



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113592995 B

(45) 授权公告日 2023.07.18

(21) 申请号 202110849254.0

US 2015085136 A1, 2015.03.26

(22) 申请日 2021.07.27

审查员 张驰

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113592995 A

(43) 申请公布日 2021.11.02

(73) 专利权人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72) 发明人 姜宏志 闫雍靖 赵慧洁 李旭东

(51) Int. Cl.

G06T 15/06 (2011.01)

G06T 5/10 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 107870334 A, 2018.04.03

CN 110264540 A, 2019.09.20

US 2005103854 A1, 2005.05.19

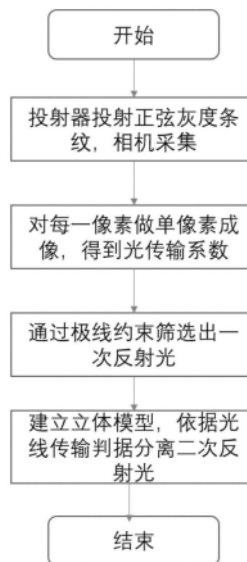
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于并行单像素成像的多次反射光分离方法

(57) 摘要

本发明设计一种基于并行单像素成像的多次反射光分离方法,将并行单像素成像应用至多次反射光表面中混叠光线的分解中,能够完成多次反射光线中一次、二次和三次及以上反射光的分离。首先通过投射器投射正弦灰度条纹到被测多次反射光场景,相机对场景中的调制信息进行采集;其次,根据相机采集到的图像结果做相位相减得到傅里叶系数,对傅里叶系数做傅里叶逆变换可以得到投射器视角下的光传输系数图像;随后分别根据极线约束和立体三维模型分离一次反射光和二次反射光线,因此实现了多次反射光表面的分离。这种方法是传统光照渲染的逆过程,可以直接通过相机-投射器系统获得场景信息的复合光照结果并对混叠光线完成分离,对推动光学测量、计算机视觉和计算机图形学的发展有重要作用。



1. 一种基于并行单像素成像的多次反射光分离方法,其特征在于:分离过程包括以下步骤:

(1) 将投射器与相机放置与被测场景前,投射器投射出用于并行单像素成像所需的正弦条纹,相机采集到条纹与场景的混合图像,图像像素采集的光强是一次、二次和多次反射光分量的混合;

(2) 对相机中每个像素实行并行单像素成像算法,可以得到该像素对应的投影仪视角下的光传输系数图像,光传输系数图像中的多个光斑反映了一次、二次和多次反射光的分量信息;

(3) 根据光传输系数图像,采用极线约束原理将一次反射光从混合的光照信息中分离,将所有像素的一次反射光强度相加,得到一次反射光分离的结果图像,通过像素点与一次反射光点建立立体模型,重建得到被测场景的三维点云模型;

(4) 根据二次反射光分离模型和传播路径特点,采用二次反射光分离算法,在间接反射光分量中分解得到二次反射光,对强度相加得到二次反射光分离的结果图像;

(5) 在光传输系数图像中,将一次和二次反射光分量去除,剩下的光斑即代表三次及以上反射光分量,对其强度相加可以得到三次及以上分离的结果图像。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:步骤(1)中所提及的多次反射光混叠光线的表达式为:

$$I_{out}(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h(x, y; m, n) I_{in}(m, n) + I_e(x, y)$$

其中, $I_{out}(x, y)$ 为某一相机像素 (x, y) 接收到的多次反射光混叠光强, $h(x, y; m, n)$ 为光线从投射器像素 (m, n) 到相机像素 (x, y) 的光传输系数, $I_{in}(m, n)$ 为投射器像素 (m, n) 发出的出射光强, $I_e(x, y)$ 为环境光强。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:步骤(3)中由于相机一次反射光属于直接从投射器某像素发出,经过一次反射直接被相机接收的分量,因此满足立体视觉中极线约束条件,在光传输系数图像中,通过计算相机像素对应投射器视角下的极线,设置极线阈值可以确定处于阈值范围内的光斑,该光斑即代表一次反射光分量,对光斑的强度进行相加,可以得到一次反射光分量的像素值,对每个像素进行上述处理,可以得到一次反射光分量的结果图像。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:步骤(4)中所涉及到的二次反射光分离算法,其分离二次反射光原理表达式为:

$$\delta(m, n; x, y) = \frac{K_L}{\pi} + K_G \cdot \frac{8+s}{8\pi} \cos\left(\frac{i(m, n; x, y) - r(m, n; x, y)}{2}\right)^s$$

$$\delta(m, n; x, y) \leq \theta_d$$

其中 K_L 和 K_G 分别代表朗伯表面和光亮表面的反射率,范围从0到1,参数 s 描述了曲面的粗糙度;

由于二次反射光在空间中传播的独特性,其发生在多次反光材质的曲面上会发生两次反射,针对曲面上某一点 Y 来说,入射光经投射器某一像素 (m, n) 发出,由 Y 点反射后到达另一点 X ,最终被相机像素 (x, y) 所接收,即二次反射光线,在此设入射到 Y 的光线为 L ,经 Y 反射

到X的光线为R,上式中, $i(m,n;x,y)$ 和 $r(m,n;x,y)$ 分别为光线在Y点的入射角与反射角,上面两式代表了二次反射光从投射器某一像素(m,n)到相机某一像素(x,y),在第一次发生反射时的角度关系,针对每一相机像素,去除一次反射光分量后可以重建出其仅包含间接反射光分量的光传输系数图像,遍历光传输系数图像中的候选点,按照以上公式,满足阈值条件的则可以被确定为二次反射光。

一种基于并行单像素成像的多次反射光分离方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于并行单像素成像的多次反射光分离方法,该方法将并行单像素成像用于光线传输和摄影测量领域,结合传统三维测量技术,完成多次反射光表面上一次、二次和多次反射光分量的分离。本发明主要属于计算成像与计算机视觉领域。

背景技术

[0002] 多次反射光实际上是光线在空间中的混叠,造成了多次序反射光线混叠在一起,当被光探测器采集时,该探测器接受到光强信息实际上是多次反射光混叠后的结果。在摄影测量领域,对多次反射光线的分解能够帮助重建真实的三维场景信息,提高测量精度;在计算机图形学领域种,由于往往通过渲染方程对虚拟场景进行渲染,模拟了光线从光源到场景的传播过程,在传播过程种添加多次反射光等光照信息,使得场景信息更加真实,而对于多次反射光的分离实际上是渲染的逆向过程,对反射光线的分离能够帮助验证渲染的真实性,为其提供理论依据和真实测量数据。

[0003] 例如,中国专利申请公布的专利公布号为No.CN110264540A公开的一种并行单像素成像方法研究了单个探测器像素接收到的光强信息,对其解析可以得到该像素对应的光照信息,而多次反射光实际上就是光照信息的一部分,因此从理论从发,并行单像素成像应当可以完成多次反射光中各种分量的识别和分离。

发明内容

[0004] 本发明提出一种基于并行单像素成像的多次反射光分离方法,将并行单像素成像的基本原理拓展至混叠光线的分离问题中,通过并行单像素算法的独特性,实现了复杂光照条件下多次反射光成分的识别和分离。基于并行单像素成像的多次反射光分离方法流程图如附图1所示。

[0005] 本发明的基本原理是基于通过将并行单像素成像移植到传统阵列相机中,将每一个相机像素视作单像素探测器,对其采集到的光强信息做傅里叶反变换处理,得到光传输系数图像,在光传输系数图像中通过极线约束识别直接反光点,随后通过三维立体模型识别和分离二次反光点,完成一次、二次和多次反射光分量的分离。

[0006] 本发明与其他分离反射光线不同的地方在于,本发明实现了从测量数据到多次反射光分量图像的逆向还原,独特之处在于本发明对被测场景的表面材质信息和空间三维结构没有预先获取,针对静态的未知场景做到了多次反射光分量的识别和分离,这是这一发明最独特和最直接的优势。

[0007] 本发明的技术解决方法为:首先根据傅里叶变换并行单像素成像方法,生成适用于本发明的正弦灰度条纹,利用投射器将调制好的灰度条纹按照频率变换投射到被测场景中,同时标定好的相机对场景与条纹调制后的混合场景进行拍摄采样;拍摄完毕后,对相机像素上每一个单像元通过相位相减和傅里叶逆变换得到该像素对应的投射器视角下的光传输系数图像;对光传输系数做极线约束处理,将一次反射光点识别和分离出来;通过立体

视觉原理重构得到三维点云,建立光线传播模型,通过二次反射光判据进行二次反射光分量的识别和分离。其主要包含以下步骤:

[0008] (1) 将投射器与相机放置与被测场景前,投射器应当提前生成需要投射的正弦灰度条纹,投射器投射条纹随后光线在传播路径上发生混叠,相机端采集得到混叠光线强度图像。

[0009] (2) 根据多步相移的原理,对每一频率下的四张相位图像进行相位相减得到傅里叶系数,并对傅里叶系数做傅里叶逆变换处理;

[0010] (3) 对所有相机像素均做(2)处理,每一个像素点可以得到一张光传输系数图像;

[0011] (4) 根据光传输系数图像,采用极线约束原理分解一次反射光(直接反射光)与间接反射光;

[0012] (5) 根据立体视觉原理重建三维点云数据模型,根据二次反光分离模型对间接反射光分量进行分解,分解得到二次反射光和三次及以上反射光。

[0013] 步骤(1)中所提及的多次反射光混叠光线的表达式为:

$$[0014] \quad I_{out}(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h(x, y; m, n) I_{in}(m, n) + I_e(x, y)$$

[0015] 其中, $I_{out}(x, y)$ 为某一相机像素 (x, y) 接收到的多次反射光混叠光强, $h(x, y; m, n)$ 为光线从投射器像素 (m, n) 到相机像素 (x, y) 的光传输系数, $I_{in}(m, n)$ 为投射器像素 (m, n) 发出的出射光强, $I_e(x, y)$ 为环境光强。

[0016] 步骤(3)中所提及的光传输系数图像位于投射器视角下,分辨率与投射器一致,而多次反射光表面一般存在多个光斑,针对某一像素 (m, n) ,其代表投射器阵列上该点发出的光在空间中经过若干次反射到达当前相机像素 (x, y) ,二者的对应关系刚好反映在光传输系数图像中。

[0017] 步骤(4)中由于相机一次反射光属于直接从投射器某像素发出,经过一次反射直接被相机接收的分量,因此满足立体视觉中极线约束条件,在光传输系数中,通过计算相机像素对应投射器视角下的极线,仅有一次反射光满足该条件,因此可以通过此方法完成一次反射光的分离。

[0018] 步骤(5)中所设计到的立体三维模型,其分离二次反射光与三次及以上反射光的原理表达式为:

$$[0019] \quad \delta(m, n; x, y) = \frac{K_L}{\pi} + K_G \cdot \frac{8+s}{8\pi} \cos\left(\frac{i(m, n; x, y) - r(m, n; x, y)}{2}\right)^s$$

$$[0020] \quad \delta(m, n; x, y) \leq \theta_d$$

[0021] 由于二次反射光在空间中传播的独特性,其发生在多次反射光材质的曲面上会发生如图所示的两次反射,第二次反射后其传播路径与一次反射光一致,形成混叠光线,因此对二次反射光的分离应在此之前进行。针对曲面上某一点Y来说,入射光经投射器某一像素 (m, n) 发出后,光线经曲面上Y点反射后到达曲面上另一点X,随后被反射到相机像素上一点 (x, y) ,构成二次反射光线。在此设入射到Y的光线为L,经Y反射到X的光线为R,上式中, $i(m, n; x, y)$ 和 $r(m, n; x, y)$ 分别为光线在Y点的入射角与反射角,上面两式代表了二次反射光从投射器某一像素 (m, n) 到相机某一像素 (x, y) ,在第一次发生反射时的角度关系。根据前述

步骤,相机采集的某一像素值可以经傅里叶逆变换获得一幅光传输系数图像,通过极线约束的方法可以将一次反射光筛选出,此时在光传输系数图像上将一次反射光点的值设置为0,保留间接反射光分量;同时根据一次反射光和相机像素的匹配关系,可以计算得到每一相机像素在空间中对应的三维坐标。因此,针对每一相机像素,都可以重建出其仅包含间接反射光分量的光传输系数图像,遍历光传输系数图像中所有点,按照以上公式,满足阈值条件的则可以被确定为二次反射光。

[0022] 本发明的优点在于:

[0023] (1) 本发明针对存在多次反射光表面的三维场景,在未知其表面材质和三维形貌的前提下可以完成多次反射光中一次分量、二次分量和三次及以上分量的分离工作,这与传统分离研究不同,过去多次反射光分离或基于给定表面材质信息或理想朗伯体表面,或仅完成一次直接分量和间接分量的分离,未完成更高次反射光的分解。本发明对二次反射光的分解能帮助光学和计算机图像学领域中BRDFs和BSDFs模型的精确建立和渲染效果的验证。

[0024] (2) 提供了光线由光源到采集器的直观表示。通过引入并行单像素成像,本发明直接重构出光线由投射器到相机过程中的光传输系数,在光传输系数二维图像中,可以直接观察由各次序反射光组成的表示结果。这意味着光线的传播可以直接在光传输系数中直观表示,为分解各个分量提供了基础。

[0025] (3) 完成未知场景二次反射光的分离。在未知场景形貌和表面材质的前提下,分解多次反射光成了难题。本发明从并行单像素成像出发,通过并行单像素成像重构出光传输系数图像,在建立好三维立体模型后,根据二次反射光线的传播路径和Phong模型可以在反射光瓣范围内筛选出满足判断条件的二次反射光。

[0026] 总之,本发明提出基于并行单像素成像的多次反射光表面分离方法,通过并行单像素成像还原出光传输系数,在光传输系数中可以按照一次、二次和三次以上多次反射光分量的各自特性,对各个分量逐个完成分离,实现多次反射光表面上的反光分量分离,其分离结果由二维图像展示。

附图说明

[0027] 图1为本发明的实施流程图。

[0028] 图2光线从投射器阵列到相机阵列的传播示意图。该图中,1为一次反射光传播路径,2为二次反射光路径,3为三次反射光路径,4为条纹投射器,5为投射器阵列上某像素表示,6为被测多次反射光场景,7为相机接收到的多次反射光混叠光线,8为相机阵列上某像素表示,9为相机。

[0029] 图3为由像素得到的光传输系数示意图。该图中,8为相机阵列上某像素表示,9为相机,10为由光传输系数图像,11为像素在图像上对应的极线。

[0030] 图4为二次反射光分离示意图。该图中,1为一次反射光传播路径,2为二次反射光路径,4为条纹投射器,7为相机接受到的多次反射光混叠光线,8为相机阵列上某像素表示,9为相机,12为计算机,13为被测多次反射光场景的曲面表示,14为投射器发出的灰度正弦条纹,15为反射面13在某点的法线,16和17分别代表二次反射光在该点的入射角与反射角。

具体实施方式

[0031] 下面结合附图和具体实施方式对本发明的技术方案作进一步说明。

[0032] 本发明提出一种基于并行单像素成像的多次反射光分离方法,本方法实施流程图如图1所示,通过条纹投射器投射出灰度正弦条纹,该条纹经多次反射光场景反射被相机像素接收,经傅里叶逆变换得到光传输系数的二维图像,在二维图像基础上,首先通过极线约束筛选掉一次反射光线,通过一次反射与投射器像素点建立立体视觉关系,得到三维重构数据,在此基础上建立二次反射光的分离模型,通过二次反射光判据将二次反射光从间接光分量中分离出,最终完成一次、二次和三次及以上反射光分量的分离。多次反射光在空间中形成混叠光线的示意图如图2所示。本发明具体操作如下:

[0033] 1、将条纹投射器与相机标定完成,得到二者之间的空间位姿关系,生成具有并行单像素特点的灰度正弦条纹,确保投射器投射出的调制图案可以被相机所采集到。投射器投射出调制图案,相机经触发对场景进行图像采集,得到一系列场景与条纹结合的场景图像。

[0034] 2、针对相机采集到的二维图像,经过相位相减处理后可以得到傅里叶系数,对其做傅里叶逆变换可以得到如图3中所示的光传输系数。该光传输系数为多次反射光分量的混叠结果,其表达式为:

$$[0035] \quad I_{out}(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h(x, y; m, n) \quad (1)$$

[0036] 其中, $I_{out}(x, y)$ 为相机像素接受到的混合光线的光线强度, $h(x, y; m, n)$ 为投射器坐标 (m, n) 对应到相机阵列坐标 (x, y) 的光传输系数,在附图3中表示为光传输系数中的某一亮点,多次反射光的分离原理如下式所示:

$$[0037] \quad h^n(x, y; m, n) = h(x, y; m, n) \cdot M^n(x, y; m, n) \quad (2)$$

[0038] 其中, $M^n(x, y; m, n)$ 为某一次序 n 次反射光的掩膜,其表达式为:

$$[0039] \quad M^n(x, y; m, n) = \begin{cases} 1 & (m, n) \in C_n \\ 0 & (m, n) \notin C_n \end{cases} \quad (3)$$

[0040] 公式(3)中 C_n 表示当前反射光在逻辑上是否属于所需要的第 n 次反射光,若属于将其置为1,否则为0,(2)式和(3)在数学逻辑上计算了多次反射光的光传输系数,本发明关键即为求出了一次、二次和三次及以上反射光的掩膜表示,以此求出其分离结果。图3说明了从相机某像素还原光传输系数的过程。

[0041] 3、从光传输系数图像中分离一次反射光。图3中9为相机,8为相机阵列上的某一像素,该像素经傅里叶逆变换得到一幅投射器视角下的图像,该图像尺寸为投射器的分辨率大小,图像中一些亮斑即代表不同次序反射光的光传输系数,为分离一次反射光应当寻找一次反射光相较间接光线的特征。因为一次反射光代表光线在传播过程中只经过被测场景的一次反射即到达相机像素,其在空间中应当满足立体视觉的基本约束关系,因此在此步骤中选择通过极线约束筛选一次反射光点,如图中所示,10为光传输系数图像,11为像素在光传输系数图像上的极线,根据极线判断位于极线阈值范围内的光斑,将其像素值进行求和得到的总和即为该像素上接收到的一次反射光光强 $I^1(x, y)$,将所有像素按照此方法进行处理即可得到一次反射光的二维分离结果。

[0042] 4、通过一次反射光点与其对应的相机像素点,可以通过三维视觉立体重构求得被测表面的三维结构。以此三维结果可以建立分离二次反射光的分离模型,如附图4所示。

[0043] 由于二次反射光在空间中传播的独特性,其发生在多次反射光材质的曲面上会发生如图所示的两次反射,第二次反射后其传播路径与一次反射光一致,形成混叠光线,因此对二次反射光的分离应在此之前进行。针对曲面上某一点Y来说,入射光经投射器某一像素(m,n)发出后,光线经曲面上Y点反射后到达曲面上另一点X,随后被反射到相机像素上一点(x,y),构成二次反射光线。在此设入射到Y的光线为L,经Y反射到X的光线为R,根据光的反射特性有以下公式:

$$[0044] \quad i(m,n;x,y) = \arccos\left(\frac{L \cdot N}{|L| \cdot |N|}\right) \quad (4)$$

$$[0045] \quad r(m,n;x,y) = \arccos\left(\frac{R \cdot N}{|R| \cdot |N|}\right) \quad (5)$$

[0046] 其中, $i(m,n;x,y)$ 和 $r(m,n;x,y)$ 分别为光线在Y点的入射角与反射角,上面两式代表了二次反射光从投射器某一像素(m,n)到相机某一像素(x,y),在第一次发生反射时的角度关系。根据前述步骤,相机采集的某一像素值可以经傅里叶逆变换获得一幅光传输系数图像,通过极线约束的方法可以将一次反射光筛选出,此时在光传输系数图像上将一次反射光点的值设置为0,保留间接反射光分量;同时根据一次反射光和相机像素的匹配关系,可以计算得到每一相机像素在空间中对应的三维坐标。因此,针对每一相机像素,都可以重建出其仅包含间接反射光分量的光传输系数图像,其中包含有来自投射器上某些像素发出的间接光,将所有光点坐标带入以下公式:

$$[0047] \quad \delta(m,n;x,y) = \frac{K_L}{\pi} + K_G \cdot \frac{8+s}{8\pi} \cos\left(\frac{i(m,n;x,y) - r(m,n;x,y)}{2}\right)^s \quad (6)$$

$$[0048] \quad \delta(m,n;x,y) \leq \theta_d \quad (7)$$

[0049] 其中, K_L 和 K_G 分别代表朗伯体表面和光滑表面的反射率,范围从0到1,二者分别代表了非光滑面和光滑表面的反射特性。参数s代表了当前表面的粗糙程度,金属材料的数值比其他材质数值更大,一旦其最终的计算结果 $\delta(m,n;x,y)$ 小于给定阈值,则判定这束从(m,n)到(x,y)的光线属于二次反射光,依次可以对每一相机像素进行筛选,从光线的逆向追迹角度选出其对应的二次反射光线,当筛选后,在光传输系数图像中,将满足条件的光点像素值保留,将其余置为0,再将每一幅光传输系数图像数值相加,则得到了最终的二次反射光分离结果。



图1

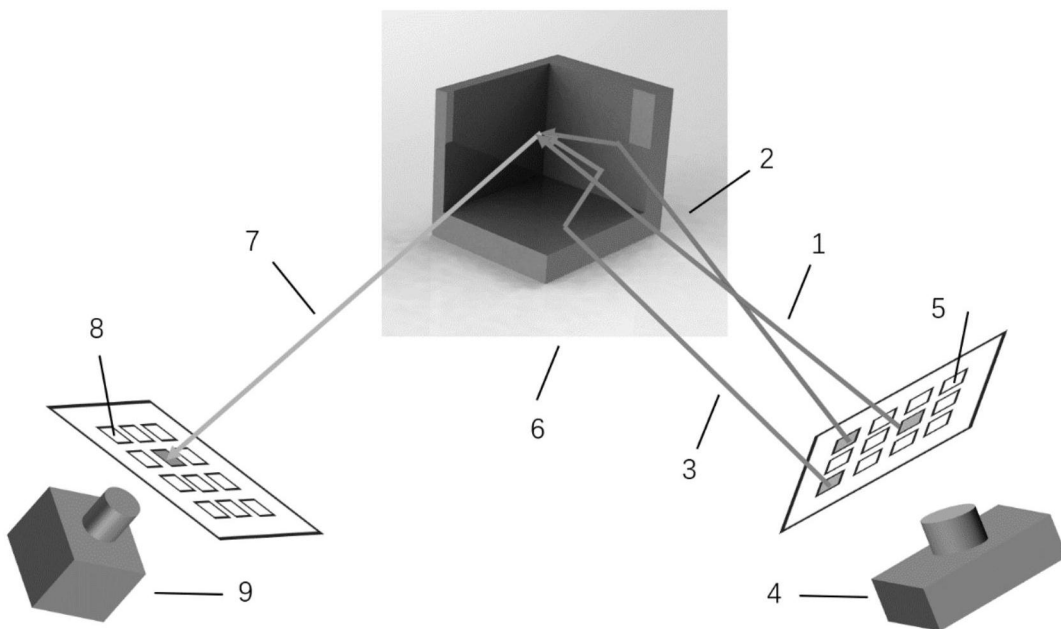


图2

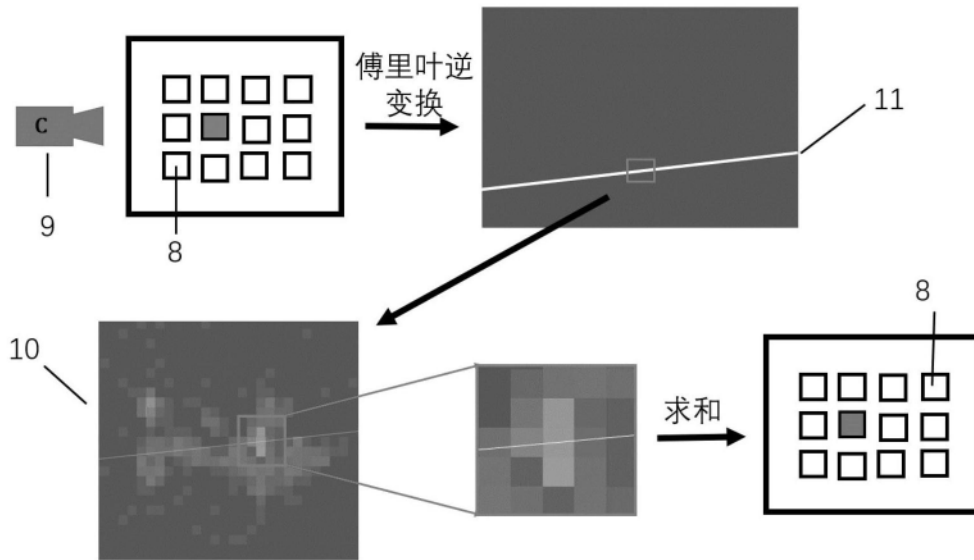


图3

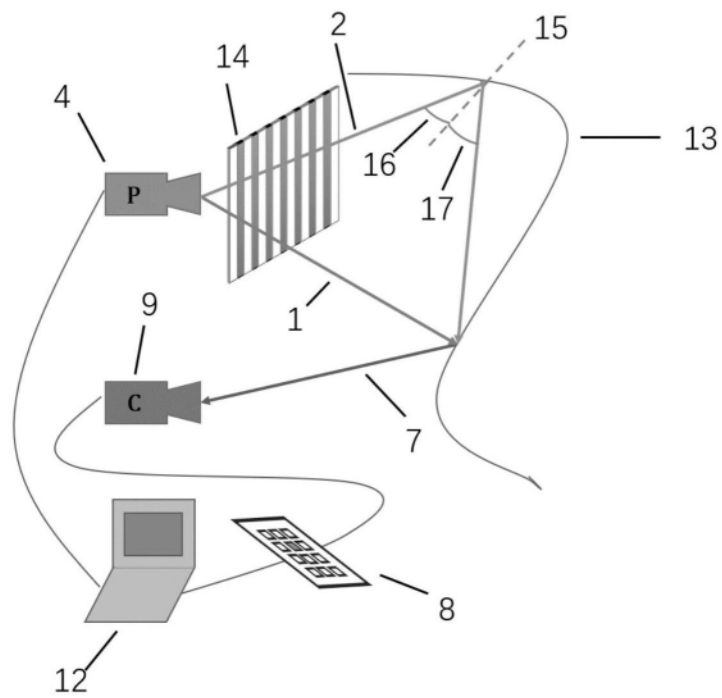


图4