



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106470595 A

(43)申请公布日 2017.03.01

(21)申请号 201580035993.9

G·戈尔纳里 A·J·萨贝利

(22)申请日 2015.06.26

(74)专利代理机构 北京市金杜律师事务所
11256

(30)优先权数据

代理人 李辉 潘聪

14/321,318 2014.07.01 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

(51)Int.Cl.

2016.12.30

A61B 5/00(2006.01)

A61B 1/24(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

A61C 19/04(2006.01)

PCT/US2015/037868 2015.06.26

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/003787 EN 2016.01.07

(71)申请人 3M创新有限公司

地址 美国明尼苏达州

(72)发明人 G·索玛桑达拉姆

E·J·里布尼克 R·西瓦零甘

A·艾德 T·M·迈耶

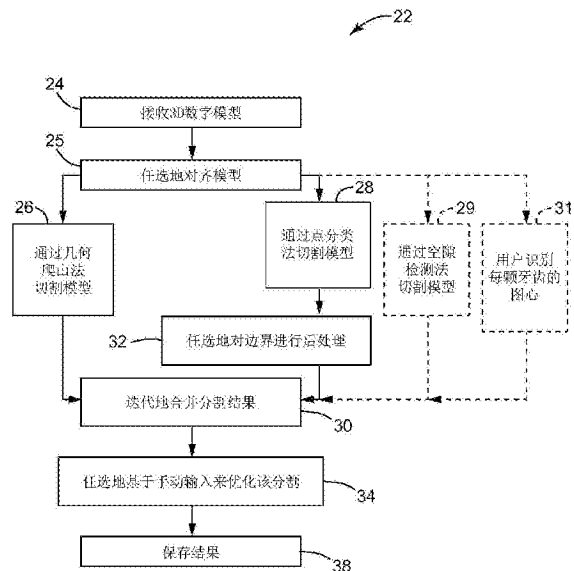
权利要求书4页 说明书13页 附图9页

(54)发明名称

利用口内3D扫描图检测牙齿磨损

(57)摘要

本发明提供了一种使用在不同时间取得的数字3D牙齿模型来检测牙齿磨损的方法。对数字3D牙齿模型进行分割以识别数字3D模型内的各颗牙齿。分割包括执行第一分割方法和第二分割方法，第一分割方法将模型内的牙齿中的至少一些牙齿过分割，第二分割方法将模型内的点分类为在牙齿的内部上或在牙齿之间的边界上。合并第一分割方法和第二分割方法的结果以生成经分割的数字3D模型。将经分割的数字3D牙齿模型进行比较，以通过确定经分割的模型之间的差异来检测牙齿磨损，其中差异与相同的牙齿相关，以检测随时间推移的牙齿的磨损。



1. 一种用于检测牙齿磨损的方法,包括以下步骤:

接收第一数字3D牙齿模型和第二数字3D牙齿模型,其中所述第一数字3D模型在第一时间取得,并且所述第二数字3D模型在晚于所述第一时间的第二时间取得;

分割所述第一数字3D牙齿模型,以将所述第一数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第一数字3D牙齿模型;

针对所述第二数字3D牙齿模型重复所述分割步骤,以将所述第二数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第二数字3D牙齿模型;以及

将所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型进行比较,以通过确定所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型之间的差异来检测牙齿磨损,其中所述差异与相同的牙齿相关。

2. 根据权利要求1所述的方法,还包括将所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的牙齿与所述经分割的第二数字3D牙齿模型中的所述牙齿配准,以将所述牙齿的第一经分割的模型与所述牙齿的第二经分割的模型对齐。

3. 一种用于检测牙齿磨损的方法,包括以下步骤:

接收第一数字3D牙齿模型和第二数字3D牙齿模型,其中所述第一数字3D模型在第一时间取得,并且所述第二数字3D模型在晚于所述第一时间的第二时间取得;

分割所述第一数字3D牙齿模型,以将所述第一数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第一数字3D牙齿模型,包括:

针对所述第一数字3D牙齿模型执行第一分割方法;以及

针对所述第一数字3D牙齿模型执行不同于所述第一分割方法的第二分割方法;

针对所述第二数字3D牙齿模型重复所述分割步骤,以将所述第二数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第二数字3D牙齿模型;以及

将所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型进行比较,以通过确定所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型之间的差异来检测牙齿磨损,其中所述差异与相同的牙齿相关。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中所述分割步骤包括:

执行所述第一分割方法,所述第一分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的牙齿中的至少一些牙齿过分割;

执行所述第二分割方法,所述第二分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的点分类为在牙齿的内部上或在所述第一数字3D牙齿模型中的牙齿之间的边界上;以及

合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果,以生成所述经分割的第一数字3D牙齿模型。

5. 根据权利要求3所述的方法,其中所述分割步骤包括:

执行所述第一分割方法,所述第一分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的牙齿中的至少一些牙齿过分割;

执行所述第二分割方法,所述第二分割方法估算所述第一数字3D牙齿模型内的每对牙齿之间的空隙间隔;以及

合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果,以生成所述经分割的第一数字3D牙齿模型。

6. 根据权利要求3所述的方法,其中所述分割步骤包括:

执行所述第一分割方法,所述第一分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的牙齿中的至少一些牙齿过分割;

执行所述第二分割方法,所述第二分割方法接收用户输入的所述第一数字3D牙齿模型中的牙齿图心的估计值;以及

合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果,以生成所述经分割的第一数字3D牙齿模型。

7. 根据权利要求3所述的方法,还包括将所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的牙齿与所述经分割的第二数字3D牙齿模型中的所述牙齿配准,以将所述牙齿的第一经分割的模型与所述牙齿的第二经分割的模型对齐。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中所述比较步骤包括确定所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的所述牙齿与所述经分割的第二数字3D牙齿模型中的所述牙齿之间的距离的测量值。

9. 根据权利要求4所述的方法,其中所述合并步骤包括迭代地合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果。

10. 根据权利要求3所述的方法,其中所述合并步骤还包括检测所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的未对齐的边界并且移除所述未对齐的边界。

11. 根据权利要求3所述的方法,其中所述分割步骤还包括基于用户输入来优化所述经分割的第一数字3D牙齿模型。

12. 根据权利要求3所述的方法,其中所述比较步骤包括显示具有磨损区域的可视指示的所述牙齿中的一颗或多颗牙齿的数字3D模型。

13. 一种用于检测牙齿磨损的系统,包括:

用于接收第一数字3D牙齿模型和第二数字3D牙齿模型的模块,其中所述第一数字3D模型在第一时间取得,并且所述第二数字3D模型在晚于所述第一时间的第二时间取得;

用于分割所述第一数字3D牙齿模型的模块,以将所述第一数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第一数字3D牙齿模型;

用于针对所述第二数字3D牙齿模型重复所述分割的模块,以将所述第二数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第二数字3D牙齿模型;以及

用于将所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型进行比较的模块,以通过确定所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型之间的差异来检测牙齿磨损,其中所述差异与相同的牙齿相关。

14. 根据权利要求13所述的系统,还包括用于将所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的牙齿与所述经分割的第二数字3D牙齿模型中的所述牙齿配准的模块,以将所述牙齿的第一经分割的模型与所述牙齿的第二经分割的模型对齐。

15. 一种用于检测牙齿磨损的系统,包括:

用于接收第一数字3D牙齿模型和第二数字3D牙齿模型的模块,其中所述第一数字3D模型在第一时间取得,并且所述第二数字3D模型在晚于所述第一时间的第二时间取得;

用于分割所述第一数字3D牙齿模型的模块,以将所述第一数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第一数字3D牙齿模型,包括:

用于针对所述第一数字3D牙齿模型执行第一分割方法的模块;和

用于针对所述第一数字3D牙齿模型执行不同于所述第一分割方法的第二分割方法的模块;

用于针对所述第二数字3D牙齿模型重复所述分割的模块,以将所述第二数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开并生成经分割的第二数字3D牙齿模型;以及

用于将所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型进行比较的模块,以通过确定所述经分割的第一数字3D牙齿模型与所述经分割的第二数字3D牙齿模型之间的差异来检测牙齿磨损,其中所述差异与相同的牙齿相关。

16. 根据权利要求15所述的系统,其中所述分割模块包括:

用于执行所述第一分割方法的模块,所述第一分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的牙齿中的至少一些牙齿过分割;

用于执行所述第二分割方法的模块,所述第二分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的点分类为在牙齿的内部上或在所述第一数字3D牙齿模型中的牙齿之间的边界上;以及

用于合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果以生成所述经分割的第一数字3D牙齿模型的模块。

17. 根据权利要求15所述的系统,其中所述分割模块包括:

用于执行所述第一分割方法的模块,所述第一分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的牙齿中的至少一些牙齿过分割;

用于执行所述第二分割方法的模块,所述第二分割方法估算所述第一数字3D牙齿模型内的每对牙齿之间的空隙间隔;和

用于合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果以生成所述经分割的第一数字3D牙齿模型的模块。

18. 根据权利要求15所述的系统,其中所述分割模块包括:

用于执行所述第一分割方法的模块,所述第一分割方法将所述第一数字3D牙齿模型内的牙齿中的至少一些牙齿过分割;

用于执行所述第二分割方法的模块,所述第二分割方法接收用户输入的所述第一数字3D牙齿模型中的牙齿图心的估计值;以及

用于合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果以生成所述经分割的第一数字3D牙齿模型的模块。

19. 根据权利要求15所述的系统,还包括用于将所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的牙齿与所述经分割的第二数字3D牙齿模型中的所述牙齿配准的模块,以将所述牙齿的第一经分割的模型与所述牙齿的第二经分割的模型对齐。

20. 根据权利要求19所述的系统,其中所述比较模块包括用于确定所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的所述牙齿与所述经分割的第二数字3D牙齿模型中的所述牙齿之间的距离的测量值的模块。

21. 根据权利要求16所述的系统,其中所述合并模块包括用于迭代地合并所述第一分割方法和所述第二分割方法的结果的模块。

22. 根据权利要求15所述的系统,其中所述合并模块还包括用于检测所述经分割的第一数字3D牙齿模型中的未对齐的边界并且移除所述未对齐的边界的模块。

23. 根据权利要求15所述的系统,其中所述分割模块还包括用于基于用户输入来优化所述经分割的第一数字3D牙齿模型的模块。

24. 根据权利要求15所述的系统,其中所述比较模块包括用于显示具有磨损区域的可视指示的所述牙齿中的一颗或多颗牙齿的数字3D模型的模块。

利用口内3D扫描图检测牙齿磨损

背景技术

[0001] 牙齿磨损(例如,与磨牙症相关联的牙齿磨损)和牙龈萎缩是(多种缺陷中的)两种病症,如果不经过牙科专业人员及时治疗,可能会造成严重的医疗后果。就磨牙症而言,横向移动和磨牙可致使牙齿显著磨损,并且导致肌肉疼痛、颞下颌关节问题和头痛。在一些情况下,这可能导致牙质暴露、蛀牙,甚至是牙齿折断。

[0002] 尽管这些潜在后果很严重,但是牙科专业人员可用于诊断和评估牙齿磨损和牙龈萎缩的严重程度的工具却十分有限。就牙齿磨损而言,这些工具包括患者调查问卷、牙医临床检查以及咬合力测量。临床检查可利用个体牙齿磨损指数来进行,牙医根据目视评估可提供介于0和3之间的评分。然而,这些方法中没有一种能直接测量所表现出的牙齿磨损量,大多数都是通过主观定性来完成的。所有这一切都说明,存在对可用于评估这些病症的更具定量性、可重复性指标的需要。

发明内容

[0003] 符合本发明的用于检测牙齿磨损的第一方法包括:接收第一数字3D牙齿模型和第二数字3D牙齿模型,其中所述数字3D牙齿模型在不同的时间取得。将第一数字3D牙齿模型进行分割,以将第一数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开,并且针对第二数字3D牙齿模型重复该分割步骤以生成经分割的第二数字3D牙齿模型。将经分割的第一数字3D牙齿模型与经分割的第二数字3D牙齿模型进行比较,以通过确定经分割的第一数字3D牙齿模型与经分割的第二数字3D牙齿模型之间的差异来检测牙齿磨损,其中这些差异与相同的牙齿相关。

[0004] 符合本发明的用于检测牙齿磨损的第二方法包括:接收第一数字3D牙齿模型和第二数字3D牙齿模型,其中所述数字3D牙齿模型在不同的时间取得。将第一数字3D牙齿模型进行分割,以将第一数字3D牙齿模型内的各颗牙齿分开,这包括:针对第一数字3D牙齿模型执行第一分割方法,并且针对第一数字3D牙齿模型执行不同于第一分割方法的第二分割方法。针对第二数字3D牙齿模型重复该分割步骤以生成经分割的第二数字3D牙齿模型。将经分割的第一数字3D牙齿模型与经分割的第二数字3D牙齿模型进行比较,以通过确定经分割的第一数字3D牙齿模型与经分割的第二数字3D牙齿模型之间的差异来检测牙齿磨损,其中这些差异与相同的牙齿相关。

附图说明

[0005] 附图并入本说明书并构成本说明书的一部分,它们连同具体实施方式阐明本发明的优点和原理。在附图中,

[0006] 图1是使用基于口内3D扫描图或3D印象扫描图的数字3D模型来检测牙齿磨损的系统的示意图;

[0007] 图2示出了来自口内扫描图的3D牙齿模型;

[0008] 图3示出了经分割以通过数字方式分开各颗牙齿的3D牙齿模型;

[0009] 图4是用于分割数字3D模型中的牙齿的方法的流程图;

- [0010] 图5示出了通过几何爬山法对牙齿进行的过分割过程；
- [0011] 图6示出了数字3D模型中的牙齿之间的边界顶点的检测过程；
- [0012] 图7A和图7B示出了固定数字3D模型中的牙齿之间的边界的形态学清理过程；
- [0013] 图8A和图8B示出了数字3D模型中的未对齐边界的移除；
- [0014] 图9A至图9H示出了将两种不同分割方法的结果进行合并以分割数字3D模型中的牙齿的过程；
- [0015] 图10是使用口内3D模型检测和显示牙齿磨损的方法的流程图；
- [0016] 图11是牙齿的热图,该热图表示第一时间与第二时间之间的位移；
- [0017] 图12示出了数字3D牙齿模型上的初始磨损区域的检测过程；
- [0018] 图13A至图13C示出了对数字3D牙齿模型上的磨损区域进行的形态学操作；并且
- [0019] 图14是用于示出牙齿磨损的用户界面的示意图。

具体实施方式

[0020] 在牙科领域中,数字3D模型的使用越来越普遍。这些模型可以在活体内使用口内扫描仪获得,或通过传统激光印象扫描图离线获得。数字3D模型可用于各种临床工作,包括治疗规划、牙冠与植入物的制备、以及诊断辅助工具,例如用以评估牙齿磨损程度。

[0021] 图1是使用基于口内3D扫描图的数字3D模型来检测牙齿磨损的系统10的示意图。系统10包括处理器20,该处理器从口内3D牙齿扫描图或牙齿印象扫描图接收牙齿12的数字3D模型。系统10还可包括电子显示设备16,诸如液晶显示器(LCD)设备,以用于显示牙齿磨损的指示;和输入设备18以用于接收用户命令或其它信息。来自扫描图的患者牙齿的数字3D模型的示例在图2中示出。基于来自多个视角的图像集来生成数字3D图像或模型的系统公开于美国专利7,956,862和7,605,817中,这两篇专利以引用方式并入本文,如同被完整陈述。这些系统可使用口内扫描仪来从牙齿或其它口内结构的多个视角获得数字图像,并且这些数字图像被处理以生成表示所扫描的牙齿的数字3D模型。系统10可以用例如台式电脑、笔记本电脑或平板电脑来实现。系统10可通过网络从本地或从远程接收3D扫描图。

[0022] 对于某些诊断工作,在可执行所需分析或操纵之前,需要将模型中的各颗牙齿彼此分割。在一些情况下,可提供软件界面以使用户执行该分割或手动执行部分分割。然而,该过程可能相当耗时耗力。因此,理想的是使该任务自动化。图3示出了数字模型中已分割的牙齿的示例。该分割将数字3D模型中的各颗牙齿分开,如图3的阴影所示,并且该模型中的每颗牙齿可通过数字方式基本上彼此分开,以进行进一步处理,从而检测牙齿磨损。与比较模型内的整个或部分牙弓相比,使用经分割的数字3D模型来比较或分析各颗牙齿更为准确。

[0023] 本文描述了用于数字3D模型内的牙齿分割的技术。该技术是两种独立算法的组合,并且组合了这两种算法的优势。第一算法是几何爬山法,该算法考虑了诸如高度和曲率的拓扑结构。第二算法是机器学习法,该算法将表面上的每个点分类为边界点或非边界点。另选地,第二算法是空隙检测法,该算法将邻近牙齿之间的空隙间隔的一组平面(或点)进行分类。第二算法可以与第一算法(几何爬山法)互补,并且与第一算法合并以产生所得分割。作为第二算法的另一替代方式,第一算法可以与估计数字3D模型中的牙齿图心的用户输入合并。可仅使用一种算法(例如,本文所述算法中的任一种)来分割数字3D模型,而不是

合并两种算法的结果。

[0024] 本文所介绍的3D扫描图用三角形网格表示。三角形网格是3D表面的常见表示方式,并具有两个分量。第一分量称作网格的顶点,只是表面(即,点云)上已重新构建的3D点的坐标。第二分量(即网格面)对物体上的点之间的关联进行编码,并且是一种在连续表面上的离散样品点之间进行插值的有效方式。每个面是由三个顶点限定的三角形,从而得到可以由一组小三角形平面贴片表示的表面。

[0025] 图4是用于分割数字3D模型中的牙齿的方法22的流程图。方法22可以在软件或固件模块中实现,例如由处理器20执行。方法22可以另选地在硬件模块或软件与硬件的组合中实现。

[0026] 方法22包括接收患者牙齿的数字3D模型(步骤24)并且任选地对齐该模型(步骤25)。然后,方法22涉及通过几何爬山法(步骤26)与点分类法(步骤28)对模型进行分割。任选地,对通过点分类法进行分割的边界进行后处理(步骤32)。作为点分类法的一种替代方式,可通过空隙检测法来分割该模型(步骤29)。作为点分类法的另一替代方式,方法22可接收识别模型中的每颗牙齿的图心的用户输入(步骤31)。

[0027] 分割方法的结果迭代地进行合并(步骤30)。具体地讲,将通过爬山法进行分割的结果与通过点分类法或空隙检测法或识别图心的用户输入进行分割的结果合并。合并后的分割结果可任选地基于手动输入(例如,用户输入)进行优化(步骤34)。保存分割结果(步骤38)。该分割过程得到数字3D模型中的每颗牙齿各自的网格,如图3所示。这些步骤更详细地描述于下文中。

[0028] 任选的对齐步骤25可使用支持向量回归(SVR)法来实现,以查找与数字3D模型中的牙齿的网格相匹配的咬合面。该对齐可用于使数字3D模型中的牙齿与Y轴基本上对齐。

[0029] 该对齐可使用LIBSVM工具箱以及 ϵ -SVR方法。选择的核函数为线性核函数,并且 $\epsilon=5$ 。训练基于以下假设:牙齿沿着Y轴大致朝上。输出是来自咬合面的样品点,该咬合面用于简单的主分量分析(PCA)法以找到法向方向。SVR使用线性损失函数,其中界限内具有零部分,对于牙齿数据集而言,线性损失函数比常规最小二乘回归法中的二次损失函数表现更好。线性损失函数有助于减少齿龈截止线的影响,齿龈截止线在网格扫描图中可能非常参差不齐以及高低不平。在确定咬合面取向时,线性损失函数还尝试划去牙齿(颊部)上的垂直点,并且更注重牙齿(牙尖部)上的水平点。另选地可以将RANSAC法和鲁棒PCA法用于对齐。

[0030] 表1提供了用于实现对齐步骤的示例性伪代码。

| 表 1—用于法向提取的伪代码 | |
|--|--|
| 输入: 具有一组顶点 V 的 3D 网格, 这些顶点通过 3D 坐标系 X、Y 和 Z 进行指定。Y 表示纵轴的大致方向, 在该方向上, 牙齿朝上。 | |
| 输出: 垂直于咬合面的法向量, 表示牙齿的正确朝上方向。 | |
| 假设: 牙齿沿着 Y 轴大致朝上。网格已从牙龈线下被截断。 | |
| 方法步骤: | |
| 1 | 减去数据点的均值以将数据点集中到(0,0,0)周围。 |
| 2 | 采用具有线性核函数和边缘值 ϵ 的支持向量回归法以找到咬合面。 |
| 3 | 通过几何法或应用简单 PCA 法来找到咬合面的法向方向。 |

[0032] 通过几何爬山法进行分割

[0033] 分割算法中的一种算法基于对网格的几何操作。具体地讲,该方法的主要思想是,如果从表面上的任一点开始并且向上移动经过一系列点,将会聚至高点,该高点为局部最大值。在大多数情况下,可以预期,一颗牙齿(或一颗牙齿的同一牙尖)上的所有点将会聚至相同的局部最大值。此类分割可以在牙齿之间形成非常精确的边界,但是通常导致过分割,其中单颗牙齿可能被分为多个节段。

[0034] 在进行切割之前,使用拉普拉斯平滑法对网格进行预处理。该预处理可有效移除表面重建中的高频噪声。

[0035] 然后针对网格上的每个顶点计算能量函数,根据该函数,该算法将尝试稍后在爬山过程中找到局部最大值。每个顶点处的能量函数由两项组成,其中对于第*i*个顶点:

$$[0036] \quad f_i = y_i + \lambda d_i$$

[0037] 其中 y_i 是第*i*个顶点的 y 坐标(高度), d_i 是其角散度,并且

[0038] $\lambda > 0$ 是加权参数。参数 λ 可以是大于零的任何值,另选地, λ 可等于零。

[0039] 角散度是围绕点的总体曲率的量度。对于由顶点 v_i 、 v_j 和 v_k 构成并且分别具有法向量 n_i 、 n_j 和 n_k 的面 F ,角散度为:

$$[0040] \quad D_F = |\cos^{-1}(n_i^T n_j)| + |\cos^{-1}(n_i^T n_k)| + |\cos^{-1}(n_j^T n_k)|$$

[0041] 如果围绕面的区域是完全平整的,则其所有三个顶点的所有三个法向量将指向同一方向,并且 D_F 将为零。然后第*i*个顶点 v_i 的角散度是 v_i 作为其一部分的面的角散度的平均值。

[0042] 一旦计算出每个顶点的能量函数 f_i ,根据爬山流程进行分割。从概念上讲,该算法可如下进行理解:对于表面上的每个顶点,该算法对爬山进行初始化,其中每次迭代时该算法移动到具有最高能量函数值的相连邻点(由面限定)。该算法继续攀爬直至达到局部最大值,该局部最大值的能量高于其所有邻点的能量。沿着该路线经过的所有顶点归属于该局部最大值,并且会聚至该局部最大值的所有此类路径限定节段。重复这一过程直到已经遍历网格上的所有顶点。

[0043] 该分割将顶点分配到由局部能量最大值限定的节段,能量函数通过单调递增路径可达到局部能量最大值。能量函数 f_i 被限定为使得每次爬山迭代在高度上向上移动,但是由于角散度项而无法跨过高曲率区域。这有助于确保没有跨过牙齿之间的边界。

[0044] 图5示出了通过该算法产生的分割示例。如图中可见,该算法通过将一颗牙齿的每个牙尖分成其自己的节段来过分割牙齿,这一点可以直观地理解为爬山流程的结果,这是因为每个牙尖将具有其自己的唯一的局部最大值。例如,将牙齿40的数字模型分割为五个节段。然而,由该方法产生的边界是相当精确的,并且准确地将牙齿彼此分开。

[0045] 表2提供了用于实现几何爬山算法的示例性伪代码。

表2—爬山式分割伪代码

| | |
|--------|--|
| [0046] | <p>输入: 具有一组顶点 V 的 3D 网格, 这些顶点通过 3D 坐标系 X、Y 和 Z 进行指定。Y 表示纵轴或牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角形划分或面 F。</p> <p>输出: 经分割的网格, 其中网格中的每个顶点 v_i 均分配了标记 l_i, 该标记对应于顶点所属的节段。</p> <p>假设: 牙齿沿着 Y 轴大致朝上。网格已从牙龈线下被截断。</p> <p>方法步骤:</p> |
|--------|--|

| | | |
|--------|---|--|
| [0047] | 1 | 执行拉普拉斯网格平滑法以减小误差 |
| | 2 | 对于 V 中的每个顶点 v_i ，计算此顶点处的表面法向量 |
| | 3 | 对于 F 中的每个面 f_i ，计算该面的误差： $D_f = \cos^{-1}(n_i^T n_j) + \cos^{-1}(n_i^T n_k) + \cos^{-1}(n_j^T n_k) $ ，其中 n_i 、 n_j 和 n_k 是该面的顶点 i、j 和 k 的法向方向 |
| | 4 | 将每个面的误差值应用于该面的所有单独顶点 |
| | 5 | 计算每个顶点处的能量函数值： $y + \lambda * D_f$ |
| | 6 | 针对每个顶点，确定局部邻区中的最大函数值 |
| | 7 | 将所有顶点分配到步骤 6 中归属于局部最大值的节段 |
| | 8 | 重复步骤 6 至 7 直至达到局部最大值 |
| | 9 | 将合适的集群标记分配给每个顶点 |

[0048] 通过点分类法进行分割

[0049] 通过点分类法进行分割是数据驱动方法。不同于几何爬山法，该方法依赖于手动提供的真实数据分割。真实数据可从用户获得，用户提供手动使用诸如 MeshLab 系统等网格操纵工具而进行的几近精确的分割。可使用面选择工具对各颗牙齿进行选择。各颗牙齿以这种方式进行选择并且保存为单独的网格文件。使用原始网格与各个牙齿文件，可推测出原始网格中顶点的标记。一旦完成真实数据的全扫描，可将所有节段的推测出的标记可视化。

[0050] 通过该真实数据标记，可确定节段之间的边界顶点。对于每个顶点，检查围绕该顶点的顶点标记的分布。如果分布是单峰分布（即，大多数顶点标记相同），则将该顶点视为内部顶点。如果不是，将该顶点视为边界顶点。可将该数据例如作为训练数据一次性手动输入，然后反复用于点分类算法。

[0051] 考虑到真实数据边界顶点标记来自多个训练网格，该算法提供了能够预测网格上的顶点是位于牙齿内部还是牙齿之间的边界上的函数。具体地讲，该算法可将网格中的点进行分或标记为牙齿上的点或牙齿之间的边界上的点。该过程涉及两项任务：特征提取和分类。图6示出了数字3D模型中的牙齿之间的边界顶点42的检测。

[0052] 表3提供了用于实现点分类（机器学习）训练数据算法的示例性伪代码。

| | |
|--------|---|
| [0053] | 表 3—机器学习训练伪代码 |
| | 输入：具有一组顶点 V 的多个 3D 网格，这些顶点通过 3D 坐标系 X、Y 和 Z 进行指 |

定。Y 表示纵轴或牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角形划分或面 F。以及与边界对应和与手动标注所示的内部顶点相对应的顶点形式的真实数据分割过程。

输出：预测模型，该模型能够为一组查询顶点生成边界顶点预测标记。

假设：牙齿沿着 Y 轴大致朝上。网格已从牙龈线下被截断。

方法步骤：

| | |
|--------|---|
| [0054] | <ol style="list-style-type: none"> 1 针对训练数据集中的每个网格中的每个顶点，计算以下特征： <ol style="list-style-type: none"> a. 法向方向 b. 绝对曲率、平均曲率和高斯曲率 c. 形状上下文 d. 网格傅里叶 e. 旋转图像 f. 网格局部协方差 2 构建数据矩阵 X，该矩阵为 M X N，其中 M 为所有网格中的顶点的总数，并且当步骤 1 中的所有特征值连结起来时，N 为特征尺寸的总数 3 训练 RUSBoosted 决策树分类器，该分类器可预测与顶点是否位于边界上相对应的标记。（可使用另选分类器。） |
|--------|---|

[0055] 特征提取

[0056] 为了执行该任务，点分类算法提取网格中的每个顶点的许多性能特征。通常很难确定哪种特征可用于分割算法。存在许多可用于该构架下的分割的特征，包括但不限于多尺度表面曲率、从局部形状 PCA 中提取的奇值、形状直径、距内侧表面点的距离、平均测地距离、形状上下文和旋转图像。其中，该算法实现以下特征：绝对曲率和平均曲率、顶点处的法向方向、围绕该顶点的网格的局部曲率及其主要本征值、旋转图像、傅里叶特征、形状上下文和 PCA 特征。

[0057] 分类

[0058] 考虑到顶点 X 的特征集，函数 f 定义如下： $f: X \rightarrow \{1, 0\}$ ，即函数 f 将特征集 X 映射为 1 或 0。值 1 表示顶点为边界顶点，并且值 0 表示顶点不是边界顶点。该函数可以是许多分类方法中的一种或组合，诸如支持向量机、决策树、条件随机域等。另外，作为分割中的分类问题，存在类别失衡。内部顶点的数目远远大于边界顶点的数目。内部顶点与边界顶点的比率通常为 100:1。在此类极端的类别失衡情形下，常规分类器并非最佳分类器。这是因为，可通过始终预测顶点在内部而获得非常高的精度，但这一点实际上没有用，因为没有顶点会被分类为边界上的顶点。为了解决这一问题，一种选择涉及使用分类器集成，诸如 boosting 集成。

[0059] 分类算法使用决策树上的 RUSBoosting 作为分类器。RUSBoost 表示随机欠采样 boosting (random undersampling boosting)，并且已知可很好地解决类别失衡。另外，RUSBoost 已经在 MATLAB 程序“fitensemble”函数中实现。基于初步分析，RUSBoost 在 700 个决策树上执行。该数目通过对训练集进行交叉验证来选择，其中再代入损失作为指标。在我们的实验中，我们使用“不考虑扫描图”的交叉验证方案。我们的数据集由 39 张扫描图组成，并且对于每次测试扫描，其余的 38 张扫描图用于进行训练。将所得的预测结果与测试扫描图的真实数据边界标记进行比较。通过比较真实数据标记与预测标记则可获得混淆矩阵。据此我们可获得误警率和命中率。通过对 39 张扫描图进行交叉验证测试，我们获得 80% 的命中率和 1.7% 的平均误警率。

[0060] 表4提供了用于实现点分类(机器学习)算法的示例性伪代码。

| 表 4—机器学习预测伪代码 | |
|--|---|
| 输入: 具有一组顶点 V 的 3D 网格, 这些顶点通过 3D 坐标系 X 、 Y 和 Z 进行指定。 Y 表示纵轴或牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角形划分或面 F 。 输出: 二值化网格, 其中针对网格中的每个顶点 v_i , 标记 l_i 对应于顶点是否属于边界。 假设: 牙齿沿着 Y 轴大致朝上。网格已从牙龈线下被截断。 方法步骤: | |
| [0061] | 1 针对 V 中的每个顶点 v_i , 计算以下特征: <ol style="list-style-type: none"> 法向方向 绝对曲率、平均曲率和高斯曲率 形状上下文 网格傅里叶 旋转图像 网格局部协方差 |
| | 2 构建数据矩阵 X , 该矩阵为 $M \times N$, 其中 M 为网格中的顶点的数目, 并且当步骤 1 中的所有特征值连结起来时, N 为特征尺寸的总数 |
| | 3 使用所学习的决策树 RUSBoost 分类器对标记进行预测, 这些标记对应于顶点是否位于边界上 |

[0062] 通过空隙检测法进行分割

[0063] 作为点分类法的一种替代方式, 第二分割算法可使用空隙检测法(方法22的步骤 29)。表5提供了用于实现空隙检测算法的示例性伪代码。

| 表 5—空隙检测伪代码 | |
|---|--|
| 输入: 具有一组顶点 V 的 3D 网格, 这些顶点通过 3D 坐标系 X 、 Y 和 Z 进行指定。 Y 表示纵轴或牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角形划分或面 F 。 输出: 一组平面, 这些平面估算每对牙齿之间的空隙间隔。 假设: 牙齿沿着 Y 轴大致朝上。 方法步骤: | |
| [0064] | 1 形成网格的俯视角距离图像。即, 俯视角上的距离图像, 其中每个像素表示表面在相应点处的高度。 |
| | 2 用局部线性嵌入(LLE)算法来估计牙弓的一维参数设定值, 这可获得曲线, 该曲线表示牙弓的总体形状并且大致穿过牙齿中心。 |
| | 3 计算沿着一维参数化曲线的一组均匀间隔的样品点。 |
| | 4 对于沿着该曲线的每个样品点, 沿着与该点处的曲线垂直的线来计算距离图像中的高度之和。 |
| | 5 空隙间隔确定为样品点, 这些点是步骤 4 中计算的高度之和中的局部最小值。空隙间隔取向由对应样品点处的一维参数化曲线的法向方向决定。 |
| | 6 将所检测出的空隙间隔及其取向映射回原始网格的三维坐标。 |

[0065] 形态学清理

[0066] 诸如网格侵蚀与膨胀等形态学操作可以相继完成, 从而导致发生操作已知的形态学开运算。与图像不同, 由于没有滑动窗口, 进行网格侵蚀与膨胀并非易事。可以将每个顶点所连接的 v 环用作其邻区, 而非执行网格侵蚀。执行形态学开运算可移除岛状区和小条纹, 这些岛状区和小条纹可能会干扰后文提到的合并算法。图7A和图7B示出了用于固定数字3D模型中的牙齿之间的边界的形态学清理过程, 其中图7B示出了图7A所示的边界的清理过程。该形态学清理过程可用于通过点分类进行分割之后的方法22的任选步骤32。

[0067] 补充分割方法

[0068] 基于爬山法与分类法的结果,已发现,爬山法可获得牙尖的主要几何形状,并且往往围绕牙齿形成良好的边界,但是爬山法造成过分割,因此导致形成更多错误的边界。相反地,分类法的边界命中率在某种程度上低于所需命中率,但是其误警率非常低。鉴于该互补结果,合并这些结果的方法有助于对这两种方法进行取长补短。为了实现这一点,使用分层合并算法,该算法使用分类法的边界预测将爬山法中的多个节段合并起来。基于分类法所预测的边界顶点为爬山法所预测的每条边界进行评分。然后执行分层合并。丢弃评分小于阈值的所有边界,并且合并对应的多个节段,并相应地校正边界评分。逐渐增加该阈值。例如,最先丢弃评分小于5的所有边界。合并对应的多个节段,然后通过一步步增加阈值(例如,增加50)重复该过程。在大多数情况下,该试探在多个合并步骤的一个步骤中可提供正确的牙齿分割结果。

[0069] 消除未对齐边界

[0070] 即使在合并过程之后,仍存在一些明显错误且没有完全消除的边界,这些边界由机器学习分类器预测。这些边界可使用边界方向对齐假说来移除。由于每个连续牙齿边界大致平行,因此在连续牙齿之间的边界方向上不会发生任何明显变化。在图8A和图8B中,使用此类假说来移除未对齐边界,其中图8B示出了从图8A的模型移除边界。这可通过以下方式实现:使用PCA确定每个边界节段取向的主要方向。每颗连续牙齿边界的主要分量(PC)应当对齐,因此需要消除PC未对齐的边界。在合并爬山结果与机器学习结果之后应用该过程。

[0071] 分割结果

[0072] 图9A-9H示出了分类法或机器学习(ML)法的样品结果、爬山(HC)法的样品结果、以及合并步骤。机器学习输出(图9A)示出了边界顶点和内部顶点的网格标记。第二网格(图9B)是爬山法的结果。如图9B所示,爬山法过分割每颗牙齿,但是一般来说,降低了多个牙齿之间共享节段的几率。这也是与参数 λ 的选择相关联的特性。图9C-9H中显示的网格迭代地指出了每个合并步骤的结果。合并1对应于丢弃评分小于5的边界,并且合并2对应于丢弃评分小于10的边界等等。在此示例中,正确的分割在步骤6处实现。如图9C至图9H的示例所示,可能的是,一些连续(迭代)合并步骤之间没有变化。连续合并步骤指出了合并相邻节段的积极程度,因此在一些情况下,只在后面的合并步骤中可察觉出变化。

[0073] 用于合并的评分可以表示例如:在由爬山算法确定的特定边界附近,由点分类算法分类为边界点的数目。示例性评分5意指:分类为边界的至少5个点在由爬山算法确定的特定边界附近。所用的特定附近可基于,例如,经验证据、实际边界的常见宽度或尺寸、或其它因素。

[0074] 在一些情况下,最好的结果将在第6个合并步骤之前实现,并且可能在步骤6处得到过合并结果。在此情况下,可手动使用步骤5处的结果或尝试手动分开过合并的牙齿。有时候,甚至在步骤6之后也可能发生欠合并或过分割结果。在此场景下,通过使用光标控制设备和用户界面,用户即可手动选择(“单击”)并合并多个节段,这些节段需要进行合并以例如正确提取牙齿。然后可以将最终经分割的数字3D模型保存到电子存储设备中用于后续处理。

[0075] 表6提供了用于实现合并算法的示例性伪代码,该算法用于合并爬山分割法与点分类(机器学习)分割法。对于另选的空隙检测分割法,表7提供了用于实现合并算法的示例

性伪代码,该算法用于合并爬山分割法与空隙检测分割法。

| 表 6—用于合并爬山法与机器学习预测的伪代码 | |
|------------------------|---|
| | <p>输入: 具有一组顶点 V 的 3D 网格, 这些顶点通过 3D 坐标系 X、Y 和 Z 进行指定。Y 表示纵轴或牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角形划分或面 F。还提供以下功能: 爬山法中的标记分配以及由机器学习法预测的边界顶点标记。</p> <p>输出: 经分割的网格, 其中针对网格中的每个顶点 v_i, 均分配了标记 l_i, 该标记对应于顶点所属的节段。</p> <p>假设: 牙齿沿着 Y 轴大致朝上。网格已从牙龈线下被截断。</p> <p>方法步骤:</p> |
| [0076] | <p>1 将爬山法标记分配值转化为节段之间的边界以及多个节段的内部顶点之间的边界, 从而得到一组边界 B</p> <p>2 通过形态学侵蚀的方式消除机器学习预测过程中较小的边界预测区域。同时也消除与象限/牙弓的主要取向不对齐的边界</p> <p>3 将合并阈值初始化为 Th</p> <p>4 对于 B 中的每条边界 b_i, 通过确定该边界最近邻区中通过机器学习所预测的边界顶点的数目来计算边界评分。根据边界长度标准化该数目 (顶点总数)。</p> <p>5 消除评分小于 Th 的边界, 通过消除一些集群分配值以及复制集群分配值来正确地合并多个节段。</p> <p>6 根据步骤 4 重新计算边界评分</p> <p>7 按预定量增加 Th</p> <p>8 重复步骤 5 至 7 再五次</p> <p>9 将新集群标记分配给顶点</p> |

| 表 7—通过空隙检测法合并爬山节段的伪代码 | |
|-----------------------|---|
| [0077] | <p>输入: 具有一组顶点 V 的 3D 网格, 这些顶点通过 3D 坐标系 X、Y 和 Z 进行指定。Y 表示纵轴或牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角形划分或面 F。还提供爬山法的标签分配值以及所检测出的空隙间隔。</p> |
| [0078] | <p>输出: 经分割的网格, 其中针对网格中的每个顶点 v_i, 均分配了标记 l_i, 该标记对应于顶点所属的节段。</p> <p>假设: 牙齿沿着 Y 轴大致朝上。</p> <p>方法步骤:</p> <p>1 所检测出的每个空隙间隔可限定网格 3D 空间中的平面。对于爬山法中查找到的每个节段, 计算每个空隙平面的大多数顶点处于该空隙平面的哪一侧。这称作每个节段相对于每个空隙平面的“极性”。</p> <p>2 将相对于临近空隙平面具有相同极性的节段合并在一起。</p> |

[0079] 作为点分类与空隙检测法的另选方式, 该算法可合并爬山分割法与识别牙齿图心的用户输入(方法22的步骤31)。该分割方法需要用户在该过程开始时进行输入。具体地, 用户识别数字3D牙齿模型中的每颗牙齿的图心。例如, 当查看数字3D牙齿模型时, 诸如, 查看图2中的模型时, 在显示设备16上, 用户可使用输入设备18(诸如, 光标控制设备)来选择(“单击”)模型中的每颗牙齿的图心或以其它方式识别图心。该图心可包括实际图心或用户认为的图心的估计值。将该用户输入信息用作分割步骤的初始信息, 该分割步骤通过K均值法来合并爬山节段。为了有效执行分割过程并且不需要用户进行后处理, 这些用户识别的图心需要接近牙齿的真实图心。该方法中需要进行训练的唯一参数是SVR中的 ϵ , 以用于上述对齐过程中的法向方向提取。

[0080] 然后使用K均值聚类法将用户输入的以识别每颗牙齿图心的信息与爬山分割结果

合并。首先应当将顶点替换为爬山步骤中相应的局部最大值。对该组新顶点采用K均值法以使这些新顶点集群于k个节段中，其中k等于用户在该过程开始时输入（“点击”）的数目。将用户输入（牙齿图心估计值）用作K均值法的图心起始位置。

[0081] 该合并方法可如下成功实现分割：对局部最大值（大多数位于牙尖上）而不是全部网格进行集群，从而取得精度高速度快的优势。局部最大值的集群越大，在K均值法中的权重越高，并且用户输入的图心起始位置可避免会聚于K均值法的其它可能的局部最佳程度。

[0082] 表8提供了用于实现合并算法的示例性伪代码，该算法合并了爬山分割法与用户输入的牙齿图心估计值。

| | | | | | | | | | |
|--------|--|---|--------------------------|---|---|---|------------------------------|---|------------------|
| [0083] | 表 8—通过 K 均值法合并爬山节段的伪代码 | | | | | | | | |
| [0084] | <p>输入：具有一组顶点 V 的 3D 网格，这些顶点通过 3D 坐标系 X、Y 和 Z 进行指定，该分割过程起因于爬山分割算法，在该 3D 网格中，列出了每个顶点已经达到的局部最大坐标值；以及牙齿图心估计值，该估计值在该过程开始时已从用户处接收。</p> <p>输出：经分割的网格，其中针对网格中的每个顶点 v_i，分配了标记 L_i，该标记对应于顶点所属的节段。</p> <p>方法步骤：</p> <table border="1" data-bbox="304 837 1410 992"> <tr> <td data-bbox="304 837 347 875">1</td> <td data-bbox="347 837 1410 875">用每个顶点已经达到的局部最大值表示/代替该顶点。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="304 875 347 913">2</td> <td data-bbox="347 875 1410 913">对新顶点实施 K 均值法，其中用户的图心估计值作为 K 均值法的图心起始位置。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="304 913 347 952">3</td> <td data-bbox="347 913 1410 952">将所有顶点分配到步骤 2 中归属于相应局部最大值的节段。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="304 952 347 992">4</td> <td data-bbox="347 952 1410 992">将合适的集群标记分配给每个顶点。</td> </tr> </table> | 1 | 用每个顶点已经达到的局部最大值表示/代替该顶点。 | 2 | 对新顶点实施 K 均值法，其中用户的图心估计值作为 K 均值法的图心起始位置。 | 3 | 将所有顶点分配到步骤 2 中归属于相应局部最大值的节段。 | 4 | 将合适的集群标记分配给每个顶点。 |
| 1 | 用每个顶点已经达到的局部最大值表示/代替该顶点。 | | | | | | | | |
| 2 | 对新顶点实施 K 均值法，其中用户的图心估计值作为 K 均值法的图心起始位置。 | | | | | | | | |
| 3 | 将所有顶点分配到步骤 2 中归属于相应局部最大值的节段。 | | | | | | | | |
| 4 | 将合适的集群标记分配给每个顶点。 | | | | | | | | |

[0085] 表1至表8中的示例性伪代码是为了说明所述算法的具体实施方式而提供，并且也可采用其它实施方式。

[0086] 牙齿磨损评估

[0087] 牙齿磨损评估是用于检测与分析连续口内3D扫描图中的牙齿磨损的技术。连续意指已经在不同时间点获取了指定患者的至少两张扫描图。对这两张扫描图之间的变化进行评估以定位已经发生显著磨损或侵蚀的区域。在进行该评估之前，相应数字3D模型中的牙齿已经彼此分割开来，并且在时间1和时间2时相应的牙齿已经配准（即，在共同坐标系中尽可能保持一致）。变化区域，即已经发生显著牙齿磨损的区域，定义为磨损区域。

[0088] 图10是使用口内3D模型检测和显示牙齿磨损的方法50的流程图。方法50可以在软件或固件模块中实现，例如由处理器20执行。方法50可以另选地在硬件模块或软件与硬件的组合中实现。

[0089] 方法50包括：接收患者牙齿的配准的经分割的3D模型（步骤52），配准的经分割的3D模型可以由（例如）方法22的结果提供；以及配准所选的经分割的牙齿（步骤53）。配准过程涉及：通过在两个不同时间扫描牙齿获得经分割的3D牙齿模型，以及旋转并平移这些模型以将其对齐在一起，用于检测两个模型的变化。用于配准过程的旋转与平移可涉及：将两个模型与共同坐标系对齐以将其以相同的取向排列用于比较。具体地，配准过程是对齐的过程或获得需要对移动网格施加的最合适旋转量与平移量以与固定网格对齐或需要推广至多个网格的最合适旋转量与平移量的过程。

[0090] 在示例性实施方案中，对齐过程（步骤53）可使用迭代最近点（ICP）算法以实现表示数字3D模型的网格之间的对齐。ICP算法的一个变体包括表9中的步骤。对于示例性实施方案，配准过程（参见表9中的步骤）使用步骤1中的所有点、步骤2中的欧几里得与点到面算

法、相等权重对并基于固定的预定阈值丢弃该权重对(步骤3和4)、步骤5中作为指标的距离平方和,步骤6中通过奇值分解(SVD)法和莱文伯格-马夸特法实现了最小化。

[0091] 任选地,一旦已经达到最终的最佳配准值,可验证这确实是最佳稳定值。可通过两种可能的方式进行验证——首先,通过小量的旋转与平移来干扰该最佳值以确定其是否会聚回原始最佳值或是否可达到更好的最佳值;第二,通过用不同初始旋转与平移量来执行ICP算法随机重启以确定每次初始化所达到的最佳值中的最优值。

| | |
|---|--|
| 1 | 选择网格中待配准的点。这些点的一些选择方式包括: a. 选择所有点 b. 选择随机子样品 c. 选择相同的子样品 d. 选择与诸如曲率和局部协方差等关键特征值相对应的点 |
| 2 | 查找匹配(对应)点,在该步骤中,对于第一网格中的每个点,第二网格中的最近点通过合适的距离指标进行确定。该步骤也可使用不同的指标来实现: a. 欧几里得点到点距离 b. 点到面距离或法向距离 c. 逆向校准 d. 其它组合 |
| 3 | 对加权相当于对评级。对加权可通过基于距离的一些权重、基于法向方向相容性的一些权重、或其它因素来完成。 |
| 4 | 对丢弃可通过权重阈值来完成,这些阈值在前面步骤中的其它启发式算法中进行计算。 |
| 5 | 用于优化的误差指标可以算作步骤 4 之后剩余对之间的距离平方之和。这些距离也可以是如步骤 2 中的点到面距离。 |
| 6 | 可通过 SVD(奇值分解)、莱文伯格-马夸特优化、BFGS、随机梯度下降、模拟退火、或其它技术来完成优化。 |

[0093] 用于检测与分析磨损区域的方法包括以下步骤:计算在时间1与时间2之间配准的一组牙齿之间的距离的测量值(步骤54);通过查找在负方向上已经显著移动(例如,向内移动)的顶点来检测初始磨损区域(步骤56);通过形态学操作优化磨损区域(步骤58);以及计算体积与高度的变化(步骤60)。这些步骤中的每个步骤更详细地描述于下文中。然后可显示所检测的牙齿磨损结果(步骤62),例如,在显示设备16上显示。

[0094] 步骤54—计算一组配准的牙齿之间的距离的测量值

[0095] 3D表面由三角网格表示,这些三角网格由顶点(3D空间中的点)以及限定相邻顶点之间的关系的面组成。考虑到时间1与时间2时表示相同牙齿的两张网格,并且这两张网格已经配准,该评估过程测量这两张扫描图之间的每个顶点是否已经移动以及每个顶点已经移动的方式。不必为两张网格中的每个顶点查找到完全一一对应的关系,因为牙齿的形状可能已经改变,并且在随后的扫描图中,对顶点表示的表面的取样过程一般也将改变。由此,该评估技术可通过查找每个顶点在其法向方向上的近似对应点来估算该测量结果。可计算每个顶点和每个面的法向量。然后,对于每个顶点,该评估技术可沿着法向量或在法向量附近(在正方向或负方向上)查找点。最近的此类点视为该顶点的最佳匹配点,该顶点据称已经位移的距离由这两点之间的距离决定,并且投射成法向量。

[0096] 一旦已经计算了每个顶点的最近点,可以显示位移热图,在该热图中,每个顶点的

颜色表示该顶点在时间1与时间2之间已经移动的距离。位移迹象对应于该顶点沿着其法向向量已经移动的方向。图11示出了此类热图的示例。热图的阴影可表示在时间1与时间2之间时牙齿扫描图的变化(或位移)。也可使用不同的颜色来表示变化的程度或严重性。可单独示出每颗牙齿的变化或作为牙弓所扫描的所有牙齿的变化。

[0097] 步骤56—检测初始磨损区域

[0098] 一旦已经估算出位移,下一步是计算潜在磨损区域可能所在的位置的初始估计值。由于牙齿磨损是负过程,评估技术确定在比较时间1的模型与时间2的模型时已经测得负位移的区域。初始磨损区域由定位顶点进行检测,其中负方向上的变化在特定阈值之上。一个示例在图12中示出,该图示出了牙齿在数字模型上的磨损区域64。牙齿之间的咬合点也可用于检测初始磨损区域。

[0099] 步骤58—通过形态学操作优化磨损区域

[0100] 在一些情况下,步骤56中检测出的初始磨损区域可受到噪声以及网格中的其它不平整部分的影响。由此,将这些初始磨损区域用作起始点,下一步是通过对网格进行形态学操作来优化初始磨损区域。

[0101] 对于这些操作,与处理二值图像类似的方式来处理网格,其中初始磨损区域中的顶点取值为1,所有其它顶点取值为0,并且面限定顶点之间的关系。第一步是执行侵蚀,这导致磨损区域发生轻微收缩。该步骤用来移除较小的磨损隔离区域,诸如网格中的单点或被认为是噪声的足够小的点的集合,以及用来优化其余的磨损区域使得这些区域更光滑。

[0102] 接下来,迭代地执行区域增加操作。每次迭代时,如果新点临近现有磨损区域并且具有大于特定阈值(比步骤56中用于检测初始磨损区域的阈值小)的负位移,将新点添加到磨损区域。添加到网格中的这些点规定了更加完整的磨损区域。

[0103] 该流程的示例在图13A至图13C中示出,这些图示出了对由深色阴影表示的磨损区域(诸如,区域66,68和70)进行迭代处理的过程。具体地针对该示例,图13A示出了初始磨损区域,图13B示出了在移除点的侵蚀处理之后的模式区域,图13C示出了在添加点的区域增加处理之后的磨损区域。

[0104] 步骤60—计算体积和高度的变化

[0105] 一旦最终已经确定了磨损区域,可计算出牙齿在时间1与时间2之间发生的体积与高度量变。这些测量值可用作诊断辅助工具,用于评估牙齿磨损与磨牙症。

[0106] 体积变化如下进行计算:求时间1与时间2时所有顶点内的模型的表面之间的体积总和,所有顶点在前几步中视为磨损区域。高度变化按照模型中的每个牙尖进行测量(这是因为一些牙齿,诸如臼齿,具有多个牙尖)。在每个牙尖磨损区域,变化最大的点位于该磨损区域并且指定为该磨损区域中的高度变化点。

[0107] 另选地,体积可通过以下方法进行计算。

[0108] 对于时间1时的牙齿:用某些值为Y的水平平面(平行于XZ平面)进行切片,变化应当在Y以上。通过以下方式测量在该平面以上的体积:通过平面上的规则栅格坐标(x,z)的参数化,求在沿着该平面的垂直方向上的体积之和。

[0109] 对于时间2时的牙齿:重复体积测量步骤。

[0110] 然后:从第二体积中减去第一体积以获得体积差测量值。

[0111] 图14是示出了牙齿磨损的用户界面72的视图。用户界面72可以在(例如)显示设备

16上显示,并且包括示出了随时间推移的区域74的磨损的数字牙齿外形。牙齿外形可以通过经分割的3D牙齿模型而生成。可以计算基于区域74的磨损而产生的体积与高度变化。特定牙齿减小的体积也可以其它方式示出,诸如牙齿高度或体积变化曲线图、或示出了随时间推移的牙齿变化的动画。

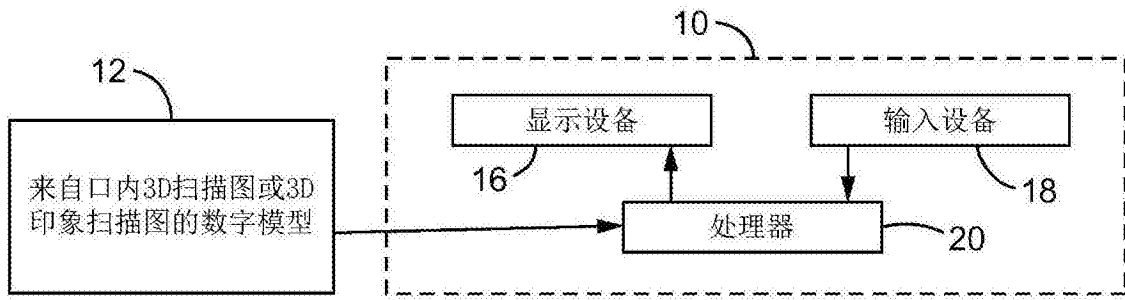


图1

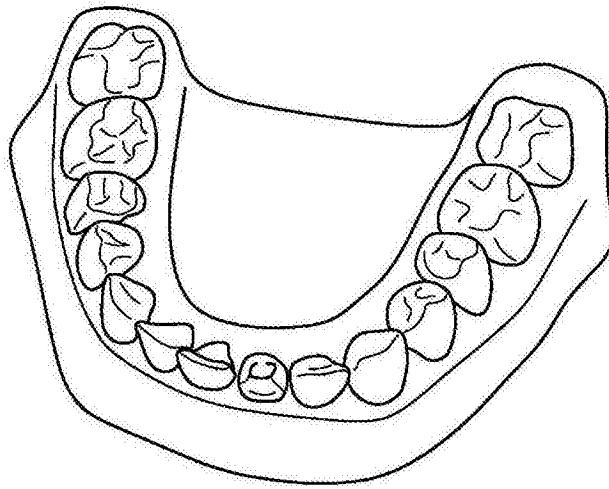


图2

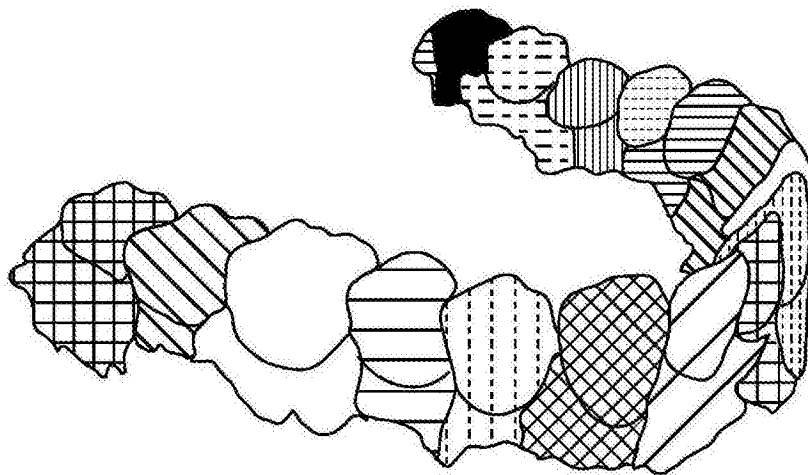


图3

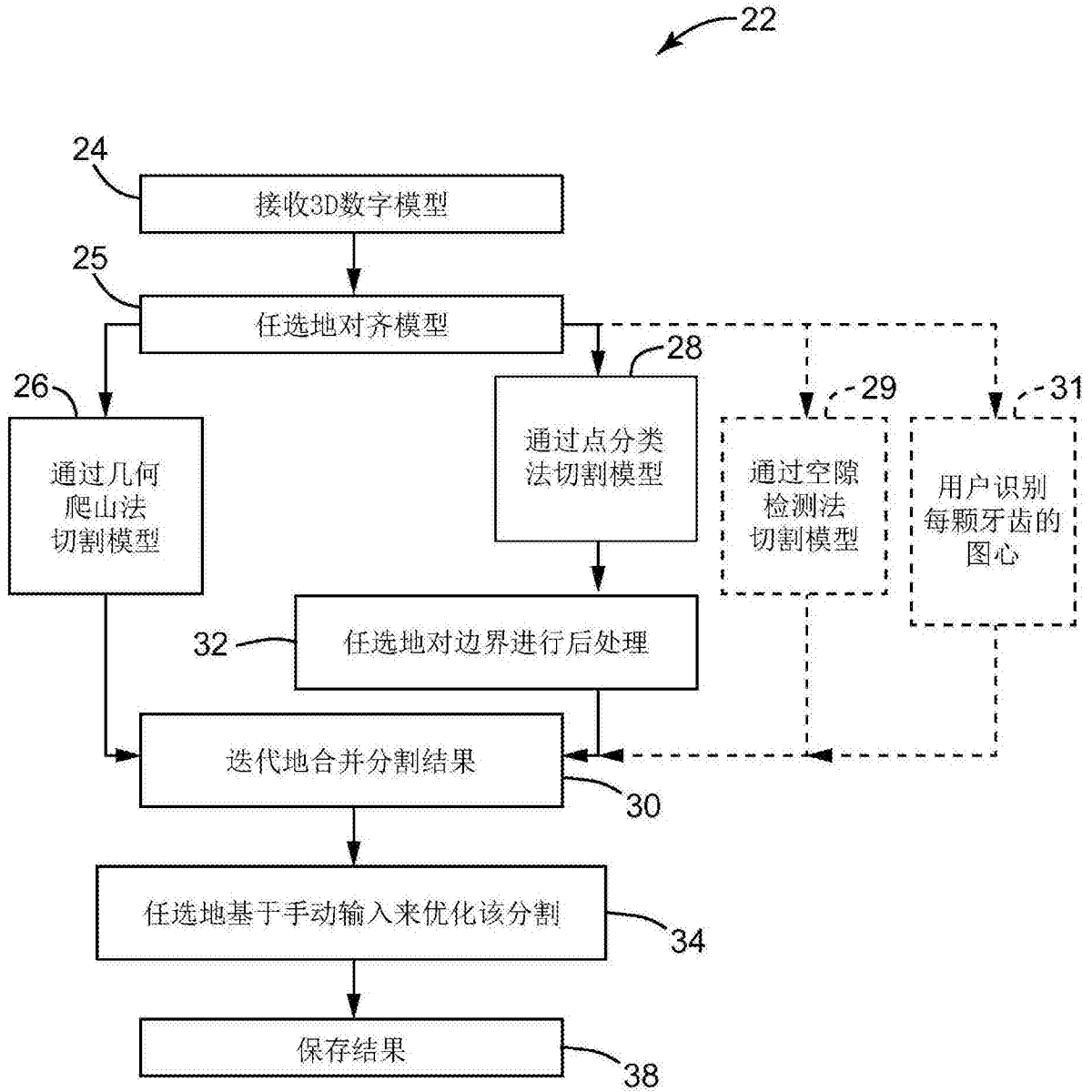


图4

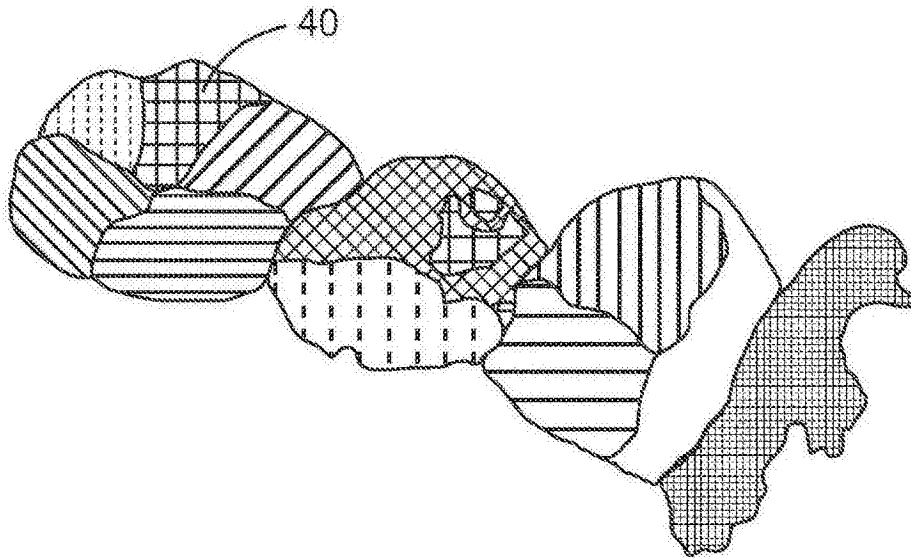


图5

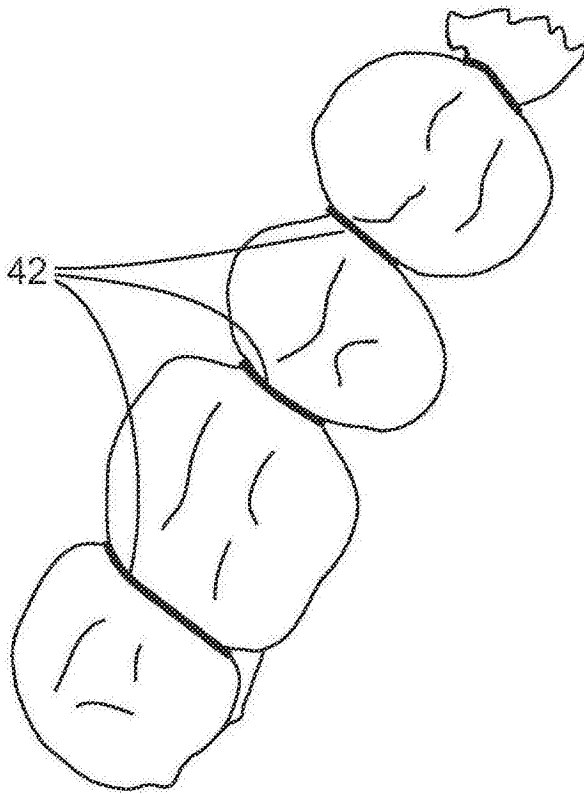


图6

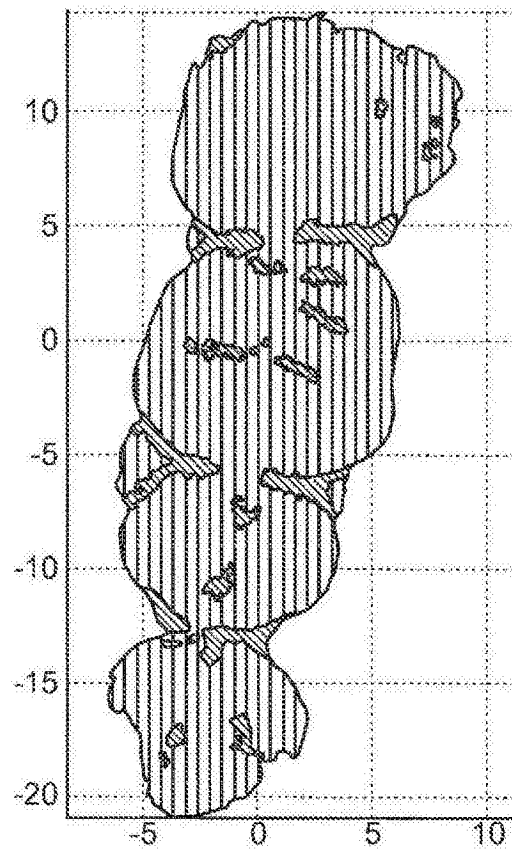


图7A

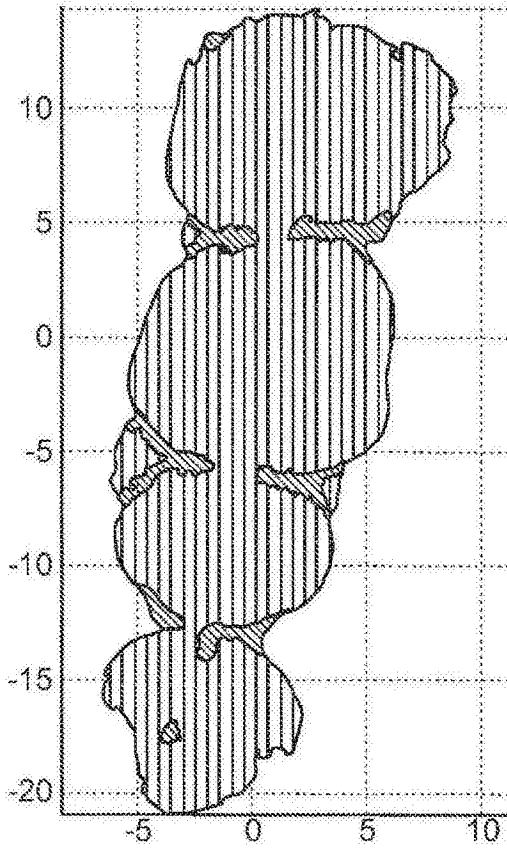


图7B

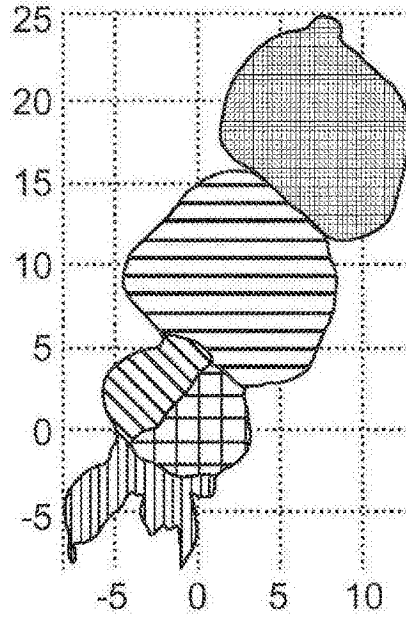


图8A

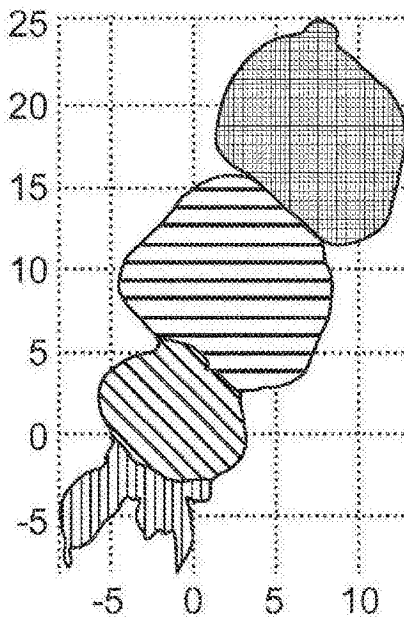


图8B

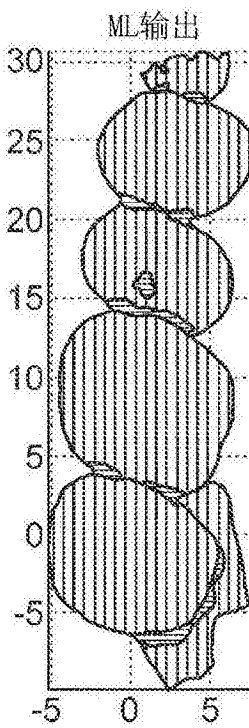


图9A

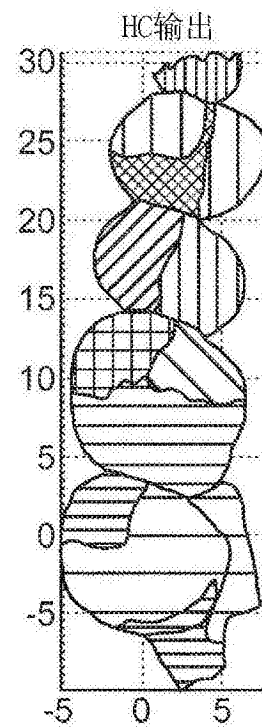


图9B

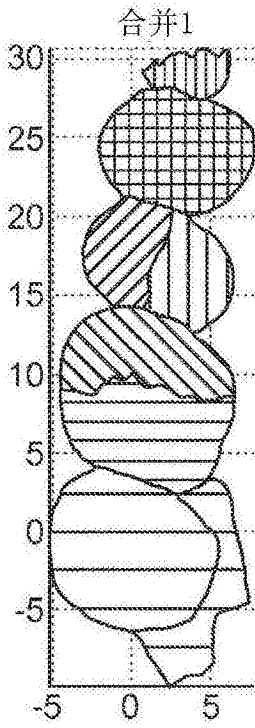


图9C

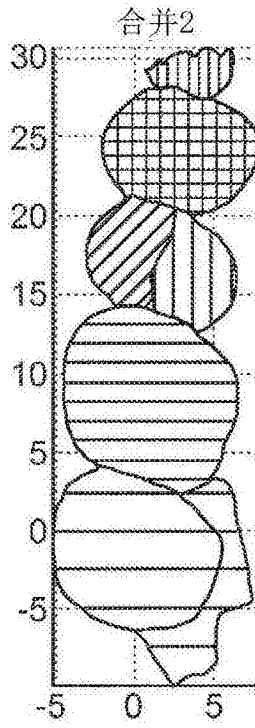


图9D

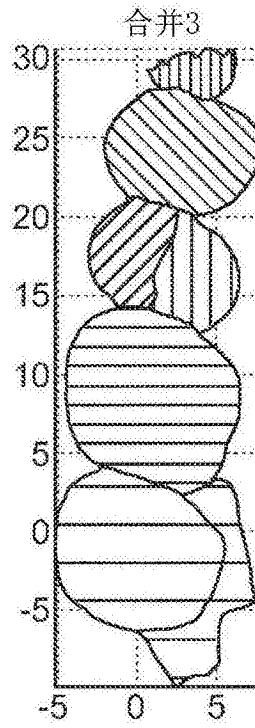


图9E

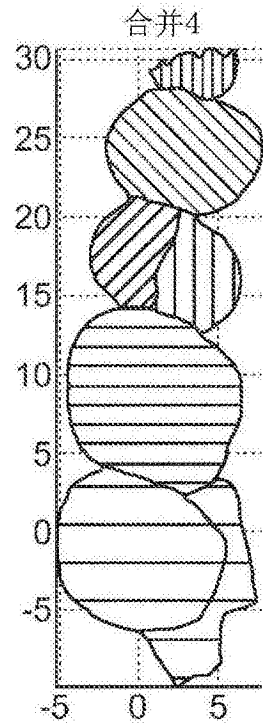


图9F

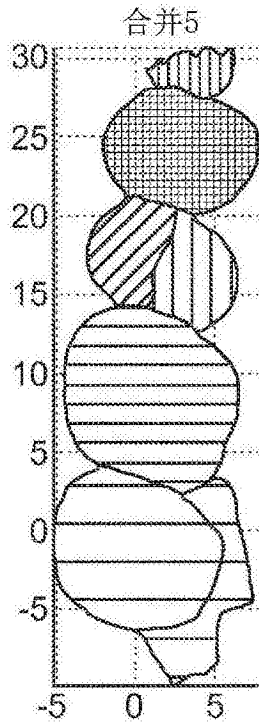


图9G

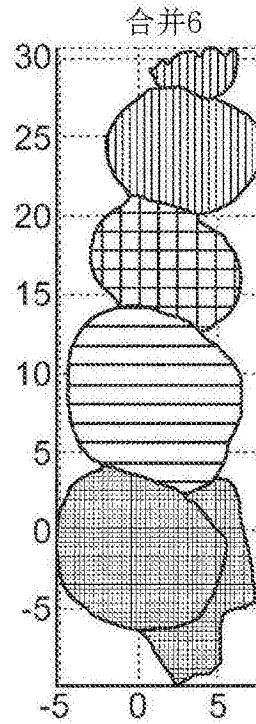


图9H

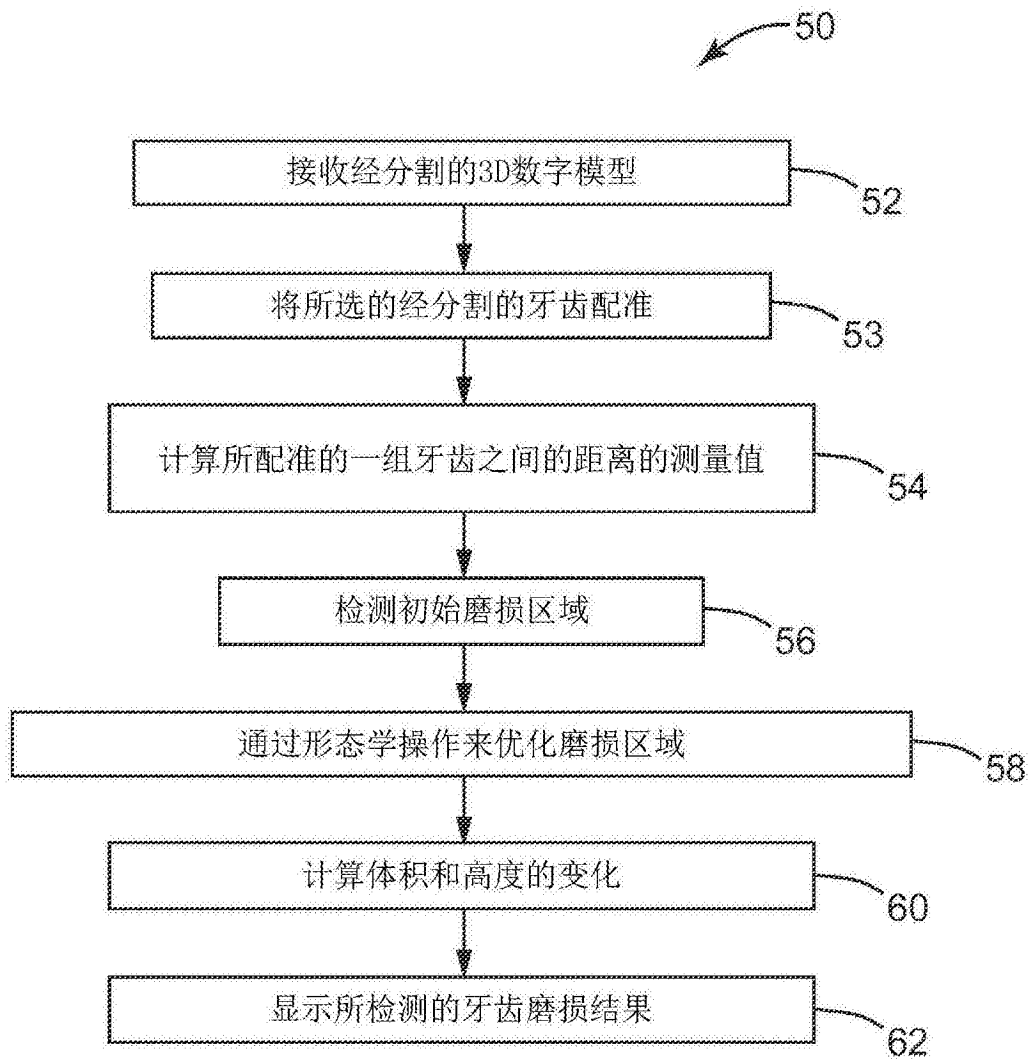


图10

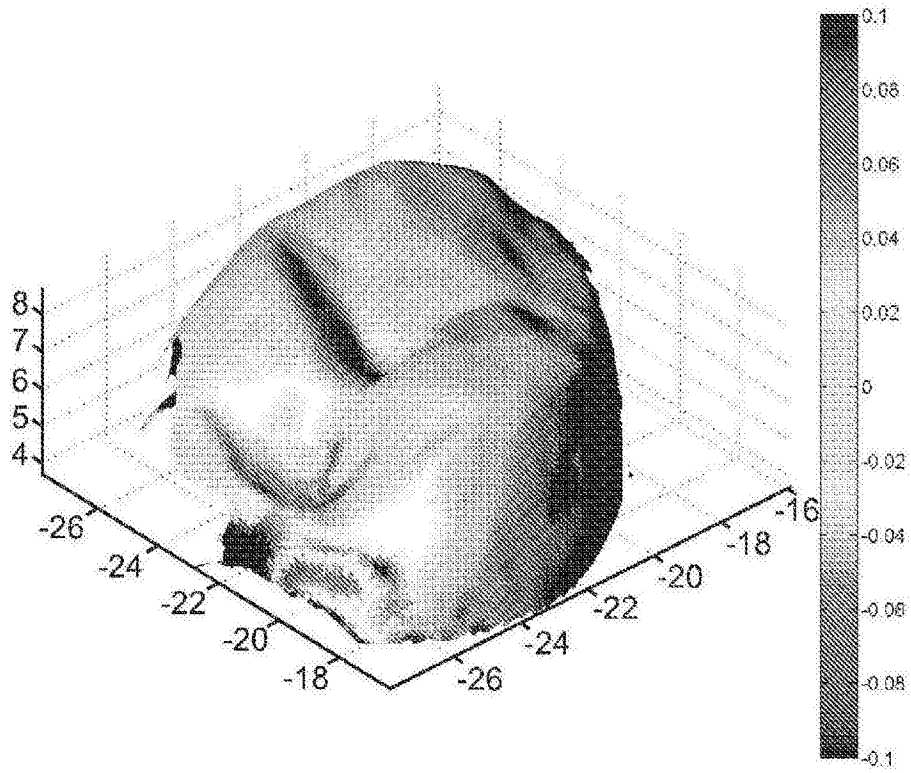


图11

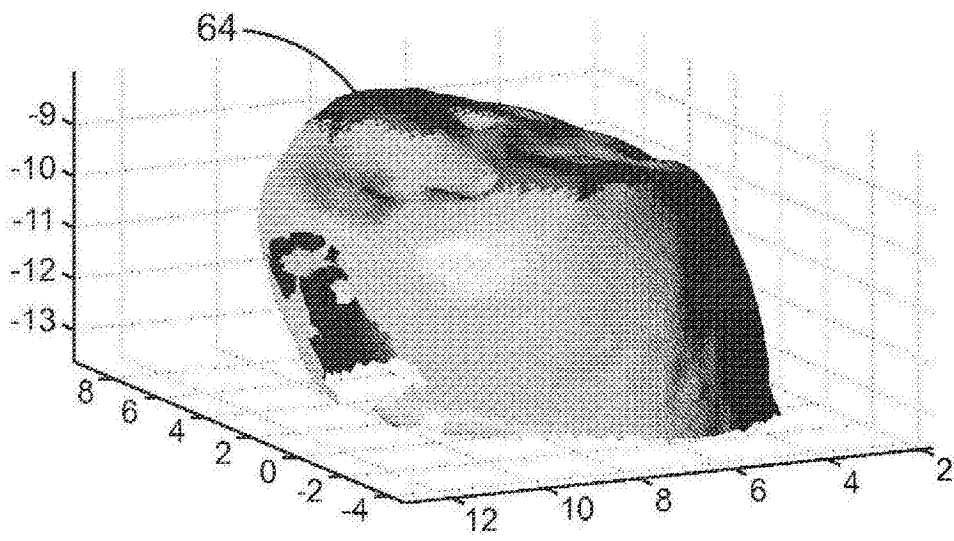


图12

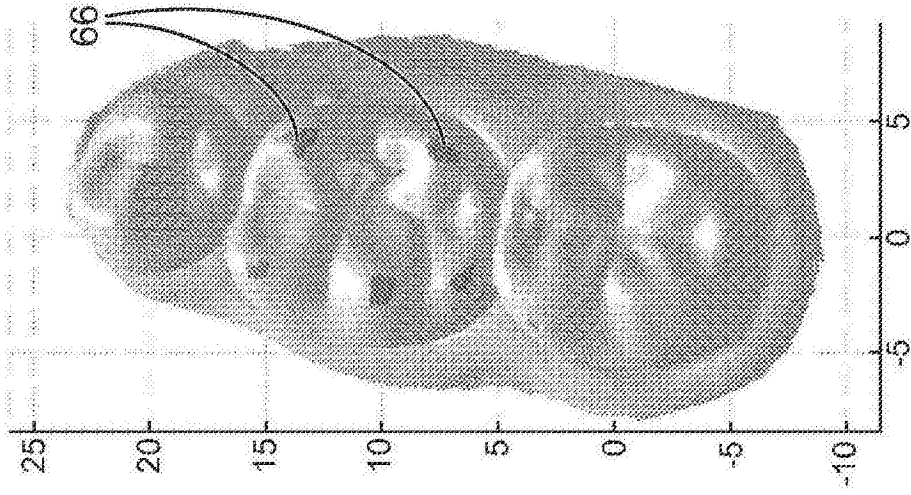


图13A

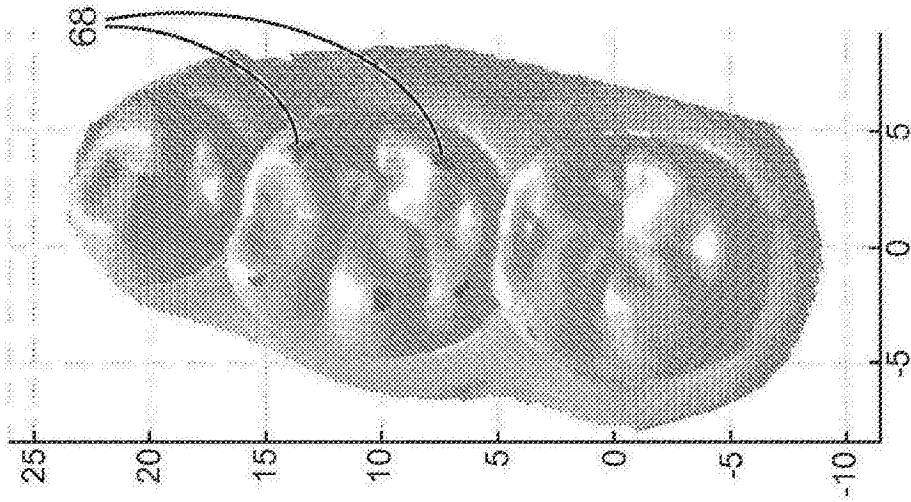


图13B

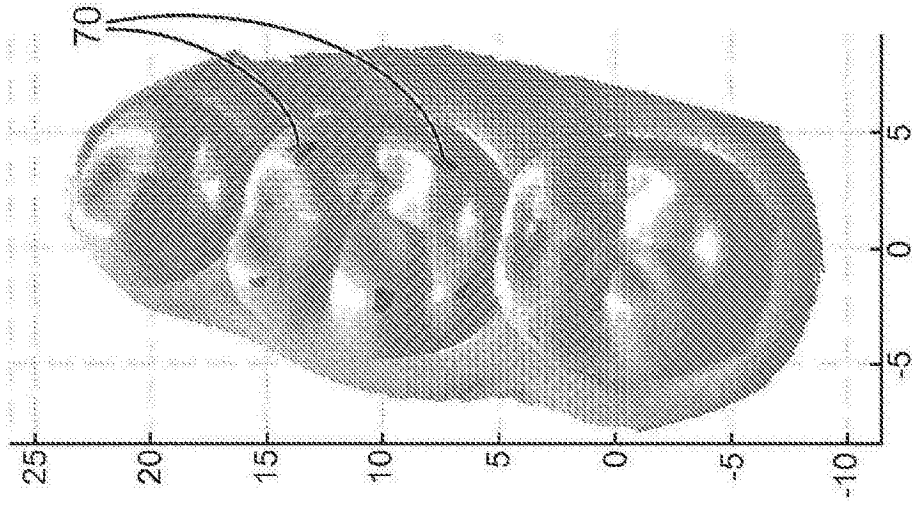


图13C

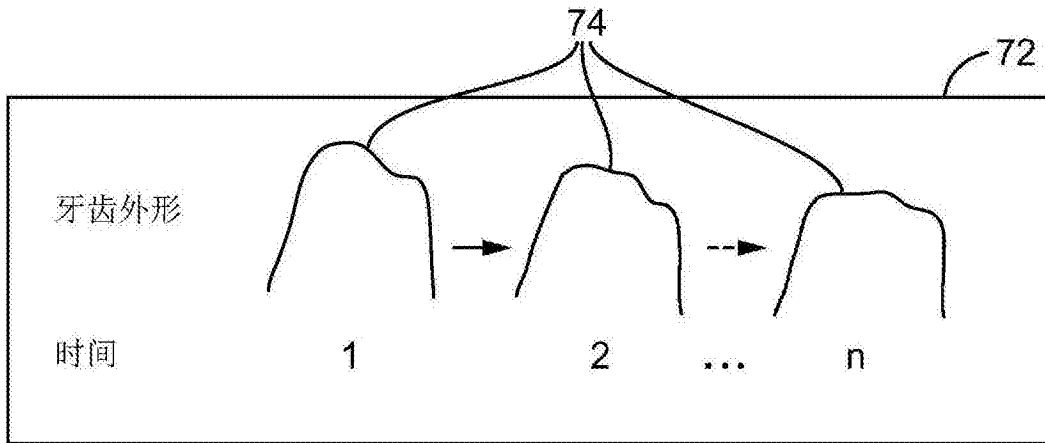


图14