(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101118155 B
(45)授权公告日 2010.09.08

(21)申请号 200710139723.X

(22)申请日 2007.07.27

(30)优先权数据
11/497,962 2006.08.01 US

(73)专利权人 三菱电机株式会社
地址 日本东京

(72)发明人 保罗·A·比尔兹利

(74)专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127
代理人 党晓林

(51)Int.Cl.
G01B 11/24(2006.01)

(56)对比文件
CN 1334913 A,2002.02.06, 全文.
JP 特开2004-279187 A,2004.10.07, 全文.
CN 1701603 A,2005.11.23, 全文.
CN 1729381 A,2006.02.01, 全文.
Kutulakos K N ET AL.Atheo ryofrefractiveandspecular3Dshapebylight-pathtriangulation. Computer vision,2005,ICCV 2005.Tenth IEEE international Conference on Beijing2.2005,21448-1455.
Thomas bonfort et al.General specular surface triangulation,.computer vision-ACCV 20063852/2006.2006,3852/2006872-881.
Thomas Bonfort et al.Voxel carving for specular surface.Computer vision,2003,ICCV 2005.Proceedings of the Ninth IEEE international Conference on computer vision1.2003,1591-596.

审查员 郑大磊

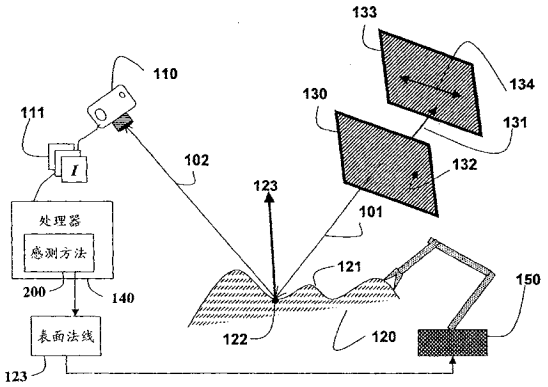
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 6 页

(54)发明名称

用于感测反光物体的表面形状的方法和系统

(57)摘要

本发明提供一种感测反光物体表面形状的方法和系统。针对镜面反射或镜面-漫射混合反射物体确定表面法线和其他三维形状描述信息。在平滑空间变化图案位于初始位置时,照相机记录被物体表面反射的该图案的图像。然后该照相机记录经历一系列后续位移而到达与初始位置不同的最终位置的图案的多个图像。对于图像的各像素,求出与初始图像的像素值和所有最终图像的像素值之间的最小差值相对应的图案位移。随后利用求出的图案位移确定在被所述像素成像的点处入射在所述物体表面上的入射光线。然后利用确定的入射光线确定在同一表面点处的表面法线。根据物体的表面法线确定三维形状的其它描述信息,例如:主曲率、参数表面的主轴线、三维形状或物体姿势。



CN 101118155 B

1. 一种用于感测反光物体的表面形状的方法，该方法包括以下步骤：

在所述表面反射位于初始位置的可见物时，记录所述物体上的表面点的初始图像值；

当所述可见物经过与所述初始位置不同的后续位置而经历预定动作时，记录后续图像值；

识别所述可见物的位置，在该位置处，所述表面点的图像值变得与所述初始图像值大致相同；以及

利用所述可见物的初始位置和识别出的位置确定所述表面点的表面法线，

其中，所述可见物是平面屏幕，该平面屏幕显示空间变化的图案，并且该方法还包括以下步骤：

第一步骤：在所述屏幕位于初始位置的情况下，采集被所述物体的表面反射的该屏幕的初始图像；

第二步骤：按照预定动作将所述屏幕移动到与所述初始位置平行的最终位置；

第三步骤：在所述屏幕位于最终位置并且所述图案在该屏幕上经历了一系列位移的情况下，采集被所述物体的表面反射的该屏幕的最终图像；

第四步骤：对于所述图像中的像素，确定所述初始图像的像素值与所有最终图像的像素值的最小差值，并记录所述图案的相关位移；

第五步骤：对于经过位移的像素，求出在被该像素成像的点处从所述图案至所述物体表面的入射光线的方向；以及

第六步骤：对于一像素，由该像素的已确定的入射光线求出所述物体在被该像素成像的点处的表面法线，该表面法线代表该表面点处的表面形状。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，利用所述表面法线确定表面的三维属性，所述三维属性选自由主曲率、参数表面的主轴线、三维形状以及物体姿势构成的组。

3. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，仅记录所述物体的反射所述可见物的部分的图像值。

4. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述可见物是带有印刷图案的物体。

5. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述可见物是带有投影图案的物体。

6. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述可见物是具有一维亮度渐变的图案的物体。

7. 根据权利要求 6 所述的方法，其中，所述一维亮度渐变包括多种颜色渐变。

8. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述第一至第六步骤执行两次，第一次仅利用沿所述屏幕的水平方向变化的一维图案，图案位移是水平的，第二次仅利用垂直变化的一维图案，图案位移是垂直的，并结合两个结果以得到所述表面法线。

9. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所采集的图案的图像数量是三个，即：在初始屏幕位置的一个图像以及在最终屏幕位置的两个图像，并且通过线性内插求出使所述初始图像和所述最终图像之间的像素值之差最小的图案位移。

10. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所采集的图案的图像数量大于三个，即：在初始屏幕位置的一个图像以及在最终屏幕位置的其它图像，并且通过高阶内插方法求出使所述初始图像和所述最终图像之间的像素值之差最小的图案位移。

11. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述图案在所述屏幕上周期性重复，并且周期足够长以使得所述图案的反射至所述初始图像和所述最终图像的给定像素的点位于该周

期图案的一个周期内。

12. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述图案在初始位置和最终位置处在所述屏幕上移动，并且利用多个初始图像和多个最终图像来确定表面形状。

13. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，利用经过部分表面的表面法线的变化表征表面属性。

14. 根据权利要求 13 所述的方法，其中，利用表面法线的变化识别所述表面的物理不连续性。

15. 根据权利要求 13 所述的方法，其中，利用表面法线的变化识别各个表面点处的主曲率，对于参数表面来说识别对称轴。

16. 根据权利要求 13 所述的方法，其中，利用表面法线的变化识别凸起的浅浮雕图样。

17. 根据权利要求 13 所述的方法，其中，利用表面法线的变化表征表面的平滑性。

18. 根据权利要求 13 所述的方法，其中，利用表面法线的变化表征表面的各向异性。

19. 根据权利要求 13 所述的方法，其中，利用表面法线的变化识别表面反射的不连续性。

20. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，利用图像值的变化表征表面属性。

21. 根据权利要求 20 所述的方法，其中，利用所述变化表征表面的各向异性。

22. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述可见物由多个小平面构成。

23. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，利用两个或更多个照相机观察所述物体。

24. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，利用变焦相机观察所述物体。

用于感测反光物体的表面形状的方法和系统

技术领域

[0001] 本发明总体涉及计算机视觉，更具体地涉及感测具有镜面反射面以及镜面－漫射混合反射面的物体的三维形状。

背景技术

[0002] 感测面

[0003] 用于采集三维数据的传感器用于多种用途。例如，工厂中的自动“箱拾取”系统可采集三维数据以作为判断箱内物体姿势的预报器。于是，可指引机械手取回所选出的一个物体。物体姿势是物体的三维位置以及在该位置的三维取向。

[0004] 用于感测表面三维形状的基于视觉的一系列技术假设物体具有非镜面反射面，例如漫反射面。另一系列技术假设物体具有镜面反射面，例如镜面或透明表面。

[0005] 非镜面反射面

[0006] 用于感测非镜面反射面三维形状的基于计算机视觉的技术包括结构光、飞行时间激光扫描仪、立体照相机、移动照相机、光度立体视觉、由明暗重构形状以及由聚焦（离焦）求取深度。

[0007] 这些技术都假设入射到表面上的入射光发生漫反射，因此反射光在具有至该表面的瞄准线的任何传感器处都可见。此外，许多技术假设可见特征为三维物理位置可测的物理特征，而不是反射特征。当表面漫反射少而镜面反射多时，由于上述假设不再成立，因此所述技术变差。

[0008] 镜面反射面

[0009] 用于感测镜面反射面三维形状的基于计算机视觉的技术假设在被镜面反射面反射的周边场景中存在多个特征。这些特征可能是稀疏的，例如由场景中的点光源产生的镜面反射强光，如在 1988 年的 ICCV（国际计算机视觉大会）会刊中收录的 A.Blake 和 G.Brelstaff 的“Geometry from specularity”中所述。若特征是稀疏的，感测到的表面三维形状也是稀疏的。这对于很多用途来说并不理想。例如，当感测到的特征稀疏时难以计算可靠的物体姿势。通过相对于表面移动照相机或特征可改善该问题，但是这耗费时间。

[0010] 所述特征可以是密集的，例如密集二进制编码图案，如在 2006 年的 ICCV 会刊中收录的 T.Bonfort 等的“General Specular Surface Triangulation”中所述。然而，当感测变化的表面形状时，使用密集个体特征的密集二进制编码图案存在问题。诸如平面镜的平坦镜面反射面中的密集特征的反射不会失真，而在诸如凹面镜的弯曲镜面反射面中的特征的反射可能严重失真。若密集特征为在平坦反射面中可见的合适尺寸，则相同的特征在大多数弯曲反射面中通常太小而不能识别。若密集特征为在弯曲反射面中可见的合适尺寸，则相同特征太大而不能提供平坦表面的高分辨率测量。

[0011] 使用密集二进制编码图案的第二个问题在于，所述图案是通过在屏幕上显示一系列图像而形成的。若二进制代码例如为 8 位，则必须显示 8 个图像。若图案必须显示两次，如在以上参考的 Bonfort 所述的方法中，则必须显示 16 个图像。这耗费时间。

[0012] 当照相机像素（或像素组）记录图案的单个特征的反射时，会引起使用密集二进制编码图案的第三个问题。所记录的特征用于确定表面的一个三维测量。但是无法为该三维测量分配亚像素精度的像素位置。相反，必须作出估计判断(arbitrary decision)，例如为该三维测量分配照相机像素中心（或者像素组中心）。由于在测量阶段损失精度，因此这样是不理想的。

[0013] Bonfort 等所述的方法试图通过在后续平滑阶段使该三维测量平滑而解决该问题。然而，由于该平滑作用可能会去除三维形状表面的重要细节，因而不利于在测量阶段获得亚像素精度的像素位置。

[0014] 混合面

[0015] 在本领域中公知一些用于具有镜面－漫射混合反射面的物体的基于视觉的传感器，所述镜面－漫射混合反射面例如磨砂金属，在这种情况下表面以镜面反射方式反射一部分入射光，以漫反射方式反射一部分光。这是由于这样的表面没有为对非镜面反射面有效的技术提供足够强的漫反射响应，也没有为对镜面反射面有效的技术提供足够强的镜面反射。例如，当相邻二进制编码特征的反射由于漫反射分量而彼此混淆时，Bonfort 等所述的方法就失效了。因此，不能确定二进制编码图案。

[0016] 因而，需要一种用于感测镜面反射面的方法和系统，其在平面表面和弯曲表面上都能很好地发挥作用。还需要一种系统，该系统所使用的图案不包含大量的时间序列图像因而是快速的。还需要一种方法和系统，其以亚像素精度使照相机像素位置和所求出的三维测量值相关联。而且，需要一种用于感测镜面反射面的方法和系统，其可应付表面反射中出现的漫反射分量。

发明内容

[0017] 本发明的实施方式提供了一种用于感测具有镜面反射面和镜面－漫射混合反射面的物体的三维形状的系统和方法。

[0018] 照相机采集由物体的镜面反射面或镜面－漫射混合反射面反射的平面屏幕的图像，所述屏幕示出平滑的空间变化图案。例如，该图案显示或投影在屏幕上。

[0019] 所述屏幕以受控方式沿与该屏幕的平面垂直的方向从初始第一位置经过后续位置移动到最终位置。

[0020] 在所述屏幕位于所述最终位置的情况下，所述照相机采集该屏幕的被物体的镜面反射面或镜面－漫射混合反射面反射的多个图像，该屏幕显示经历一系列横向位移的图案。

[0021] 对于各个像素，记录与初始图像的像素值和所有最终图像的像素值之间的最小差值相对应的图案位移。

[0022] 对于各个像素，利用所述图案位移与已知系统标定相结合来求取物体表面上的被该像素成像的点处的表面法线。

[0023] 利用求出的表面法线导出该表面的其它几何特征，例如：各个点处的主曲率、参数物体的主轴线、利用相位展开方法导出的三维形状、以及物体姿势。

附图说明

[0024] 图 1 是根据本发明实施方式的用于确定物体表面形状的系统的示意图；

[0025] 图 2 是根据本发明实施方式的用于确定物体表面形状的方法的流程图；

[0026] 图 3 是系统标定的示意图；

[0027] 图 4 表示通过本系统进行测量的示意图；

[0028] 图 5 是与确定表面法线的中间结果相对应的一组平面的示意图；以及

[0029] 图 6 是表示借助镜面－漫射混合反射面使用本系统的效果的示意图。

具体实施方式

[0030] 系统结构

[0031] 图 1 示出了根据本发明实施方式的用于感测反光物体的表面法线的系统 100。该系统包括照相机 110、物体 120、可动平面屏幕 130（其示出了平滑的空间变化图案 132）以及与照相机 110 相连的处理器 140。

[0032] 照相机采集物体 120 的表面 121 的输入图像 (I)111。表面 121 具有镜面反射特性或镜面－漫射混合反射特性。图案 132 被表面 121 反射。通过在初始位置的屏幕 130 采集图像。该屏幕以受控量 131 经过后续位置移动到最终位置 133，使得在不同位置处的屏幕的平面都保持与位于初始位置时的屏幕相平行。通过位于最终位置 133 的屏幕以及在屏幕上移动一系列后续位置 134 的图案来采集图像。在这种情况下，位移在与屏幕平行的平面中。

[0033] 照相机像素记录由入射光线 101 以及被表面点 122 反射的反射光线 102 到达的光作为图像值（亮度）。表面 121 在点 122 处具有表面法线 123。目标是确定可表示物体形状的表面法线 123。

[0034] 图案 132 可打印在屏幕上，或者可利用前照明或后照明而显示在屏幕上。如本领域中公知的，处理器 140 包括存储器和输入输出端口。该处理器能够运行根据本发明实施方式的感测方法 200。处理器输出的是表面法线 123。表面法线可表示物体的表面形状。该表面法线可被其它系统（例如，机械臂 150）利用来操纵物体。

[0035] 操作方法

[0036] 图 2 表示根据本发明一个实施方式的用于感测反光物体的表面法线的方法 200 的步骤。初始步骤对该系统进行标定（步骤 201），从而产生标定数据 202。该标定执行一次。

[0037] 照相机 110 采集屏幕 130 的被物体 120 的表面反射的图像 111（步骤 210）。屏幕具有初始位置、后续位置和最终位置。对于屏幕上的图案的一系列位移，照相机采集屏幕位于初始位置的一个图像以及屏幕位于最终位置的多个图像。对于各个图像的各个像素，该方法求出初始图像的像素图像值与所有最终图像的后续图像值之间的最小差值（步骤 220），并记录图案的相关位移 221。

[0038] 对于各个图像的各个像素，利用位移 221 求出从图案到物体表面上的点 122 的入射光线 101 的方向 231（步骤 230）。对于各个图像的各个像素，利用入射光线 101 确定点 122 的表面法线 123 的取向（步骤 240）。表面法线 123 可以表示物体在点 122 处的形状。

[0039] 详细操作

[0040] 标定

[0041] 如图 3 所示，标定的第一阶段确定照相机的固有参数。第二阶段确定照相机的物理位置以及屏幕在初始位置 301 和最终位置 302 的物理位置。该阶段要求输入图像至少包括在屏幕上的已知位置的三个特征，例如屏幕的四个角点中的三个。

[0042] 如果不能通过照相机直接看到屏幕时，可通过平面镜观察屏幕。借助在已知位置的至少三个点来标记该镜。该标定涉及确定镜子的位置、当屏幕显示在镜中时确定屏幕的虚像位置，然后推断屏幕的物理位置。

[0043] 标定的第三阶段确定屏幕的水平方向和垂直方向。该操作需要至少一条在屏幕上位于水平方向的线，从而可推断出垂直方向。

[0044] 标定的第四阶段确定图案在屏幕上移动时图案位移的大小。该操作需要照相机观察在屏幕上至少经历一次移动的图案。

[0045] 感测

[0046] 图 4 表示具有像素 c 112 的图像 111，该像素 c 112 对应于图案中的特征 P，该特征 P 在表面点 S 122 处被三维光线 v 101 和三维光线 w 102 反射。该图案为平滑地空间变化的一维图案，例如在屏幕 130 上沿水平方向变化的亮度渐变或多种色谱渐变。像素 c 处的像素值（亮度或颜色）为 p。在该图中，图像 111 中的像素 c 直接对应于照相机 110 的传感器的像素。因此，可将该像素称为照相机像素。

[0047] 屏幕沿其法线从初始位置 301 经过后续位置平移距离 D 到达最终位置 302，此时照相机像素 c 对应于图案中的特征 Q。

[0048] 屏幕上的图案移动通过一系列水平位移 303，即，在与屏幕平行的平面中移动。位移序列在照相机像素 c 处的像素值表示成 q_i，$i = 1, \cdots, n$。

[0049] 求出与 $p-q_i$ 的最小值对应的图案的水平位移 H。若已知照相机像素 c 的 D 和 H，就能够求出一组平行面 401，如图 5 中的垂直视图所示。该组平面中的任何给定平面都由两条线限定，第一条是图案位于初始位置的线，第二条是图案位于最终位置的线，横向位移为 H。该组平面中的一个平面包含从图案特征 P（或 Q）至表面点 S 122 并反射至照相机像素 c 的入射光线 v。

[0050] 在一维图案在屏幕上转动的情况下重复所述过程，使得图案沿垂直方向而不是水平方向变化，图案在最终位置的位移是垂直的而不是水平的。若最终位置处的图案位移序列在照相机像素 c 处的像素值表示成 r_i，$i = 1, \cdots, n$，则可求出对应于 $p-r_i$ 的最小值的图案垂直位移 V。于是可得到第二组平行平面，其与第一组不同并且其中一个平面包含从特征 P（或 Q）至表面点 S 122 并反射至照相机像素 c 的入射光线。

[0051] 由第一组平面的任意平面与第二组平面的任意平面相交得到入射光线 101 的三维光线 $v = (m \times n)$，其中 m 是第一组平面的法线，n 是第二组平面的法线，“×”表示交叉相乘的运算符。注意，三维光线 v 101 仅规定了方向，其并不处于三维空间中的已知位置。三维光线 v 101 规定了从特征 P（或 Q）到表面点 S 122 的方向，该三维光线 v 101 反射至照相机像素 c。

[0052] 从照相机标定数据 202 可以获得图 1 中的用于照相机像素 c 的三维光线 w 102。给定方向 v 和 w，则点 S 处的表面法线 123 为 $n = (v_u+w_u)/2$，其中 v_u 是对应于方向 v 的单位矢量，w_u 是对应于方向 w 的单位矢量。

[0053] 可用 $p-q_i$ 的最小值的计算结果修正 H 的计算结果，从而不必使图案大范围地移动。可通过由 q_i 的值进行线性内插或外插而仅由 q_i 的两个值（以及与其相关的 H_i）计算 H。如果已知 q_i 的两个以上的值，则可利用更好的函数逼近（例如二次逼近），从而得出更接近 H 的估计值。对于 V 来说也是如此。

[0054] 其它实施方式

[0055] 在另一实施方式中，由于在任何图像中其值都不发生变化的像素不与图案的反射相对应，因而忽略这样的像素。例如，位于场景的周围背景中的像素。

[0056] 在其它实施方式中，图案可以是屏幕上的固定图样，或者是投影在屏幕上的图案。

[0057] 在另一实施方式中，利用单个图案而不是两个图案来进行感测。该图案在各个点处都具有唯一值。例如，图案是具有沿水平方向的红色亮度渐变和沿垂直方向的绿色渐变的彩色图案，并且在屏幕位于最终位置的情况下，该图案沿对角线方向移动。而且如之前一样利用最终图像来计算 p-q 和 p-r 并进行后续计算。

[0058] 在另一实施方式中，图案在屏幕上周期性重复。为了避免 p-q 和 p-r 出现多个最小值，屏幕的平移足够小，以使得反射到初始图像和最终图像中的给定像素的图案部分都位于周期图案的一个周期内。

[0059] 在另一实施方式中，在初始位置以及在最终位置，图案都在屏幕上移动，并且多个初始图像和最终图像都用于确定表面形状。

[0060] 在另一实施方式中，在初始位置之后，屏幕移动到两个或多个后续位置，对于各个后续位置重复所述步骤。对于图像中的像素，此时通过结合在各单独位置计算出的光线而计算入射至表面的入射光线，从而提供更准确的估计值。

[0061] 在另一实施方式中，利用表面法线估算物体上的各个点处的主曲率。

[0062] 在另一实施方式中，利用表面法线确定参数物体（例如柱体或球体）的主轴线。

[0063] 在另一实施方式中，将表面法线输入相位展开方法以确定物体的三维形状。相位展开方法在本领域中是公知的。

[0064] 在另一实施方式中，利用表面法线确定物体的三维形状之后确定物体的姿势。

[0065] 在另一实施方式中，利用经过表面某区域的表面法线的变化来分析该表面。表面法线的变化可用来识别表面形状的不连续性，例如两个表面之间的边缘，或者表面的凹凸部分。表面法线的变化还用于表征表面的平滑性。表面法线的变化还用于识别主曲率，并且对于参数物体来说，表面法线的变化还用于识别诸如主轴线的特征。表面法线的变化还用于表征表面的各向异性，例如磨砂金属上的方向纹理，这是由于表面法线很少沿磨砂纹理的方向变化，而在大多数情况下沿垂直于磨砂纹理的方向变化。表面法线的不连续性还可用于识别表面上的反射不连续性，例如当某些反射直接来自图案而某些反射来自图案的经由其它镜面反射面的双重反射时会出现反射不连续。

[0066] 在另一实施方式中，利用初始图像和多个最终图像中的各个图像之间的像素值之差的变化来表征表面的各向异性，例如磨砂金属上的方向纹理。

[0067] 在另一实施方式中，屏幕包括多个小平面，从而物体表面的多个部分反射图案。

[0068] 在另一实施方式中，利用两个以上的照相机观察物体表面，从而可处理表面的多个部分。

[0069] 在另一实施方式中，利用变焦照相机观察物体表面，从而可得到变焦区域的更高分辨率结果。

[0070] 在另一实施方式中，用分束器和两个固定屏幕代替移动屏幕，从而不使用移动部件而提供同样有效的结构。

[0071] 在另一实施方式中，利用出现的 p-q 和 p-r 的多个最小值来识别物体表面上的多

个层。

[0072] 发明效果

[0073] 由于本方法仅基于像素值 p-q 之差而不基于照相机的任何预标定或期望特征、环境照明、表面材料或者屏幕上的图案，因而本方法不因照相机 110 的响应特性、环境照明、表面 121 的反射特性、表面 121 上的瑕疵或污物以及屏幕 130 上的图案的绝对外观而变化。

[0074] 由于本方法仅基于像素值 p-q 之差而不受由不同形状的表面反射所引起的反射图案失真以及尺度差影响，因而本方法可有效地用于平坦或弯曲表面且不需要调整图案的形式。

[0075] 在示出两个不同图案（水平和垂直）的情况下，本方法最少利用图案的六个图像。即：在初始屏幕位置的一个图像、在最终屏幕位置的两个图像（针对图案的位移）。当示出一个图案，例如具有沿水平方向的红色亮度渐变以及沿垂直方向的绿色亮度渐变的彩色图案时，本方法最少利用三个图像。

[0076] 对于图像中的像素来说，本方法能够使像素值 p-q 的多个差值相结合而求出 p-q 的最小值的更准确的估算值，由此求出相关表面法线的更准确的估算值。

[0077] 本方法对于镜面反射面和镜面 - 漫射混合反射面都有效。当表面为镜面时，到达照相机像素的光是来自图案上的单个点的反射。但是当表面为镜面 - 漫射混合反射面时，到达照相机像素的光是来自图案区域的镜面反射和漫反射的产物。在图 6 中，当屏幕位于初始位置时，所述区域是 620，当屏幕位于最终位置时，所述区域为 630。该方法仅基于像素值 p-q 之差，像素值 p 对应于区域 620 的反射，像素值 q 对应于区域 630 的反射，从而不需要确切模拟该复杂反射。

[0078] 尽管已通过优选实施方式的实施例描述了本发明，然而应理解在本发明的精神和范围内可进行各种其它改进和修改。因此，所附权利要求旨在覆盖落于本发明的实际精神和范围内的所有此类变型和修改。

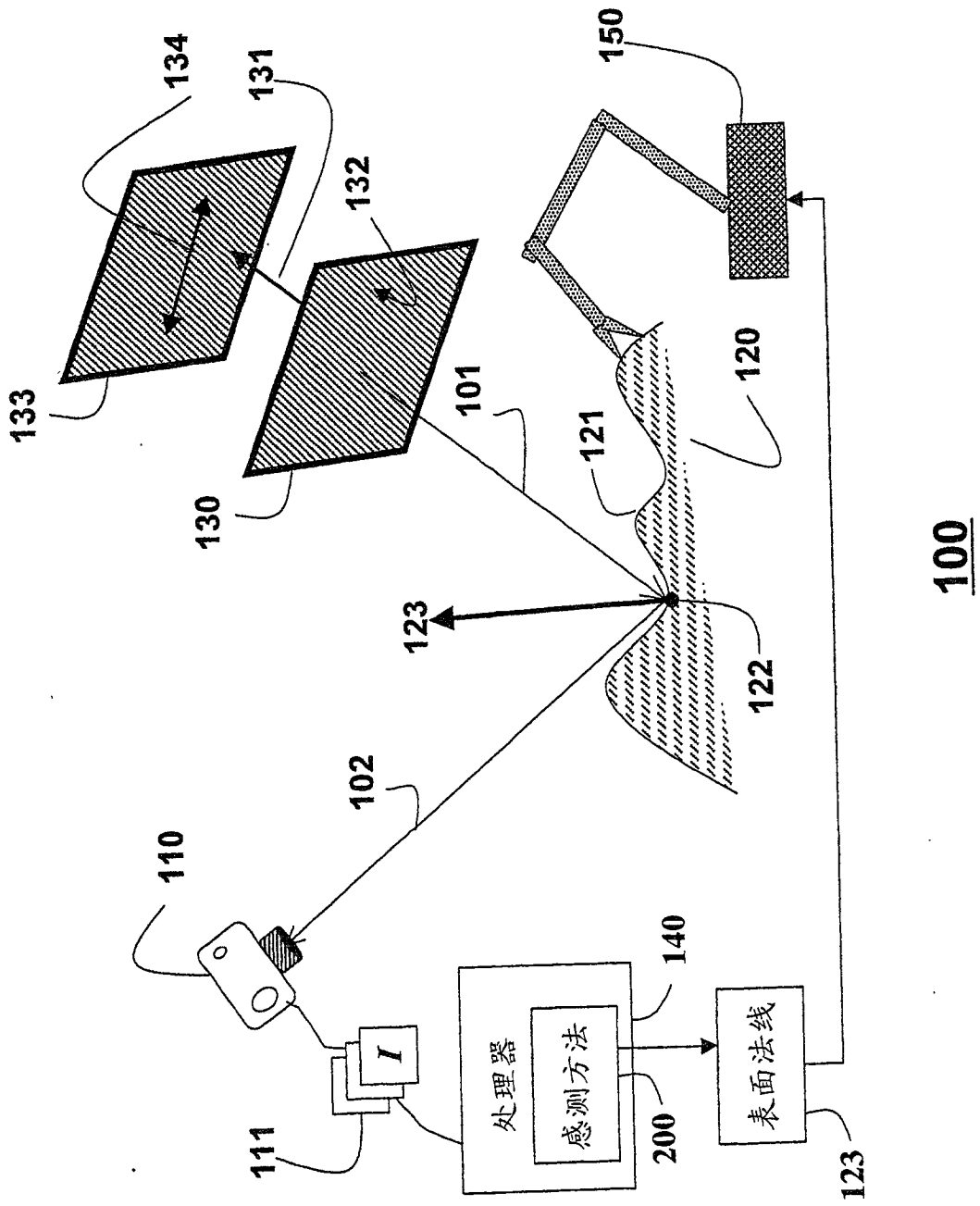

134
131
150
132
133
101
120
121
130
123
122
100
102
110
140
处理器
感测方法
I
200
表面法线
111
123

图 1

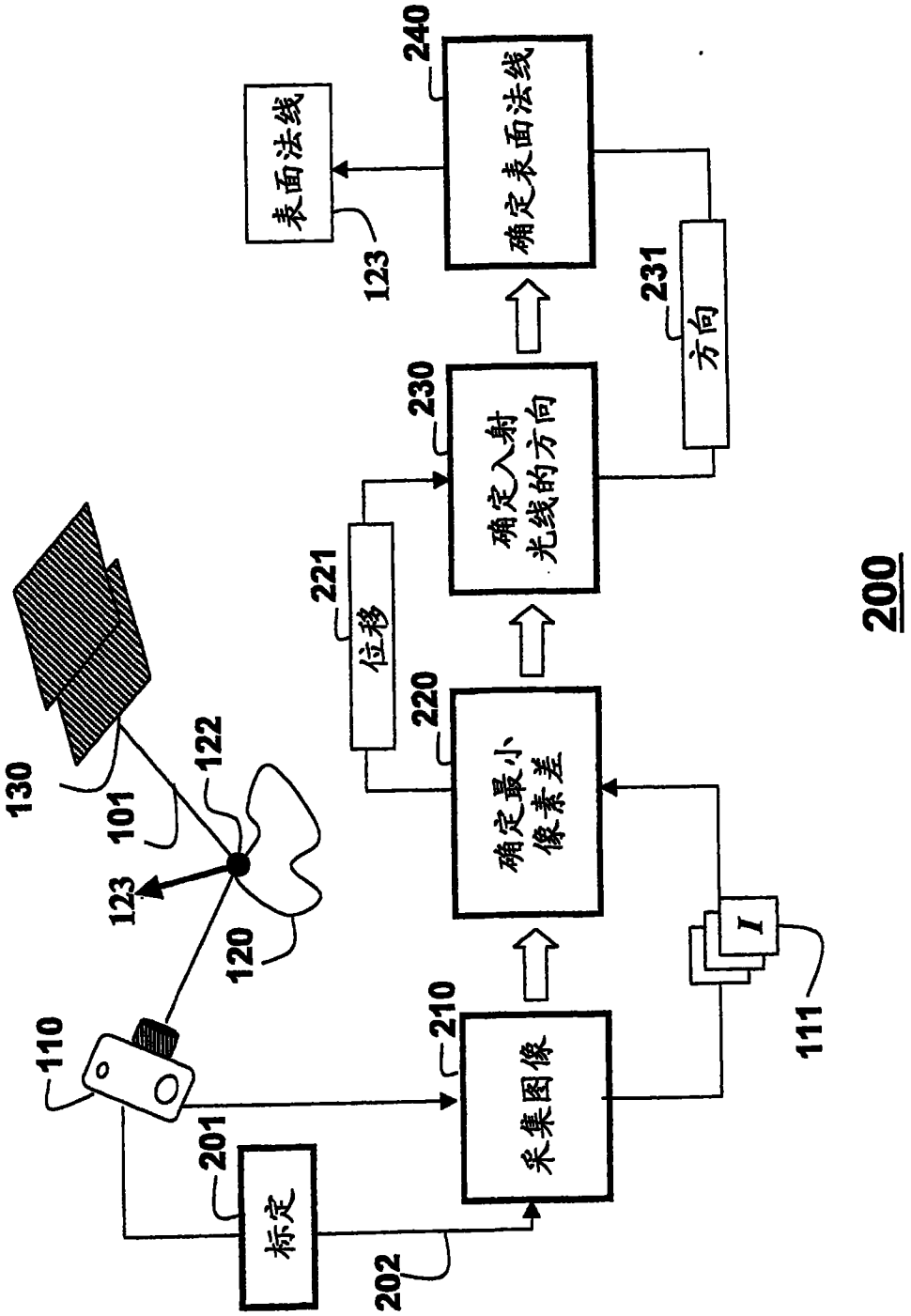

200
130
101
122
123
120
110
201
标定
202
210
采集图像
220
确定最小像素差
221
位移
230
确定入射光线的方向
231
方向
240
确定表面法线
123
表面法线
111
I

图 2

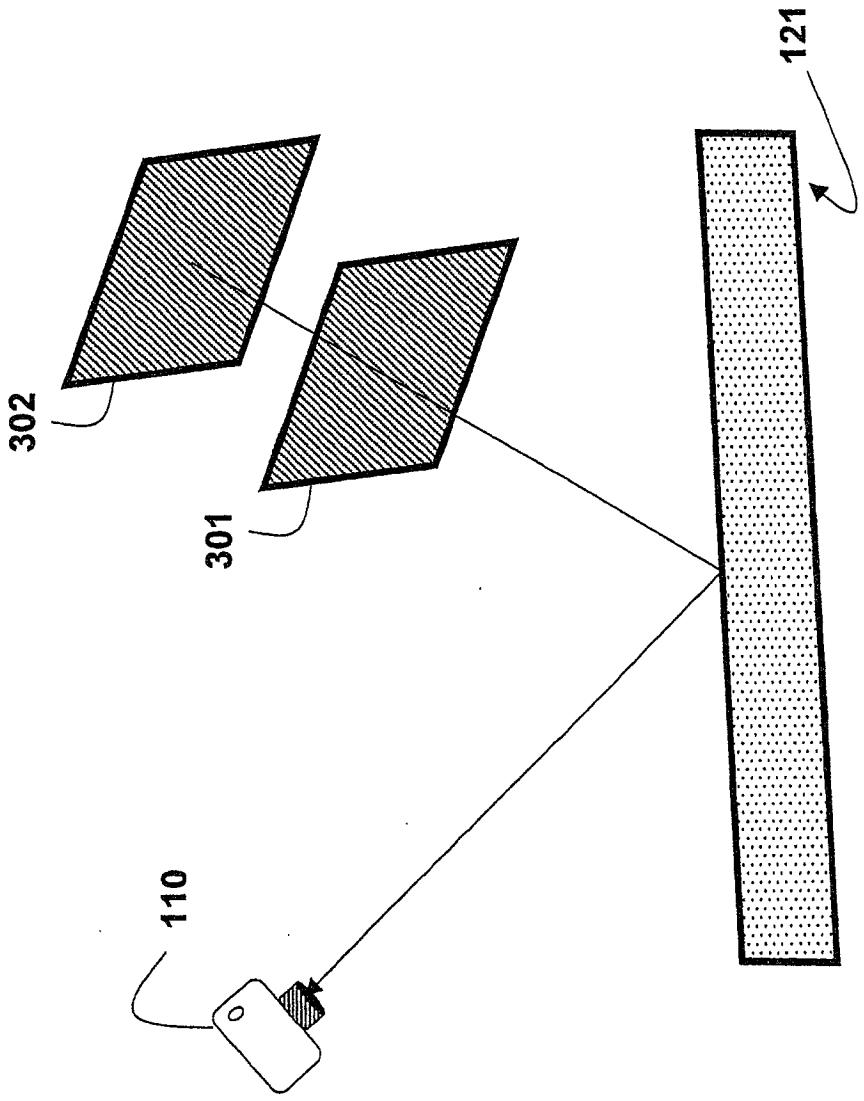


图 3

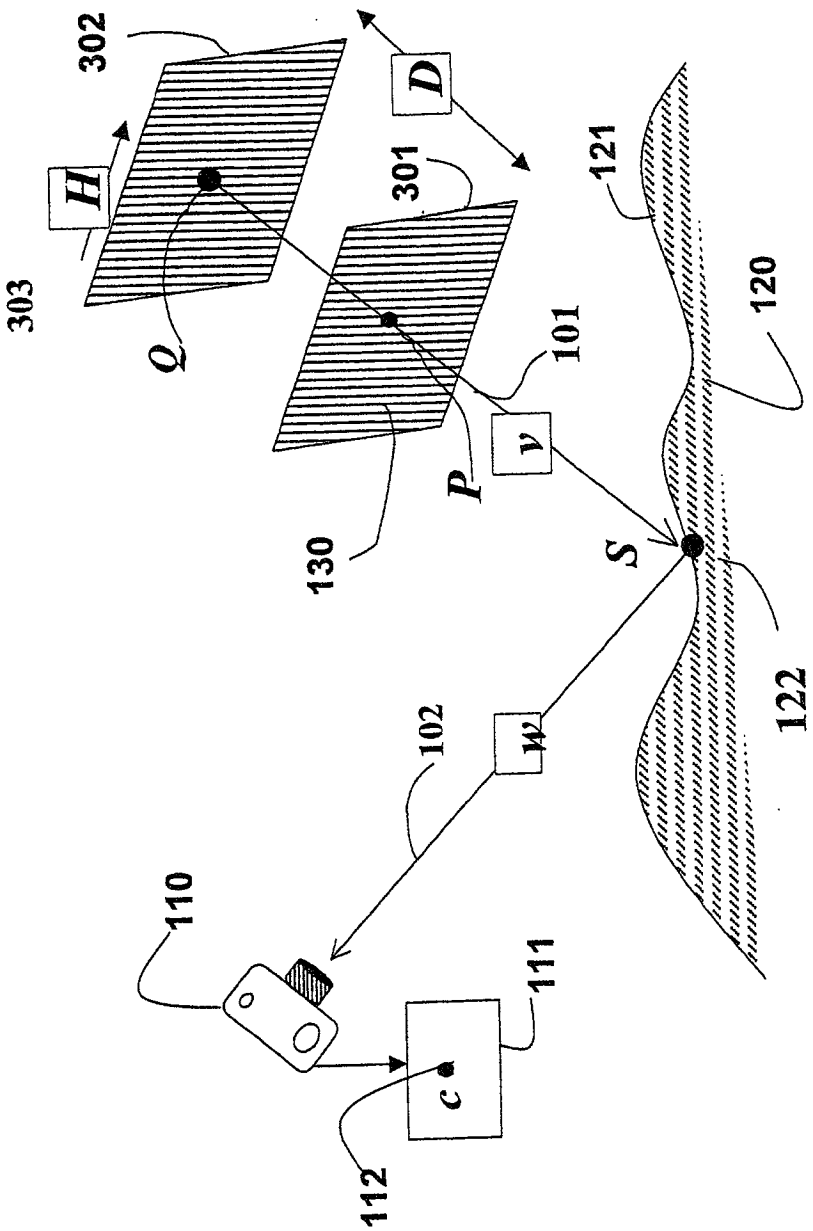


图 4

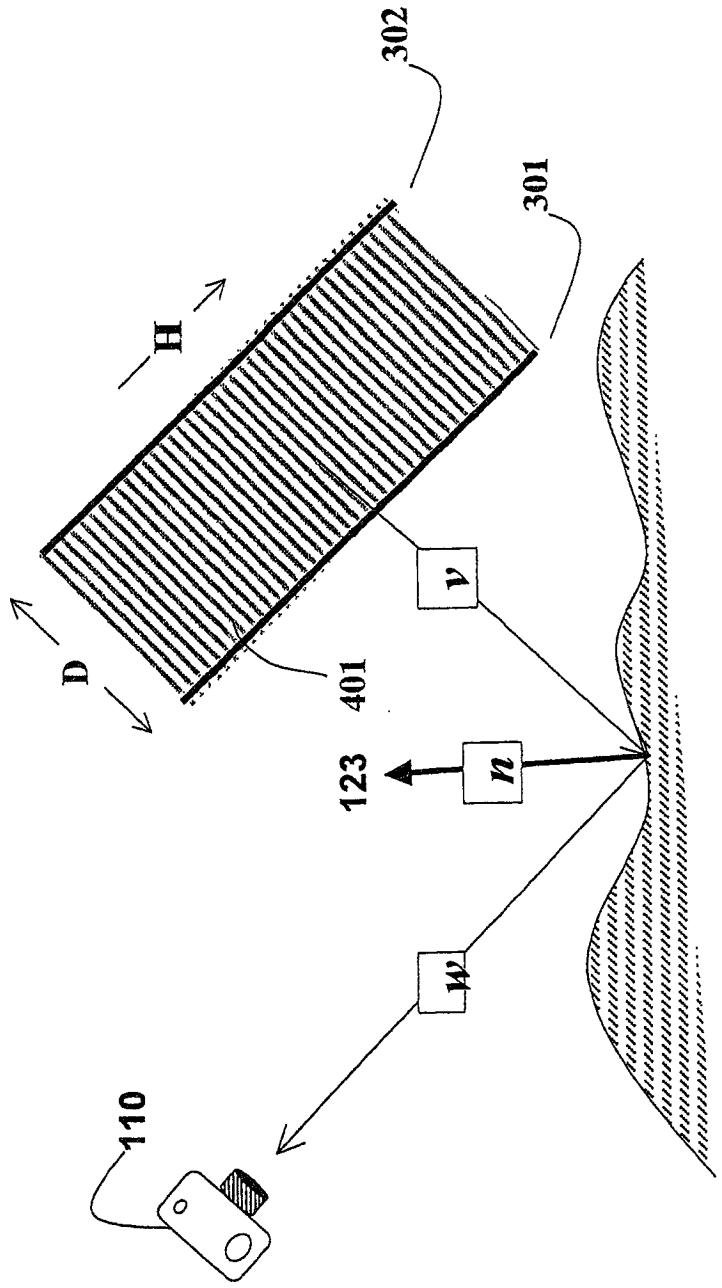


图 5

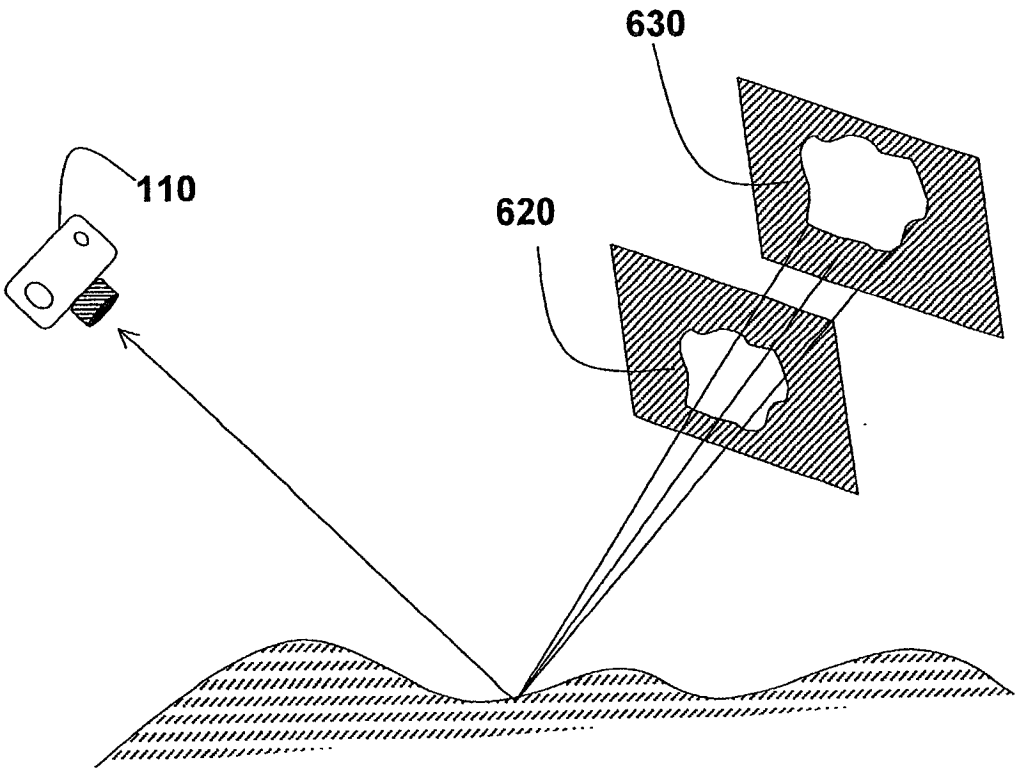


图 6