射量,并且引起所述患者身体的所述区域中的第一剂量分布,

-获得改变根据所述第一剂量分布被递送到所述区域的至少一个体积元素的辐射剂量的指令,并且

-针对所述辐射分量中的至少一些,基于所述指令并且基于所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献来直接计算量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的变化,

-基于量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所确定的变化来计算经更新的参数值,

-基于所述经更新的参数值来确定第二处置计划,

其中,量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述变化的所述参数值被限制到上阈值和/或下阈值,并且其中,所述规划单元被配置为通过以下来计算所述经更新的参数值:将所确定的变化迭代地添加到所述参数值以计算所述经更新的参数值,直到所述经更新的参数值达到所述上阈值或所述下阈值或者直到由基于所述经更新的参数值生成的处置计划产生的剂量分布包括所述至少一个体积元素的变化剂量。

2. 根据权利要求1所述的系统,其中,基于局部性参数并且基于所述贡献本身来调整所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献,以便确定量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所述变化。

3. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述辐射分量中的每个辐射分量对应于在停留时间期间由所述患者身体内的多个辐射源中的一个辐射源发射的辐射,并且其中,量化由一个辐射源提供的辐射量的所述参数对应于相关联的停留时间。

4. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述辐射分量中的每个辐射分量对应于由所述患者身体外部的辐射源生成的辐射射束的元素,并且其中,量化由辐射射束的一个元素提供的辐射量的所述参数对应于相关联的通量。

5. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述规划单元被配置为基于量化所述辐射分量对所述患者身体的所述区域的个体体积元素的贡献的影响矩阵来确定量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所述变化。

6. 根据权利要求5所述的系统,其中,所述规划单元被配置为根据以下公式来确定量化由第*i*个辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所述变化:

$$\Delta \tau_i = \sum_j [B \cdot (M_d \cdot B)^{-1}]_{ij} \Delta d_j,$$

其中,  $\Delta \tau_i$  指代量化由所述第*i*个辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所述变化,  $\Delta d_j$  指代被递送到体积元素*j*的所述辐射剂量的变化量,  $[B \cdot (M_d \cdot B)^{-1}]_{ij}$  指代矩阵  $B \cdot (M_d \cdot B)^{-1}$  的*i, j*分量,  $M_d$  指代矩阵,所述矩阵包括与至少一个体积元素有关的所述影响矩阵的行,并且*B*指代基于所述影响矩阵和局部性参数 $\alpha$ 来生成以实现所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献的调整的对角矩阵。

7. 根据权利要求6所述的系统, 其中,  $\Delta \tau_i$  指代第i个辐射源的停留时间的变化或辐射束的第i个元素的通量的变化。

8. 根据权利要求6所述的系统, 其中, 所述矩阵B的每个对角元素 $B_{jj}$ 是根据以下公式计算的:

$$B_{jj} = \max_i P_{ij}^a,$$

其中,  $P_{ij}$  指代矩阵P的分量, 所述矩阵P是通过使用每行的最大分量对相应行的分量进行归一化从所述矩阵 $M_d$ 获得的, 并且局部性参数a具有等于或大于零的整数值,

其中, 对于 $a=0$ , 所有辐射分量都被视为同等重要, 以实现期望剂量分布修改, 并且, 对于 $a>0$ , 由对由违反体素吸收的剂量具有较小贡献的辐射分量所提供的辐射量被较小程度地修改。

9. 根据权利要求1所述的系统, 其中, 所述规划单元被配置为在所述第一剂量分布中识别吸收最高辐射剂量和/或最低辐射剂量的至少一个体积元素, 并且确定量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数的变化以改变被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量。

10. 根据权利要求1所述的系统, 其中, 所述规划单元被配置为: 接收对应于所述第二处置计划的所述剂量分布的全局剂量约束; 识别至少一个体积元素, 使得根据第一剂量分布被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的变化实现所述全局剂量约束的满足; 并且生成改变被递送到所识别的至少一个体积元素的所述辐射剂量的指令。

11. 根据权利要求10所述的系统, 其中, 所述患者的所述区域的体积的给定片段吸收根据所述第一剂量分布的第一辐射剂量, 其中, 所述全局剂量约束要求被递送到所述片段的所述辐射剂量大于指定的第二剂量值, 并且其中, 所述规划单元被配置为识别吸收所述第一辐射剂量与第二辐射剂量之间的辐射的至少一个体积元素, 并且生成改变被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射的指令。

12. 一种用于规划对患者身体的区域中的目标结构的放射治疗处置的装置, 其中, 被递送到所述区域的辐射包括多个辐射贡献, 所述多个辐射贡献是能够基于处置计划来个体地控制的, 并且其中, 所述装置包括:

- 用于获得根据参数的值生成的第一处置计划的单元, 所述参数的值量化由辐射分量提供的辐射量, 并且引起所述患者身体的所述区域中的第一剂量分布,

- 用于获得改变根据所述第一剂量分布被递送到所述区域的至少一个体积元素的辐射剂量的指令的单元,

- 用于针对所述辐射分量中的至少一些, 基于所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献来直接计算量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的变化值的单元,

- 用于基于量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所确定的变化来计算经更新的参数值的单元, 并且

- 用于基于所述经更新的参数值来确定第二处置计划的单元,

其中, 量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述变化的所述参数值被限制到上阈值和/或下阈值, 并且其中, 通过以下来计算所述经更新的参数值: 将所确定的变化迭代地添加到所述参数值以计算所述经更新的参数值, 直到所述经更新的参数值达到所述上阈值

或所述下阈值或者直到由基于所述经更新的参数值生成的处置计划产生的剂量分布包括所述至少一个体积元素的变化剂量。

13. 一种计算机可读介质,其存储包括程序代码的计算机程序,所述程序代码用于当在计算机设备中执行所述程序代码时令所述计算机设备执行包括如下步骤的方法,

- 获得根据参数的值生成的第一处置计划,所述参数的值量化由辐射分量提供的辐射量,并且引起患者身体的区域中的第一剂量分布,

- 获得改变根据所述第一剂量分布被递送到所述区域的至少一个体积元素的辐射剂量的指令,

- 针对所述辐射分量中的至少一些,基于所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的贡献来直接计算量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的变化,

- 基于量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所确定的变化来计算经更新的参数值,并且

- 基于所述经更新的参数值来确定第二处置计划,

其中,量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述变化的所述参数值被限制到上阈值和/或下阈值,并且其中,通过以下来计算所述经更新的参数值:将所确定的变化迭代地添加到所述参数值以计算所述经更新的参数值,直到所述经更新的参数值达到所述上阈值或所述下阈值或者直到由基于所述经更新的参数值生成的处置计划产生的剂量分布包括所述至少一个体积元素的变化剂量。

## 用于放射治疗处置的处置计划生成

### 技术领域

[0001] 本发明总体上涉及放射治疗处置的用户指导的规划。更具体地,本发明涉及用于生成用于对患者身体的区域内的目标结构进行放射治疗处置的处置计划的系统、方法和计算机程序。

### 背景技术

[0002] 在放射治疗中,通过放射性或电磁辐射或超声波来处置患者身体内的目标结构,例如肿瘤,以便控制癌细胞的生长或杀死癌细胞。同时,以这样的方式来递送处置:递送到周围健康结构的辐射或热剂量尽可能低,所述周围健康结构通常也被称为危及器官(OAR)。

[0003] 一种示例性放射治疗流程是所谓的临时近距离放射治疗,其中,使用施加器将一个或多个放射性辐射源在处置区域内放置限定的短时间间隔(通常称为停留时间),以便将限定的辐射剂量特别地施加到肿瘤细胞。另外的放射治疗流程是外部射束放射治疗,其中,将聚焦的且特定形状的外部辐射射束指向目标结构。放射治疗流程的另外的示例包括射频(RF)和微波处置以及激光消融。此外,本文所用的术语放射治疗还涵盖其他消融治疗模态,例如特定的高强度聚焦超声(HIFU)。

[0004] 在规划系统中生成的处置计划中定义了用于控制处置的处置参数。为了确定处置计划,可以执行所谓的反向规划流程。在这样的流程中,目标结构和周围OAR被确定,并且处置目标被指定。这样的处置目标包括应当满足的可以指定对递送到患者的某些区域的剂量的要求的软约束,和/或必须满足的递送到某些区域的剂量的硬约束。然后,执行优化过程以找到满足指定处置目标的处置计划。

[0005] 根据用于找到最终处置计划的一种方法,执行操作者指导的迭代优化流程,其中,在若干周期中进一步优化了预先优化的处置计划。在该流程中,将在每个优化周期中对处置计划进行自动优化,并且在每个优化周期之后,规划系统的操作者(通常是医师)可以查看相应周期中计算出的处置计划,以便检查是否他/她对由相应处置计划产生的剂量分布感到满意。如果不是这种情况,则操作者可以对优化问题进行修改以实现期望的剂量分布,并且可以基于修改后的优化问题对处置计划执行下一自动优化。

[0006] 处置计划的自动优化涉及解决优化问题,其是基于软约束和硬约束来制定的。在典型的规划系统中,优化问题对应于成本函数的最小化,成本函数是个体目标函数的加权和,其中,每个个体目标函数表示一个软约束。另外,必须确保满足硬约束。典型的目标函数涉及要递送到目标结构的特定区域的最小剂量,以及要递送到OAR的最大剂量,其中,对应的目标函数被配置为使得在满足这些剂量要求时其具有(全局)最小值。

[0007] 为了调整在这样的系统中在一个优化周期中生成的处置计划,通常不能修改剂量要求本身,因为这些要求通常被设置为与优化流程开始时,即在第一优化周期之前已经存在的期望剂量分布相对应。代替地,用户通常会修改成本函数中个体目标函数的权重。例如,如果用户确定向OAR递送太高剂量,则他/她可能会增加表示相关OAR的最大剂量要求的个体目标函数的权重。

[0008] 通过修改分配给目标函数的权重,用户只能间接影响在下一个优化周期中计算出的剂量分布。因此,通常只能通过反复试验方法中的迭代修改来获得接近期望剂量分布的剂量分布。这通常非常耗时,并且还可能导致不令人满意的结果。

[0009] EP 2 260 902 A1公开了一种辐射处置规划系统,其中,用户可以交互地指定局部剂量变化,并且该系统修改初步处置计划,以诸如考虑输入的局部剂量变化。为了修改处置计划,系统计算适当的体素权重调节,使得局部剂量按照用户的规定进行变化。为此目的,可以以相同的方式改变对相关体素的剂量有贡献的体素的权重。作为备选,可以仅修改对局部剂量具有最高贡献的体素,或者可以修改对超过预定阈值的局部剂量具有相对贡献的那些体素。

## 发明内容

[0010] 本发明的目的是允许更容易和更快地调整预先优化的处置计划。

[0011] 根据第一方面,本发明提出了一种用于规划对患者身体的区域中的目标结构的放射治疗处置的系统,其中,被递送到所述区域的辐射包括多个辐射贡献,所述多个辐射贡献是能够基于处置计划来个体地控制的。所述系统包括规划单元,所述规划单元被配置为:(i)获得根据参数的值生成的第一处置计划,所述参数的值量化由辐射分量提供的辐射量,并且引起所述患者身体的所述区域中的第一剂量分布;(ii)获得改变根据所述第一剂量分布被递送到所述区域的至少一个体积元素的辐射剂量的指令;并且(iii)针对所述辐射分量中的至少一些,基于所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献来直接计算量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的变化;(iv)基于量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所确定的变化来计算经更新的参数值;(v)基于所述经更新的参数值来确定第二处置计划。量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述变化的所述参数值被限制到上阈值和/或下阈值,并且所述规划单元被配置为通过以下来计算所述经更新的参数值:将所确定的变化迭代地添加到所述参数值,直到参数值达到所述上阈值或所述下阈值或者直到由基于所述经更新的参数值生成的处置计划产生的剂量分布包括所述至少一个体积元素的变化剂量。

[0012] 直接计算量化由辐射分量提供的辐射量的参数值的变化建议是指避免基于优化问题的解间接确定这些变化的计算流程。这样的直接计算允许以较少的计算复杂度来修改处置计划,使得实现对处置计划的更容易和更快的修改。

[0013] 此外,建议的系统允许直接指定针对特定体积元素的剂量变化。与其中用户必须修改优化问题以便间接地控制由处置计划产生的剂量分布的修改的常规流程相比,这特别简化了针对用户的处置计划的修改。

[0014] 优选地仅关于贡献于递送到至少一个体积元素的辐射剂量的辐射分量来执行量化由辐射分量提供的辐射量的参数值的变化计算。此外,在计算中,优选仅关于由这些辐射分量提供给相关的至少一个体积元素的辐射剂量来调整量化由相关辐射分量提供的辐射量的参数值。

[0015] 因此,在所有剂量变化仅影响指定剂量变化的体积元素的假设下,有效地执行量化由辐射分量提供的辐射量的参数值的变化计算。因此,计算的维数以及由此其计算复杂度进一步降低,使得可以非常快速地执行计算。

[0016] 在一个实施例中,基于局部性参数并且基于所述贡献本身来调整所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献,以便确定量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所述变化。基于局部性参数,可以特别地调整辐射分量对由某个体积元素吸收的辐射剂量的贡献,使得在确定改变的参数值的过程中,相对于较高的贡献,进一步降低较低的贡献。结果,辐射分量的变化可以被保持为“局部”,即,其可以基本上被限制为几个辐射分量。因此,能够降低处置计划的修改导致剂量约束的违反的可能性,该剂量约束已经由第一处置计划满足。特别地,能够防止上述计算限制对向至少一个体积元素提供辐射的辐射分量以及由这些辐射分量提供到至少一个体积元素的辐射的有害影响。

[0017] 建议的系统尤其可以用于规划近距放射治疗处置。在相关的实施例中,所述辐射分量中的每个辐射分量对应于在停留时间期间由所述患者身体内的多个辐射源中的一个辐射源发射的辐射,并且量化由一个辐射源提供的辐射量的所述参数对应于相关联的停留时间。

[0018] 同样,建议的系统适用于规划外部射束放射治疗处置。在相关的实施例中,所述辐射分量中的每个辐射分量对应于由所述患者身体外部的辐射源生成的辐射射束的元素,并且量化由辐射射束的一个元素提供的辐射量的所述参数对应于相关联的通量。

[0019] 在另外的实施例中,所述规划单元被配置为基于量化所述辐射分量对所述患者身体的所述区域的个体体积元素的贡献的影响矩阵来确定量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所述变化。在影响矩阵的基础上,由患者身体的相关区域的体积元素吸收的剂量的线性近似能够是由辐射分量提供的(发射)剂量的函数。特别地,影响矩阵的每个分量可以量化针对由特定辐射分量提供的每单位辐射量,由特定体积元素吸收的剂量的量。可以根据影响由辐射分量提供的辐射量的合适数量来测量单位辐射量。

[0020] 在近距放射治疗处置的情况下,该数量特别地可以对应于辐射源的停留时间。因此,影响矩阵的每个分量可以量化由于来自在某个位置处的某个辐射源的发射而造成的每单位时间由某个体素吸收的剂量的量。在外部射束放射治疗处置的情况下,该数量可以特别地对应于射束元素的通量。因此,影响矩阵可以量化由于每单位通量的特定束元素中的发射造成的由特定体积元素吸收的剂量的量。

[0021] 在一个实施例中,所述规划单元被配置为根据以下公式来确定量化由第*i*个辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所述变化:

$$[0022] \quad \Delta \tau_i = \sum_j [B \cdot (M_d \cdot B)^{-1}]_{ij} \Delta d_j$$

[0023] 其中,  $\Delta \tau_i$  指代量化由所述第*i*个辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值,  $\Delta d_j$  指代被递送到体积元素*j*的所述辐射剂量的变化量,  $[B \cdot (M_d \cdot B)^{-1}]_{ij}$  指代矩阵  $B \cdot (M_d \cdot B)^{-1}$  的*i, j*分量,  $M_d$  指代矩阵,所述矩阵包括与至少一个体积元素有关的所述影响矩阵的行,并且*B*指代基于所述影响矩阵和局部性参数 $\alpha$ 来生成以实现所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献的调整的对角矩阵。

[0024] 在近距放射治疗处置的情况下,  $\Delta \tau_i$  可以对应于第*i*个辐射源的停留时间的变化。在外部射束放射治疗处置的情况下,  $\Delta \tau_i$  可以对应于在外部射束放射治疗处置的情况下辐射射束的第*i*个元素的通量的变化。

[0025] 在另一个实施例中,矩阵B的每个对角元素 $B_{jj}$ 根据下式来计算:

$$[0026] \quad B_{jj} = \max_i P_{ij}^a,$$

[0027] 其中, $P_{ij}$ 指代矩阵P的分量,所述矩阵P是通过使用每行的最大分量对相应行的分量进行归一化从所述矩阵 $M_d$ 获得的,并且局部性参数 $a$ 具有等于或大于零的值。优选地,局部性参数 $a$ 的值大于零。

[0028] 改变根据第一剂量分布递送到该区域的至少一个体积元素的辐射剂量的指令可以由规划单元的用户手动提供,例如,在查看第一剂量分布时。在这方面,一个实施例包括所述规划单元被配置为在所述第一剂量分布中识别吸收最高辐射剂量和/或最低辐射剂量的至少一个体积元素,并且确定量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数的变化以改变被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量。吸收最高辐射剂量(所谓的最热点)和最低辐射(所谓最冷点)的体积元素确实最可能对应于要修改吸收剂量的体积元素。因此,由规划单元对最热点和/或最冷点的自动确定帮助用户识别针对其可能需要改变吸收的辐射剂量的体积元素。

[0029] 此外,规划单元可以被配置为接收针对与第二处置计划相对应的剂量分布的全局剂量约束。这样的全局剂量约束可以由规划单元的用户指定,例如基于第一剂量分布的剂量体积直方图。关于全局剂量约束,规划单元可以被配置为识别至少一个体积元素,使得根据第一剂量分布被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的变化实现所述全局剂量约束的满足;并且生成改变被递送到所识别的至少一个体积元素的所述辐射剂量的指令。由此,用户能够基于全局剂量约束来控制处置计划的修改,作为基于递送到特定体积元素的剂量的变化的修改的补充或备选。在该实施例中,与这些变化有关的指令由系统基于剂量约束自动生成。

[0030] 在相关的实施例中,所述患者的所述区域的体积的给定片段吸收根据所述第一剂量分布的第一辐射剂量,并且所述全局剂量约束要求被递送到所述片段的所述辐射剂量大于指定的第二剂量值。在这种情况下,所述规划单元可以被配置为识别吸收所述第一辐射剂量与第二辐射剂量之间的辐射的至少一个体积元素,并且生成改变被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射的指令。

[0031] 在另外的实施例中,规划单元被配置为提供图形用户接口,以用于向用户绘制第一剂量分布的图形可视化,并接收用于在可视化中选择至少一个体积元素的用户输入。

[0032] 根据另外的方面,本发明提出了一种用于规划对患者身体的区域中的目标结构的放射治疗处置的方法,其中,被递送到所述区域的辐射包括多个辐射贡献,所述多个辐射贡献是能够基于处置计划来个体地控制的。所述方法包括以下步骤:(i)获得根据参数的值生成的第一处置计划,所述参数的值量化由辐射分量提供的辐射量,并且引起所述患者身体的所述区域中的第一剂量分布;(ii)获得改变根据所述第一剂量分布被递送到所述区域的至少一个体积元素的辐射剂量的指令;(iii)针对所述辐射分量中的至少一些,基于所述辐射分量对被递送到所述至少一个体积元素的所述辐射剂量的所述贡献来直接计算量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的变化;(iv)基于量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述参数值的所确定的变化来计算经更新的参数值;并且(v)基于所述经更新的参数值来确定第二处置计划。量化由所述辐射分量提供的所述辐射量的所述变化的所述参数值被限制到上阈值和/或下阈值,并且通过以下来计算所述经更新的参数值:将所



确定的变化迭代地添加到所述参数值,直到参数值达到所述上阈值或所述下阈值或者直到由基于所述经更新的参数值生成的处置计划产生的剂量分布包括所述至少一个体积元素的变化剂量。

[0033] 根据另外的方面,本发明提出一种包括程序代码的计算机程序,所述程序代码用于在计算机设备中执行所述程序代码时令计算机设备执行所述方法。

[0034] 应当理解,根据本发明各个实施例所述的系统、方法和计算机程序具有相似和/或相同的优选实施例。

[0035] 参考下文描述的实施例,本发明的这些和其他方面将变得显而易见并得到阐述。

## 附图说明

[0036] 在以下附图中:

[0037] 图1示意性且示例性地示出了近距离放射治疗处置系统的部件,

[0038] 图2示意性且示例性地示出了外部射束放射治疗系统的部件,

[0039] 图3示意性和示例性地示出了用于修改处置计划的流程的步骤。

## 具体实施方式

[0040] 图1和图2示意性地并且示例性地图示了用于将放射治疗处置递送到人或动物患者身体内的目标结构的系统的实施例。目标结构尤其可以是身体的某些区域内的肿瘤。在图1中示意性地示出的一个示例性实施例中,该系统被配置为时间近距离放射治疗系统,其可以被配置为递送高剂量率(HDR)近距离放射治疗处置或另一形式的时间近距离放射治疗处置。在图2中示意性示出的另一示例性实施例中,该系统被配置为外部射束放射治疗处置系统。

[0041] (近距离放射治疗系统)

[0042] 在近距离放射治疗系统中,通过一个或多个辐射源辐照目标结构,该一个或多个辐射源被临时放置在目标结构附近的处置区域中(其中,以下假定使用多个辐射源)。可以一次或以多个片段(即,将辐射源若干次放置在处置区域中)递送处置。

[0043] 近距离放射治疗系统包括用于将辐射源递送到处置区域的施加器1。辐射源可以特别地包括发射电离放射性辐射以用于处置目标结构的放射性粒子。施加器1包括用于接收辐射源的导管。经由导管,辐射源可以被递送到处置区域并在限定的时间段内保持在限定的位置,该限定的位置也称为停留位置,该限定的时间段也称为停留时间。在图1所图示的实施例中,辐射源从后装载器设备2远程地递送到施加器1中。在另外的实施例中,辐射源同样可以被手动地递送到施加器1中。

[0044] 此外,该系统包括成像设备3,成像设备3被配置为采集患者身体内的处置区域的图像。优选地,成像设备3被配置为生成处置区域的三维图像。为此,成像设备3可以采用本领域技术人员已知的任何合适的成像模态。由成像设备3采用的示例性成像模态包括计算机断层摄影(CT)、超声成像或磁共振成像(MRI)。原则上,成像设备3也能够被配置成借助X射线成像、超声成像或其他成像技术来采集处置区域的二维图像。基于图像,当采集图像同时施加器1被定位于处置区域中时,可以检查处置区域的解剖结构,并且可以确定(一个或多个)辐射源和施加器1相对于目标结构和OAR的相对位置。

[0045] 根据处置计划来递送处置,该处置计划指定相关的处置参数,特别是包括停留时间,并且该处置计划在规划单元4中生成,这将在下文中进行更详细的描述。在系统中开始实际的辐射处置之前,在规划单元4的定位模块7中确定处置区域中的一个或多个适当的停留位置,然后将施加器1定位在处置区域中,使得(一个或多个)辐射源当被插入到施加器1中时被布置在(一个或多个)确定的停留位置处。

[0046] 可以通过应用启发式确定流程基于目标结构和OAR的位置来确定一个或多个停留位置。这种流程的已知示例包括所谓的k均值聚类流程和所谓的质心Voronoi镶嵌。可以使用借助于成像设备3采集的处置区域的图像来确定目标结构和OAR的位置。在图像中,可以描绘目标结构和OAR以确定目标结构和OAR的轮廓,并且可以基于所确定的轮廓来确定位置。可以使用本领域技术人员已知的手动、半自动或自动流程来进行目标结构和OAR的描绘。

[0047] 基于相对于目标结构和OAR的(一个或多个)停留位置的布置,在规划单元4的计划模块8中使用患者身体的相关区域的图像来确定处置计划,该图像包括:停留位置,目标结构和周围的OAR。该处置计划特别地定义一个或多个停留时间,在所述停留时间期间,通过一个或多个辐射源来照射该处置区域。在已经将施加器1定位在处置区域中并且针对(一个或多个)辐射源的(一个或多个)停留位置确定了处置计划之后,将(一个或多个)辐射源递送到施加器1中并根据处置计划在施加器1内保持就位。

[0048] (外部射束放射治疗系统)

[0049] 外部射束放射治疗系统包括辐射源20,其可以被操作以将电离辐射发射到处置区21中。在处置区21中,患者身体被定位在合适的支撑件上,例如患者台(图中未示出)。辐射源20相对于相关身体区域的相对位置和取向可以在位置和取向的特定范围内变化。为此目的,辐射源20可以安装在可旋转机架22上,使得辐射源201可以围绕处置区21在特定角度范围内旋转,该角度范围可以是360°或更小,以便在不同射束方向下递送辐射。另外,机架22和/或患者支撑件可以在平行于和/或垂直于机架22的旋转轴的方向上可移动。由此,能够在患者和辐射等中心之间建立特定相对位置。使得目标结构布置在辐射等中心内。此外,能够绕垂直于机架22的旋转轴的轴旋转支撑件。

[0050] 辐射源20可以包括线性粒子加速器或用于产生电离辐射射束的另一辐射源。另一辐射源的一个示例是放射性源,例如钴源。此外,辐射源20可以被提供有用于对辐射射束整形的准直器23。准直器23可以特别地允许以限定的方式改变整个辐射射束的辐射强度。为此目的,准直器23可以构造为多叶准直器。

[0051] 在放射治疗处置的递送期间,辐射在变化的射束方向下被递送到目标结构,并且由辐射源20发射的辐射的强度可以变化。此外,可以基于处置计划来改变准直器23的构造,使得辐射射束以随时间变化的形状被递送。在处置计划中定义了包括射束方向和强度以及准直器配置的相关处置参数。

[0052] 在一个实施方式中,根据连续分段来递送放射治疗处置,其中,每个段对应于处置计划中定义的处置参数的一种配置。在两个分段之间,配置从段中第一个的配置改变为分段中第二个的配置。在该时段期间,可能会关闭辐射射束(这通常也称为“步调”方法)。同样,能够根据分段连续地改变构造,而不中断辐射射束。例如,这种方法被应用于所谓的体积调制电弧治疗(VMAT)。

[0053] 为了在处置期间控制放射治疗处置系统的部件,包括辐射源20、准直器23、机架22和患者支撑件,处置系统包括控制单元24。优选地,控制单元5被实现为软件程序,其包括由控制单元执行的控制例程,并且在与放射治疗处置系统的另外的部件耦合的计算机设备中执行。

[0054] 可以在处置之前借助于包括在其中的计划模块29在规划单元25中基于包括目标结构和周围OAR的相关身体区域的图像来生成处置计划,该图像在本文中也称为规划图像。可以使用根据可以包括在系统中的合适的成像模态配置的成像设备26来采集规划图像。如果系统包括这样的成像设备26,则还可以能够以本领域技术人员已知的方式基于在处置期间采集的图像来在处置过程中调整处置计划。作为备选,也可以使用系统外部的成像设备来采集规划图像。

[0055] (处置计划的生成)

[0056] 通常以这样的方式执行处置计划的生成:由在相应放射治疗系统中可用的可个体控制的辐射分量提供的辐射量被优化。以这样的方式执行优化:将足够的辐射剂量递送到目标结构,并且将递送到OAR的辐射剂量保持在预定义的阈值以下。为此目的,放射治疗系统的规划单元4、25执行优化流程以确定量化由可个体控制的辐射分量提供的辐射量的参数的值,并基于这些参数值生成处置计划。

[0057] 在近距离放射治疗系统中,可个体控制的辐射分量对应于由放置在患者身体内的辐射源发射的辐射。要在近距离放射治疗系统的规划中优化的参数可以特别地对应于辐射源的停留时间,其确定在处置期间由辐射源发射的辐射量。在外部射束放射治疗系统中,可个体控制的辐射分量对应于可用子射束,即可以根据相对于目标结构的可能射束方向和可能准直器配置在系统中特别生成的子射束,其中,当使用优选规则网格划分射束时,一个子射束对应于辐射射束的一部分。要优化的参数可以特别地对应于子射束的通量,并且基于优化的通量,规划单元4可以确定要在处置计划中指定的机器参数。同样,能够直接优化机器参数。

[0058] 用于在两个系统中生成处置计划的规划单元4、25以类似的方式配置。特别地,每个规划单元4、25可以被配置为计算机设备,例如个人计算机,其包括执行处置规划软件的处理单元,该处置规划软件用于生成用于控制放射治疗处置的执行的处置计划。每个规划单元4、25包括用于接收如上所述采集的规划图像的合适接口。此外,每个规划单元4、25包括或耦合到用于与用户(其例如可以是医师)交互的用户接口。用户接口可以特别地包括显示单元5、27和输入设备6、28。输入设备6、28可以特别地允许在显示单元5、27上提供的图形用户接口内进行导航。输入设备6、28可以特别地包括指点设备,例如计算机鼠标、轨迹板或轨迹球。同样,显示单元5、27可以包括触敏监测器,该触敏监测器也用作输入设备6、28。

[0059] 在每个规划单元4、26中,在针对患者的临床处方的基础上在对应的计划模块8、29中生成处置计划,该临床处方可以特别地关于目标结构指定处置目标。这些处置目标可以包括在处置期间将特定最小辐射剂量递送至目标结构。另外,可以指定关于OAR的处置目标。这些处置目标可以包括要递送到OAR的最大辐射剂量的递送。此外,在根据规划图像确定的目标结构和OAR的位置上生成处置计划。为此目的,使用合适的描绘流程在规划图像中确定目标结构和OAR的描绘,该描绘流程可以是手动、半自动或自动描绘流程。

[0060] 基于处置目标,确定一组软约束和/或硬约束,并生成至少近似满足约束的预先优

化的处置计划。为此目的,基于约束规划优化问题,并且至少近似地求解该优化问题。

[0061] 软约束对应于对应满足剂量分布的要求。可能的软约束尤其包括将最大辐射剂量和最小辐射剂量递送到处置区域内的特定位置或区域。最小剂量要求通常与目标结构有关。因此,可以特别地指定要递送到目标结构的一个或多个位置或区域的最小辐射剂量。最大剂量要求通常与OAR有关。在这方面,可以特别地指定要被递送到OAR的一个或多个位置或区域的最大辐射剂量。另外,可以定义另外的软约束,例如,将均匀的剂量分布递送到处置体积的特定区域(器通常将是目标结构的区域)。

[0062] 硬约束通常对应于与软约束相同的要求。然而,尽管不必严格满足实现为软约束的要求,但剂量分布不得违反实现为硬约束的要求。

[0063] 为了基于针对特定患者指定的软约束和硬约束自动生成预先优化的处置计划,计划模块8、29可以使用合适的优化算法来最小化成本函数F。成本函数F可以包括个体目标函数 $F^k$ 的集合,其中,每个个体目标函数 $F^k$ 表示一个软约束。在一个实施例中,成本函数F可以特别地对应于目标函数 $F^k$ 的加权和,即,

$$[0064] \quad F(\tau) = \sum_{k=1}^N w^k F^k$$

[0065] 其中, $\tau$ 指代要确定的一组处置参数,并且参数 $w^k$ 指代目标函数 $F^k$ 的权重。由于该加权,在这种软约束彼此冲突的情况下,具有较高权重的软约束比具有较低权重的软约束更可能得到满足。因此,根据软约束相对于处置成功的重要性来选择权重。

[0066] 硬约束对应于必须通过优化问题的解来满足的副条件。特别地,硬约束可以由函数 $C(\tau)$ 表示,使得计划模块8、29可以最小化上述函数 $F(\tau)$ ,并且可以同时确保:

$$[0067] \quad C(\tau) \geq 0 \text{ 或 } C(\tau) = 0$$

[0068] 得以满足。

[0069] 目标函数和个体硬约束通常取决于由处置计划产生的可变辐射剂量以及患者身体相关区域的某些体积元素的相关剂量目标,其中,体积元素可以对应于规划体积的体素,如包括的规划图像。特别地,这些体素可能由根据规则网格划分规划体积产生。

[0070] 作为范例,表示特定体积V的最大/最小辐射剂量的目标函数可以由下式给出:

$$[0071] \quad F^k = \sum_{i \in V} f(d_i, d^k) \cdot \left[ \frac{d_i - d^k}{d^k} \right]^2 \cdot \Delta v_i$$

[0072] 其中,在指定最大剂量的情况下 $f(d_i, d^k) = H(d_i - d^k)$ ,并且在指定最小剂量的情况下 $f(d_i, d^k) = H(d^k - d_i)$ 。 $\Delta v_i$ 指代体素i的体积, $d_i = d_i(\tau)$ 是当使用辐射参数 $\tau$ 时递送到体素i的辐射剂量, $d^k$ 是要递送到体积V的最大/最小辐射剂量,并且H是由下式定义的Heaviside阶跃函数

$$[0073] \quad H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

[0074] 例如,对应于最大剂量需要的硬约束的对应函数C可以为 $C = d^k - d_i$ ,并且对应于最小剂量需要的硬约束的对应函数C可以为 $C = d_i - d^k$ 。为了(近似地)解决优化问题使得满足硬约束,例如可以应用拉格朗日乘子的已知方法。

[0075] 可变辐射剂量(即,前述实施例中的剂量 $d_i$ )是要确定的处置参数的函数。在近距

离放射治疗系统的情况下,辐射剂量是针对停留位置的停留时间的函数。在外部射束放射治疗系统的情况下,辐射剂量是在处置的不同分段中生成的辐射射束的子射束的通量的函数。

[0076] 特别地,可以基于影响矩阵线性地近似由患者身体的相关区域的体素*i*吸收的辐射剂量。在近距离放射治疗系统的情况下,可以根据下式计算近似:

$$[0077] \quad d_i = \sum_j M_{ij}^B \cdot t_j$$

[0078] 其中, $M_{ij}^B$ 指代用于近距离放射治疗的影响矩阵 $M^B$ 的*i*,*j*分量,并且 $t_j$ 指代停留位置*j*的停留时间。影响矩阵的每个分量 $M_{ij}^B$ 量化了由于来自停留位置*j*处的辐射源的发射造成的每单位时间内由体素*i*吸收的剂量的量。可以基于停留位置(如上所述确定)、患者身体的相关区域的解剖构造以及由辐射源发射的已知辐射强度来计算影响矩阵。

[0079] 在外部放射治疗系统的情况下,由体素*i*吸收的辐射剂量可以根据下式来近似:

$$[0080] \quad d_i = \sum_j M_{ij}^E \cdot \phi_j$$

[0081] 其中, $M_{ij}^E$ 指代用于外部射束放射治疗的影响矩阵 $M^E$ 的*i*,*j*分量, $\phi_j$ 指代子射束*j*的通量。影响矩阵的每个分量 $M_{ij}^E$ 量化了来自子射束*j*的每单位通量被体素*i*吸收的剂量的量。可以基于患者身体的相关区域的针对辐射射束和对应子射束的相关射束方向的解剖构造来确定影响矩阵 $M^E$ 。

[0082] 这些近似可以用于生成目标函数 $F^k$ 和用于确定处置计划的约束。与其他近似值同样,例如基于非线性模型的近似可以用于该目的。在近距离放射治疗系统的情况下,所生成的目标函数 $F^k$ 和约束是作为要确定的优化参数的停留时间 $t_i$ 的函数。在外部射束放射治疗系统的情况下,所生成的目标函数 $F^k$ 和约束可以是通量 $\phi_j$ 的函数,并且这些通量可以对应于要确定的优化参数。根据优化的通量,规划单元4可以确定机器参数,辐射源1和准直器4的模型,并且这些机器参数可以包括在处置计划中。这种方法也称为通量图优化(FMO)。

[0083] 作为用于确定外部射束放射治疗系统的处置计划的备选方法,优化参数对应于系统的机器参数。这种方法也称为直接机器参数优化(DMPO)。在该变型中,将通量与机器参数链接的辐射源20和准直器23的模型被并入到优化问题中,使得机器参数被直接优化。使用该模型,剂量分布包括到目标函数 $F^k$ 中,作为DMPO中机器参数的函数,而不是通量的函数。

[0084] 为了求解优化问题并生成预先优化的处置计划,计划模块8、29可以执行自动数值计算。任选地,还能够执行用户指导的迭代优化流程,该流程包括若干步骤。在每个步骤中,计划模块8、29通过近似优化问题的解来自动计算初步处置计划。然后,计划模块8、29确定与该处置计划相对应的剂量分布,并将剂量分布可视化给规划单元4、26的用户。用户查看剂量分布,以决定他/她是否对剂量分布大为满意(其中,不必完全满足处置目标,如下文所述)。如果一步中是这种情况,则将在该步骤中计算出的处置计划用作预先优化的处置计划。如果用户不满意,则根据作为他/她的查看结果由用户指定的变化来修改优化问题。然后,计划模块8在下一步中计算新的初步处置计划。

[0085] 在该步骤之后,计划模块8、29执行常规处置规划流程。然而,除了在常规处置规划中之外,在前述步骤中仅生成了预先优化的处置计划,其在下文所述的后续步骤中被进一步优化以生成最终的处置计划。与最终处置计划相反,预先优化的处置计划可能不完全满

足处置目标,并且可能特别得到体积,该体积仍接收比期望低的辐射剂量(冷点)或比期望高的辐射剂量(热点)。这种不完善的预先优化的处置计划可以在全自动数值计算中或在上述用户指导的优化流程的几个步骤中相对快地计算。特别是,如果执行了用户指导的优化流程,则操作者可能会在大致满足处置目标的情况下已经停止该流程,其通常情况下是经过几个步骤后。

[0086] 在已经生成了预先优化的处置计划后,计划模块8、29获得改变由一个或多个体素吸收的剂量的指令。这些指令可能与一个或多个体素有关,对于所述体素,由预先优化的处置计划引起的剂量分布中违反了剂量约束。因此,下文指定了剂量变化的体素也称为违反体素。指令指定要改变剂量的相关体素以及体素的剂量值的改变量或要达到的体素的目标剂量值。

[0087] 基于这些指令,计划模块8、29针对递送到患者身体的相关区域的辐射的可单独控制的辐射分量中的每个确定参数值的变化,该参数值量化由辐射分量提供的辐射量。参数值的变化是基于相应辐射分量对由违反体素吸收的辐射剂量的贡献来确定的。为此目的,尤其可以基于影响矩阵M来确定参数值的变化,该影响矩阵M量化辐射分量对患者身体的相关区域的体素的影响,如上所述。

[0088] 如上面已经解释的,近距离放射治疗系统中可单独控制的辐射分量对应于由放置在患者体内的不同辐射源发出的辐射,并且量化由这些辐射分量提供的辐射量的参数可以对应于辐射源的停留时间。在外部射束放射治疗系统中,可单独控制的辐射分量对应于子射束,并且量化由这些辐射分量提供的辐射量的参数可以对应于子射束的通量。

[0089] 优选地,仅基于贡献于递送到违反体素的辐射剂量的辐射分量来执行量化由辐射分量提供的辐射量的参数值的变化,并且仅相对于由这些辐射分量提供给违反体素的辐射剂量来调整量化由相关辐射分量提供的辐射量的参数值。这种方法允许快速计算。然而,其涉及这样一个假设,即仅由相关的体素吸收的剂量根据处置计划的调整而改变。该假设对应于一个近似,该近似通常不反映由于由一个或多个辐射分量所提供的辐射量的调整而引起的实际剂量变化。

[0090] 另外,因此可以基于局部性参数来计算参数值的变化。使用局部性参数,可以额外地修改辐射分量对由某些体素吸收的辐射剂量的贡献,使得在确定改变的参数值的过程中,相对于较高的贡献,较低的贡献被进一步减小。因此,应实现,仅对于对由要改变剂量值的体素吸收的辐射剂量有最大贡献的辐射分量,发生由辐射分量提供的辐射量的更大变化。因此,辐射分量的变化保持“局部”。因此,可以在不损害整体处置计划的情况下消除预先优化的处置计划的小缺陷(其在很大程度上已经满足处置目标)。特别地,可以防止或至少减小上述近似的有害效应。

[0091] 由于在近距离放射治疗系统中利用了局部性参数(并取决于局部性参数的值),相比于由与这些体素具有更大距离的辐射源所提供的辐射量,由放置为更靠近违反像素的辐射源提供的辐射量到更大程度。在外部射束放射治疗系统中,由于利用了局部性参数(具有适当的值),因此在较短距离内通过违反体素的子射束的辐射量被较大程度地修改。

[0092] 在一个实施例中,根据以下公式计算量化由辐射源提供的辐射量的参数值的变化:

[0093] 
$$\Delta \tau = B \cdot (M_d \cdot B)^{-1} \Delta d,$$

[0094] 或者,对于  $\Delta \tau$  的个体分量,根据下式来计算:

$$[0095] \quad \Delta \tau_i = \sum_j \left[ B \cdot (M_d \cdot B)^{-1} \right]_{ij} \Delta d_j$$

[0096] 此处,  $\Delta \tau$  指代具有分量  $\Delta \tau_i$  的向量,所述分量  $\Delta \tau_i$  对应于量化由对由违反体素(即,要修改其吸收剂量的体素)吸收的剂量有贡献的辐射分量  $i$  提供的辐射量的参数,并且  $\Delta d$  指代具有分量  $\Delta d_j$  的向量,该分量  $\Delta d_j$  指定由患者身体的相关区域的违反体素  $j$  吸收的辐射剂量的期望变化。 $M_d$  指代包括针对相应处置模态的影响矩阵  $M$  的行的矩阵,所述行涉及违反体素。 $B$  指代具有不为零的对角元素  $B_{ii}$  的方形对角矩阵(矩阵  $B$  的其他分量  $B_{ij}$ ,  $i \neq j$  为零)。

[0097] 优选地,基于相应处置模态的影响矩阵  $M$  和正局部参数  $\alpha$  来生成矩阵  $B$ ,以实现辐射分量对如由矩阵  $M_d$  所量化的违反所吸收的剂量的贡献的前述修改。为此目的,可以应用启发式流程。在一个相关的实施方式中,元素  $B_{jj}$  可以根据下式来计算:

$$[0098] \quad B_{jj} = \max_i P_{ij}^\alpha$$

[0099] 其中,  $\alpha$  是具有等于或大于零的值的局部性参数,并且  $P_{ij}$  指代矩阵  $P$  的分量,该矩阵  $P$  是通过使用相应行的最大分量归一化每一行的分量从矩阵  $M_d$  获得的。上述等式中的最大值要在  $P$  的第  $i$  行上的第  $j$  列内进行计算。根据上述归一化,与对由违反体素  $x$  吸收的剂量具有最大贡献的辐射分量  $y$  有关的矩阵  $P$  的分量  $P_{xy}$  具有值  $P_{xy} = 1$ 。

[0100] 前述等式中的局部性参数  $\alpha$  确定在前述意义上由辐射分量提供的辐射量的变化的“局部性”。对于  $\alpha = 0$ ,所有辐射分量都被视为同等重要,以实现期望剂量分布修改。在这种情况下,矩阵  $B$  对应于单位矩阵。然而,对于  $\alpha > 0$ ,由对由违反体素吸收的剂量具有较小贡献的辐射分量所提供的辐射量被较小程度地修改。

[0101] 局部性参数  $\alpha$  的值可以在计划模块 8、29 中预先配置,或者可以由规划单元 4、25 的操作者指定。用于实现良好结果的值可以在 1 与 5 之间。

[0102] 根据前述原理,近距离放射治疗系统的计划模块 8 可以特别地通过计算以下向量来确定停留时间  $t_i$  的变化  $\Delta t_i$ :

$$[0103] \quad \Delta t = B^B \cdot (M_d^B \cdot B^B)^{-1} \Delta d$$

[0104] 其中,向量  $\Delta t$  的分量对应于停留时间  $\Delta t_i$ ,并且其中,  $B^B$  对应于从影响矩阵  $M^B$  获得的矩阵,如上所述。

[0105] 类似地,外部射束放射治疗系统的计划模块 29 可以通过计算下式来确定在预先优化的处置计划中考虑的子射束  $i$  的通量的变化  $\Delta \phi_i$ :  $\Delta \phi = B^E \cdot (M_d^E \cdot B^E)^{-1} \Delta d$

[0106] 向量  $\Delta \phi$  的分量对应于通量  $\Delta \phi_i$ ,并且其中,  $B^E$  对应于从影响矩阵  $M^E$  获得的矩阵,如上所述。

[0107] 在另外的实施例中,基于对于违反体素的期望剂量变化的加权和,针对每个辐射分量  $j$  计算量化由辐射源提供的辐射量的参数值的变化,其中,基于由相应辐射分量  $j$  提供的辐射对由违反体素吸收的剂量的影响来确定权重。这些影响可以再次使用影响矩阵  $M$  来确定。另外,优选地,基于具有上述效果的局部性参数  $\alpha$ ,再次计算变化。在本实施例的具体实施方式中,根据下式来计算变化

$$[0108] \quad \Delta\tau_j = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \Delta d_i \frac{M_{ij}^\alpha}{\sum_{k=1}^{N_i} M_{ik}^{\alpha+1}}$$

[0109] 其中,  $N_d$  是违反体素的数量, 并且  $N_i$  是辐射分量的数量。该方法同样基于局部性参数  $\alpha$  确保由辐射分量提供的辐射量的修改的“局部性”。与前述实施例相比, 该实施例的优点在于不必执行矩阵求逆, 这可能不是在所有情况下可能的。

[0110] 基于量化由辐射分量提供的辐射量的参数值的变化, 计划模块8、29通过将变化添加到预先优化的处置计划下层的参数的值来确定这些参数的新值。使用新值, 计划模块8、29然后确定经更新的处置计划, 所述经更新的处置计划可以以上述方式进一步修改, 或者如果规划单元4的操作者对由经更新的处置计划产生的剂量分布感到满意, 则其可以被用于控制处置。

[0111] 在实践中, 量化由辐射分量提供的辐射量的参数, 例如近距离放射治疗系统和外部放射治疗系统中的停留时间和子射束通量, 能够受到上阈值和/或下阈值限制。因此, 基于所计算的变化确定的经更新的参数可以具有高于上阈值或低于下阈值的无效值。

[0112] 为了确定在规定的边界内的经更新的参数, 计划模块8、29可以迭代地将确定的变化添加到参数值。在迭代流程的每个步骤中, 计划模块8、29可以将确定的变化添加到在先前步骤中计算出的参数值, 或者在第一步中添加到预先优化的处置计划下层的参数值。仅针对在添加相关变化后超过上阈值或降至下阈值之下的参数值例外。这些参数值可以被设置为相应的阈值, 并且可以在流程的其余部分中保持在这些值处。然后, 计划模块8、29评估基于得到的参数值确定的处置计划是否导致包括由某些体素吸收的剂量值的期望变化的剂量分布。如果不是这种情况, 则执行下一迭代步骤。否则, 流程终止, 并且相应迭代步骤的参数值还用于确定经更新的处置计划。同样, 该流程可以在多个迭代步骤完成后终止, 所述迭代步骤可以由操作者、规划单元4、25指定。在这种情况下, 不能实现期望的剂量分布变化, 并且因此不生成经更新的处置计划。

[0113] 可以由规划单元4、25的操作者使用由规划单元提供的图形用户接口来控制用于调整预先优化的处置计划的上述流程。在该图形用户接口中, 规划单元4、25可以提供由预先优化的处置计划产生的剂量分布的可视化。任选地, 该可视化可以叠加在相关的规划图像上, 以便于操作者的取向。

[0114] 在图形用户接口中, 操作者可以指示要相对于与可视化剂量分布相对应的值改变吸收辐射剂量的体素。为此目的, 例如, 操作者可以通过将光标移动到这些体素并在输入设备处执行输入操作来选择相关体素。此外, 操作者可以借助于对应的用户输入来指定选定的体素的剂量值的变化。基于指示特定体素的这些指令以及要递送到这些体素的剂量值, 计划模块8、29然后计算出经更新的参数值并确定了经更新的处置计划, 所述经更新的参数值量化由辐射分量提供的辐射量, 如所述以上。

[0115] 此外, 规划单元4可以被配置为根据由预先优化的处置计划产生的剂量分布以及根据该剂量分布被递送最低辐射剂量的多个体素自动检测被递送最高辐射剂量的多个体素。这些体素对应于剂量分布的“最热点”和“最冷点”, 并且操作者最可能希望修改这些体素的剂量值。因此, 这些体素可以在图形用户接口中突出显示和/或在列表中指定, 使得用户可以容易地识别这些体素并选择它们以调整其剂量值, 如上所述。

[0116] 在上述实施例中, 计划模块8、29修改处置计划, 使得去除了得到的剂量分布的局



部热点或冷点。另外,计划模块可以被配置为修改处置计划,使得得到的剂量分布满足经修改的全局剂量约束。

[0117] 这样的全局剂量约束可以特别地涉及所谓的累积剂量体积直方图 (DVH), 其图示了特定体积的哪些部分 (诸如目标结构) 吸收至少特定辐射剂量。更具体地, 这样的 DVH 可以在水平轴上以辐射剂量绘制, 而在垂直轴上以相关体积的片段绘制, 其中, 图中提供的值指定至少吸收相关联的剂量值的体积的片段。

[0118] 与 DVH 有关的剂量约束可以包括 D 约束和 V 约束。D 约束可以写为  $D[v\%]>[d]\text{Gy}$ , 并且要求某个体积 (例如目标结构的体积) 的以  $v\%$  吸收的辐射剂量大于  $d\text{ Gy}$ 。例如, 目标结构的剂量约束 “ $D95>19\text{Gy}$ ” 要求目标结构的体积的  $95\%$  吸收大于  $19\text{Gy}$  的剂量。V 约束可以写为  $V[x\text{ Gy}]>[y]\%$ , 并且要求吸收至少  $x\text{ Gy}$  的剂量的某个体积的片段大于该体积的  $y\%$ 。

[0119] 为了评估由预先优化的处置计划产生的剂量分布, 规划单元 4、25 的操作者可以查看对应的 DVH, 并且可以基于 D 约束和 V 约束通过操纵 DVH 来修改剂量分布。这些约束可以由操作者重新指定, 或者操作者可以修改已经用于确定预先优化的处置计划的对应约束。

[0120] 当由操作者为体积的特定片段指定了新的 D 约束时, 计划模块 8、29 确定违反此约束的一组体素。特别地, 计划模块 8、29 确定吸收在针对相关片段的预先优化的处置计划所产生的剂量分布的 DVH 中包括的剂量值与由操作者在 D 约束中指定的剂量值之间的剂量的体素。因此, 当体积的  $v\%$  根据由预先优化的处置计划产生的剂量分布吸收  $d_0$  的剂量时, 并且操作者指定该体积的  $v\%$  将吸收  $d_{\text{新}}$  的剂量时, 计划模块确定吸收  $d_0$  和  $d_{\text{新}}$  之间的剂量的体积的体素。

[0121] 如技术人员将意识到的, 当修改以这种方式确定的由体素吸收的剂量以对应于由操作者指定的新剂量值时, 将满足新的 D 约束。这是由于以下事实: 吸收至少剂量  $d_0$  的体素对应于相关体积的  $v\%$  (根据 DVH)。因此, 当所有这些体素吸收至少  $d_{\text{新}}$  的剂量时, 将满足新的 D 约束。这可以通过将由相关体素吸收的剂量改变为该值来实现, 所述相关体素当前吸收小于  $d_{\text{新}}$  的剂量。这些体素对应于根据当前剂量分布吸收在  $d_0$  和  $d_{\text{新}}$  之间的剂量的体素。

[0122] 因此, 计划模块 8、29 自动将由用户为新剂量约束输入的剂量值  $d_{\text{新}}$  指定为以上述方式识别的体素的目标剂量值, 并如上所述使用这些目标值确定新的处置计划。

[0123] 当操作者指定新的 V 约束时, 计划模块 8、29 可以将该 V 约束转换为对应的 D 约束。因此, 如果操作者指定了新的体积约束 “ $Vx>y\%$ ”, 则计划模块将该体积约束转换为剂量约束 “ $Dy>x\text{ Gy}$ ”。由于 DVH 曲线单调递减, 因此该剂量约束确保也满足新的体积约束。在转换之后, 计划模块 8、29 可以结合 D 约束确定如上所述的新的处置计划。

[0124] 此外, 如果处置方案如到目前为止所描述被修改, 则经修改的处置方案能够引起这样的剂量分布: 其中, 对于在修改流程中未被识别为违反体素的体素, 吸收剂量被改变。这样的改变能够引起剂量约束的违反, 该剂量约束在由预先优化的处置计划产生的剂量分布中被满足。鉴于此, 一个实施例提供, 操作者可以指定 “锁定的” 剂量约束, 该约束 (仍然) 必须通过由经修改的处置计划产生的剂量分布来满足。

[0125] 在如上所述执行对预先优化的处置计划的第一修改之后, 计划模块 8、29 可以检查由经修改的处置计划产生的剂量分布是否满足锁定的剂量约束。如果不是这种情况, 则计划模块 8、29 可以确定违反这些剂量约束的体素, 并且可以根据违反的剂量约束为这些体素自动指定经修改的剂量值, 并且可以在经修改的剂量值的基础上迭代地应用上述流程以修

改处置计划,直到满足锁定的剂量约束(或已达到预定义的迭代次数)为止。在迭代流程的每个步骤中,计划模块确定(仍然)违反由先前迭代步骤中确定的处置计划产生的剂量分布中的相关剂量约束的体素,并根据用于在当前步骤中确定经修改的处置计划的剂量约束为这些体素指定经修改的剂量值。

[0126] 图3图示了用于修改上述近距离放射治疗系统或外部放射治疗系统中的预先优化的处置计划的流程的示例性步骤:在步骤301中,规划单元4、25的计划模块8、29获得预先优化的处置计划。然后,计划模块8、29确定由预先优化的处置计划产生的剂量分布,并在步骤302中借助于显示单元5、27将该剂量分布可视化给操作者。任选地,计划模块8、29还可以检测剂量分布中最热点和最冷点,并且可以将这些点呈现给操作者,例如通过在剂量分布的可视化中突出显示对应的体素(步骤303)。另外,计划模块8、29可以确定剂量分布的DVH并将其呈现给操作者。

[0127] 在步骤304中,计划模块8、29接收用户输入,该用户输入指定了递送到一个或多个体素的剂量的变化。另外,计划模块可以接收由用户指定的一个或多个全局剂量约束,特别地包括如上所述的D约束和/或V约束。对于这些全局剂量约束,计划模块8、29确定违反体素,并如上所述指定递送到这些体素的辐射剂量的变化值(步骤305)。因此,在计划模块8、29中存在用于改变递送到体素中的一个或多个的辐射剂量的指令。这些指令直接对应于步骤304中针对用户针对其直接指定剂量值的体素的用户输入,并且其由计划模块基于全局剂量约束针对步骤305中识别的体素自动地生成。

[0128] 在步骤306中,计划模块8、29以上述方式确定参数值的变化,所述参数值量化由相应系统的相关辐射分量提供的辐射量。基于这些变化,计划模块8、29计算相关参数的更新值(步骤307)。使用这些更新的值,计划模块8、29在步骤308中确定修改的处置计划。

[0129] 在步骤309中,计划模块8、29可以确定由经修改的处置计划产生的剂量分布,并且可以将该剂量分布可视化给操作者以进行检查。如果操作者对剂量分布感到满意,则可以使用经修改的处置计划来递送处置。如果操作者不满意,则可以类似于第一修改对剂量分布和处置计划进行另外的修改。

[0130] 以这种方式,可以执行针对近距离放射治疗处置或外部射束放射治疗处置的预先优化的处置计划的容易且快速的优化。以类似的方式,处置计划可以以其他消融治疗模式生成并优化,例如HIFU,射频(RF)和微波处置以及激光消融。在HIFU中,相关剂量可以对应于热剂量,并且辐射可以对应于超声波,超声波也由本文所用的术语辐射涵盖。

[0131] 通过研究附图、公开内容和所附权利要求,本领域技术人员在实践所要求保护的发明时可以理解和实现所公开的实施例的变型。

[0132] 在权利要求中,“包括”一词不排除其他元素或步骤,并且词语“一”或“一个”不排除多个。

[0133] 单个单元或设备可以履行权利要求中记载的若干项的功能。尽管在互不相同的从属权利要求中记载了特定措施,但是这并不指示不能有利地使用这些措施的组合。

[0134] 计算机程序可以被存储/分布在合适的介质上,例如与其他硬件一起提供或作为其他硬件的部分提供的光学存储介质或固态介质,但计算机程序也可以以其他形式来分布,例如经由因特网或者其他有线或无线电信系统分布。

[0135] 权利要求中的任何附图标记都不应被解释为对范围的限制。

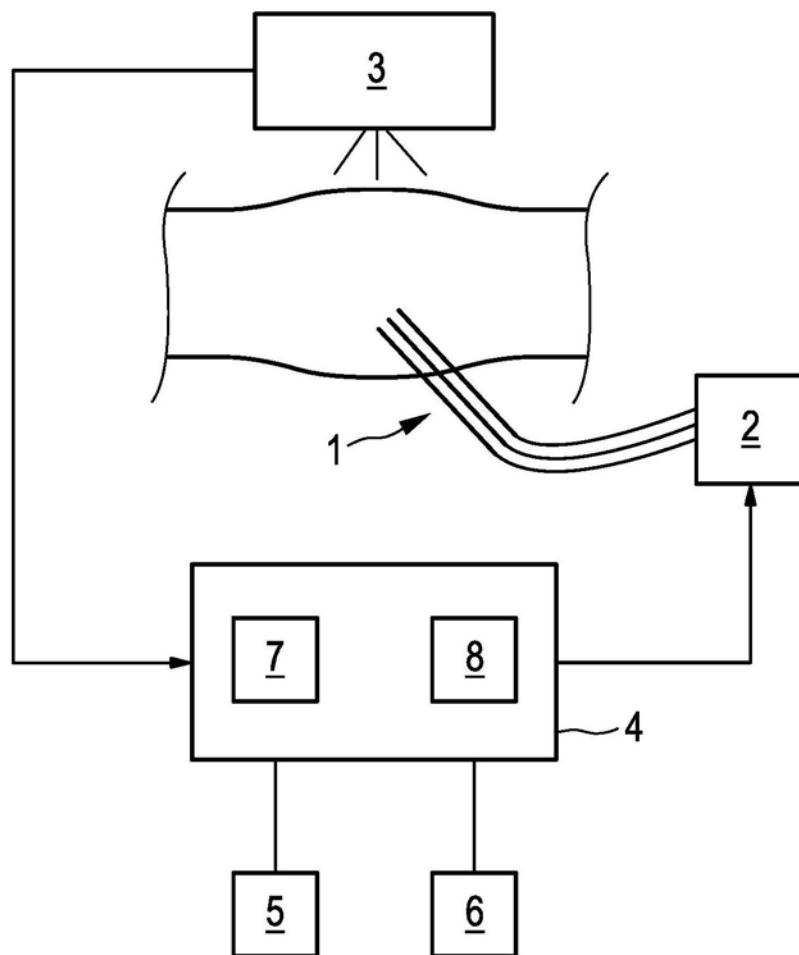


图1

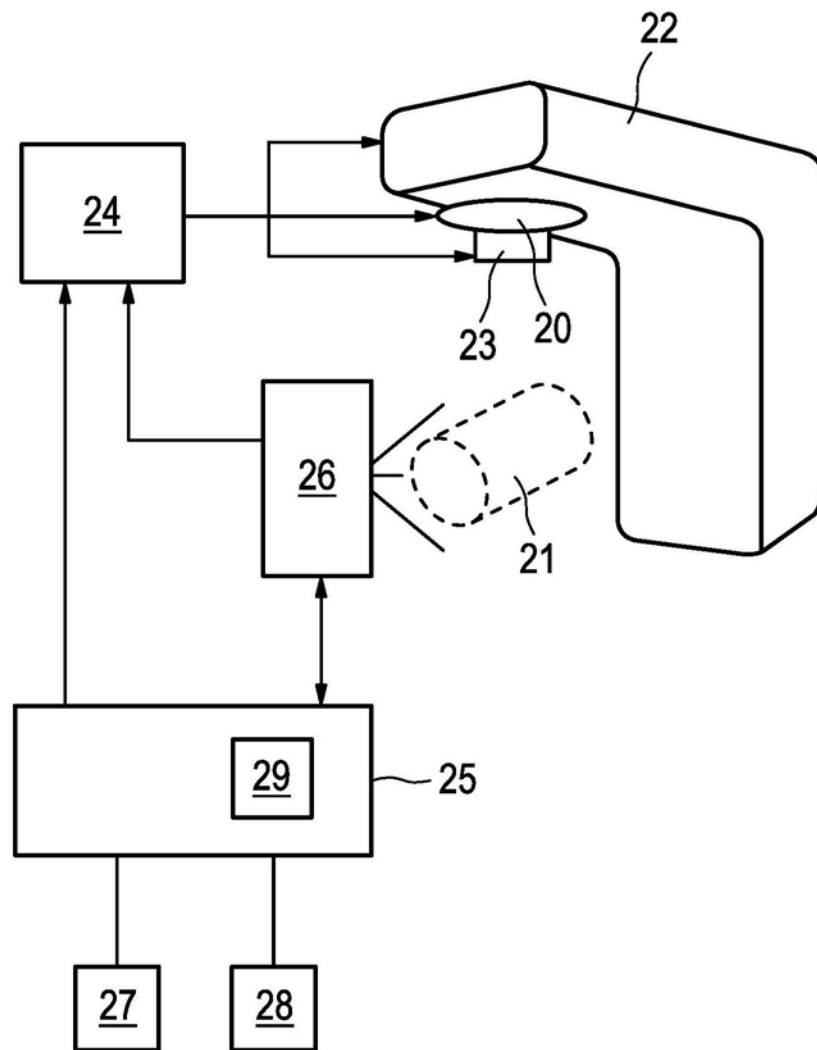


图2

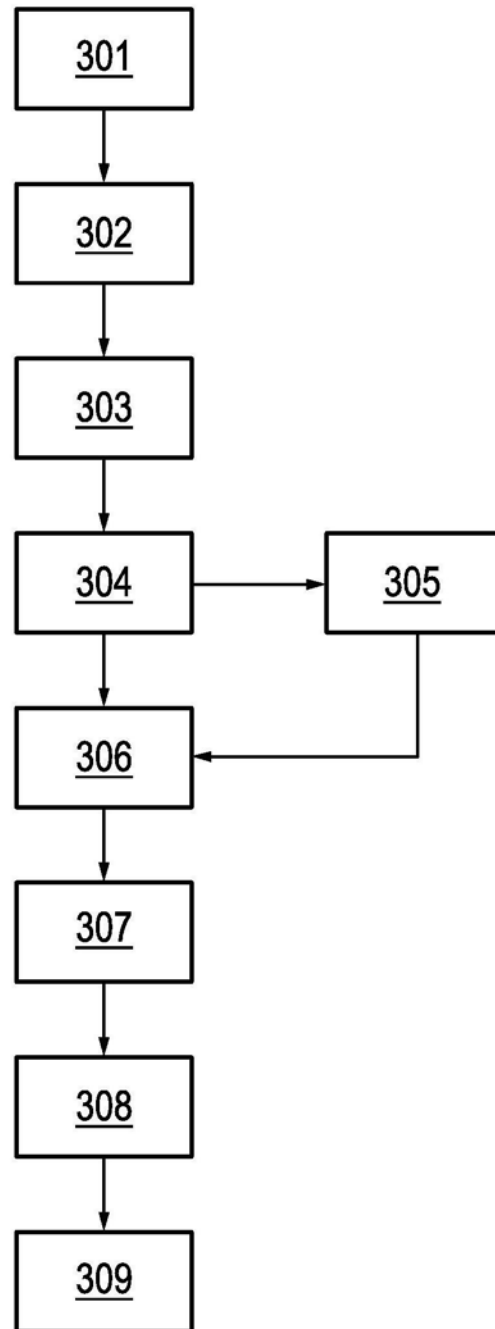


图3