



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111462333 B

(45) 授权公告日 2024.05.07

(21) 申请号 202010261171.5

(22) 申请日 2015.08.31

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111462333 A

(43) 申请公布日 2020.07.28

(30) 优先权数据  
14/479,692 2014.09.08 US

(62) 分案原申请数据  
201580048036.X 2015.08.31

(73) 专利权人 舒万诺知识产权公司  
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  
S·D·斯考特 G·戈尔纳里  
A·艾德

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所  
11256

专利代理师 李辉 范怀志

(51) Int.Cl.  
G06T 17/20 (2006.01)

(56) 对比文件  
CN 101706971 A, 2010.05.12  
US 2002177108 A1, 2002.11.28  
US 2004197727 A1, 2004.10.07  
US 2006024637 A1, 2006.02.02  
US 2013325431 A1, 2013.12.05  
US 6386878 B1, 2002.05.14

审查员 付圆媛

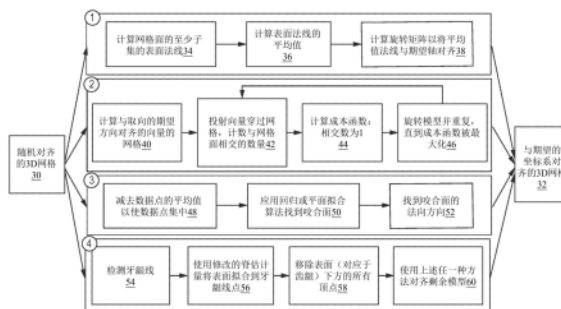
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

对齐口内数字3D模型的方法

(57) 摘要

本发明提供了用于将由3D网格表示的牙齿的数字3D模型与3D坐标系内的期望取向对齐的方法。所述方法包括接收随机对齐的所述3D网格以及改变所述3D网格的取向,以将牙齿的所述数字3D模型与所述3D坐标系内的期望轴对齐。所述方法还可以检测所述数字3D模型中的牙龈线,以从所述模型中移除所述齿龈。



1. 一种用于改变和对齐牙齿的数字3D模型的方法,包括以下步骤:  
接收由随机对齐的3D网格表示的具有相关联齿龈的牙齿的数字3D模型;  
将具有相关联齿龈的牙齿的所述数字3D模型与3D坐标系内的期望轴对齐;  
在所述对齐步骤之后,从所述数字3D模型中移除所述相关联齿龈,移除步骤包括:  
在所述数字3D模型中检测牙龈线;  
将表面拟合到所检测到的所述牙龈线;以及  
移除与所述齿龈相对应的所述表面的一侧上的所述网格的顶点,以从所述数字3D模型中移除所述齿龈;以及  
将不具有所述齿龈的所述数字3D模型与所述3D坐标系内的所述期望轴重新对齐。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中所述检测步骤包括使用基于所述网格的网格表面形状特性的分类函数来检测所述牙龈线。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中所述检测步骤包括使用曲率函数的相关性来检测所述牙龈线。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中所述重新对齐步骤包括:  
计算所述网格的每个面的至少子集的表面法线;  
计算所述表面法线的聚集体以确定代表性法向方向;以及  
计算和应用旋转矩阵以将所述代表性法向方向与所述期望轴对齐。
5. 根据权利要求1所述的方法,其中所述重新对齐步骤包括:  
计算与所述3D坐标系内的所述期望轴对齐的向量的网;  
将所述向量投射穿过所述网格,以计数所述向量与所述网格的面的相交数量;  
基于所述相交数量计算所述网格的成本函数;以及  
旋转所述网格并重复所述投射步骤和所述计算所述成本函数步骤,直到所述成本函数被最大化以使所述网格与所述期望轴对齐。
6. 根据权利要求1所述的方法,其中所述重新对齐步骤包括:  
对所述网格中的数据点应用回归或平面拟合算法,以找到所述数字3D模型的咬合面;  
以及  
找到所述咬合面的法向方向以使所述网格与所述期望轴对齐。
7. 根据权利要求1所述的方法,其中所述重新对齐步骤包括:  
对所述网格中的数据点应用回归或平面拟合算法,以找到与所述数字3D模型最佳拟合的平面;以及  
找到所述平面的法线方向以使所述网格与所述期望轴对齐。
8. 根据权利要求1所述的方法,其中所述检测步骤包括找到所述牙龈线的点,并且所述拟合步骤包括将所述表面拟合到所述牙龈线的所述点。
9. 根据权利要求8所述的方法,其中所述拟合步骤包括使用修改的脊估计量来将所述表面拟合到所述牙龈线的所述点。

## 对齐口内数字3D模型的方法

[0001] 本申请是于2015年8月31日向国际局提出、优先权日为2014年9月8日、于2017年3月7日进入中国国家阶段、国家申请号为201580048036.X、发明名称为“对齐口内数字3D模型的方法”的中国发明专利申请的分案申请。

### 背景技术

[0002] 数字3D模型的使用在牙科市场中正变得越来越普遍。这些模型可以在活体内通过口内扫描仪获得,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任务,包括治疗规划、以及牙冠与植入物的制备。该模型还可以用于诊断辅助,例如用于评估牙齿磨损和牙龈萎缩。数字3D模型通常以随机的取向获得,并且不固定到特定坐标系。因此,存在将口内数字3D模型与给定坐标系对齐以用于诊断或其它目的的需求。

### 发明内容

[0003] 符合本发明的用于对齐牙齿的数字3D模型的方法包括接收由随机对齐的3D网格表示的牙齿的数字3D模型,以及改变3D网格的取向以将牙齿的数字3D模型与3D坐标系内的期望轴对齐。

[0004] 符合本发明的用于改变和对齐牙齿的数字3D模型的方法包括接收具有由随机对齐的3D网格表示的相关联齿龈的牙齿的数字3D模型,在数字3D模型中检测牙龈线,以及从数字3D模型中移除齿龈。不具有齿龈的数字3D模型与3D坐标系内的期望轴对齐。

### 附图说明

[0005] 附图并入本说明书中并构成本说明书的一部分,并且附图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是用于基于口内3D扫描图或3D印象扫描图对齐数字3D模型的系统的示意图;

[0007] 图2示出了通过口内扫描图得到的3D牙齿模型;

[0008] 图3是用于对齐和改变数字3D模型的方法的流程图;并且

[0009] 图4是在3D坐标系内以期望的取向对齐并且与检测到的牙龈线对齐的数字3D模型的示意图。

### 具体实施方式

[0010] 图1是用于基于口内3D扫描图对齐数字3D模型的系统10的示意图。系统10包括处理器20,该处理器通过口内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还包括:电子显示设备16,诸如液晶显示器(LCD)设备,用于显示数字3D模型;和输入设备18,用于接收用户命令或其它信息。通过扫描图得到的患者牙齿的数字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获得牙齿或其它口内结构的多角度数字图像,并且对那些数字图像进行处理

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。

[0011] 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,并且具有两个分量。第一分量称作网格的顶点,其仅仅是表面(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。

[0012] 图3是用于对齐数字3D模型并且可选地从模型中移除牙龈的方法1-4的流程图。这些方法可以在软件或固件模块中实现,例如由处理器20执行。这些方法可以另选地在硬件模块或软件与硬件的组合中实现。方法1-4接收随机对齐的3D网格(步骤30),并且生成与3D坐标系中的期望轴对齐的3D网格(步骤32)。3D网格是具有上述分量的三角形网格。

[0013] 在一个特定实施方案中,对齐导致咬合面与3D坐标系内的期望取向对齐。可通过在牙齿的数字3D模型中找到在一颗牙齿或多颗牙齿顶部处的点并且将平面拟合到那些点来测定咬合面。在一个示例中,期望的取向将咬合面与Y轴对齐,使牙齿在模型中朝上,但咬合面也可以使用对齐方法与其它轴对齐。3D坐标系的示例包括X轴、Y轴和Z轴,该轴中的每一个彼此互相正交。

[0014] 对齐方法1-法线的聚集

[0015] 方法1包括以下步骤:计算在每个面或顶点处或在面或顶点的子集处的网格的法线(步骤34);计算表面法线的聚集体,以通过计算表面法线的平均值,或另选地计算表面法线的总和或中值来确定代表性法向方向(步骤36);以及计算和应用旋转矩阵以将平均法线与期望轴对齐(步骤38)。有若干方法可以计算两个向量之间的旋转矩阵、具有期望空间取向的法线的平均值。以下示例性方法使用罗德里格斯公式。

[0016] 对于两个向量a和b,可以通过计算归一化叉积以及它们之间的角度来找到旋转轴线x,θ如下所示:

$$[0017] \quad x = \frac{a \times b}{\|a \times b\|}$$

$$[0018] \quad \theta = \cos^{-1} \frac{a \cdot b}{\|a\| \cdot \|b\|}$$

[0019] 罗德里格斯公式产生从向量a变换到向量b的旋转矩阵[R]。

$$[0020] \quad [R] = [I] + x \sin\theta + x^2 (1 - \cos\theta)$$

[0021] 此处,[I]是3×3的单位矩阵。

[0022] 表1提供了用于实现对齐方法1的示例性伪代码。

表 1	
[0023]	输入: 在 3D 坐标系 X、Y 和 Z 中具有指定的一组顶点 V 的 3D 网格。Y 表示纵轴或其中牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角部分或面 F。 输出: 对齐的网格, 其中牙齿的咬合面大致平行于 XZ 平面并垂直于纵轴, 在这种情况下为 Y 轴。 方法步骤:

	1	对于 V 中的每个顶点 $v_i$ ，计算法向方向 $n_i$ 。
	2	计算所有顶点的法向量的总和，并确定方向为 $n\_sum$ 。另选地，可以使用法向方向的平均值或中值。
[0024]	3	确定旋转的方向和角度，以使用如下的罗德里格公式将 $n\_sum$ 与期望轴（诸如 Y）对齐： $a = n\_sum$ $b = Y$ 旋转方向： $x = a \times b / \ a \times b\ $ 旋转角度： $\theta = \cos^{-1}(a \cdot b / \ a\  \cdot \ b\ )$ 其中， $x$ 代表叉积，并且 $\cdot$ 代表向量的点乘积 要施加至顶点的旋转矩阵： $[R] = [I] + x \sin \theta + x^2 (1 - \cos \theta)$

[0025] 对齐方法2-开放的网格假设

[0026] 方法2包括以下步骤：计算与期望的取向方向对齐的向量的网格（步骤40）；将向量投射穿过网格并计数与网格面相交的数量（步骤42）；计算成本函数作为各情况的总数，其中网格上具有面的每个网格线的相交数为1（步骤44）；以及旋转模型并重复步骤42和44，直到成本函数被最大化（步骤46）。

[0027] 这种方法假设模型表示开放的形貌表面，即表面不自相交或靠近自身。这种模型通常是牙列的3D扫描图的情况。为了计算最终的变换矩阵，该方法将一组平行光线（也平行于固定的期望轴）投射到网格上；基于模型分辨率和计算限制来选择那些光线的网格间距。成本函数是与一个面相交的光线的数量与同不止一个面相交的光线的数量的比率：

[0028] 
$$f(\theta) = \frac{\text{总和}(n=1)}{\text{总和}(n>1)}$$
  $n$ 是每条光线穿过的面的数量

[0029] 该方法围绕某个给定的轴 ( $\theta$ ) 旋转模型，并使成本函数最大化，直到找到局部最大值。

[0030] 表2提供了用于实现对齐方法2的示例性伪代码。

表 2	
[0031]	输入：在 3D 坐标系 X、Y 和 Z 中具有指定的一组顶点 V 的 3D 网格。Y 表示纵轴或其中牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角部分或面 F。 输出：对齐的网格，其中牙齿的咬合面大致平行于 XZ 平面并垂直于纵轴，在这种情况下为 Y 轴。 方法步骤：
	1 计算平行于 Y 轴并且跨越输入网络的 XZ 空间的向量的网格，尤其是具有沿着 Y 轴朝向的向量的均匀样本 $\min(X)$ 到 $\max(X)$ 和 $\min(Y)$ 到 $\max(Y)$ 。
[0032]	2 按所选的角度围绕 X 轴和 Z 轴执行网格的旋转。
	3 将网格中与网格的恰好一个面相交的向量的数量计算为 N。
	4 围绕 X 和 Z 调整旋转角度。
	5 重复步骤 2 到 4，直到最大迭代数或直到步骤 3 中的总和 N 被最大化。

[0033] 对齐方法3-回归或平面拟合

[0034] 方法3包括以下步骤：减去数据点的平均值以将数据点集中（步骤48）；应用回归或平面拟合算法（例如，支持向量回归 (SVR) 函数）来找到咬合面（步骤50）；并找到咬合面的法向方向（步骤52）。另选地，也可以使用主分量分析 (PCA)，鲁棒PCA和其它形式的回归，诸如

广义线性模型 (GLM)、多变量回归。

[0035] 该对齐方法可使用SVR法来实现,以找到与数字3D模型中牙齿的网格相拟合的咬合面。该对齐过程可用于使数字3D模型中的牙齿与Y轴基本上对齐。该对齐过程可使用LIBSVM工具箱以及 $\epsilon$ -SVR  $\in$ -SVR方法。所选择的核函数为线性核函数,并且 $\epsilon=5$ 。 $\epsilon$ 的最佳值可以基于许多训练网格进行选择。训练过程基于以下假设: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PCA法中以找到法向方向。另选地,SVR也可以直接返回最佳拟合的平面的公式。然后可以从该平面计算法向方向。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。

[0036] 表3提供了用于实现对齐方法3的示例性伪代码。

表 3	
	输入: 在 3D 坐标系 X、Y 和 Z 中具有指定的一组顶点 V 的 3D 网格。Y 表示纵轴的大致方向,在该方向上,牙齿朝上。
[0037]	输出: 垂直于咬合面的法向量,其表示牙齿的期望朝上方向。 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。
[0038]	2 采用具有线性核函数和边缘值 $\epsilon$ 的 SVR 以找到咬合面。
	3 通过几何法或采用简单 PCA 法找到咬合面的法向方向。

[0039] 对齐方法4-牙龈检测和半移除

[0040] 方法4包括以下步骤:使用曲率相关性或基于网格表面特性的分类函数来检测模型中的牙龈线(步骤54);使用修改的脊估计量将表面拟合到牙龈线点(步骤56);移除对应于齿龈的表面下方的所有顶点(步骤58);以及使用上述方法1-3中的任一项对齐剩余模型(步骤60)。该方法4可在检测牙龈线之前对齐模型,并且在牙龈线检测之后重新对齐模型,或者仅在牙龈线检测之后对齐模型。

[0041] 针对步骤54,另选地也可使用利用多个表面特征诸如曲率、法向方向、网状局部协方差或其它此类特征的分类器来预测顶点是否位于牙龈线上。分类器的一些示例是线性判别分类器、决策树、支持向量机等等。

[0042] 对于步骤56,该方法检测大多数牙龈线点,不一定是所有牙龈线点,或至少足够数量的牙龈线点以将表面拟合到牙龈线。

[0043] 表4提供了使用对齐方法1实现对齐和牙龈线检测方法4的示例性伪代码。

表 4	
输入：在 3D 坐标系 X、Y 和 Z 中具有指定的一组顶点 V 的 3D 网格。Y 表示纵轴或其中牙齿朝上的总体方向。该网格也具有基于顶点的一组三角部分或面 F。 输出：对齐的网格，其中牙齿的咬合面大致平行于 XZ 平面并垂直于纵轴，在这种情况下为 Y 轴，并且牙龈线下方的网格为截顶的。 方法步骤：	
[0044]	1 将网格与法线途径的聚集对齐，如在方法 1 中所述。
	2 计算网格上每个顶点的曲率。
	3 计算网格的边界点。
	4 计算每个顶点的顶点环，该顶点是连通性矩阵。
	5 牙龈线检测：这种方法有助于牙列扫描的对齐，特别是象限扫描的对齐。 i. 找到牙龈线点。 a. 沿着边界迭代通过每个点，并且沿边界直到存储在每个点处的曲率的模型的峰，称为 1D 曲率图。 b. 使用绝对值函数作为模板。 c. 将模板与曲率图相关联，找到峰值。如果低于某阈值，则丢弃。 ii. 连接点以实现连续性。 a. 通过包括一个附加连接的顶点来展开牙龈线。
[0045]	b. 标记牙龈线顶点的每个连接分量，并基于已连接的顶点数对它们进行评分。 c. 执行通过曲率反向加权的 Dijkstra 最短路径算法（低曲率顶点是高度加权的）。 d. 重复步骤(ii)(c)，直到所有片段都已连接，或得分的总和已被最大化。
	6 将表面拟合到牙龈线点。
	7 移除与网格相交的表面下方的部分（模型中的齿龈）。
	8 使用法线的聚集（方法 1）或其它对齐方法重新对齐具有已移除齿龈的模型。

[0046] 图4是与期望的取向对齐并且与检测到的牙龈线对齐的数字3D模型的示意图。例如，牙齿70的数字3D模型已经与Y轴（牙齿沿着Y轴朝上）对齐，并且牙龈线72已经被确认为具有从数字3D模型中移除的牙龈线72下方的齿龈的部分。在该示例中，对齐导致咬合面的期望取向大致平行于XZ平面或者沿着XZ平面延伸并且垂直于Y轴或与Y轴相交。

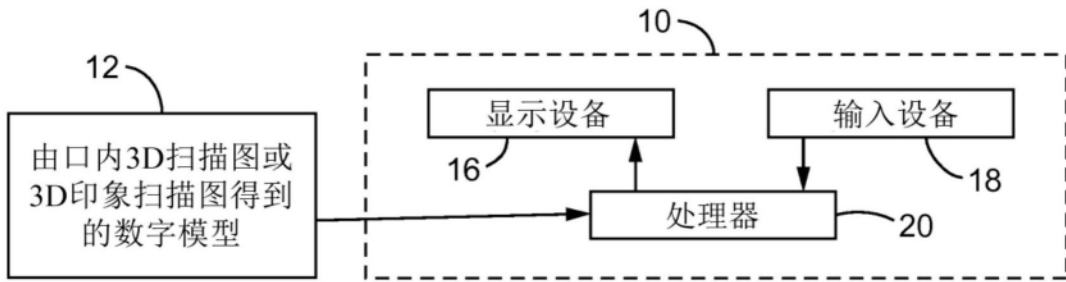


图1

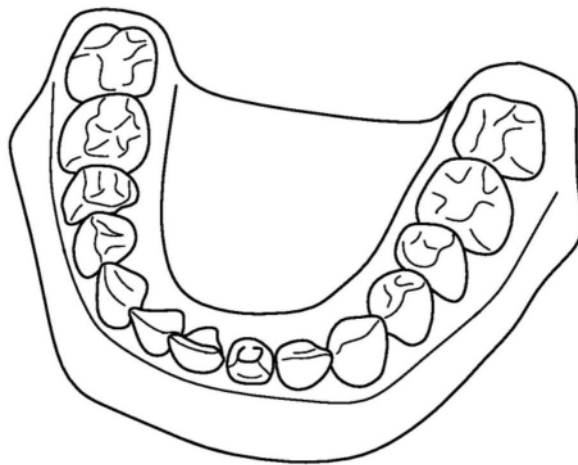


图2

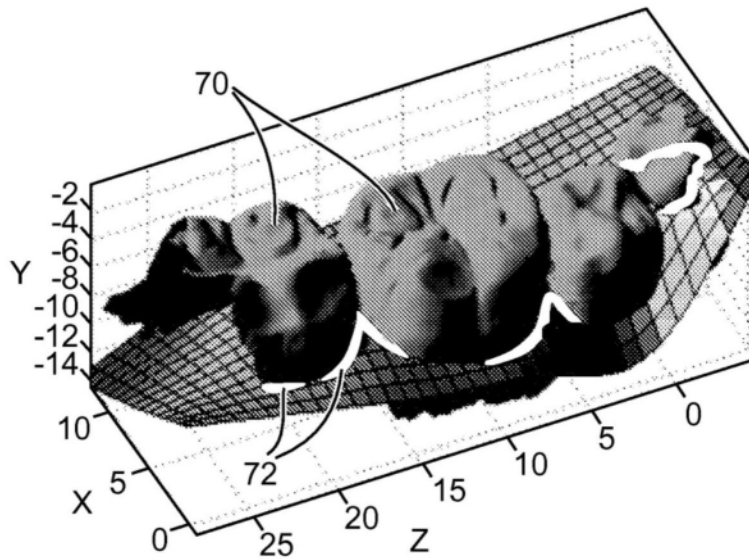


图4

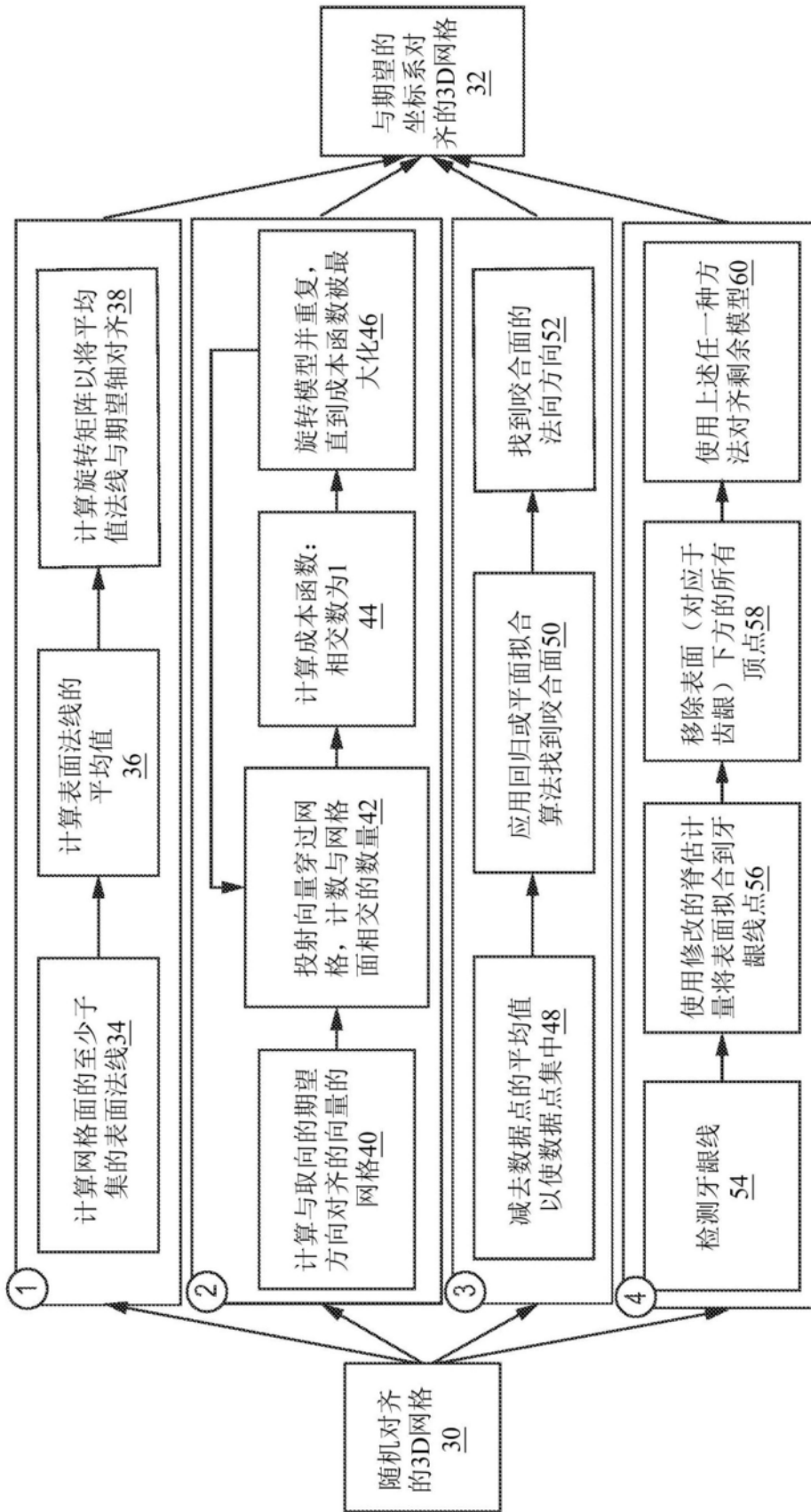


图3