



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114563406 A

(43) 申请公布日 2022. 05. 31

(21) 申请号 202111422336.3

(22) 申请日 2021.11.26

(30) 优先权数据

2012237 2020.11.27 FR

(71) 申请人 空中客车运营简化股份公司

地址 法国图卢兹

(72) 发明人 弗朗索瓦·勒菲弗阿尔巴雷

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

公司 11227

专利代理师 康建峰 李德山

(51) Int. Cl.

G01N 21/88 (2006.01)

G01N 21/01 (2006.01)

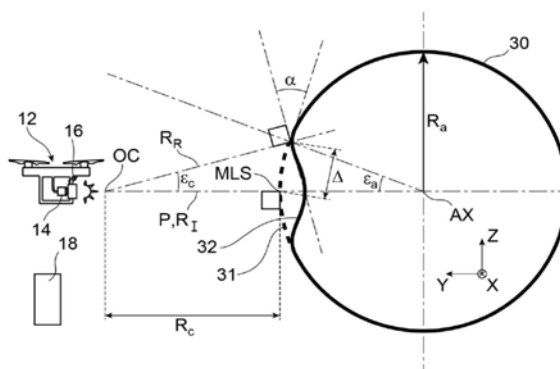
权利要求书2页 说明书9页 附图9页

(54) 发明名称

检测能够反射光的表面中的凹痕的方法和系统及存储介质

(57) 摘要

公开了一种用于检测表面(30)中的潜在凹痕(32)的方法和系统以及存储介质。该方法包括：-提供飞行无人机(12)和数据处理装置(18)，该飞行无人机装配有图像采集装置(14)和光源(16)，该光源的形状为长形；-通过使该飞行无人机(12)沿着轨迹移动经过该表面(30)来通过该图像采集装置(14)采集该表面的一部分的至少一系列图像，使得对于该系列中的每个图像，该光源(16)照亮该表面(30)的对应部分；-操作该数据处理装置(18)来分析该系列图像中的图像中该光源(16)的镜面反射的形状，从而估计该表面中的任何凹痕(32)的位置。



1. 一种用于检测能够反射光的表面 (30) 中的潜在凹痕 (32) 的方法, 所述方法至少包括以下步骤:

-A) 提供系统 (10), 所述系统包括装配有图像采集装置 (14) 和至少一个光源 (16) 的飞行无人机 (12)、以及数据处理装置 (18), 所述至少一个光源的形状为在所述光源的纵向方向 (D) 上是长形的;

-B) 通过使所述飞行无人机 (12) 沿着轨迹 (T1, T3) 移动经过所述表面 (30) 来通过所述图像采集装置 (14) 采集所述表面的一部分的至少一系列图像, 使得对于所述系列中的每个图像, 所述光源 (16) 照亮所述表面 (30) 的对应部分;

-C) 操作所述数据处理装置 (18) 以分析所述系列图像中的所有或部分图像中所述光源 (16) 的镜面反射 (ISR) 的形状, 从而估计所述表面中的任何凹痕 (32) 的位置。

2. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 对于所述系列图像或对于每一系列图像, 所述飞行无人机 (12) 的轨迹 (T1, T3) 是使得所述图像采集装置 (14) 的光轴 (40) 保持在所述表面的对应截面平面 (A-A) 内, 并且所述光源 (16) 的取向是使得其纵向方向 (D) 与所述表面的所述截面平面 (A-A) 相交。

3. 根据权利要求1或2所述的方法, 其中, 步骤C包括以下步骤:

-C-I) 对于所述系列图像中的每个图像, 操作所述数据处理装置 (18) 来:

- c1) 识别所述图像中所述光源 (16) 的镜面反射 (ISR);
- c2) 根据在前一子步骤中识别的镜面反射, 来估计所述图像中所述光源 (16) 的理想镜面反射的、与所述光源 (16) 的纵向方向 (D) 正交的中间位置, 所述中间位置对应于在所述表面 (30) 中不存在任何凹痕时这种镜面反射的中间位置 (ML);
- c3) 确定所述飞行无人机 (12) 与所述表面 (30) 之间的距离 (R_c);
- c4) 确定所述图像中所述光源 (16) 的镜面反射 (ISR) 的起始地 (SR) 的每个点在所述表面 (30) 上的位置;
- c5) 至少根据对在所述图像中所述光源 (16) 的镜面反射 (ISR) 的每个点与所估计的理想镜面反射的中间位置 (ML) 之间可能存在的任何距离 (Δ) 的估计, 来估计在所述镜面反射的起始地 (SR) 的每个点处所述表面 (30) 的局部梯度 $\partial r / \partial s$;

-C-II) 根据对于所述表面的至少一个区域作为步骤C-I的结果获得的所有估计的局部梯度 $\partial r / \partial s$, 操作所述数据处理装置 (18) 以估计可能存在于所述表面中的任何凹痕 (32) 的位置。

4. 根据权利要求3所述的方法, 其中, 在子步骤c3中, 所述数据处理装置 (18) 确定所述图像中所述照明装置 (16) 的镜面反射的表观纵向范围 (L_{ISR}), 所述数据处理装置由此来推导所述飞行无人机 (12) 与所述表面 (30) 之间的距离 (R_c)。

5. 根据权利要求3或4所述的方法, 其中, 子步骤c4包括: 操作所述数据处理装置 (18) 来:

-根据所述图像中所估计的理想镜面反射的中间位置 (ML) 来确定所述图像采集装置 (14) 的光轴 (40) 与平面 (P) 之间的角度 (γ), 所述平面经过所述图像采集装置的光学中心 (OC) 并且包含所述光源 (16) 的离开理想表面 (31) 的理想镜面反射的起始地的中间位置

(MLS),所述理想表面对应于所述表面(30)在没有凹痕的情况下将具有的形状;

-由此来推导在所述表面(30)的无凹痕区中所述光源(16)的镜面反射(ISR)的起始地(SR)的任何点处垂直于所述表面(30)的方向相对于参考平面的取向(θ);

-由此来推导所述图像的每个点与所述表面(30)的对应部分的每个点之间的对应性。

6.根据权利要求3至5中任一项所述的方法,其中,在子步骤c5中,所述数据处理装置(18)根据所述图像中所述光源(16)的理想镜面反射的宽度的、由所述数据处理装置获得的估计值($l_{\text{ISR-co}}$)来确定以下参数(Ω)的最大极限值 Ω_{max} ,所述参数表示所述光源(16)的宽度和所述表面(30)固有的潜在橘皮效应对所述图像中所述光源(16)的镜面反射(ISR)的累积效应。

7.根据权利要求3至6中任一项所述的方法,其中,步骤C-II包括:操作所述数据处理装置(18)来沿着所述表面(30)的不同的截面平面来确定局部梯度 $\partial r/\partial s$ 的对应特征曲线,同时将指示沿着所述截面平面中的每个截面平面的局部梯度的绝对值总和的函数最小化,所述特征曲线与在步骤C中获得的估计的局部梯度兼容。

8.根据权利要求7所述的方法,其中,步骤C-II随后包括:操作所述数据处理装置(18)来通过沿着所述表面(30)的不同截面平面中的每个截面平面来计算先前确定的所述局部梯度 $\partial r/\partial s$ 的对应特征曲线的积分,而确定凹痕轮廓(Δr)。

9.根据权利要求8所述的方法,其中,步骤C-II随后包括:操作所述数据处理装置(18)来根据先前针对所述表面的不同截面平面确定的凹痕轮廓(Δr)来形成所述表面(30)的至少一部分的深度图,并且接着识别深度大于所述表面中的凹痕(32)的预定阈值的任何区。

10.根据权利要求3至9中任一项所述的方法,其中,步骤C随后包括介于步骤C-I与步骤C-II之间的步骤C-I-bis,后者涉及:操作者或人工智能在步骤B中采集的图像中视觉地识别所述表面(30)中的一个或多个凹痕(32)、并且选择表面中包含所述一个或多个凹痕的一个或多个区域,并且其中,步骤C-II本身仅涉及这一个或多个区域。

11.一种用于检测能够反射光的表面(30)中的潜在凹痕(32)的系统,所述系统包括:

-装配有图像采集装置(14)和至少一个光源(16)的飞行无人机(12),所述至少一个光源的形状为在所述光源的纵向方向(D)上是长形的;以及

-数据处理装置(18),所述数据处理装置被配置用于执行根据权利要求1至10中任一项所述的方法的步骤C。

12.根据权利要求11所述的系统,其中,所述光源(16)的纵向范围(LS)大于由所述飞行无人机(12)排除所述光源(16)之外构成的组件的跨度、和/或所述飞行无人机(12)的转子(24)之间的最大间距(D_{max})的至少1.5倍。

13.一种其上存储有计算机程序产品的存储介质,所述计算机程序产品包括程序代码指令,当所述程序代码指令由根据权利要求11或12所述的系统的数据处理装置(18)执行时,使所述数据处理装置(18)实施根据权利要求1至10中任一项所述的方法的步骤C,所述系统被提供有能够反射光的表面(30)的一部分的、已经在根据权利要求1至10中任一项所述的方法的步骤B中采集的一系列图像。

检测能够反射光的表面中的凹痕的方法和系统及存储介质

技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于检测能够反射光的表面、比如飞行器的外表面(或蒙皮)中的凹痕的方法。这样的凹痕尤其可能是由坠落的物体或鸟击造成的。

背景技术

[0002] 飞行器的外表面中的凹痕通常是通过视觉检查来检测。在此情况下,关于形成机身或机翼的内部结构的可见结构元件,比如框架、纵梁或肋,已经使用测量工具(比如卷尺)来手动确认凹痕的位置。

[0003] 这样的操作涉及许多操作者的介入并且执行时间很长,尤其在必须架设脚手架来触及飞行器上部的情况下。

[0004] 在文献FR 3038109 B1(及其等同文件US 9830411 B2)中还提出了使用装配有用于检测和测量飞行器外表面中的凹痕的遥测装置的无人机。

[0005] 此方法可以显著节省时间并显著降低成本,但需要对要分析的表面的理想(即,无缺陷)几何形状有精确的先验知识,并且并不总是能够实现足够的测量精度。

发明内容

[0006] 本发明的一个目的是一种适合用于检查大尺寸(例如几百平方米)表面的方法,其能有效且快速地实施并且可以至少部分地克服上文提及的缺点。本发明的另一目的是允许实施这种方法的系统和计算机程序产品。

[0007] 为此,本发明提出了一种用于检测能够反射光的表面中的潜在凹痕的方法,该方法至少包括以下步骤:

[0008] -A) 提供系统,该系统包括装配有图像采集装置和至少一个光源的飞行无人机、以及数据处理装置,该至少一个光源的形状为在该光源的纵向方向上是长形的;

[0009] -B) 通过使飞行无人机沿着轨迹移动经过该表面来通过图像采集装置采集该表面的一部分的至少一系列图像,使得对于该系列中的每个图像,光源照亮该表面的对应部分;

[0010] -C) 操作数据处理装置来分析这一系列图像中的所有或部分图像中光源的镜面反射的形状,从而估计该表面中的任何凹痕的位置。

[0011] 通常,根据本发明的方法允许以尤其快速、有效且可靠的方式来分析非常大的尺寸、例如几百平方米的表面,而不需要对这些表面的形状的精确的先验知识。

[0012] 在需要这样做的情况下,根据本发明的方法允许分析步骤C的全部或一部分被自动化。当已知了待检查表面的理想几何形状时,可以至少粗略地完全或部分地以编程的方式来执行对飞行无人机的控制,使得方法的步骤B也可以自动化。

[0013] 在本发明的一个实施例中,对于这些系列图像或每一系列图像,飞行无人机的轨迹是使得图像采集装置的光轴保持在该表面的对应截面平面内,并且光源的取向是使得其纵向方向与该表面的所述截面平面相交。

[0014] 在本发明的一个实施例中,步骤C包括以下步骤:

[0015] -C-I) 对于该系列图像中的每个图像,操作该数据处理装置来:

[0016] • c1) 识别该图像中光源的镜面反射;

[0017] • c2) 根据在前一子步骤中识别的镜面反射,来估计该图像中光源的理想镜面反射的、与光源的纵向方向正交的中间位置,该中间位置对应于在该表面中不存在任何凹痕时这种镜面反射的中间位置;

[0018] ●c3) 确定飞行无人机与表面之间的距离;

[0019] ●c4) 确定该图像中光源的镜面反射的起始地的每个点在该表面上的位置;

[0020] ●c5) 至少根据对在图像中该光源的镜面反射的每个点与所估计的理想镜面反射的中间位置之间可能存在的任何距离的估计,来估计在镜面反射的起始地的每个点处该表面的局部梯度;

[0021] -C-II) 根据对于该表面的至少一个区域作为步骤C-I的结果获得的所有估计的局部梯度,操作该数据处理装置以估计可能存在于表面中的任何凹痕的位置。

[0022] 在本发明的一个实施例中,在子步骤c3中,数据处理装置确定图像中光源的镜面反射的表观纵向范围,该数据处理装置由此来推导飞行无人机与该表面之间的距离。

[0023] 在本发明的一个实施例中,子步骤c4包括操作数据处理装置来:

[0024] -根据该图像中所估计的理想镜面反射的中间位置来确定图像采集装置的光轴与以下平面之间的角度,该平面经过图像采集装置的光学中心并且包含该光源的离开理想表面的理想镜面反射的起始地的中间位置,该理想表面对应于该表面在没有凹痕的情况下将具有的形状;

[0025] -由此来推导在该表面的无凹痕区中光源的镜面反射的起始地的任何点处垂直于该表面的方向相对于参考平面的取向;

[0026] -由此来推导图像的每个点与该表面的对应部分的每个点之间的对应性。

[0027] 在本发明的一个实施例中,在子步骤c5中,数据处理装置根据图像中该光源的理想镜面反射的宽度的、由该数据处理装置获得的估计值来确定以下参数的最大极限值,该参数表示光源的宽度和该表面固有的潜在橘皮效应对该图像中光源的镜面反射的累积效应。

[0028] 在本发明的一个实施例中,步骤C-II包括:操作数据处理装置来沿着该表面的不同的截面平面来确定局部梯度的对应特征曲线,同时将指示沿着这些截面平面中的每个截面平面的局部梯度的绝对值总和的函数最小化,该特征曲线与在步骤C中获得的估计的局部梯度兼容。

[0029] 在本发明的一个实施例中,步骤C-II随后包括:操作数据处理装置来通过沿着该表面的不同截面平面中的每个截面平面来计算先前确定的局部梯度的对应特征曲线的积分,从而确定凹痕轮廓。

[0030] 在本发明的一个实施例中,步骤C-II随后包括:操作数据处理装置来根据先前针对该表面的不同截面平面确定的凹痕轮廓来形成该表面的至少一部分的深度图,并且接着识别深度大于该表面中的凹痕的预定阈值的任何区。

[0031] 在本发明的一个实施例中,步骤C随后包括介于步骤C-I与步骤C-II之间的步骤C-I-bis,后者涉及:操作者或人工智能在步骤B中采集的图像中视觉地识别该表面中的一个或多个凹痕、并且选择该表面中包含该一个或多个凹痕的一个或多个区域,并且其中,步骤

C-II本身仅涉及这一个或多个区域。

[0032] 本发明还涉及一种用于检测能够反射光的表面中的潜在凹痕的系统,该系统包括:

[0033] -装配有图像采集装置和至少一个光源的飞行无人机,该至少一个光源的形状为在该光源的纵向方向上是长形的;以及

[0034] -数据处理装置,该数据处理装置被配置用于执行上述类型的方法的步骤C。

[0035] 在本发明的一个实施例中,光源的纵向范围大于由飞行无人机排除光源之外构成的组件的跨度、和/或飞行无人机的转子之间的最大间距的至少1.5倍。

[0036] 本发明还涉及一种计算机程序产品,该计算机程序产品包括程序代码指令,当程序代码指令由上文所定义类型的系统的数据处理装置执行时,使数据处理装置实施所述方法的步骤C,该系统被提供有能够反射光的表面的一部分的、已经在根据上文所定义类型的方法的步骤B中采集的一系列图像。

附图说明

[0037] 通过阅读以非限制性实例的方式并且参照附图给出的以下描述,将更好地理解本发明,并且本发明的其他细节、优点和特征将变得清楚,在附图中:

[0038] 图1是用于实施检测能够反射光的表面中的潜在凹痕的方法的系统的示意性前视图,该系统包括装配有图像采集装置和光源的飞行无人机、以及数据处理装置;

[0039] 图2是图1的系统的示意性顶视图;

[0040] 图3是图1的系统的示意性侧视图;

[0041] 图4是能够反射光的表面的示意性透视图;

[0042] 图5是在实施该方法的步骤期间图4的表面和图1的系统的示意性部分侧视图,该步骤包括通过该系统来采集该表面的一部分的至少一系列图像;

[0043] 图6是对应于图5在实施该方法步骤期间图4的表面和图1的系统的截面示意图;

[0044] 图7是类似于图6的视图;

[0045] 图8是对应于图5在实施该方法步骤期间图4的表面和图1的系统的示意性部分侧视图;

[0046] 图9是对应于图5在实施该方法步骤期间图4的表面和图1的系统的示意性部分顶视图;

[0047] 图10是对应于图5在实施该方法步骤期间所采集的一系列图像中的一个图像的部分视图;

[0048] 图11是图10的图像在该方法的步骤的背景下在由数据处理装置应用的处理之后的视图;

[0049] 图12类似于图11的视图,展示了该方法的另一步骤;

[0050] 图13在上部分中包括来自在对应于图5的方法步骤期间旋转了90度后采集的一系列图像中的图像集合,并且在下部分中包括在这个图的上部分中的平面A-A内该表面上的局部梯度值相对于该表面上的曲线横坐标的曲线图,这些梯度值是在该方法的步骤背景下由数据处理装置估计的;

[0051] 图14是在图13的上部分的平面A-A内该表面中的凹痕值相对于该表面上的曲线横

坐标的曲线图,这些凹痕值是在该方法的步骤背景下由数据处理装置估计的;

[0052] 图15是三维曲线图,展示了在方法结束时重建的表面部分的图;

[0053] 图16是根据本发明的优选实施例的方法的流程图。

[0054] 在所有这些附图中,相同的附图标记可以指示相同或相似的元件。

具体实施方式

[0055] 现在继续参见图16的流程图来描述根据本发明的一个实施例的用于检测能够反射光的表面中的凹痕的方法。

[0056] 此方法的第一步骤A包括提供系统10。在图1至图3中可见的系统10包括飞行无人机12和数据处理装置18,该飞行无人机装配有图像采集装置14和光源16。

[0057] 图像采集装置14例如是数字摄像机或数字照相机。飞行无人机是例如可从市场上获得的具有图像采集装置14的产品。

[0058] 光源16具有长形形状、优选地为纵形,从而限定其纵向方向D。

[0059] 在所展示的实施例中,光源16由纵向的一排照明元件20(例如,由在纵向方向D上为长形的形状、固定至飞行无人机12的底盘22的支撑件(比如棒或梁)所支承或集成在该支撑件中的发光二极管(LED))构成。作为变体,可以设置平行的若干排照明元件。作为另外的变体,光源16可以由单一发光元件或此类型的彼此平行的若干照明元件构成,该单一发光元件的形状是在纵向方向D上为长形的。光源16(不是非常定向,以允许照亮待分析的表面)具有中心发射方向ED(图3),该中心发射方向相对于飞行无人机12的水平面H向下倾斜例如30度至60度之间的角度 ψ ,例如45度。在飞行无人机12包括共面转子24的所展示示例中,水平面H简单地定义为转子的平面。更一般地,水平面H是与飞行无人机12在悬停飞行中飞行时可能采取的可能姿态对应的平面。根据该方法的参数、尤其待分析的表面的形状的参数以及在实施该方法期间飞行无人机12与这个表面之间的平均既定距离的参数来选择中心发射方向ED和光源16所发射的光束的发散度。

[0060] 光源16的纵向范围 L_{LS} 优选地大于由与飞行无人机12排除光源16之外自身构成的组件的跨度,并且等于例如1米(图1和图2)或更大。在本发明的一些实施例中,此纵向范围 L_{LS} 至少等于飞行无人机12的转子24之间的最大间距 D_{max} (图2)的1.5倍。与上述跨度相比而言大的纵向范围 L_{LS} 优化了该方法的操作有效性,同时限制了飞行无人机12的大小并且因此限制了其成本,如下文中将变得更清楚。这排照明元件20包括例如多个照明元件,使得照明元件20成对地相隔少于30厘米(cm),此间距 μ 优选地小于1厘米(图1)。照明元件的高线性密度允许待检查表面被良好地均匀照亮。当然,尤其可以根据待检查的表面的尺寸来优化这些参数的选择。此外,电池26附接至飞行无人机12以对光源16供应电力(图1至图3)。

[0061] 最后,数据处理装置18是带有程序的通用市售装置,比如计算机、平板电脑或智能手机,该程序被设计用于实施该方法;或者是专门被设计用于实施根据本发明的方法的设备。在本发明的一些实施例中,数据处理装置18可以部分地或完全被携带在飞行无人机12上。在所有情况下,数据处理装置18能够例如经由无线连接与飞行无人机12所装配的图像采集装置14交换数据。数据处理装置18可以有利地被设计用于控制飞行无人机12的飞行或与控制飞行无人机12的控制单元对接。

[0062] 图4展示了待检查的表面30的一部分。因此,当表面30具有足够的光泽而允许在此

表面上辨别光源16的镜面反射时,根据本发明的方法变得适用。在此方面,该方法优选地适用于镜面光泽度至少等于10% (在标准ISO 2813的含义内) 的表面。应注意的是,根据本发明的方法可以适用于具有“橘皮效应”的表面,此效应是例如由于可以用来涂覆此类表面的涂料的类型,如将在下文中变得更清楚。

[0063] 本发明适用于要检查的、表现出不同几何形状的表面。然而,在本发明的所展示实施例的背景下,待检查表面30 (不考虑可能存在的任何凹痕) 的几何形状是使得在与某个方向正交的任何截面平面内,确定在横坐标点s处垂直于该表面的向量n与关于正交参考系统{X,Y,Z}所限定的参考平面、比如水平面(X,Y)所成的角度 θ 相对于所述截面平面内的曲线横坐标值s (图4) 的关系的函数 $\theta(s)$ 是双射函数。

[0064] 因此,表面30是具有圆形截面的柱形形状的表面,或者在变体中,该表面是具有椭圆形或卵形截面的柱形形状的表面,或者更一般地,具有可以局部地近似为回转柱体的环形截面。在此情况下,实施该方法时所考虑的这一个或多个截面平面优选地是横向于该表面的轴线AX的平面,而限定了角度 θ 和曲线横坐标值s的水平参考平面包含了轴线AX。

[0065] 在根据本发明的方法的一种特定应用中,表面30是飞行器的外表面、尤其是飞行器机身的外表面。

[0066] 在本发明的其他实施例中,表面30是锥形形状的表面,在此情况下,为了实施该方法,表面30局部地近似为回转柱体。

[0067] 参见图5至图8,根据本发明的方法包括步骤B:通过使飞行无人机12沿着轨迹T1或T3移动经过表面30而使图像采集装置14的光轴40 (图5和图7) 保持在表面30的对应截面平面A-A (例如,图6和图7的截面平面) 内,并且通过将光源16的取向保持为使得其纵向方向D与所述截面平面A-A相交,并且使得对于系列中的每个图像 $I(1) \cdots I(n)$,光源16照亮该表面的对应部分 $P(1) \cdots P(n)$,来通过图像采集装置14采集表面30的一部分 $P(1) \cdots P(n)$ 的至少一系列图像 $\{I(1) \cdots I(n)\}$ 。在所展示的示例中,光源16的取向保持为使得其纵向方向D与所述截面平面A-A正交。

[0068] 在本发明的优选实施例中,在采集给定的一系列图像 $\{I(1) \cdots I(n)\}$ 期间,飞行无人机12的轨迹是被包含在横向于表面30的轴线AX的截面平面A-A内的轨迹。

[0069] 在适用情况下,参见图5,相继采集若干系列的图像时飞行无人机12的总体轨迹包括分别被包含在横向于表面30的轴线AX的截面平面A-A内的第一轨迹部分T1和T3、和第二轨迹部分T2,第二轨迹部分将第一轨迹部分T1和第三轨迹部分T3成对地相连、例如被定向为基本上平行于表面30的轴线AX。考虑到有效性,第一部分T3以与第一部分T1相反的方向被覆盖,并且因此与后者交替地执行。

[0070] 横向于轴线AX的截面平面 (在该平面中限定了第一轨迹部分T1和T3) 彼此相隔一定距离,该距离小于或等于图像采集装置14所看到的光源16的镜面反射SR在表面30上的纵向范围 L_{SR} (图5、图8、和图9)。因此,镜面反射SR扫过整个表面30或表面的某一区域。

[0071] 该方法进一步包括步骤C,该步骤包括:通过数据处理装置18来分析该系列图像中的所有或部分图像中光源16的镜面反射ISR的形状,从而估计表面30中任何凹痕32的位置。

[0072] 更具体地,步骤C包括步骤C-I,该步骤包括:对于这些系列图像 (或每一系列图像) 中的每个图像 $I(1) \cdots I(n)$,操作数据处理装置18来执行以下子步骤c1至c5。

[0073] 第一子步骤c1包括:例如通过将图像分段来识别图像中光源16的镜面反射 (图

10)。

[0074] 为此,数据处理装置将例如实施自适应阈值算法。图11展示了被如此分段的对应图像,并且因此揭示了如此确定的镜面反射ISR。

[0075] 第二子步骤c2包括:根据在前一步骤中识别的镜面反射ISR来估计该图像中光源16的理想镜面反射的、与光源16的纵向方向D正交的中间位置,该中间位置对应于在表面30中不存在任何凹痕时这种镜面反射的中间位置。

[0076] 为此,数据处理装置18例如使用线性回归来确定平行于光源16的纵向方向D定向的镜面反射ISR的中线ML(图12)。当易于影响表面30的任何凹痕32的大小与光源16在表面30上的镜面反射SR的纵向范围 L_{SR} (图5、图8和图9)相比较小时,这种线可以比作光源16的理想镜面反射的中间位置。

[0077] 第三子步骤c3包括确定飞行无人机12与表面30之间的距离 R_c 。更具体地,将距离 R_c 定义为图像采集装置14的光学中心OC与表面30之间的距离(即,光学中心OC与表面30上离光学中心OC最近的那个点之间的距离)。

[0078] 为此,数据处理装置18确定该图像中光源16的镜面反射ISR的表观纵向范围 L_{ISR} (图11),并且由此来推导飞行无人机12与表面30之间的距离 R_c (图6)。参见图8和图9,可以使用对于几何性质的简单考虑因素,根据光源16的纵向范围 L_{LS} 来推导光源16的镜面反射ISR在表面30上的起始地SR的纵向范围 L_{SR} 。“镜面反射离开表面30处的起始地”简单地是指在图像中形成镜面反射ISR的光射线在表面30上所起始的点。

[0079] 在图像采集装置14包括相对于光源16居中的单一相机的所展示示例中,镜面反射ISR在表面30上的起始地SR的纵向范围 L_{SR} 等于光源16的纵向范围 L_{LS} 的一半。已知了镜面反射ISR在表面30上的起始地SR的纵向范围 L_{SR} 以及图像采集装置14的固有特性,比如焦距、光学中心OC的位置(图7)以及畸变参数(如果有的话),就可以用先前确定的在图像中该光源16的镜面反射ISR的表观纵向范围 L_{ISR} 来推导出飞行无人机12与表面30之间的距离 R_c 。

[0080] 可以在实施第二子步骤c2之前、期间、或之后来执行第三子步骤c3。

[0081] 第四子步骤c4包括:确定图像中光源16的镜面反射ISR的起始地SR的每个点在表面30上的位置。

[0082] 在所展示的实施例中,以一种方式来实施此子步骤c4,如下文将更具体地参见图7来描述。

[0083] 根据图像中理想镜面反射的估计中间位置(在所展示的示例中对应于线ML)、飞行无人机12与表面30之间的距离 R_c 、以及图像采集装置14的特征(焦距、感光点的尺寸、光学中心OC的位置等)这些起始数据,数据处理装置18确定图像采集装置14的光轴40与平面P之间的角度 γ ,该平面被定义为经过该图像采集装置的光学中心OC并且包含光源16的在理想表面31上的理想镜面反射的起始地的中间位置的平面,该理想表面对应于表面30没有凹痕时将具有的形状。根据定义,理想镜面反射的起始地与光源16在表面30的任何无凹痕部分中的镜面反射ISR的起始地SR重合。

[0084] 因此,平面P包括虚拟光线 R_I ,其将形成由装置14接收的、在表面30没有变形时光源16的镜面反射(图7)。在表面30的任何无凹痕部分中,当图像采集装置14的光轴40与光源16的平均纵向轴线之间的距离同飞行无人机12与表面30之间的距离 R_c 相比可忽略不计时,这些光线 R_I 定向在基本上垂直于表面30的平面P内。

[0085] 此外,通过飞行无人机12所装配的陀螺仪或等效装置来确定光轴40相对于水平面(X,Y)的取向 ϕ 。

[0086] 通过将光轴40与包含虚拟光线 R_L 的平面P之间的角度 γ 同光轴40的倾角 ϕ 相加,数据处理装置18确定对应的角度 θ 并且由此使用 θ 与s之间的双射关系来推导出离开表面30的理想镜面反射的起始地的中间位置的横坐标值s。

[0087] 数据处理装置18可以由此来推导图像的所有点在表面30上的位置,并且尤其由此来推导图像中光源16的镜面反射ISR的每个点在表面30上的起始位置。因此,数据处理装置建立图像的每个点与表面30的对应部分的每个点之间的对应性。

[0088] 第五子步骤c5包括:至少根据对图像中光源16的镜面反射ISR的每个点与理想镜面反射的中间位置(对应于线ML)之间可能存在的任何距离的估计,来估计在被图像采集装置14看到的镜面反射SR的每个点处该表面30的局部梯度。

[0089] 参见图6,子步骤c5的实施依赖于以下反射模型:表面30被近似为如上文解释的回转柱体, R_a 表示在给定的截面平面内表面30的局部曲率,并且可回想 R_c 表示的是飞行无人机12与表面30之间的距离。角度 α 表示表面30(可能有凹痕)与理想(无凹痕)表面之间的角度。角度 ϵ_c 是当表面30中存在凹痕32时,图像采集装置14看到的镜面反射SR在所涉及的截面平面内产生的真实光线 R_R 与在该凹痕不存在的情况下图像采集装置14看到的镜面反射将会在所涉及的截面平面内产生的理想光线 R_L 之间的角度。该理想光线定向在基本上垂直于理想表面31(对应于表面30在没有凹痕32时将具有的形状)的平面P内,如上文所解释的。距离 Δ 被定义为真实光线 R_R 在表面30上所起始的点,和理想光线 R_L 在理想表面31上所起始的点。

[0090] 通过围绕平均角 β 来分布取向 Ω ,将光源16的宽度(与其纵向方向D正交)和表面30上可能存在的任何橘皮效应一起建模。可以容易地证明:

$$[0091] \quad \alpha = \beta + \Omega = \epsilon_a + \epsilon_c = \Delta \times \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} \right)$$

[0092] 光源16的宽度和可能存在的任何橘皮效应所引起的偏差 Ω 可以被认为是有限界的:

$$[0093] \quad \Omega \in [-\Omega_{\max}; +\Omega_{\max}]$$

[0094] 应注意的是,在表面30呈回转柱体的形式或是可以近似为回转柱体的形状(不考虑可能存在的任何凹痕)、并且光源16为纵形且基本上平行于回转轴线AX的情况下,镜面反射的畸变在一阶上仅取决于角度 α ,而表面30在轴线AX的方向X上的倾斜度仅在二阶上产生影响。

[0095] 数据处理装置18通过估计图像中光源16的理想镜面反射(对应于在表面30中没有凹痕时将会感知到的镜面反射)的宽度来确定最大偏差 $\Omega_{\max}$ 的估计值。为此,数据处理装置18确定图像中光源16的镜面反射ISR的最大连接部分ISR-C0的中值宽度 $1_{\text{ISR-C0}}$ (图11)。由于此中值宽度 $1_{\text{ISR-C0}}$ 被认为是对理想镜面反射的宽度的估计,因此数据处理装置用其来推导最大偏差 $\Omega_{\max}$ 的估计值,该估计值等于中值宽度 $1_{\text{ISR-C0}}$ 除以飞行无人机12与表面30之间的距离 R_c 的两倍。

[0096] 最后,数据处理装置18估计该图像中光源16的镜面反射ISR的每个点与理想镜面反射的中间位置(对应于线ML(图12))之间可能存在的任何距离 Δ 。

[0097] 鉴于 $\Omega \in [-\Omega_{\max}; +\Omega_{\max}]$ 以及 $\beta + \Omega = \Delta \times (1/R_a + 1/R_c)$,数据处理装置18由此来推

导表面30的局部梯度 β 的下限 $\beta_{\min}$ 和上限 $\beta_{\max}$,该梯度等于表面30的凹痕对于曲线横坐标值的微分: $\beta = \partial r / \partial s$

[0098] 在已经对这些系列(或每个系列)中的所有图像实施了步骤C-I之后,数据处理装置18拥有一组关于在表面30上的、在图像采集步骤B的过程期间反射了光源16的镜面反射至少一次的每个点处,表面30的局部梯度 β 的不等式。通过展示,图13的上部分是如此采集的图像的集合,示出了在表面30的给定区域中反射了光源16的镜面反射的点的集合。

[0099] 在随后的方法步骤C-II中,数据处理装置18依赖于在步骤C-I结束时获得的关于表面30的至少一个区域的局部梯度的这组估计值,来估计可能存在于表面30中的任何凹痕的位置。

[0100] 为此,在所展示的优选示例中,数据处理装置18执行优化任务,以沿着表面的不同的平行截面平面来确定梯度 $\partial r / \partial s$ (图13:下部分)的对应特征曲线(兼容在步骤C-I中限定的最小梯度值 $\beta_{\min}$ 和最大梯度值 $\beta_{\max}$),同时将指示沿着每个截面平面的梯度总和的函数最小化(就绝对值而言)。数据处理装置执行的优化例如涉及以下积分:

$$[0101] \quad \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \left\| \frac{\partial r}{\partial s} \right\|^2 ds$$

[0102] 沿着所涉及的每个截面平面,数据处理装置18通过计算先前确定的局部梯度的积分(例如,假设在积分域的终点处没有凹痕)来确定对应的凹痕轮廓。图14展示了针对图13的上部分中限定的截面平面A-A如此获得的凹痕曲线 Δr 。

[0103] 通过并置在相邻的截面平面上的所有重建的凹痕轮廓,数据处理装置18确定表面30或其至少一部分的深度图,如图15所示。

[0104] 对于给定的一系列图像,在步骤C-II中考虑的截面平面的数量例如等于这系列图像中光源16的镜面反射ISR的最小纵向定义(以像素计)。

[0105] 数据处理装置例如应用了空间滤波来减少或消除与并不对应于待检测的凹痕的大尺寸变形相对应的测量噪音和低频。

[0106] 最后,数据处理装置18通过将所述深度图中对应于超过预定阈值的深度的任何区比作这样的凹痕,来列出表面30中可能存在的任何凹痕32。

[0107] 通常,在该方法的任何阶段,本领域技术人员应了解的是,应用常规降噪和信号优化技术可能是合适的。

[0108] 本领域技术人员还应了解的是,某些步骤的顺序可以与上文描述的顺序不同。例如,步骤B和C-I可以并行执行,其中数据处理装置18对表面30的给定截面平面实施步骤C-I的数据处理操作,而同时在采集该表面的另一截面表面的一系列图像,或者在同一系列图像内,数据处理装置18可以对给定图像实施步骤C-I的数据处理操作,而同时在采集另一系列图像。

[0109] 此外,作为变体,飞行无人机12可以装配有多个图像采集装置,例如位于光源16的相反两端处的两个装置。因此,每个装置感知光源16的镜面反射,所述镜面反射沿着待检查表面30是偏离的,这意味着与用单一图像采集装置实现的效果相比,增强了针对飞行无人

机沿着给定截面平面的行程所分析的表面部分。

[0110] 另外,飞行无人机12可以装配有一个或多个光源(每个光源的形状是纵形的),以同时产生离开待分析表面的不同部分的多个镜面反射。

[0111] 飞行无人机为了采集一个或多个系列图像所遵循的轨迹可以与上文描述的轨迹不同。通常,飞行无人机为了采集一系列图像(或每一系列图像)所采取的轨迹(或在适用情况下为轨迹的第一部分)优选地是根据表面30的最大曲率平面限定的,而在适用的情况下,第二轨迹部分沿着该表面的较小曲率平面限定。因此,在所展示的示例中,限定第一轨迹部分T1和T3的截面平面横向于表面30,并且因此是表面30具有弯曲(大致圆形)截面处的平面,而第二轨迹部分T2是平行于表面的轴线AX限定的,在此方向上,表面30具有零曲率或较小曲率。

[0112] 本领域技术人员还应了解的是,根据沿着给定截面平面对表面30的期望空间采样来调整图像捕捉频率,这种采样速率取决于表面的曲率以及可能影响表面30的凹痕的尺寸。

[0113] 可选地,该方法可以包括介于步骤C-I与C-II之间的步骤C-I-bis,后者涉及:操作者在步骤B中采集的图像中视觉地识别表面30中的一个或多个凹痕32、并且选择包括这一个或多个凹痕的一个或多个表面区域,使得此后由数据处理装置18实施的步骤C-II本身仅涉及这一个或多个区域。因此,可以减少步骤C-II所需的计算时间。替代性地,可以使用先前训练过的人工智能来执行这样的步骤C-I-bis,以识别表面中凹痕的镜面反射变形特征。

[0114] 此外,通过利用将表面30的局部法线 n 的取向 θ 与此表面上沿给定截面平面的曲线横坐标值 s 相关联的 $\theta(s)$ 函数的双射性质来实施上文描述的子步骤c4。

[0115] 在变体中,子步骤c4可以依赖于用于在表面30上重新对准所采集图像的其他方法,特别是不需要表面30的形状为使得上述 $\theta(s)$ 函数是双射函数的方法。为此,子步骤c4依赖于例如在所采集的至少一部分图像中识别表面30上存在的图案。在表面30是飞行器外表面的情况下,这样的图案例如由两排铆钉构成。作为另外的变体,子步骤c4可以依赖于光源16发出的结构光以及对于此光在表面30上形成的结构反射的分析。

[0116] 在本发明中,所采集的图像是表面的被照亮部分的反射图像,并且分析所采集图像中此长形光源的镜面反射(即分析反射图案)并且测量梯度可以对小深度凹痕敏感。通常,根据本发明的方法允许以尤其快速、有效且可靠的方式来分析非常大的尺寸、例如几百平方米的表面,而不需要对这些表面的形状的精确的先验知识。

[0117] 根据本发明的方法允许所有的分析步骤C-I、C-II以及在适用情况下C-I-bis都是自动化的。当已知了待检查表面30的理想几何形状时,可以至少粗略地完全或部分地以编程的方式来执行对飞行无人机的控制,使得方法的步骤B也可以自动化。

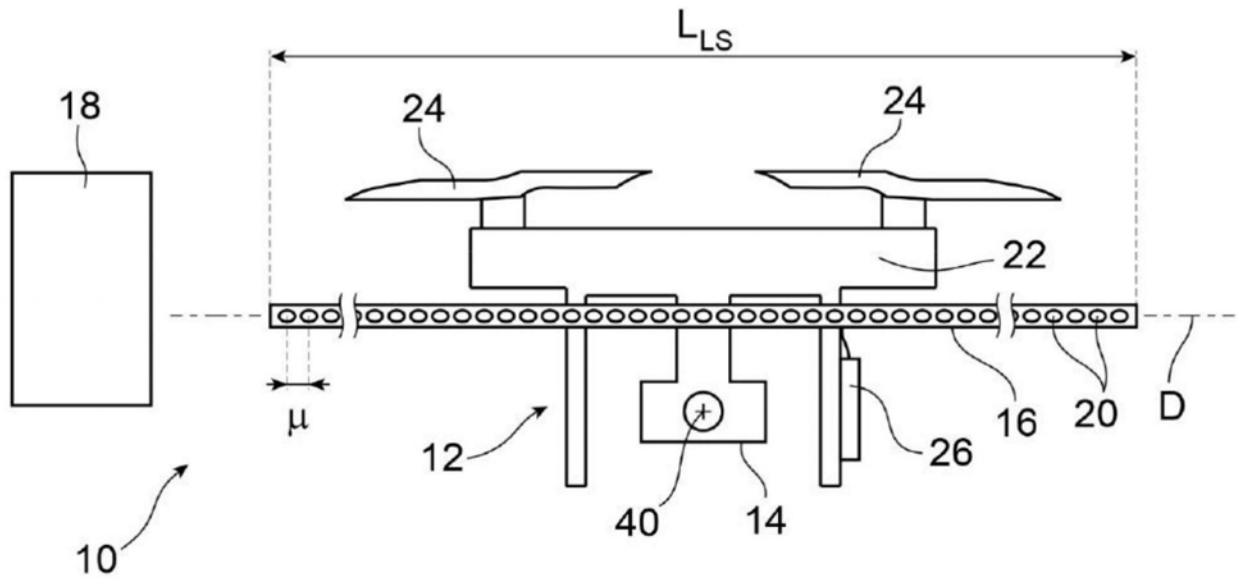


图1

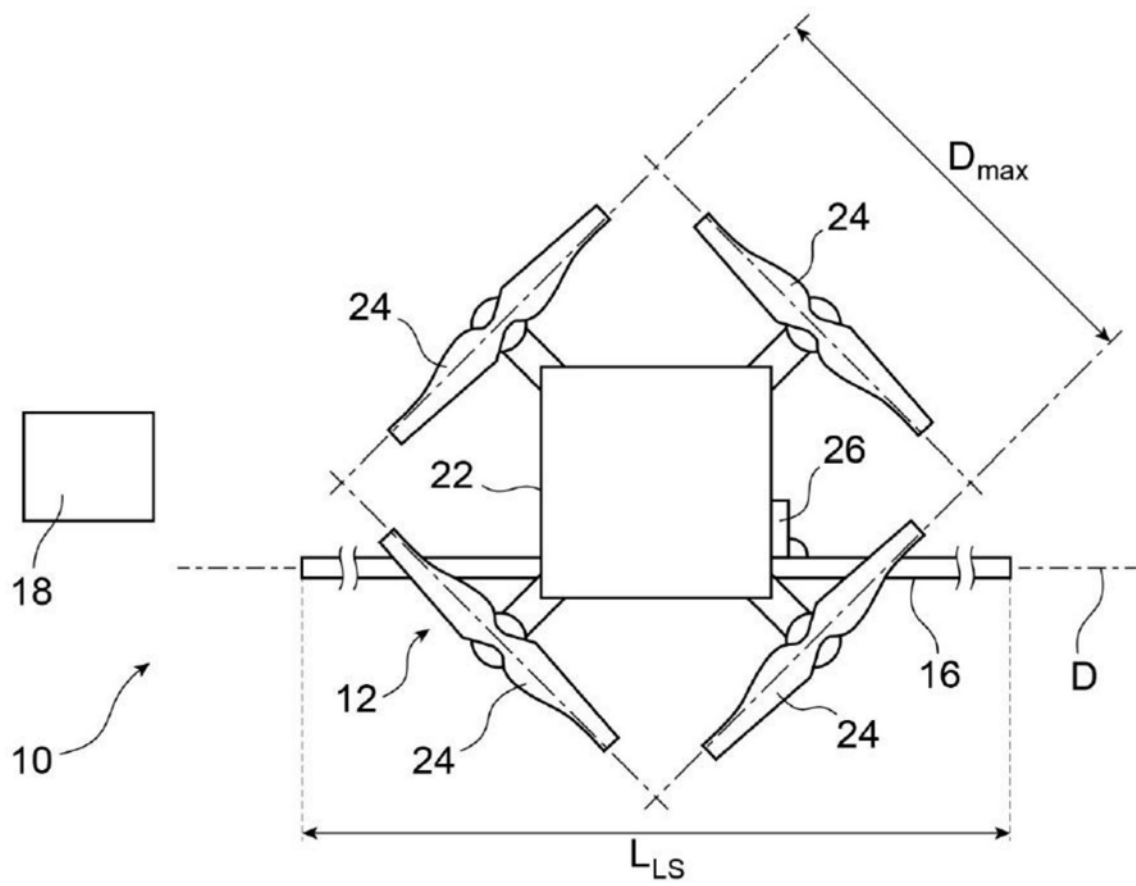


图2

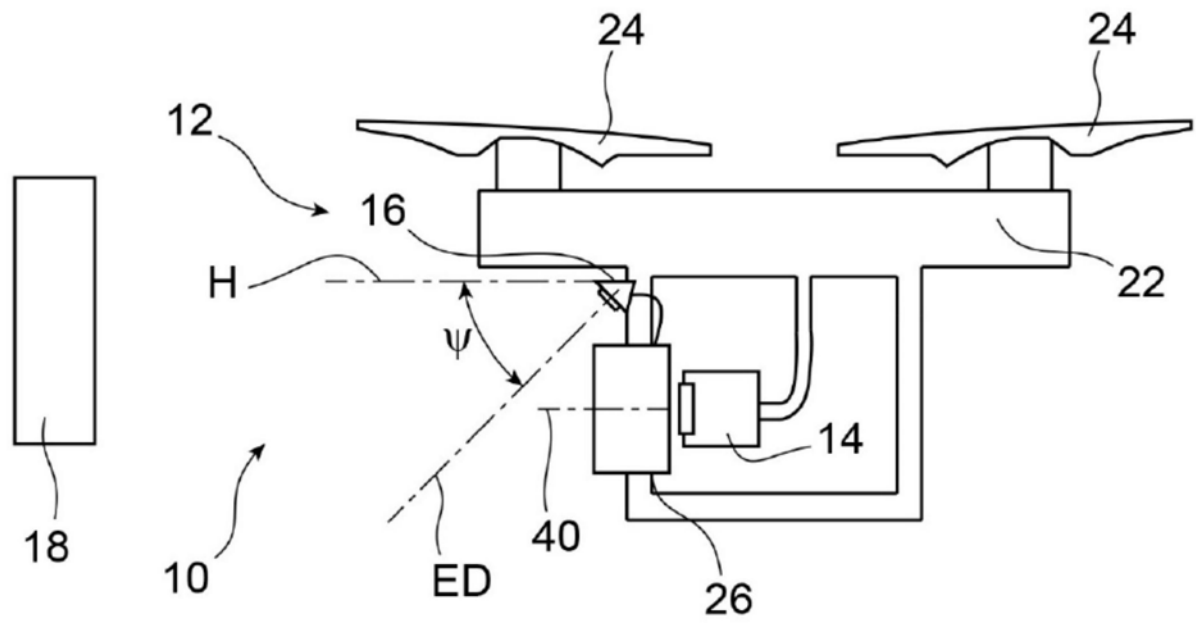


图3

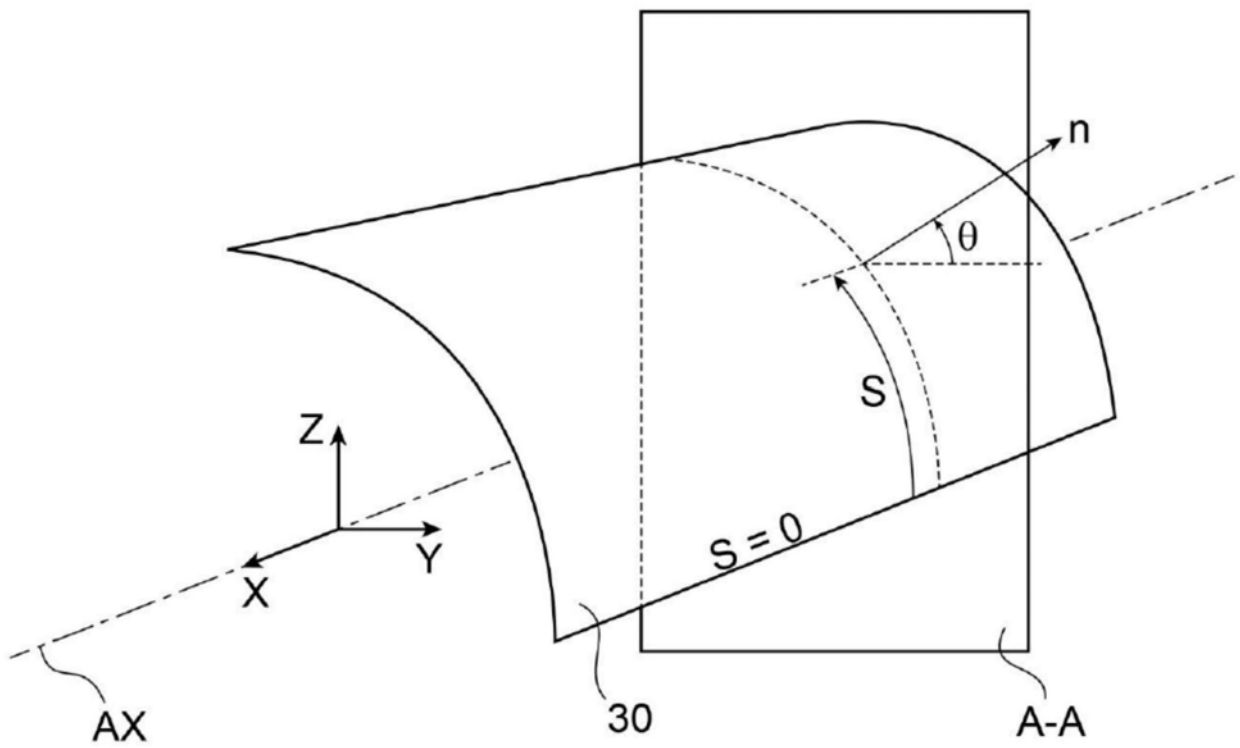


图4

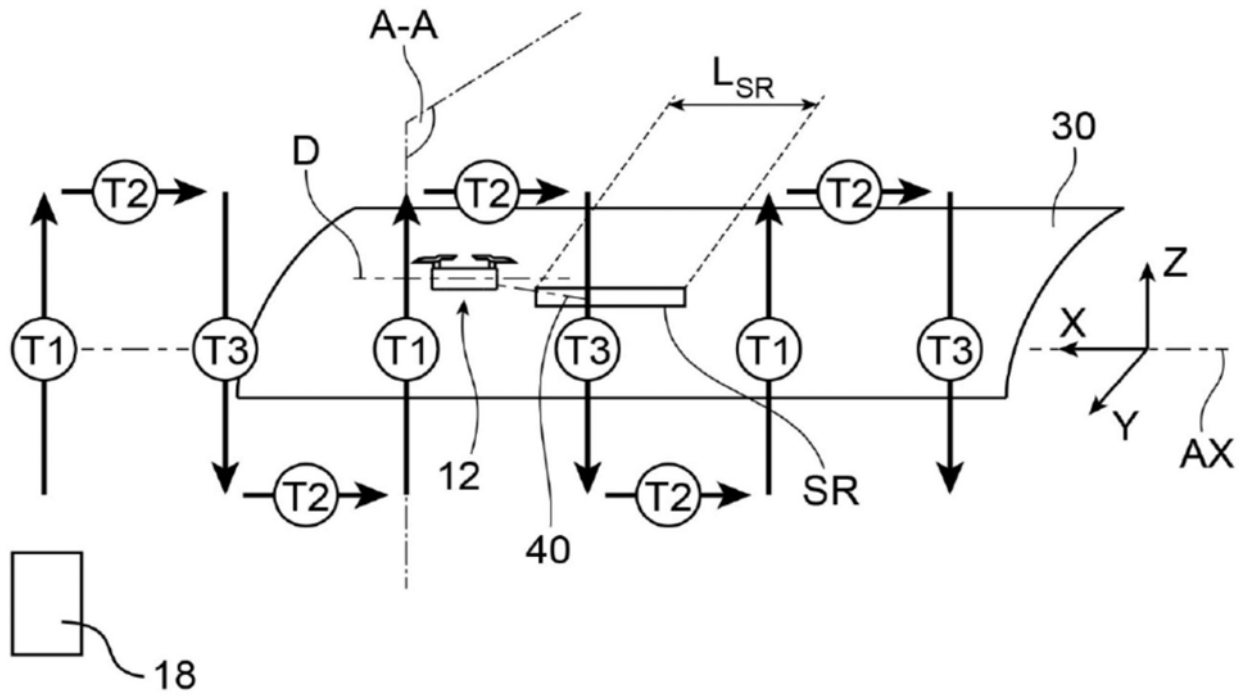


图5

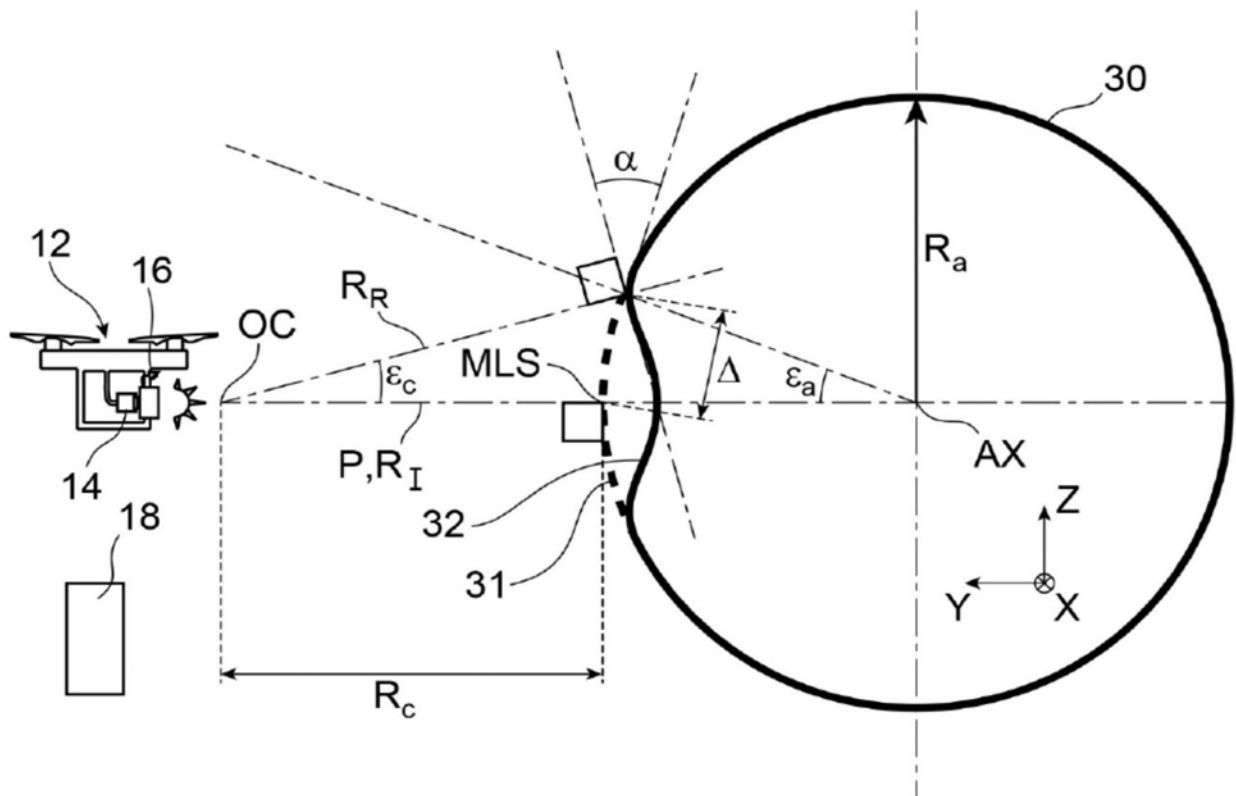


图6

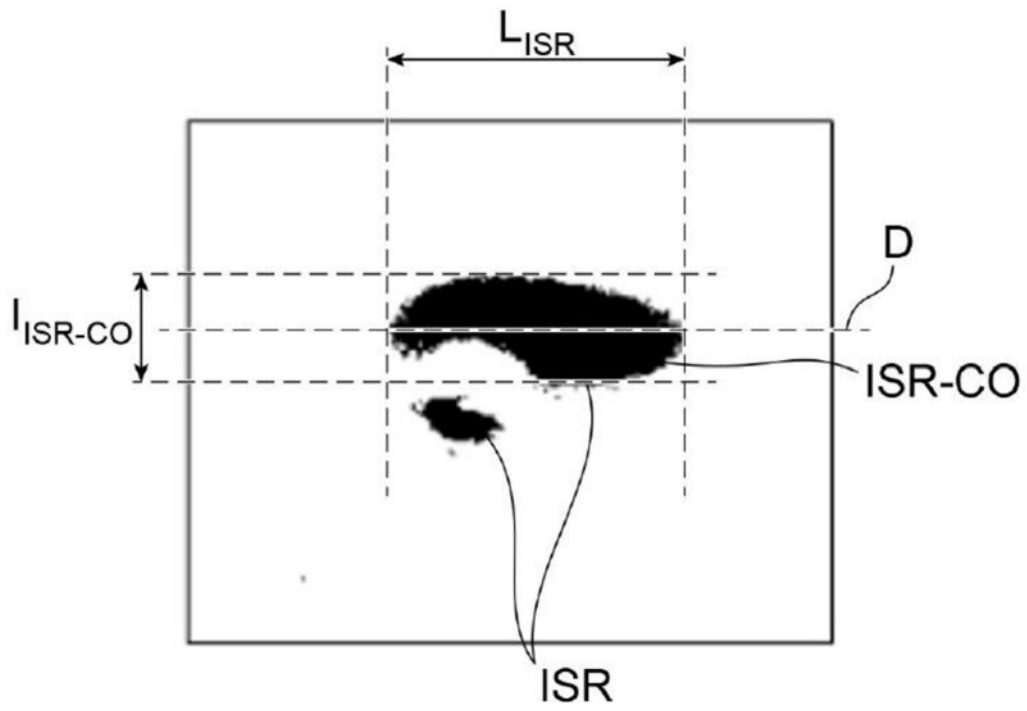


图11

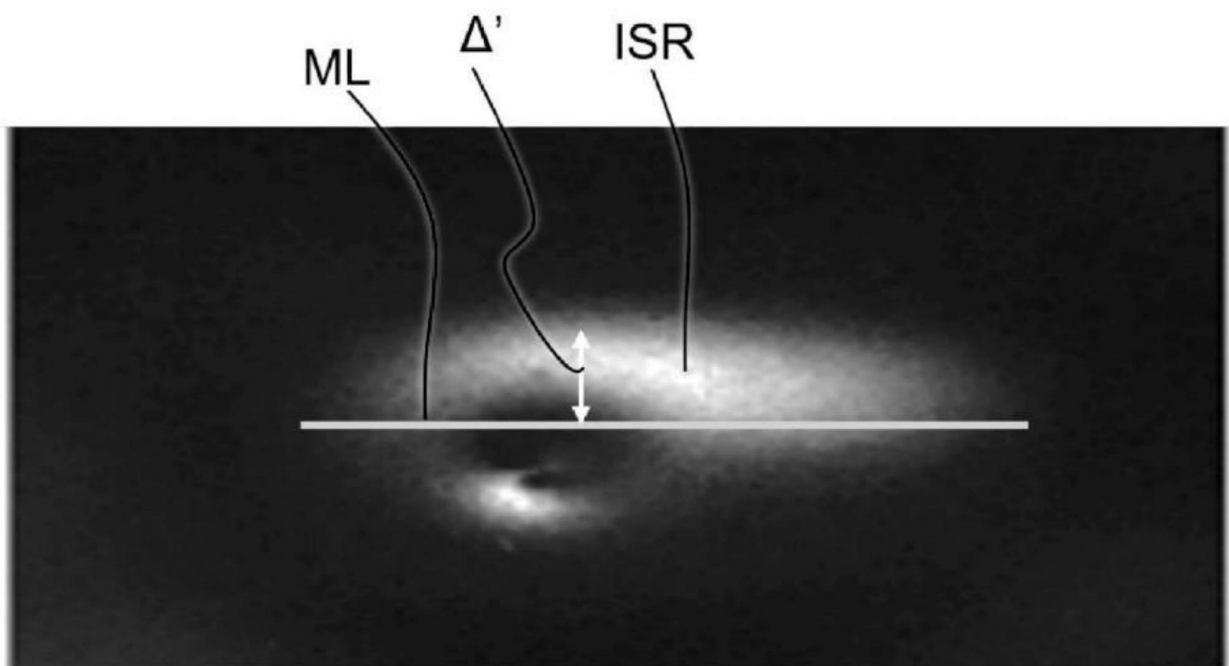


图12

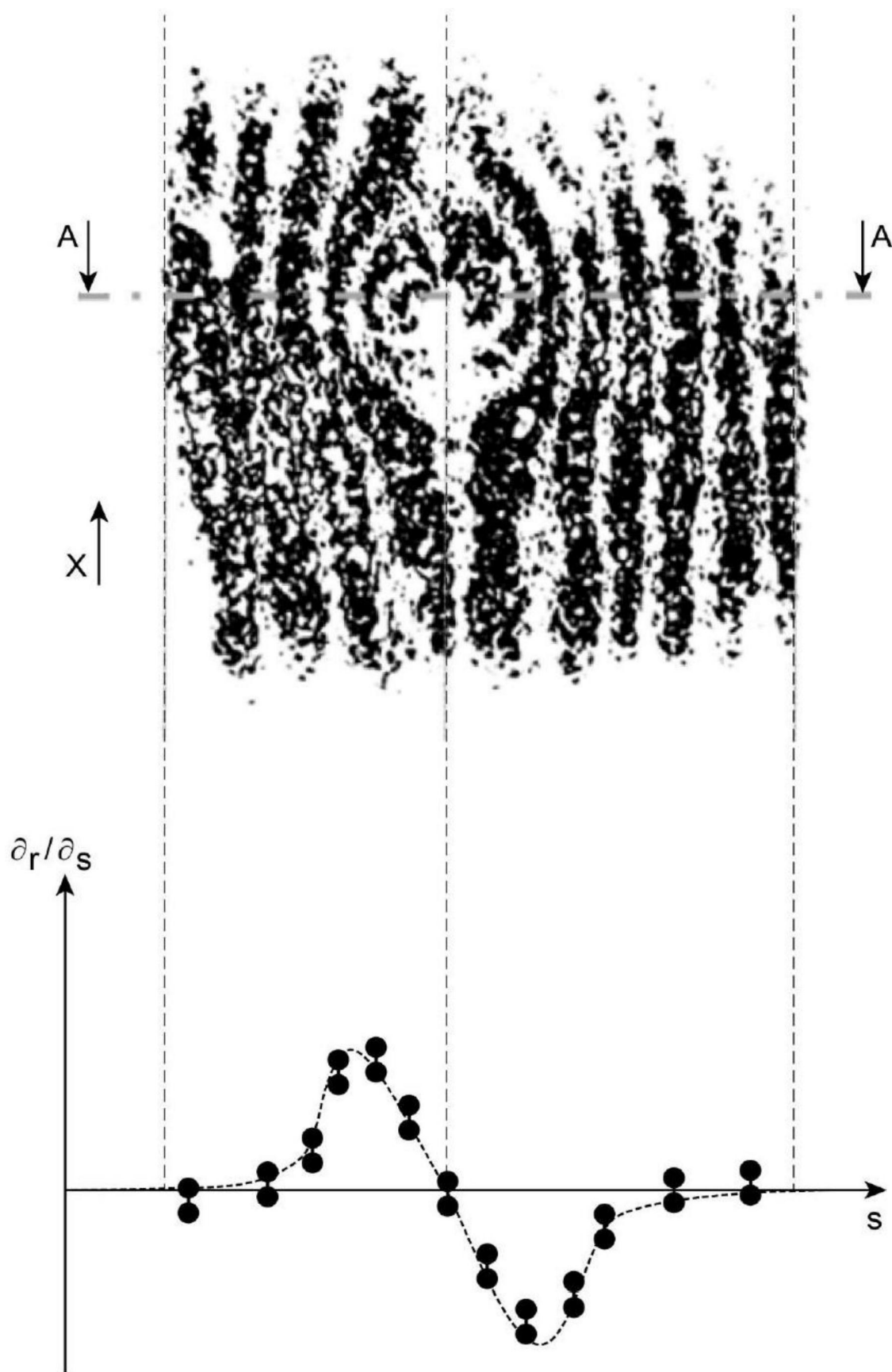


图13

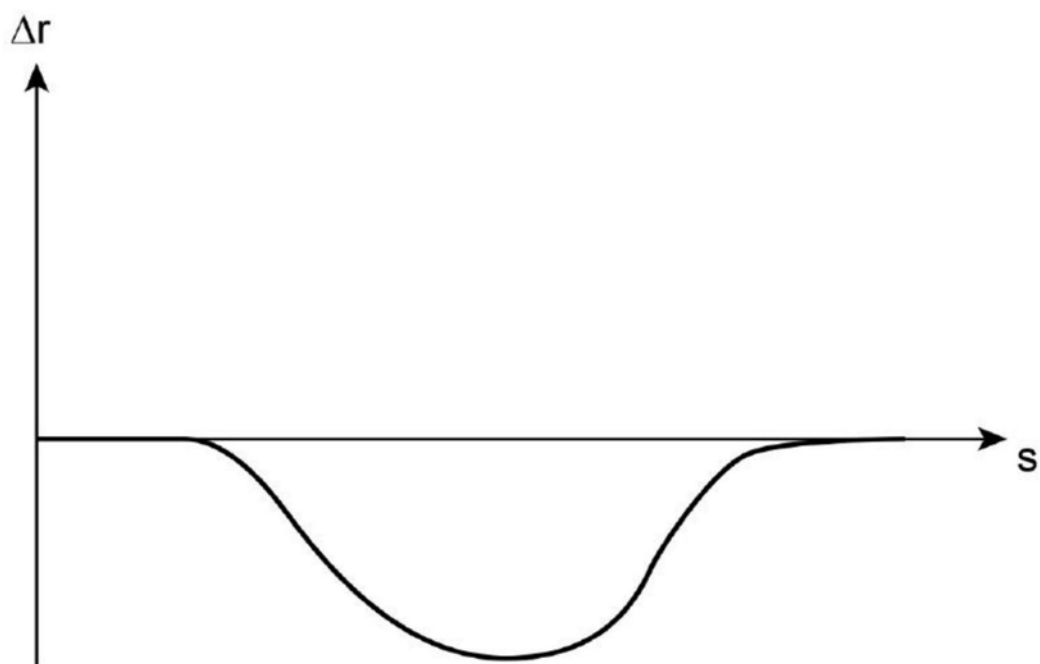


图14

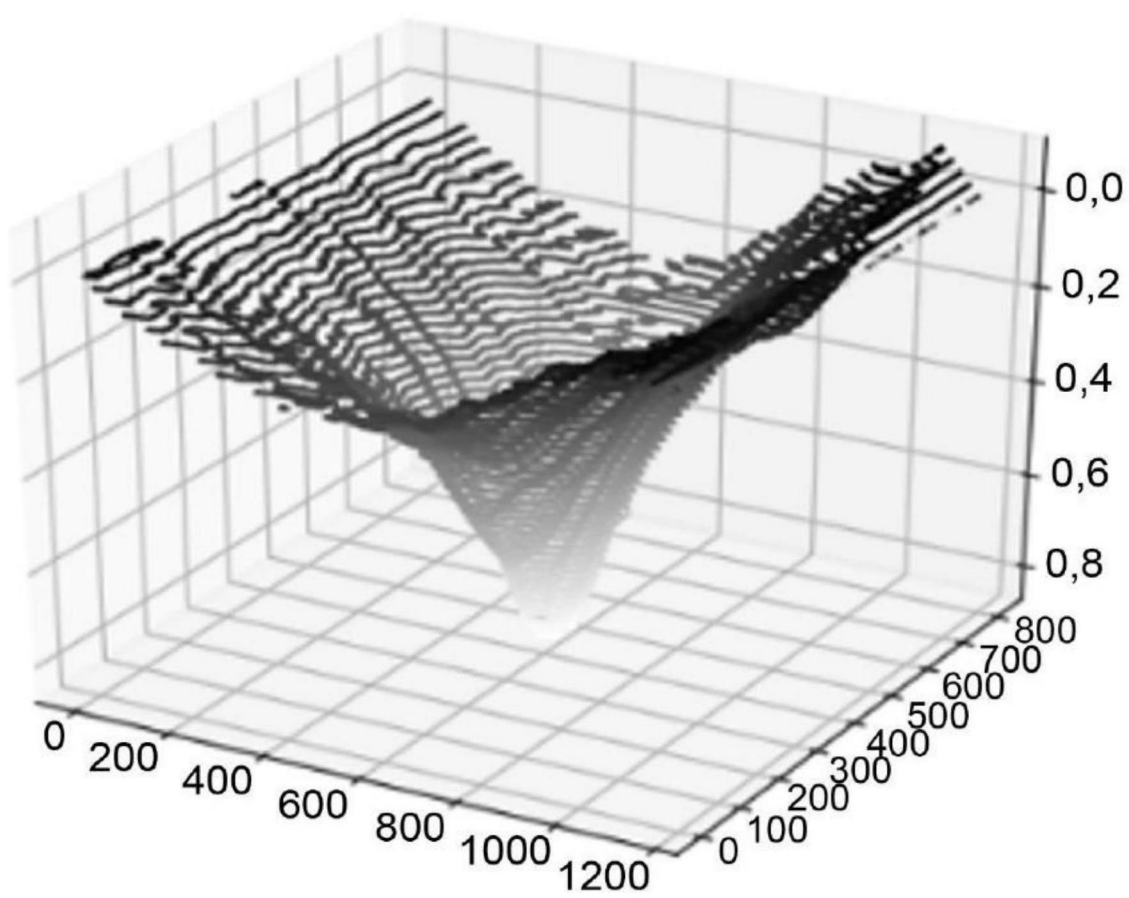


图15

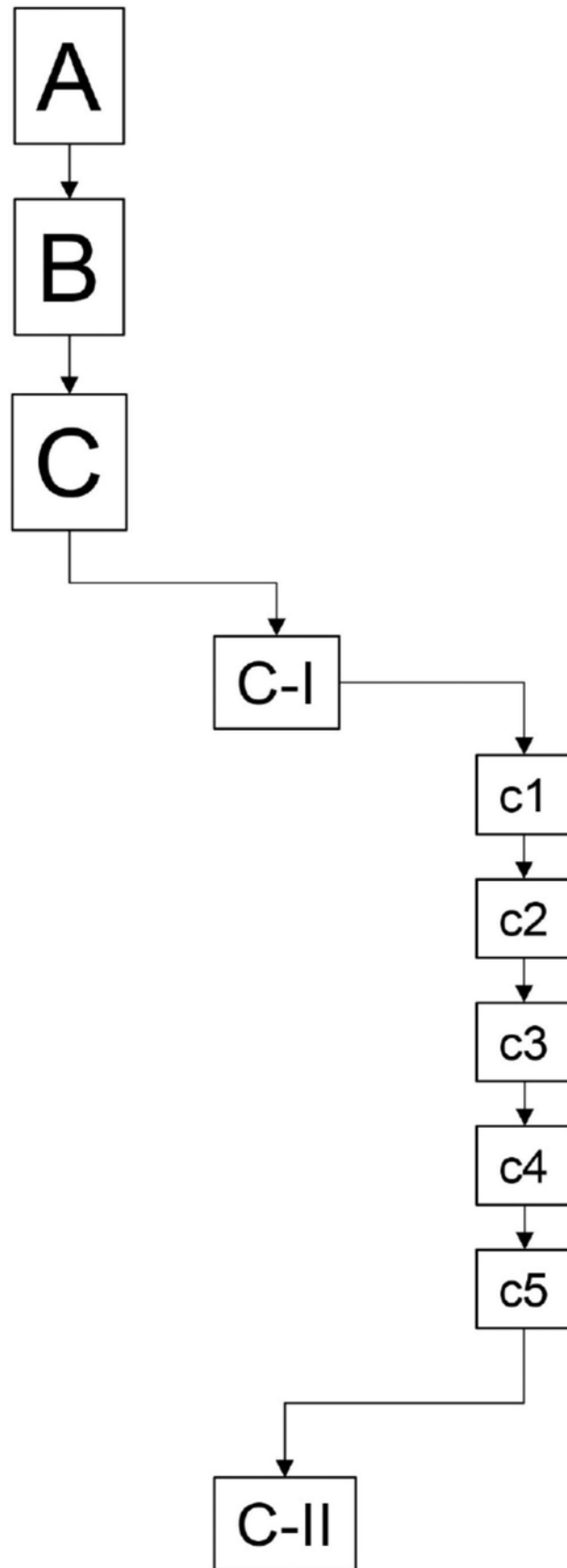


图16