



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106471507 B

(45)授权公告日 2020.04.14

(21)申请号 201580035989.2

(22)申请日 2015.06.25

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106471507 A

(43)申请公布日 2017.03.01

(30)优先权数据  
14174905.1 2014.06.30 EP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2016.12.30

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/EP2015/064328 2015.06.25

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02016/001046 EN 2016.01.07

(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

代理人 王英 刘炳胜

(51)Int.Cl.

G16H 20/40(2018.01)

G16H 70/20(2018.01)

A61N 5/10(2006.01)

(56)对比文件

CN 102859527 A,2013.01.02,

CN 103083820 A,2013.05.08,

CN 103282967 A,2013.09.04,

EP 2575965 A4,2013.12.11,

WO 2014068435 A2,2014.05.08,

Masoud Zarepisheh.A DVH-guided IMRT optimization algorithm for automatic treatment planning and adaptive radiotherapy replanning.《Medical Physics》.2014,第41卷(第6期),

David Craft.Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning.《Phys.Med.Biol》.2013,第58卷(第1期),

审查员 罗玲莉

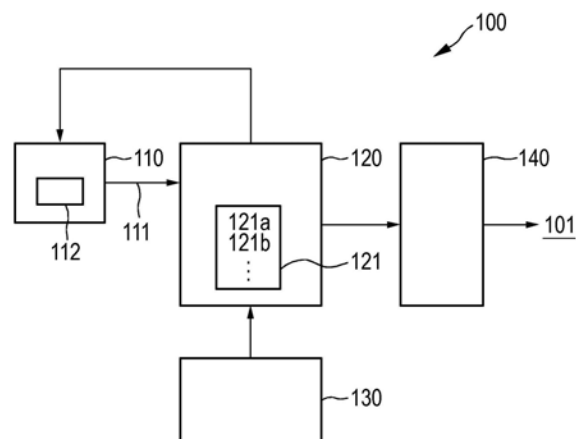
权利要求书2页 说明书10页 附图5页

(54)发明名称

辐射治疗规划系统和方法

(57)摘要

本发明涉及一种用于确定对应于积分通量分布概况的解(101)的辐射治疗规划系统(100)。本发明提出使用帕累托前沿导航器(140)来从各种自动规划解的集合中选择最佳计划。向规划者提供交互式图形用户接口(400)以在自动规划解的凸组合之中进行导航。所提出的帕累托计划导航能够被认为是另外的任选的细化过程,其能够在自动生成的解未完全满足规划者的要求的情况下进行应用以找到最佳计划。导航工具(400)局部地移动通过自动生成的计划的集合,并且能够潜在地简化规划者的决策制定过程并将对复杂临床案例的总的规划时间从若干小时减小到若干分钟。



1. 一种用于确定对应于积分通量分布概况的解(101)的辐射治疗规划系统(100),所述辐射治疗规划系统(100)包括:

-自动规划解生成单元(110),其用于基于一个或多个剂量质量度量(112)来自动地生成一个或多个自动规划的处置计划(111);

-权重分配单元(120),其被配置为将预定的多个权重(121)分配至所述一个或多个剂量质量度量(112);

-权重调节单元(130),其被配置为调节来自所述多个权重(121)的选定权重(121a);以及

-帕累托前沿导航单元(140),其被配置为响应于经调节的所述选定权重(121a)来生成对应于所述积分通量分布概况的所述解(101);

其中,所述辐射治疗规划系统(100)被配置为将所述解(101)与临床目标进行比较,并且其中,所述辐射治疗规划系统(100)还被配置为生成指示所述解(101)是否满足所述临床目标的比较信号,并且被配置为,如果所述比较信号指示所述解不满足所述临床目标,则将所述解提供作为热启动以生成最终的自动生成的计划。

2. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100),其中,所述帕累托前沿导航单元(140)被配置为确定帕累托前沿的凸包分段线性近似。

3. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100),其中,所述权重调节单元(130)包括图形用户接口,在所述图形用户接口中,针对来自所述多个权重(121)的每个各自的权重,提供滑动条以调节所述各自的权重。

4. 根据权利要求3所述的辐射治疗规划系统(100),其中,响应于接收利用滑动条的用户交互,所述辐射治疗规划系统(100)被配置为基于经调节的权重来优化内部线性编排问题。

5. 根据权利要求3所述的辐射治疗规划系统(100),其中,所述图形用户接口还被配置为更新和显示各自的剂量图和剂量体积直方图。

6. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100),其中,如果所述比较信号指示所述解(101)满足所述临床目标,则所述辐射治疗规划系统(100)还被配置为将所述解(101)递送至辐射治疗系统。

7. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100),其中,所述辐射治疗规划系统(100)被配置为采用基于帕累托前沿的细化技术。

8. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100),其中,所述辐射治疗规划系统(100)被配置为确定对帕累托前沿进行采样的处置计划的集合。

9. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100),其中,所述辐射治疗规划系统(100)被配置为确定N+1个处置计划的集合,其中,N对应于剂量质量度量(112)的数量,其中,所述辐射治疗规划系统(100)被配置为通过个体地优化每个剂量质量度量来确定N个锚定处置计划,并且其中,所述辐射治疗规划系统(100)还被配置为通过针对每个剂量质量度量使用相同的权重来确定一个额外的平衡处置计划。

10. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100),其中,所述辐射治疗规划系统(100)被配置为通过生成所述一个或多个自动规划的处置计划(111)的凸线性组合来构建近似的帕累托前沿。

11. 根据权利要求1所述的辐射治疗规划系统(100), 其中, 所述辐射治疗规划系统(100)被配置为对所述一个或多个剂量质量度量(112)中的每个剂量质量度量进行归一化。

12. 一种用于确定对应于积分通量分布概况的解(101)的辐射治疗规划方法(200), 所述辐射治疗规划方法(200)包括如下步骤:

- 基于一个或多个剂量质量度量(112)来生成(210)一个或多个自动规划的处置计划(111);

- 将预定的多个权重(121)分配(220)至所述一个或多个剂量质量度量(112);

- 调节(230)来自所述多个权重(121)的选定权重(121a);

- 通过使用帕累托前沿导航单元响应于经调节的所述选定权重(121a)来生成(240)对应于所述积分通量分布概况的所述解(101);

- 将所述解(101)与临床目标进行比较, 并且

- 生成指示所述解(101)是否满足所述临床目标的比较信号, 其中, 如果所述比较信号指示所述解不满足所述临床目标, 则将所述解提供作为热启动以生成最终的自动生成的计划。

13. 一种编码有一条或多条计算机可执行指令的计算机可读存储介质, 所述一条或多条计算机可执行指令当由计算系统的处理器执行时, 令所述处理器执行根据权利要求12所述的辐射治疗规划方法的所述步骤。

## 辐射治疗规划系统和方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用于确定对应于积分通量分布概况 (fluence profile) 的辐射治疗规划解的辐射治疗规划系统、辐射治疗规划方法以及计算机可读存储介质。

### 背景技术

[0002] 辐射治疗规划 (RTP) 的主要目标是快速且准确地确定能够尽可能满足所有临床目标的剂量分布 (即, 积分通量射束分布概况)。例如, 必须被向肿瘤递送特定的剂量, 并尽可能地避开附近的风险器官 (OAR)。因此, 在辐射治疗 (RT) 逆向规划中的优化问题固有地是多标准问题, 这是因为它们涉及针对肿瘤靶标和邻近的关键组织结构的多个规划目标。通常要求这样的临床决策, 其通常基于在这些相互冲突的目标之中的重要性权重的分配直到满足临床愿望。满足临床愿望通常涉及许多重复性优化。目前, 在诸如 Philips Pinnacle<sup>3</sup> 处置规划系统的处置规划系统 (TPS) 中, 已经包括了“自动规划”例程以自动地生成能够满足临床要求的计划, 参见 R.Kashani 等人在 Med.Phys., (2010), 第37卷, 第3340-3340页上的文章“M0-D-BRB-07: Automated IMRT Plan Generation for Prostate Cancer”, 通过引用将其并入本文。这些自动规划例程的实施依赖于“脚本”, 所述“脚本”是被存储为文本文件的内部命令的程序集。脚本能够随时被调取在新的患者文件上。

[0003] US2013197878A1 公开了一种用于辐射治疗优化的积分通量和射束取向优化包, 其包被称为 PARETO (帕累托意识辐射治疗演化处置优化), 其利用能够同时优化若干目标函数并且有效且详细地绘制若干目标函数的折中表面的结构的多目标遗传算法。PARETO 生成帕累托非主要解的数据库并且允许在 IMRT 处置规划期间的多个规划目标之间的折中的图形探索。PARETO 提供了自动的多目标处置计划优化, 其并不要求选取任何目标权重, 并且因此找到定义折中表面的经优化的解的大样本, 所述大样本表示可能的妥协的范围。

[0004] 当在新的患者上进行调用时, 自动规划例程通常创建各种靶标和正常组织规划结构, 设置射束和剂量规定, 并且加载定制的强度调制的辐射治疗 (IMRT) 目标以启动优化。靶标目标是基于规定剂量的, 而风险器官目标是根据考虑靶标和风险器官的几何性质的模型来确定的, 以基于现有案例来预测平均剂量。遗憾的是, 所需的时间和利用自动规划优化实现的质量是案例独立的。仅仅在很少情况下能够在无需另外的交互的情况下临床批准第一自动规划解。相反, 更多的情况是, 要求额外的手动参数调整来满足尽可能多的临床目标。这种手动调整参数的额外的细化步骤会花费若干小时, 从而使得辐射治疗规划 workflows 中的自动规划的益处变弱。

[0005] M.Zarepisheh 等人在 Medical Physics, 第41卷, 第6号, 第061711 页, (2014) 上的文章“A DVH-guided IMRT optimization algorithm for automatic treatment planning and adaptive radiotherapy replanning”公开了一种自动创建通过参考计划的 DVH 曲线引导的处置计划的算法, 其包含关于临床医生对不同靶标/器官之中并且在针对器官的 DVH 曲线的不同部分之中批准的剂量体积折中的信息。在 ART 中, 参考计划是针对相同患者的初始计划, 而针对自动处置规划, 参考计划是从具有相似医学状况和几何形状的

先前处置的患者的、在临床上批准和递送的计划的库中选择的。所提出的算法采用了基于体素的优化模型并且对大的基于体素的帕累托表面进行导航。对体素权重进行迭代地调节以得到在DVH方面类似于参考计划的计划。如果参考计划是可行的但不是帕累托优化的,则该算法生成具有比这些参考计划更好的DVH的帕累托优化计划。如果参考计划对于新的几何形状限制过多,则该算法生成具有接近这些参考计划的DVH的帕累托计划。在以上两种情况下,新的计划具有与参考计划类似的DVH折中。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供用于以快速且准确的方式确定对应于积分通量分布概况的解的改进的辐射治疗规划系统和方法。

[0007] 根据本发明的第一方面,提供了一种用于确定对应于积分通量分布概况的解的辐射治疗规划系统,所述辐射治疗规划系统包括:自动规划解生成单元,其用于基于一个或多个剂量质量度量来自动生成一个或多个自动规划的处置计划;权重分配单元,其被配置为将预定的多个权重分配给所述一个或多个剂量质量度量;权重调节单元,其被配置为调节来自所述多个权重的选定权重;以及帕累托前沿导航单元,其被配置为响应于所述经调节的选定权重而生成对应于所述积分通量分布概况的所述解。所述辐射治疗规划系统被配置为将所述解与临床目标进行比较,其中,所述辐射治疗规划系统还被配置为生成指示所述解是否满足所述临床目标的比较信号,并且被配置为,如果所述比较信号指示所述解不满足所述临床目标,则将所述解提供作为热启动以生成最终的自动生成的计划。

[0008] 在本文中,提出了使用例如D.Craft和C.Richter在Phy.Med.Biol, (2013),第58卷,第87-103页上的文章“Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning”(通过引用将其并入本文)中描述的帕累托前沿导航器来从各种自动规划解的集合中选择最佳计划。

[0009] 在多标准优化理论中,已经提出了若干种方法来找到若干(相互冲突的)目标之间的最佳折中。最常用的是所谓的“加权方法”(或“标量化”方法),其中,组成所有目标的加权复合功能被最小化。这里,询问决策制定器以找到能够得到优选解的最佳权重集合。该方法通常被用在常规的IMRT积分通量图优化中。用于多标准优化的另一种方法是“目标编排”方法。这里,决策制定器已经知道针对每个目标的期望值。然而,最小二乘问题被最小化以找到最佳解,其使得距期望值的该参考向量的距离最小化。其他方法也是可用的,如“字典排序”优化等。

[0010] 多标准优化方法的另一家族包括所谓的“交互式方法”。在交互式方法中,决策制定器充当重要角色并且构思是支持她/他寻找最优解。在交互式方法中,重复进行迭代解算法的步骤并且决策制定器逐步地提供优选信息,使得能够找到最优解。本发明的帕累托前沿导航器是该后一组方法的部分。帕累托导航器对本领域技术人员来说是已知的,并且在D.L. Craft等人在Med.Phys, (2006), 33 (9), 第3399-3407页上的文章“Approximating convex Pareto surfaces in multiobjective radiotherapy planning”以及D.Craft等人在Med.Phys, (2010), 37 (2), 第736-741 页上的文章“Simultaneous navigation of multiple Pareto surfaces, with an application to multicriteria IMRT planning with multiple beam angle configurations”中有所描

述。

[0011] 至此,简单且交互式图形用户接口 (GUI) 被提供给规划者以在自动规划解的凸组合之中进行“导航”。这种提出的帕累托计划导航能够被认为是另外的任选细化过程,其能够在自动生成的解未完全满足规划者的要求的情况下进行应用以找到最佳计划。局部地移动通过自动生成的计划的集合的这样的导航工具能够潜在地简化规划者的决策制定过程并将对复杂临床案例的总的规划时间从若干小时减小到数分钟。“局部地移动”的表达指示在以下的步骤0中获得的潜在的解只在有限的范围内 (即,局部地) 变化。

[0012] 优选地,在以下的步骤0处,例如通过使用顶点3自动规划工具来产生第一“自动生成的”解。然后,规划者可以要么接收并递送该解 (即,射束积分通量分布概况) 要么细化该解。

[0013] 如果需要细化,则本发明能够用于使得细化步骤更容易且更快速。

[0014] 实际上,在步骤1处,优选通过如下所描述地优化N+1个计划来对帕累托前沿进行近似。由于期望“细化”在步骤0处产生的第一解,因此将利用(N+1)+1=N+2个计划 (即,N个“锚定”计划,加上“平衡”计划,加上在步骤(0)处的初始自动生成的计划) 来填充帕累托矩阵Y。

[0015] 当导航开始时,在帕累托解空间内从其开始移动的初始位置对应于在步骤0处获得的解。用户能够移动滑动条以朝向可能更好地适配用户的要求的新的局部帕累托解进一步地移动。

[0016] 优选地,所述辐射治疗规划系统还包括自动生成的解的评估单元,所述自动生成的解的评估单元用于判断所述一个或多个自动规划的处置计划是否满足临床目标。优选地,所述辐射治疗规划系统被配置为使用帕累托前沿导航器。通过使用帕累托前沿导航器,所述辐射治疗规划系统找到自动规划解的有限集合的局部邻域内的最佳最终计划。优选地,在确定帕累托矩阵之后,提供允许规划者在帕累托最优空间内进行导航的工具。通过提供允许规划者在帕累托最优空间内进行导航的工具,辐射治疗规划系统找到所述靶标与OAR剂量目标之间的最佳折中。如果所述比较信号指示所述解并未满足所述临床目标,则所述辐射治疗规划系统还被配置为提供所述解作为热启动以生成最终的自动生成的计划。

[0017] 根据优选实施例,所述帕累托导航单元被配置为确定帕累托前沿的凸包分段线性近似。尤其地,如M.Monz等人在Phys.Med.Biol., (2008), 第53卷,第985-998页上的文章“Pareto navigation—algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning” (通过引用将其并入本文) 中所描述的,所提出的导航器优先将在帕累托前沿的凸包分段线性近似 $Y^c$ 内移动:

$$[0018] \quad Y^c = \left\{ \sum_{k=1}^{N+2} v_k f(x_k) \mid \sum_{k=1}^{N+2} v_k = 1, v \geq 0 \right\}$$

[0019] 这里,v是针对 $Y^c$ 中的每个导航的解的凸组合权重的向量, $x_k$ 指自动生成的计划,其中, $k=1, \dots, N+2$ ,并且f是向量值函数,其中,每个分量是N个剂量质量度量中的一个。

[0020] 根据另外的优选实施例,所述权重调节单元包括图形用户接口,其中,针对来自所述多个权重的每个各自的权重,提供滑动条以调节所述各自的权重。通过提供具有针对来自多个权重的每个各自的权重的调节滑动条的图形用户接口,向用户提供了简单且交互式的工具来调谐给定的处置计划的参数。

[0021] 根据另外的优选实施例,响应于接收利用滑动条进行的用户交互,所述辐射治疗规划系统被配置为基于所调节的权重来优化内部线性编排问题。通过以所描述的方式(即,利用基于所调节的权重来优化内部线性编排问题)来对用户接口做出响应,该优选实施例朝向满足新的/当前的滑动条位置的帕累托解的下一最佳凸组合进行移动。

[0022] 根据另外的优选实施例,所述图形用户接口还被配置为更新和显示各自的剂量图和剂量体积直方图。通过更新和显示各自的剂量图和剂量体积直方图,优选实施例向规划者提供了关于用户选择的结果的中间反馈。

[0023] 如上文所解释的,所述辐射治疗规划系统被配置为将所述解与临床目标进行比较,并且其中,所述辐射治疗规划系统还被配置为生成指示所述解是否满足所述临床目标的比较信号。通过将所述解与临床目标进行比较,根据本发明的辐射治疗规划系统可以辅助判断本解是否已经提供了满意的处置计划而使得可以停止迭代规划流程。另外,通过生成指示所述解是否满足所述临床目标的比较信号,根据本发明的辐射治疗规划系统使得用户在被询问时能够判断是否继续进行。备选地或额外地,用户可以设置偏好以在找到满意的解(即,满足一个或多个临床目标的解)时自动停止处置规划流程。

[0024] 根据另外的优选实施例,如果所述比较信号指示所述解满足所述临床目标,则所述辐射治疗规划系统还被配置为将所述解递送到辐射治疗系统。如果当前的解满足一个或多个临床目标,则可以停止迭代处置规划流程,这是因为已经找到了满意的解。辐射治疗然后可以立即开始或者在特定时间段之后开始。在任意情况下,优选将所确定的解传输到辐射治疗系统,以便使得准备使用该处置计划。

[0025] 根据另外的优选实施例,所述辐射治疗规划系统被配置为采用基于帕累托前沿的细化技术。通过采用基于帕累托前沿的细化技术,根据该优选实施例的辐射治疗规划系统避免了用于对自动生成的解进行细化的额外的冗长的手动参数调整。由此,根据该优选实施例的辐射治疗规划系统改善了对自动生成的计划细化过程的规划者控制。

[0026] 根据另外的优选实施例,所述辐射治疗规划系统被配置为确定对帕累托前沿进行采样的处置计划的集合。通过确定对帕累托前沿进行采样的处置计划的集合,能够快速且交互地浏览各种处置选项。

[0027] 根据另外的优选实施例,所述辐射治疗规划系统被配置为确定 $N+2$ 个处置计划的集合,其中, $N$ 对应于剂量质量度量的数量,其中,所述辐射治疗规划系统被配置为通过独立地优化每个剂量质量度量来确定 $N$ 个锚定的处置计划,并且其中,所述辐射治疗规划系统还被配置为通过针对每个剂量质量度量使用相同的权重来确定一个额外的平衡处置计划。通过经由使用自动规划设置的滑动条位置的不同组合的自动规划来初始地生成计划的集合,能够部署实时交互式帕累托导航器以在复杂临床场景中增强对自动生成的细化过程的规划者控制。

[0028] 根据另外的优选实施例,所述辐射治疗规划系统被配置为通过生成一个或多个自动规划的处置计划的凸线性组合来建立近似的帕累托前沿。通过生成所述一个或多个自动规划的处置计划的凸线性组合,根据优选实施例的辐射治疗规划系统实现了后续的解搜索(即,帕累托导航)将被划界到自动规划解的局部邻域。

[0029] 根据另外的优选实施例,所述辐射治疗规划系统被配置为对所述一个或多个剂量质量度量中的每个进行归一化。

[0030] 根据本发明的第二方面,提供了一种用于确定对应于积分通量分布概况的解的辐射治疗规划方法,所述辐射治疗规划方法包括如下步骤:基于一个或多个剂量质量度量来生成一个或多个自动规划的处置计划;将预定的多个权重分配给所述一个或多个剂量质量度量;调节来自所述多个权重的选定权重;通过使用帕累托前沿导航单元响应于经调节的所述选定权重来生成对应于积分通量分布概况的所述解;将所述解与临床目标进行比较,并且生成指示所述解是否满足所述临床目标的比较信号,其中,如果所述比较信号指示所述解不满足所述临床目标,则将所述解提供作为热启动以生成最终的自动生成的计划。

[0031] 根据本发明的第三方面,提供了一种编码有一条或多条计算机可执行指令的计算机可读存储介质,所述一条或多条计算机可执行指令当由计算系统的处理器执行时,令所述处理器执行根据权利要求12所述的辐射治疗规划方法的步骤。

[0032] 应当理解,根据权利要求1所述辐射治疗规划系统、根据权利要求12 所述的辐射治疗规划方法、以及根据权利要求13所述的计算可读存储介质具有尤其是在从属权利要求中所定义的相似和/或相同的优选实施例。

[0033] 应当理解,本发明的优选实施例也能够是从属权利要求或以上实施例与各自的独立权利要求的任何组合。

[0034] 参考下文描述的实施例,本发明的这些方面和其他方面将变得明显并且得到阐明。

## 附图说明

[0035] 在以下附图中:

[0036] 图1示意性且示范性示出了辐射治疗规划系统的实施例,

[0037] 图2示意性且示范性示出了辐射治疗规划系统的另一实施例,

[0038] 图3示意性且示范性示出了三维帕累托表面的图示,

[0039] 图4示意性且示范性示出了自动规划工具的屏幕截图,

[0040] 图5示意性且示范性示出了帕累托导航器工具的屏幕截图,并且

[0041] 图6示意性且示范性示出了帕累托导航器工具滑动条移动的图示。

## 具体实施方式

[0042] 图1示意性且示范性示出了用于确定对应于积分通量分布概况的解 101的辐射治疗规划系统100的实施例。辐射治疗规划系统100包括:自动规划解生成单元110,其用于基于一个或多个剂量质量度量112来自动生成一个或多个自动规划的处置计划111;权重分配单元120,其被配置为将预定的多个权重121分配给所述一个或多个剂量质量度量112;权重调节单元 130,其被配置为调节来自所述多个权重121的选定权重121a;以及帕累托前沿导航单元140,其被配置为响应于所述经调节的选定权重121a而生成对应于所述积分通量分布概况的所述解101。

[0043] 图2示意性且示范性示出了用于确定对应于积分通量分布概况的解 101的辐射治疗规划方法200的另一实施例,所述辐射治疗规划方法包括如下步骤:基于一个或多个剂量质量度量112来生成(步骤210)一个或多个自动规划的处置计划111;将预定的多个权重121分配(步骤220)给所述一个或多个剂量质量度量112;调节(步骤230)来自所述多个权重121

的选定权重121a;并且响应于所述经调节的选定权重121a而生成(步骤240) 对应于所述积分通量分布概况的所述解101。

[0044] 图3示意性且示范性示出了三维帕累托表面的图示300,所述三维帕累托表面在例如D.Craft和C.Richter等人在Phys.Med.Biol., (2013),第58 卷,第87-103页的文章“Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning”中有所描述。自动生成的处置计划是由粗体的黑点指示的。那些自动生成的处置计划的凸组合对应于由各自的三个解点形成的三角形。所提到的自动生成的解的凸组合对三维帕累托表面进行近似。其他细节在Craft和Richter的上文提到的文章中得以详细描述。

[0045] 自动规划解生成

[0046] 在第零个步骤中,可以例如通过使用Pinnacle<sup>3</sup>自动规划工具来确定潜在的解(诸如,例如积分通量射束分布概况的集合),如R.Kashani等人在 Med.Phys., (2010),第37卷,第3340-3340页上的“MO-D-BRB-07: Automated IMRT Plan Generation for Prostate Cancer”一文中所描述的,通过引用将其并入本文。如果自动生成的解已经满足所有临床愿望,则该计划能够乐意被递送。然而,如果由于不同原因,新的剂量分布并不足够准确,则需要额外的冗长的手动参数调整以细化自动生成的解。

[0047] “自动规划”例程在Philips Pinnacle<sup>3</sup>处置规划系统中是可获得。图4 示意性且示范性示出了要与例如Philips Pinnacle<sup>3</sup>处置规划系统一起使用的自动规划工具的屏幕截图400。在面板420中示出了靶标优化目标。在面板 430中示出OAR优化目标。所述自动规划例程依赖于在本文中被称为 Pinnacle“脚本”的机器可读指令。Pinnacle脚本对应于内部命令的程序集。优选地,脚本能够在任何时间在新患者文件上进行调取。当对新的患者进行调用时,自动规划例程创建各种靶标和正常组织规划结构,设定射束和剂量规定,并且加载定制的强度调制的辐射治疗目标以开始优化。靶标目标通常基于给定的规定剂量,而风险器官目标是根据考虑靶标和风险器官的几何性质的模型来确定的,以基于现有案例来预测平均剂量。自动规划解由于模型的偶尔对风险器官的过度强调而在优化期间要求更频繁的调解。在这些情况下,会让规划者将与不同剂量质量度量有关的N个“细化”滑动条(例如, N=3) 410a、410b、410c调整为:“靶标/风险器官平衡”、“剂量衰减”、“正兴性/减少的MU调制”等,如在上文提及的由R.Kashani 等人在Med.Phys., (2010),第37卷,第3340-3340页上的文章“MO-D-BRB-07:Automated IMRT Plan Generation for Prostate Cancer”中所解释的。随后,利用自动规划参数的该新的集合来调取脚本,以确定更好地适配规划者要求的新的自动规划解。该迭代手动细化过程能够是非常长的,并且不是实时迭代的。在一些复杂的临床场所中,该迭代的手动细化过程会花费若干小时来找到最佳解,妨碍了自动规划在大的有效增益和对临床RTP过程的鲁棒质量控制方面的益处。

[0048] 局部化的帕累托前沿近似

[0049] 如上文所解释的,例如通过使用Pinnacle<sup>3</sup> 自动规划工具来产生第一“自动生成的”解。然后,规划者可以选择接受并递送该解(即,射束积分通量分布概况)或拒绝该解。

[0050] 如果期望进行细化,则本发明能够用于更容易且更快速地进行细化步骤。

[0051] 在这一点上,在第一步骤中,帕累托前沿近似是通过如在下文更详细地描述的对N+1个计划进行优化来确定的。由于想要“细化”在步骤0处产生的第一解,因此将利用(N+1)+

1=N+2个计划(即,N个“锚定”计划,加上“平衡”计划,加上在步骤0处自动生成的计划)来填充帕累托矩阵Y。至此,针对每个解 $x_k$ 的(其中, $k=1, \dots, N+2$ )的所有剂量质量度量值被归一化并且被用于填充帕累托矩阵  $Y=[f(x_1) | f(x_2) | \dots | f(x_{N+1}), f(x_{N+2})]$ ,这里,f是向量值函数,其中,每个分量是在步骤0处讨论的N个剂量质量度量(细化滑动条)中的一个。

[0052] 经归一化的Y帕累托矩阵被存储在存储器中并且被用于确定帕累托前沿的凸包分段线性近似 $Y^c$ ,  $Y^c=Y*v$ :

$$[0053] \quad Y^c = \left\{ \sum_{k=1}^{N+2} v_k f(x_k) \middle| \sum_{k=1}^{N+2} v_k = 1, v \geq 0 \right\}。$$

[0054] 这里,v是针对 $Y^c$ 中的每个导航的解的凸组合权重的向量,初始 $v_{ini}$ 值将是与在步骤0处优化的计划(即,规划者想要进一步细化的计划)有关的v值。

[0055] 由于矩阵Y在[0,1]之间进行归一化并且由于系数 $v_k$ 可以具有0与1之间的值,并且由于 $\sum_k v_k = 1$ ,因此当前滑动条位置/值(其也在区间[0,1]内被归一化)能够用于借助线性编排来找到系数 $v^*$ 的最佳集合。根据这些,可以发现对应的经导航的解并将该解显示为  $x^* = \sum_{k=1}^{N+2} v_k^* x_k$ ,并且N个滑动条位置  $f(x^*) = Yv^*$ 。滑动条的位置 $f(x^*)$ 能够在将其显示在GUI上之前被去归一化回到初始范围。

[0056] 在第一步骤中,当在第零个步骤处确定的优化的自动生成的解不足够准确时,提出使用帕累托前沿导航器,如在D.Craft和C.Richter在Phy.Med. Biol., (2013),第58卷,第87-103页上的文章“Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning”中所描述的,通过引用将其并入本文。通过使用帕累托前沿导航器,目标是找到自动规划解 $x_k$ 的有限集合的局部邻域内的最佳最终计划,其中,“解”对应于特定的积分通量射束分布概况。帕累托导航中的第一步骤因此对应于确定计划的集合,其对帕累托前沿进行准确地采样。计划的该集合应当被称为帕累托数据库计划。在这种特定的情况下,提出了构建近似的帕累托前沿,使用次优化的自动规划解 $x_k$ 的有限集合以及所有它们的凸线性组合,即,所有它们的线性组合,其中,系数是非负的并且总和等于1。以这种方式,后续的解搜索(即,帕累托导航)将被划界到自动规划解 $x_k$ 的局部邻域。

[0057] 设想:

$$[0058] \quad v^* = \arg \min \left\{ z \in \Re \middle| (Yv)_i - y_i^R + s_i = z, i \in \kappa \setminus \{j\}, (Yv)_j = \tau, \sum_{i=1}^{N+2} v_i = 1, s \geq 0 \right\}。$$

线性问题时,寻找系数 $v^*$ 的新的集合(即,新的解 $x^* = \sum_{k=1}^{N+2} v_k^* x_k$ ),其中,所有第i个剂量质量度量值保持非常接近先前解 $(Yv)_i - y_i^R + s_i = z$ 中的一个,除了第j个剂量质量度量值(与由用户在GUI中修改的滑动条有关的剂量质量度量值)。以这种方式,确保了遍及解空间的“导航”是平滑的并且新的位置尽可能地接近先前位置/解(处于先前位置/解的局部)。

[0059] 在复杂的临床场景中,如在上文所提及的D.Craft和C.Richter在Phys. Med. Biol., (2013),第58卷,第87-103页上的文章“Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning”所描述的实时交互式帕累托

导航器能够被部署以增加对自动生成计划细化过程的规划者控制。最初,经由使用自动规划设置的滑动条位置的不同组合的自动规划来生成计划的集合。例如,一种构思可以是通过优化每个第 $k$ 个质量度量来确定应当被称为“锚定计划”的 $N$ 个计划。换言之,独立地优化针对每个质量度量的一个计划。这意味着一个度量的滑动条位置被设定到其最大值,而所有其他的滑动条被设定到最小值。然后,例如通过Pinnacle<sup>3</sup> 自动规划工具使用滑动条的位置,来获得一个自动生成的解。该解被收集在帕累托矩阵 $Y$ 中。

[0060] 针对每个质量度量使用相同的权重来优化一个额外的“平衡”计划。名字“平衡计划”已经被选取来反映所有权重都是相同的,即,所有调谐参数都是同等重要的。一旦细化的自动规划解的初始集合是可用的,则经细化的自动规划解的该初始集合就能够被用于对帕累托解空间进行近似和导航。优选地,针对每个解 $x_k$ 的所有剂量质量度量值(其中, $k=1, \dots, N+2$ ) 被归一化并且被用于填充帕累托矩阵 $Y=[f(x_1) | f(x_2) | \dots | f(x_{N+2})]$ 。这里, $f$ 是向量值函数,其中,每个分量是在上文所描述的第零个步骤处讨论的 $N$ 个剂量质量度量(细化滑动条)中的一个。如果 $N+2$ 个锚定计划中的一个已经满足所有临床目标,则该解被保留并且被递送到患者。如果不是以上这种情况,则应用交互式实时帕累托导航器以移动到更好的解点。

[0061] 图5示意性且示范性示出了帕累托导航器工具的屏幕截图。显示了剂量分布的当前标绘点510以及对应的剂量体积直方图520。另外,描绘了帕累托导航滑动条530a,……,530e(被共同成为帕累托导航滑动条530)。这里,每次移动一个滑动条530,利用近似1秒或更短的更新时间来实时更新剂量分布510和对应的剂量体积直方图520。

[0062] 帕累托前沿导航器

[0063] 一旦给出了近似的帕累托前沿(即,帕累托矩阵 $Y$ ),则第二步骤对应于提供工具,所述工具允许规划者在帕累托优化空间内进行导航,以便找到所有靶标与风险器官的剂量目标之间的最佳折中。在本文中,提出向规划者提供简单的并且交互式的图形用户接口,其中,对于调谐参数中的至少一个(优选针对每个),提供滑动条以增加/减小其影响,如在图6中所图示的。图6示意性且示范性示出了帕累托导航器工具滑动条移动的图示。例如,在优选实施例中,每次移动滑动条620中的一个,以增加或减小对应的剂量质量度量,求解线性编排问题,以从参考点朝向近似的局部帕累托前沿610上的新的点进行移动。

[0064] 术语“滑动条”通常被用在计算中以指图形用户接口元件,所述图形用户接口元件被用于通过例如以水平方式或垂直方式移动指示器来设置值。通过移动调谐参数的各自的一个的滑动条,线性近似问题中的调谐参数的权重被增加或减小。优选地,滑动条每次被移动时,该动作调用内部线性编排问题的优化,其目的在于朝向满足新的滑动条位置的帕累托解的下一最佳凸组合“移动”。相应地,向用户给出关于当前滑动条位置处的新的位置的质量的实时反馈。然而,本发明也覆盖使用触发器来较不频繁地进行更新的解,尽管线性编排优化是非常快速的而使得更新并不是问题。

[0065] 在帕累托前沿导航期间,优选连续地更新并标绘对应的剂量图和剂量体积直方图(DVH)(其中,更新时间为例如小于1s)。

[0066] 所提出的导航器将在帕累托前沿的凸包分段线性近似 $Y^c$ 内进行移动,如在M.Monz等人在Phys.Med.Biol.,(2008),第53卷,第985-998页上的文章“Pareto navigation—algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning”(通过引用

将其并入本文)中所描述的:

$$[0067] \quad Y^c = \left\{ \sum_{k=1}^{N+2} v_k f(x_k) \mid \sum_{k=1}^{N+2} v_k = 1, v \geq 0 \right\}.$$

[0068] 这里,  $v$  是针对  $Y^c$  中的每个导航的解的凸组合权重的向量, 在数学中, 欧几里得空间中的点的集合  $X$  的凸包或凸包络是包含  $X$  的最小凸集。例如, 当  $X$  为平面的划界子集时, 凸包可以被可视化为由在  $X$  周围伸展的橡皮圈形成的形状, 参见 de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, Mark, Schwarzkopf, O. 的教科书 “Computational Geometry: Algorithms and Applications” (Springer, 第2-8页, 2000)。正式地, 凸包可以被定义为包含  $X$  的所有凸集的相交部分, 或者被定义为  $X$  中的点的所有凸组合的集合。利用后一种定义, 凸包可以从欧几里得空间延伸到任意的实向量空间; 它们也可以被进一步概括到定向拟阵, 参见 Knuth, Donald E 的教科书 “Axioms and hulls” (Lecture Notes in Computer Science, 第606号, Heidelberg: Springer-Verlag, p.ix+109, doi:10.1007/3-540-55611-7, ISBN 3-540-55611-7, MR 1226891, 1992)。

[0069] 在本文中, 提出了向规划者提供简单的并且交互式的图形用户接口, 其中, 针对每个要调谐的质量度量, 提供滑动条以改变其值 (如在图5中所图示的)。优选地, 每次移动滑动条时, 该动作调用对内部线性编排问题的最小化, 其目的在于找到权重  $v^*$  的最佳集合, 以便朝向满足当前滑动条位置的自动生成的解  $x_k$  的下一最佳凸组合  $x^*$  “移动”:

$$[0070] \quad v^* = \arg \min \left\{ z \in \mathfrak{R} \mid (Yv)_i - y_i^R + s_i = z, i \in \kappa \setminus \{j\}, (Yv)_j = \tau, \sum_{i=1}^{N+2} v_i = 1, s \geq 0 \right\},$$

[0071] 其中,  $\arg \min$  代表最小值的幅角, 换言之,  $v^*$  对应于给定幅角的点集  $z \in \mathfrak{R}$ , 针对所述给定幅角, 给定的函数  $(Yv)_i - y_i^R + s_i = z, i \in \kappa \setminus \{j\}, (Yv)_j = \tau, \sum_{i=1}^{N+2} v_i = 1, s \geq 0$  保持其最小值。

这里,  $j$  是移动的滑动条的指数,  $\tau$  是滑动条选定值,  $\kappa := \{1, \dots, N\}$  是滑动条指数的集合, 并且  $s$  是松弛变量, 即, 被添加到不等式约束以将其变换到等式的变量, 参见 Boyd, Stephen P., Vandenberghe, Lieven 的书籍 “Convex Optimization” (Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-83378-3, 2004), 通过引用将其并入本文。参考点  $y^R$  表示具有对应于在第  $j$  个滑动条被移动之前的滑动条的位置的  $N$  个条目的向量。因此, 针对第  $j$  个度量增强了  $\tau$  值, 并且在剩余的质量标准中查找到先前滑动条位置的最佳距离。在帕累托前沿导航期间, 能够使用完全相同的优化权重  $v^*$  来计算对应的导航的解 (即, 积分通量图)  $x_k$ :

$$[0072] \quad x^* = \sum_{k=1}^{N+2} v_k^* x_k.$$

[0073] 优选地, 也能够 (利用优选小于1秒的更新时间) 连续地计算并显示对应的剂量图和剂量体积直方图, 如在上文所提及的 M. Monz 等人在 Phys. Med. Biol., 2008, 第53卷, 第985-998页上的文章 “Pareto navigation— algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning” 中所描述的。在图5中示出了导航器图形用户接口的范例。

[0074] 后续处理

[0075] 在额外的步骤中, 如果最终导航的计划  $x^*$  满足所有临床目标, 则能够乐意地递送

对应的解(即,积分通量射束分布概况)。另一方面,如果帕累托近似不是足够准确,则调谐参数(即,导航参数)的优化集合可以被用作热启动以生成最终的自动生成的计划。换言之,能够通过(在所有辐射治疗规划工具、诸如例如Pinnacle<sup>3</sup>自动规划工具中可用的)常规IMRT积分通量图优化工具进一步处理帕累托导航的解 $x^*$ (即,射束分布概况)。

[0076] 所提出的发明能够应用于所有这样的临床案例:其中,仅采用自动规划的常规处置规划系统不能产生满足所要求的质量的IMRT计划。通过利用这样的帕累托导航器工具延伸处置规划系统使得对临床IMRT规划过程的实时交互和鲁棒的质量控制变得可能。

[0077] 本领域技术人员通过研究附图、公开内容以及权利要求,在实践请求保护的发明时能够理解并实现对所公开的实施例的其他变型。

[0078] 在权利要求中,“包括”一词不排除其他元件或步骤,并且词语“一”或“一个”不排除多个。

[0079] 单个单元或设备可以实现在权利要求中记载的若干项的功能。尽管某些措施被记载在互不相同的从属权利要求中,但是这并不指示不能有利地使用这些措施的组合。

[0080] 如确定帕累托前沿的凸包分段线性近似、确定对帕累托前沿进行采样的处置计划的集合、确定N+1个处置计划的集合、确定N个锚定处置计划、确定一个额外的平衡处置计划等的由一个或多个单元或设备执行的确定能够由任何其他数量的单元或设备来执行。例如,对帕累托前沿的凸包分段线性近似的确定能够由单个单元或任何其他数量的不同单元来执行。根据上文所描述的辐射治疗规划方法对辐射治疗规划系统的控制能够被实施为计算机程序的程序代码单元和/或被实施为专用硬件。

[0081] 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或作为其他硬件的部分供应的光学存储介质或固态介质,但是也可以被以其他形式分布,例如经由互联网或其他有线或无线的电信系统。

[0082] 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。

[0083] 本发明涉及一种用于确定对应于积分通量分布概况的解的辐射治疗规划系统。本发明提出使用帕累托前沿导航器来从各种自动规划解的集合中选择最佳计划。向规划者提供交互式图形用户接口以在自动规划解的凸组合之中进行导航。所提出的帕累托计划导航能够被认为是另外的任选的细化过程,其能够在自动生成的解未完全满足规划者的要求的情况下进行应用以找到最佳计划。导航工具局部地移动通过自动生成的计划的集合,并且能够潜在地简化规划者的决策制定过程并将对复杂临床案例的总的规划时间从若干小时减小到若干分钟。

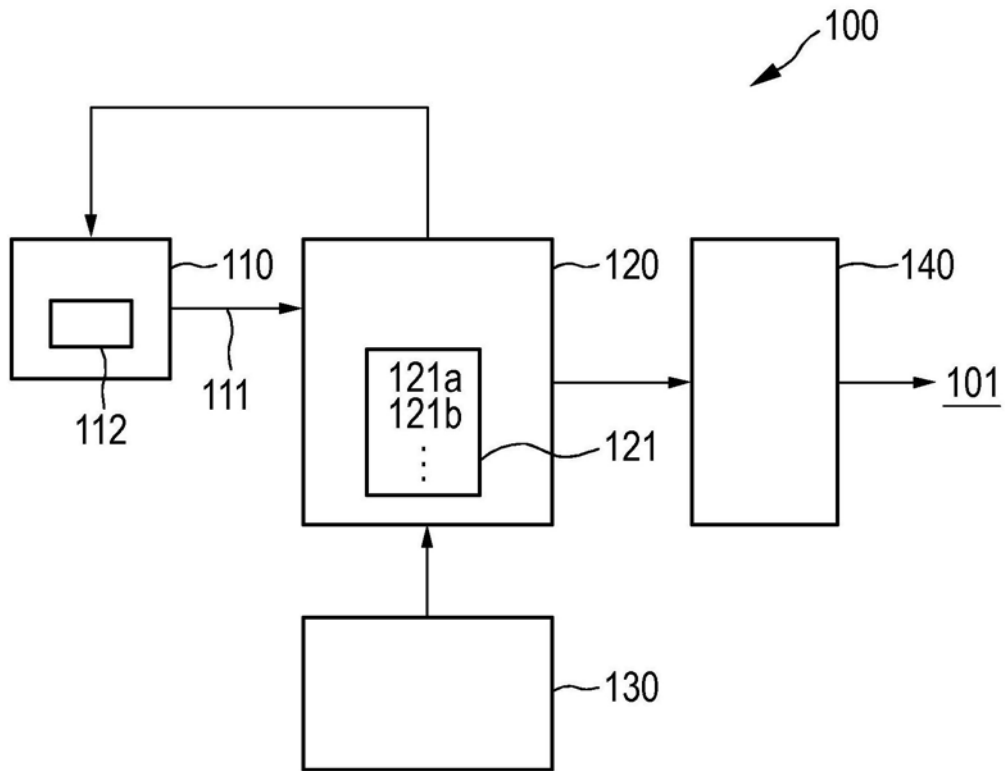


图1

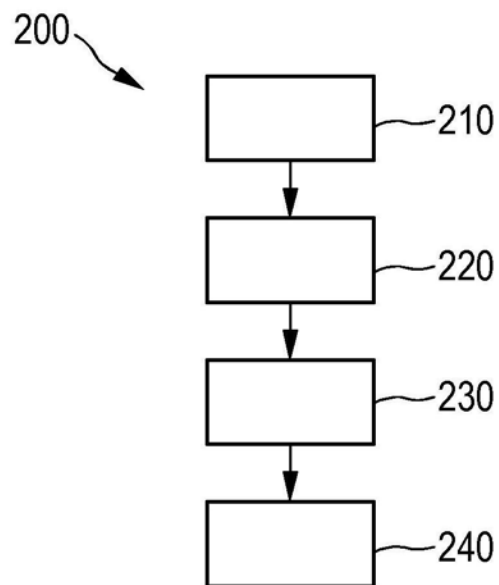


图2

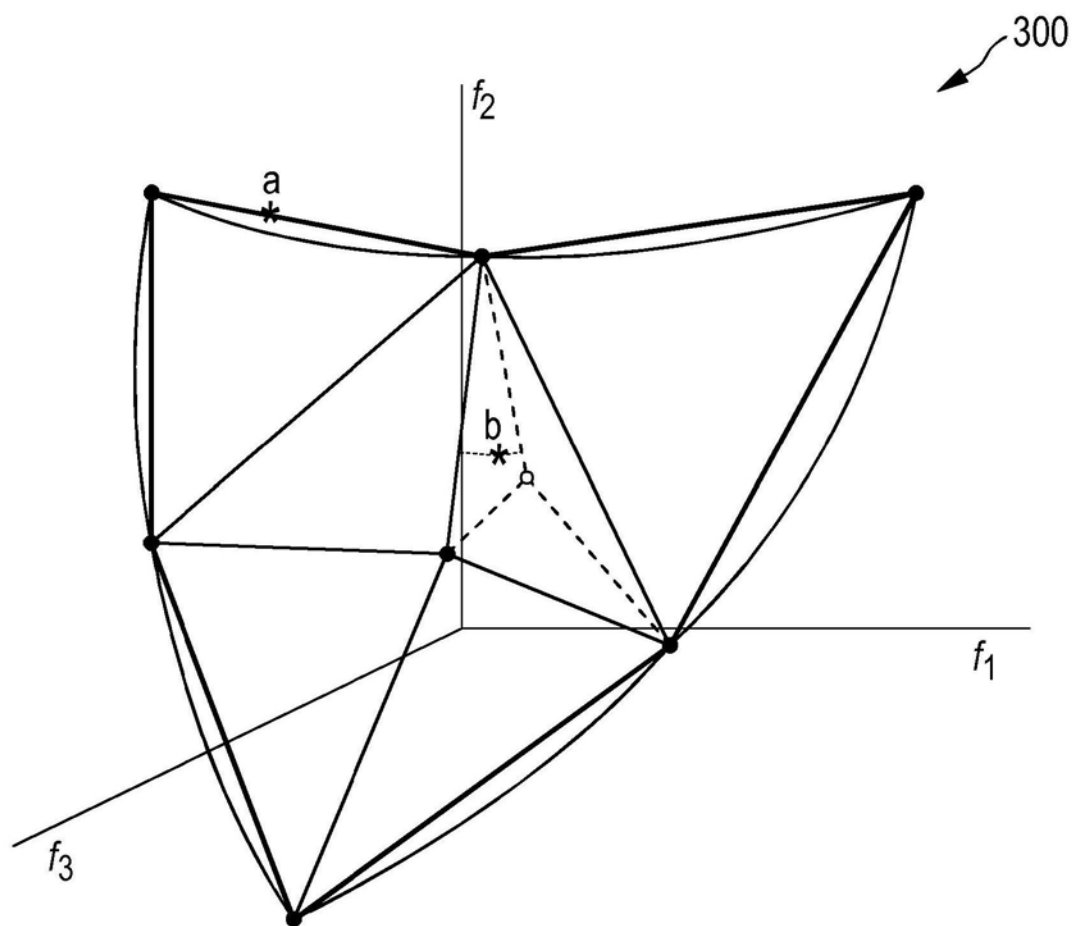


图3

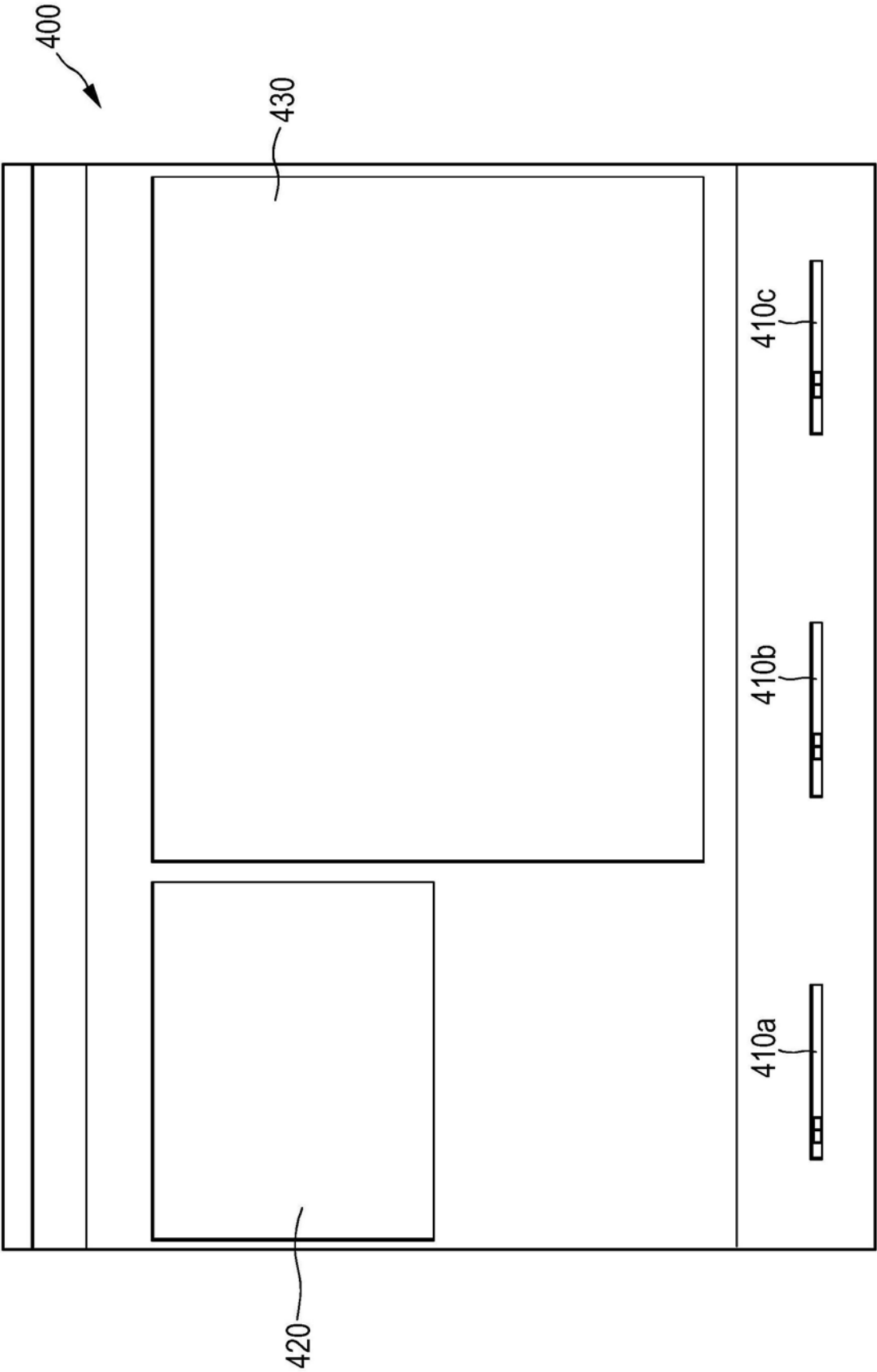


图4

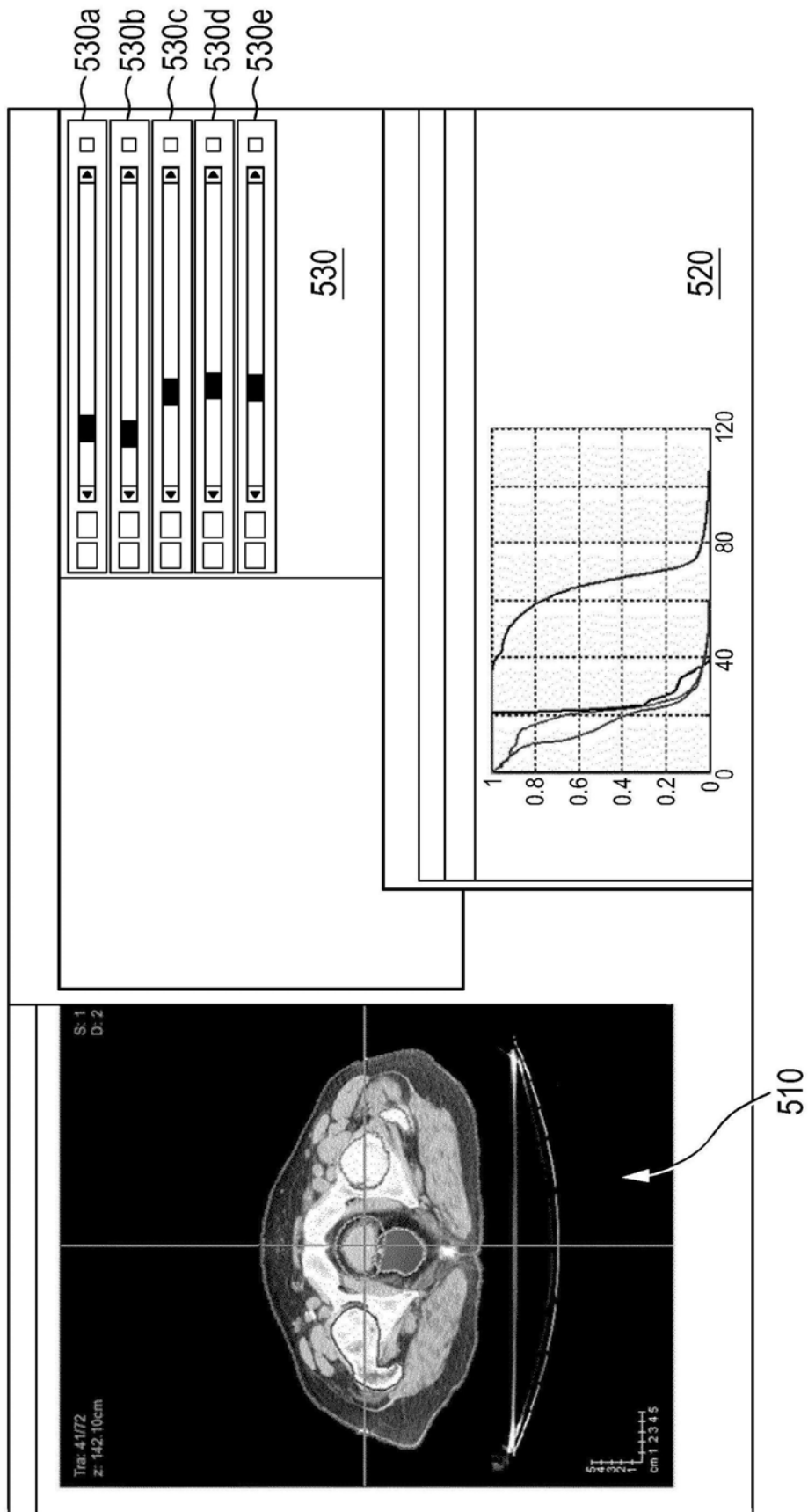


图5

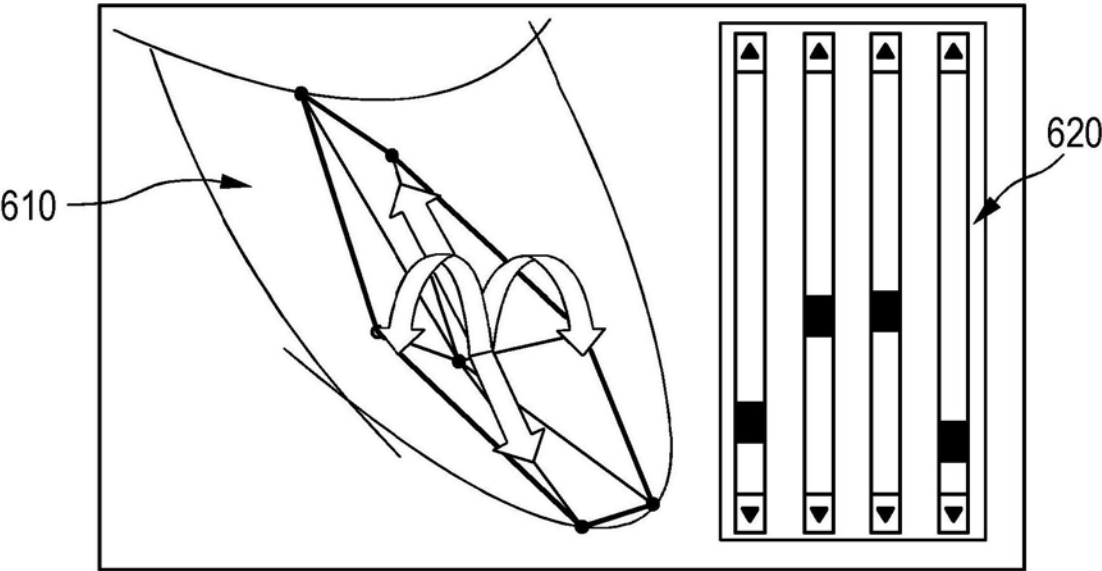


图6