

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2016 年 9 月 9 日 (09.09.2016)



(10) 国际公布号
WO 2016/138758 A1

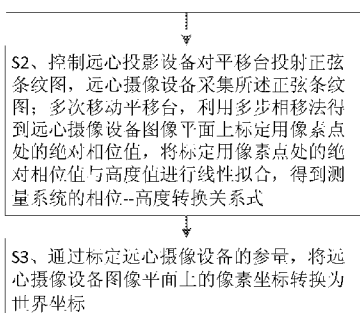
- (51) 国际专利分类号:
G01B 11/25 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2015/089903
- (22) 国际申请日: 2015 年 9 月 18 日 (18.09.2015)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201510098471.5 2015 年 3 月 5 日 (05.03.2015) CN
- (71) 申请人: 深圳大学 (SHENZHEN UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。
- (72) 发明人: 田劲东 (TIAN, Jindong); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 李东 (LI, Dong); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 颜思晨 (YAN, Sichen); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 田勇 (TIAN, Yong); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。
- (74) 代理人: 广州嘉权专利商标事务所有限公司 (JI-AQUAN IP LAW FIRM); 中国广东省广州市天河区黄埔大道西 100 号富力盈泰广场 A 栋 910 张萍, Guangdong 510627 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ,

[见续页]

(54) Title: CALIBRATION METHOD OF TELECENTRIC IMAGING THREE-DIMENSIONAL SHAPE MEASUREMENT SYSTEM

(54) 发明名称: 一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法

S1、搭建远心三维形貌测量系统



- S1 Build a telecentric three-dimensional shape measurement system
- S2 Control a telecentric projection device to project a sinusoidal fringe pattern on a translation stage, collect, by a telecentric photographing device, the sinusoidal fringe pattern; move the translation stage multiple times, utilize a multi-step phase shift method to obtain an absolute phase value at a pixel point for calibration on an image plane of the telecentric photographing device, linear fit the absolute phase value at a pixel point for calibration and a height value to obtain a phase-height conversion relation of the measurement system
- S3 Convert a pixel coordinate on the image plane of the telecentric photographing device to a world coordinate by calibrating parameters of the telecentric photographing device

图 1

(57) Abstract: A calibration method of a telecentric imaging three-dimensional shape measurement system. The method comprises the following steps: step S1: building a telecentric three-dimensional shape measurement system; S2: controlling a telecentric projection device to project a sinusoidal fringe pattern on a translation stage, collecting, by a telecentric photographing device, the sinusoidal fringe pattern; moving the translation stage multiple times, utilizing a multi-step phase shift method to obtain an absolute phase value at a pixel point for calibration on an image plane of the telecentric photographing device, linear fitting the absolute phase value at a pixel point for calibration and a height value to obtain a phase-height conversion relation of the measurement system; S3: converting a pixel coordinate on the image plane of the telecentric photographing device to a world coordinate by calibrating parameters of the telecentric photographing device. In the method, the phase and the height satisfy a linear relationship, such that only the linear relationship between an absolute phase value of a pixel point and the height of the translation stage needs to be measured. The method has a small amount of computation, a high accuracy, a strong operability and practicality. The method further provides an orthographic transformation model of dual-telecentric lens, thus simplifying a calibration process.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2016/138758 A1



BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则 4.17 的声明:

— 发明人资格(细则 4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法, 包括: 步骤 S1: 搭建远心三维形貌测量系统; S2: 控制远心投影设备对平移台投射正弦条纹图, 远心摄像设备采集所述正弦条纹图; 多次移动平移台, 利用多步相移法得到远心摄像设备图像平面上标定用像素点处的绝对相位值, 将标定用像素点处的绝对相位值与高度值进行线性拟合, 得到测量系统的相位--高度转换关系式; S3: 通过标定远心摄像设备的参量, 将远心摄像设备图像平面上的像素坐标转换为世界坐标。该方法中相位与高度满足线性关系, 只需测得一个像素点的绝对相位值与平移台高度的线性关系, 求解运算量小, 精确度高, 可操作性强, 实用性强; 另外, 该方法还提供了一种物像双远心镜头的正射变换模型, 简化了标定过程。

一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法

技术领域

本发明属于三维数据成像和光学三维重建领域，具体涉及一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法。

背景技术

在三维形貌测量系统中，基于投影正弦条纹结构光的三维形貌测量方法由于原理简单、计算速度快、测量精度高等优点而被大量使用，包括相位检测轮廓术和傅里叶变换轮廓术等。通过投影仪对参考平面投射正弦条纹图可得到参考条纹图，当在参考平面上放置被检物体时可得到变形条纹图，由两幅条纹图可得到 2D 绝对相位差，进而得到被测物体的 3D 深度信息。因此需要对系统的相位—高度转化关系以及摄像机参数进行标定。但在传统的单目三维形貌测量系统中，由于投影仪与摄像机使用普通镜头所存在的非线性，投影仪投射到参考平面上的不再是周期恒定的正弦条纹图，因此有人提出使用软件编程在投影仪数字微镜上产生不均匀正弦条纹，从而在系统可测量范围内投影生成空间上周期恒定分布的条纹图。也有人提出使用离焦的反复使二值结构条纹图生成理想的正弦条纹图。这些方法均需要复杂的系统标定过程，并且有些参量很难精确标定，如摄像机镜头的光心到参考平面的距离、投影仪与摄像机光轴的夹角等，而标定的精确性决定了任何一种三维形貌测量系统的精度。

发明内容

本发明所要解决的技术问题是提供一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法，解决现有技术中三维形貌测量系统标定复杂、部分参量很难精确标定从而影响三维形貌测量系统的精度等问题。

本发明解决上述技术问题的技术方案如下：

一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法，所述标定方法包括如下步骤：

步骤 S1：搭建远心三维形貌测量系统，所述测量系统包括：远心投影设备、远心摄像设备、平移台；远心摄像设备的光轴垂直于水平放置的平移台，远心投影设备的光轴与平移台成一夹角，并控制远心摄像设备的光轴与远心投影设备的光轴处于同一平面内；

步骤 S2：使平移台处于远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内，控制远心投影设备对平移台投射正弦条纹图，远心摄像设备采集所述正弦条纹图，选取远心摄像设备图像平面上的任一像素点作为标定用像素点，利用多步相移法解得该标定用像素点的绝对相位值，并记录此时的平移台高度值；

控制平移台在远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内沿远心摄像设备的光轴方向进行数次位移，在移动平移台至不同高度时，获取此高度下标定用像素点的绝对相位值，并记录相应的平移台高度值；

对获得的平移台的高度值与相应的标定用像素点的绝对相位值进行线性拟合，建立远心成像的三维形貌测量系统中绝对相位值与平移台高度值的转换关系；

步骤 S3：通过标定远心摄像设备的参量，将远心摄像设备图像平面上的像素坐标转换为世界坐标。

在上述技术方案的基础上，本发明还可以做如下改进：

进一步，所述步骤 S2，其具体包括：

步骤 S21：控制所述平移台在所述远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内，调整所述平移台使它处于高度测量范围的最低位置，记下平移台的最低高度 z_0 ；

步骤 S22：利用计算机编写周期为 T_0 的正弦条纹图植入所述远心投影设备，使所述远心投影设备向所述平移台投射周期恒定的四幅正弦条纹图；所述四幅正弦条纹图以第一幅正弦条纹图为基础分别进行了 $2\pi L/4$ ($L = 0, 1, 2, 3$) 的相移；所述远心摄像设备按顺序采集四幅条纹图；选取所述远心摄像设备图像平面上的任一像素点作为标定用像素点，设所述标定用像素点在所述远心摄像设备的图像坐标系中的像素坐标为 (μ, ν) ；所述标定用像素点的光强 $I_L(\mu, \nu)$ 表达式为：

$$I_L(\mu, \nu) = a(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \cos \left[\phi(\mu, \nu) + \frac{2\pi L}{4} \right] \quad (1)$$

其中 $L = 0, 1, 2, 3$, $a(\mu, \nu)$ 为背景光强, $b(\mu, \nu)$ 为条纹对比度, $\phi(\mu, \nu)$ 为标定用像素点 (μ, ν) 处的绝对相位值;

按照四步相移法, 可求得所述标定用像素点 (μ, ν) 处的包裹相位为 $\phi(\mu, \nu)$:

$$\phi(\mu, \nu) = \arctan \left[\frac{\sum_{L=0}^3 I_L(\mu, \nu) \sin \frac{2\pi L}{4}}{\sum_{L=0}^3 I_L(\mu, \nu) \cos \frac{2\pi L}{4}} \right] \quad (2)$$

由于包裹相位的值域被切断在 $[-\pi, \pi]$ 之间, 须将其进行相位展开, 得到所述标定用像素点 (μ, ν) 处绝对相位值 $\varphi(\mu, \nu)$ 为:

$$\varphi(\mu, \nu) = \phi(\mu, \nu) + 2k(\mu, \nu)\pi \quad (3)$$

其中 $k(\mu, \nu) = \pm 1$;

步骤 S23: 控制所述平移台在所述远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内沿所述远心摄像设备的光轴方向等间距移动 Δz 的距离, 使所述平移台处于 $z_j = z_0 + j\Delta z$ ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 的不同高度处, 按照所述步骤 S22 的方法分别求得当平移台处于 z_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 的高度时标定用像素点 (μ, ν) 处绝对相位值 $\varphi_{z_j}(\mu, \nu)$;

步骤 S24: 对获得的平移台的不同高度 z_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 与相应的标定用像素点 (μ, ν) 的绝对相位值 $\varphi_{z_j}(\mu, \nu)$ 进行线性拟合; 得到远心成像的三维形貌测量系统中绝对相位值与高度的线性转换关系式:

$$z = M\varphi(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \quad (4)$$

其中 M 为线性比例因子。

进一步, 所述步骤 S32, 其具体包括:

步骤 S321: 在不考虑镜头畸变情况下, 建立物像双远心镜头成像时的正射变换模型; 所述物像双远心镜头成像时的正射变换模型为:

$$\begin{bmatrix} x_{\mu i} \\ y_{\mu i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m/d\mu & 0 & 0 \\ 0 & m/d\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\omega i} \\ Y_{\omega i} \\ Z_{\omega i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $(x_{\mu i}, y_{\mu i})$ 为一系列特征点在所述远心摄像设备的成像平面坐标系中的图像坐标, $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 为一系列特征点在世界坐标系中的世界坐标, m 为物像双远心镜头的放大倍数, $R = [r_{ij}]$ 为旋转矩阵, $T = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为平移矩阵, $d\mu$ 和 $d\nu$ 分别为每个像素在 X 轴、 Y 轴方向上的物理尺寸;

在不考虑镜头畸变情况下, 所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标与远心摄像设备成像平面上的图像坐标的对应关系为:

$$\begin{bmatrix} (\mu_i - \mu_0) d\mu \\ (v_i - v_0) dv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mu i} \\ y_{\mu i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 (μ_0, v_0) 为远心摄像设备图像平面上的中心像素点坐标, 也是成像平面上图像坐标的原点;

步骤 S322: 考虑所述远心摄像设备的镜头畸变, 所述镜头畸变的表达式为:

$$\begin{bmatrix} \delta_{x_i} \\ \delta_{y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x_{\mu i} (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + h_1 (3x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + 2h_2 x_{\mu i} y_{\mu i} + s_1 (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) \\ k_1 y_{\mu i} (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + 2h_1 x_{\mu i} y_{\mu i} + h_2 (x_{\mu i}^2 + 3y_{\mu i}^2) + s_2 (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, δ_{x_i} 为每个像素在 X 轴方向上的畸变参数, δ_{y_i} 为每个像素在 Y 轴方向上的畸变参数; k_1 为径向畸变程度的参数, h_1 、 h_2 为离心畸变程度的参数, s_1 、 s_2 为薄棱镜畸变程度的参数;

建立所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ_i, v_i) 与远心摄像设备成像平面上的图像坐标 $(x_{\mu i}, y_{\mu i})$ 的对应关系:

$$\begin{bmatrix} (\mu_i - \mu_0) d\mu \\ (v_i - v_0) dv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mu i} \\ y_{\mu i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{x_i} \\ \delta_{y_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 (μ_0, v_0) 为远心摄像设备图像平面上的中心像素点坐标, 也是成像平面上图像坐标的原点;

步骤 S323: 所述远心摄像设备的参量包括外参数旋转矩阵 R 、平移矩阵 T 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值;

由所述一系列特征点的世界坐标 $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 和对应的一系列像素坐标 (μ_i, v_i) 根据式 (5)、(6) 求在不考虑畸变的情况下远心摄像设备的外参数 R 、 T 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值;

再将式 (8) 中用图像坐标表示的像素坐标带入式 (5) 中求远心摄像设备的内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 的初值;

由远心摄像设备的内外参数初值、物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值和特征点的像素坐标 (μ_i, v_i) , 反求得到考虑了镜头畸变的一系列特征点的世界坐标 $(\hat{X}_{\omega i}, \hat{Y}_{\omega i}, \hat{Z}_{\omega i})$;

建立目标函数:

$$F = \sum_{i=1}^N \left\| (x_{\omega i}, y_{\omega i}, z_{\omega i}) - (\hat{x}_{\omega i}, \hat{y}_{\omega i}, \hat{z}_{\omega i}) \right\|^2 \quad (9)$$

其中, N 为特征点总数, 通过最小二乘法求得所述远心摄像设备外参数 R 、 T 和内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的精确值;

步骤 S324: 根据得到的所述远心摄像设备外参数 R 、 T 和内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m , 将所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ, v) 转换为世界坐标 (X_{ω}, Y_{ω}) 。

本发明一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法的有益效果在于: 本发明利用远心镜头的特性搭建基于相移投影的三维相貌测量系统, 该系统中投影设备与摄像设备均使用双侧远心镜头, 在远心投影系统的景深范围内, 使得投影设备投射到参考平面上的为周期恒定的正弦条纹图, 在远心摄像设备的景深范围内, 建立远心摄像设备图像平面上任一像素点的绝对相位值与平移台高度一一对应的线性关系, 便可以确定该三维形貌测量系统的相位与高度一一对应的线性关系; 本发明中相位与高度满

足线性关系,只需测得一个像素点的绝对相位值与平移台高度的线性关系,求解运算量小,精确度高,可操作性强,实用性强。

同时,本发明远心成像的三维形貌测量系统解除了传统的三维形貌测量系统中对设备摆放位置的许多限制,如:(1)不要求投影仪的光轴 P_1P_2 与摄像设备的光轴 C_1C_2 严格交于参考平面上一点,只要光轴 P_1P_2 与光轴 C_1C_2 共面,摄像设备能捕捉到被测物体的全景即可;(2)由于远心系统中投影仪的出瞳与摄像设备的入瞳都位于无穷远处,因此没有投影仪的入瞳与摄像设备的出瞳的连线须平面于参考平面的要求;(3)此系统也没有对投影仪中像方远心镜头的主点 P_2 与摄像设备中物方远心镜头的主点 C_2 作出任何位置上的约束,只要平移台在各自的景深范围内即可。

另外,本发明在求解远心摄像设备的内外参数过程中,建立了物像双远心镜头的正射变换模型,只需要对景深范围内的一个高度标定远心摄像设备的内外参数,便可以将远心系统景深范围内的所有高度都运用这种关系去对应,简化了标定过程,同时在参数标定过程中,采用求解最优化的方法修正参数,提高系统的精度。

附图说明

图1为本发明一种三维形貌测量系统的标定方法的流程示意图;

图2为本发明一种远心三维形貌测量系统的标定方法的设备位置示意图;

图3为本发明步骤S2的一具体实施例的流程示意图;

图4为步骤S23中控制平移台在系统中移动的结构示意图,

图5为本发明步骤S2一具体实施例中绝对相位值与平移台高度值的线性拟合曲线图;

图6为本发明步骤S3的一具体实施例的流程示意图;

图7为本发明步骤S32的一具体实施例的流程示意图;

图8为具有远心透镜的摄像设备的成像模型示意图。

附图中,各标号所代表的部件列表如下:

101、远心投影设备,102、远心摄像设备,103、平移台,104、待测物体。

具体实施方式

以下结合附图对本发明的原理和特征进行描述,所举实例只用于解释本发明,并非用于限定本发明的范围。

本发明一种三维形貌测量系统的标定方法,搭建了一套远心成像的三维形貌测量系统,使得平移台在远心投影设备的景深范围内移动时,远心投影设备投射到平移台上的为周期恒定的正弦条纹图,在远心摄像设备的景深范围内,建立摄像设备图像平面上任一像素点的绝对相位值与平移台高度一一对应的线性关系,便可以确定该三维形貌测量系统的相位—高度映射关系;同时本方法建立了物像双远心镜头的正射变换模型,只需要对景深范围内的一个高度标定远心摄像设备的内外参数,便可以将远心系统景深范围内的所有高度都运用这种关系去对应,简化了标定过程。

图1为本发明一种三维形貌测量系统的标定方法的流程示意图,图2为本发明一种远心三维形貌测量系统的标定方法的设备位置示意图,如图1、2所示,本发明所述标定方法包括如下步骤:

步骤S1:搭建远心三维形貌测量系统,所述测量系统包括:远心投影设备101、远心摄像设备102、平移台103;远心摄像设备102的光轴垂直于水平放置的平移台103,远心投影设备101的光轴与平移台103成一夹角,并控制远心摄像设备101的光轴与远心投影设备102的光轴处于同一平面内。

其中,远心投影设备101可以为使用物像双远心镜头的数字投影仪,数字投影仪可以是数字液晶投影装置(LCD投影仪)、数字微镜投影装置(DMD投影仪)或硅基片液晶投影装置(LCOS投影仪),可用计算机图像处理系统方便地生成灰度条纹图案并写入数字投影装置;远心摄像设备102可以为使用物像双远心镜头的摄像机,摄像机可以为电荷耦合器件、液晶器件、空间光调制器件、CMOS器件或数码相机;应用该测量系统测量物体的三维信息时,待测物体104放置于平移台103上,平移台103水平放置并且能上下移动;平移台103可以为电控平移台,用计算机控制步进距离的电动步进机装置;平移台103也可手动控制移动的平移台。

图2为本发明一种远心三维形貌测量系统的标定方法的设备位置示意图,如图2所示,调节远心投影设备101、远心摄像设备102的相对位置,使平移台103处于远心投影设备101和远心摄像设备102的共同景深范围内,并确保远心投影设备101投射到平移台103上的结构光能被远心摄像设备102采集。为了简化图例,图2中远心投影设备101的物像双远心镜头分别用其主点 P_1 、 P_2 来示意投影

的光线, 同样远心摄像设备 102 的物像双远心镜头分别用其主点 C_1 、 C_2 来示意光线的成像。

步骤 S2: 使平移台 103 处于远心投影设备 101 和远心摄像设备 102 的共同景深范围内, 控制远心投影设备 101 对平移台 103 投射正弦条纹图, 远心摄像设备 102 采集正弦条纹图, 选取远心摄像设备 102 图像平面上的任一像素点作为标定用像素点, 利用多步相移法解得该标定用像素点的绝对相位值, 并记录此时的平移台 103 高度值;

控制平移台 103 在远心投影设备 101 和远心摄像设备 102 的共同景深范围内沿远心摄像设备 102 的光轴方向进行数次位移, 在移动平移台 103 至不同高度时, 获取此高度下标定用像素点的绝对相位值, 并记录相应的平移台 103 高度值;

对获得的平移台 103 的高度值与相应的标定用像素点的绝对相位值进行线性拟合, 建立远心成像的三维形貌测量系统中绝对相位值与平移台高度值的转换关系;

图 3 为本发明步骤 S2 的一具体实施例的流程示意图, 如图 3 所示, 在本实施例中, 所述步骤 S2, 其具体包括:

步骤 S21: 控制所述平移台 103 在远心投影设备 101 和远心摄像设备 102 的共同景深范围内, 调整平移台 103 使它处于高度测量范围的最低位置, 记下平移台 103 的最低高度 z_0 ;

步骤 S22: 利用计算机编写周期为 T_0 的正弦条纹图植入远心投影设备 101, 使远心投影设备 101 向平移台 103 投射周期恒定的四幅正弦条纹图; 四幅正弦条纹图以第一幅正弦条纹图为基础分别进行了 $2\pi L/4$ ($L = 0, 1, 2, 3$) 的相移; 远心摄像设备 102 按顺序采集四幅条纹图; 选取远心摄像设备 102 图像平面上的任一像素点作为标定用像素点, 设标定用像素点在远心摄像设备 102 的图像坐标系中的像素坐标为 (μ, ν) , 该像素点为平移台上点 (x, y) 处成像在摄像设备图像平面上的像素点, 由于与本发明所述方法相配套的远心成像的三维形貌测量系统中投影设备 101 与摄像设备 102 均使用双侧远心镜头, 在远心投影系统的景深范围内, 投影设备投射到参考平面上的为周期恒定的正弦条纹图, 因而平移台上点 (x, y) 处的绝对相位值与像素点 (μ, ν) 处的绝对相位值相等, 且标定用像素点的光强 $I_L(\mu, \nu)$ 表达式为:

$$I_L(\mu, \nu) = a(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \cos \left[\varphi(\mu, \nu) + \frac{2\pi L}{4} \right] \quad (1)$$

其中 $L = 0, 1, 2, 3$, $a(\mu, \nu)$ 为背景光强, $b(\mu, \nu)$ 为条纹对比度, $\varphi(\mu, \nu)$ 为标定用像素点 (μ, ν) 处的绝对相位值;

按照四步相移法, 可求得标定用像素点 (μ, ν) 处的包裹相位为 $\phi(\mu, \nu)$:

$$\phi(\mu, \nu) = \arctan \left[\frac{\sum_{L=0}^3 I_L(\mu, \nu) \sin \frac{2\pi L}{4}}{\sum_{L=0}^3 I_L(\mu, \nu) \cos \frac{2\pi L}{4}} \right] \quad (2)$$

由于包裹相位的值域被切断在 $[-\pi, \pi]$ 之间, 须将其进行相位展开, 得到标定用像素点 (μ, ν) 处绝对相位值 $\varphi(\mu, \nu)$ 为:

$$\varphi(\mu, \nu) = \phi(\mu, \nu) + 2k(\mu, \nu)\pi \quad (3)$$

其中 $k(\mu, \nu) = \pm 1$;

步骤 S23: 图 4 为步骤 S23 中控制平移台在系统中移动的结构示意图, 如图 4 所示, 控制平移台 103 在远心投影设备 101 和远心摄像设备 102 的共同景深范围内沿远心摄像设备 102 的光轴方向等间距移动 Δz 的距离, 使平移台 103 处于 $z_j = z_0 + j\Delta z$ ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 的不同高度处, 按照步骤 S22 的方法分别求得当平移台 103 处于 z_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 的高度时标定用像素点

(μ, ν) 处绝对相位值 $\varphi_{z_j}(\mu, \nu)$;

步骤 S24: 对获得的平移台 103 的不同高度 z_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 与相应的标定用像素点

(μ, ν) 的绝对相位值 $\varphi_{z_j}(\mu, \nu)$ 进行线性拟合; 得到远心成像的三维形貌测量系统中绝对相位值与高度的线性转换关系式:

$$z = M\varphi(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \quad (4)$$

其中 M 为线性比例因子, 由于在三维形貌测量中往往得到的是受物体高度调制的相位差, 因此只需关注线性关系中的线性比例因子的精度。

远心镜头具有在一定的物距范围内, 使得到的图像放大倍率不会随物距的变化而变化的特性, 因而在本发明远心成像的三维形貌测量系统中, 只需求得在景深范围内标定用像素点处的绝对相位值与高度的线性转换关系, 便可以将远心摄像设备图像上的任一像素点都运用这种关系去对应, 简化了标定过程。

为更清楚表述本发明步骤 S2 远心成像的三维形貌测量系统中标定绝对相位值 $\varphi(\mu, \nu)$ 与高度 z 的转换关系式的过程, 下面对本实施的具体实施方式做进一步说明。

本实施例中的远心摄像设备采用了大恒工业级 CMOS 摄像机 DH-HV1351-UC, 像素为 1280×1024 , 镜头为大恒的物像双远心镜头 GC0230105; 远心投影设备采用了惠普的投影仪 AX325AA, 分辨率为 800×600 , 镜头为大恒的物像双远心镜头 GC0230106; 平移台为手动控制上下移动的平移台, 其移动精度为 0.01mm 。本实施例投影仪和摄像机的摆放位置如图 2 所示并保持一定夹角不变, 控制平移台沿 z 轴在竖直方向上平移。投影仪向平移台倾斜投射垂直于 X 轴的正弦条纹图的周期为 16pixel , 投射的四幅正弦条纹图以第一幅正弦条纹图为基础产生 $2\pi L/4$ ($L = 0, 1, 2, 3$) 的相移; 规定第一幅正弦条纹图的初相位为 0, 则摄像机按顺序采集的四幅正弦条纹图可以表示为:

$$I_L(\mu, \nu) = a(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \cos \left[\varphi(\mu, \nu) + \frac{2\pi L}{4} \right] \quad (1)$$

其中 $L = 0, 1, 2, 3$, 对每一个高度下的平移台投射这四幅等相位差的正弦条纹图, 摄像机按顺序采集此四幅正弦条纹图, 利用四步相移法即可得出摄像机图像平面上像素点 (μ, ν) 在每一个高度 z 下的绝对相位值 $\varphi(\mu, \nu)$ 。

本实施例中选择摄像机图像平面上索引为 (710, 571) 的像素点, 手动控制平移台每次向上移动 0.05mm 的距离, 规定平移台所能达到的最低高度为 0mm , 标定高度范围为 2.40mm 至 2.70mm 。用四步相移法解得摄像机图像平面上索引为 (710, 571) 的像素点的绝对相位值 $\varphi(710, 570)$ 与平移台高度 z 的对应关系如下面表格所示:

绝对相位值 (rad)	3.1733	3.2748	3.3778	3.4885	3.5884	3.6870	3.8023
平移台高度 (mm)	2.40	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70

对这些数据进行线性拟合, 拟合的结果如图 5 所示, 图 5 为本发明步骤 S2 一具体实施中绝对相位值与平移台高度值的线性拟合曲线图。值得说明的是, 本案例是为了避免进行相位展开这一操作, 所标定的高度为 2.40mm 至 2.70mm 。实际上, 本案例所搭建的远心成像的测量系统的高度测量范围高达 5mm 。

本发明还包括步骤 S3, 步骤 S3: 通过标定远心摄像设备的参量, 将远心摄像设备图像平面上的像素坐标转换为世界坐标。

图 6 为本发明步骤 S3 的一具体实施例的流程示意图, 如图 6 所示, 在本实施例中步骤 S3, 其具体包括:

步骤 S31、将平移台调整至远心投影设备与远心摄像设备的共同景深范围内, 放置标定靶于平移台上, 由远心投影设备向标定靶投射白光, 远心摄像设备采集标定靶图像; 对采集到的图像提取特征点, 得到一系列世界坐标下特征点的世界坐标 $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$, 与特征点成像在远心摄像设备

的图像坐标系上对应的一系列像素坐标 (μ_i, ν_i) ;

步骤 S32、利用一系列特征点的世界坐标 $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 与像素坐标 (μ_i, ν_i) 的对应关系, 标定远心摄像设备的参量, 将远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ, ν) 转换为世界坐标 (X_{ω}, Y_{ω}) 。

图 7 为本发明步骤 S32 的一具体实施例的流程示意图, 如图 7 所示, 所述步骤 S32, 其具体包括:

步骤 S321: 在不考虑镜头畸变情况下, 建立物像双远心镜头成像时的正射变换模型; 所述物像双远心镜头成像时的正射变换模型为:

$$\begin{bmatrix} X_{\mu i} \\ y_{\mu i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m/d\mu & 0 & 0 \\ 0 & m/d\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\omega i} \\ Y_{\omega i} \\ Z_{\omega i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $(X_{\mu i}, y_{\mu i})$ 为一系列特征点在所述远心摄像设备的成像平面坐标系中的图像坐标, $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 为一系列特征点在世界坐标系中的世界坐标, m 为物像双远心镜头的放大倍数, $R = [r_{ij}]$ 为旋转矩阵, $T = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为平移矩阵, $d\mu$ 和 $d\nu$ 分别为每个像素在 X 轴、 Y 轴方向上的物理尺寸;

在不考虑镜头畸变情况下, 所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标与远心摄像设备成像平面上的图像坐标的对应关系为:

$$\begin{bmatrix} (\mu_i - \mu_0) d\mu \\ (\nu_i - \nu_0) d\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\mu i} \\ y_{\mu i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 (μ_0, ν_0) 为远心摄像设备图像平面上的中心像素点坐标, 也是成像平面上图像坐标的原点。

在本实施例中所采用的正射变换模型, 其具体建立过程如下:

图 8 为具有远心透镜的摄像设备的成像模型示意图, 本实施例中远心摄像设备的成像模型如图 8 所示, 特征点 P 在世界坐标系下的坐标为 $(X_{\omega}, Y_{\omega}, Z_{\omega})$, $p(X_c, Y_c, Z_c)$ 是特征点 P 在远心摄像设备坐标系中的坐标; 如果是理想的正投影模型, 那么 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 在成像平面坐标系中的理想图像坐标就是 $p(x_u, y_u)$, 由于镜头畸变, 实际的图像坐标 $p(x_d, y_d)$ 与理想图像坐标 $p(x_u, y_u)$ 并不相同; (u, v) 是远心摄像设备图像平面以像素为单位的像素坐标。

远心镜头进行缩放正投影, 在不考虑镜头畸变情况下, 任意的投影点 P 的理想 (不失真) 在成像平面的图像坐标与远心摄像设备坐标的转换关系表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{\mu} \\ y_{\mu} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-a)$$

其中 m 是远心透镜的有效放大倍数。

任意的投影点 P 的世界坐标与远心摄像设备坐标的关系表示为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-b)$$

其中, $R = [r_{ij}]$ 是旋转矩阵, $T = [t_x \ t_y \ t_z]$ 是平移矩阵。

在不考虑任何畸变的情况下, 成像平面坐标系 XOY 与远心摄像设备图像平面坐标系相一致, 因此, 从成像平面坐标 (X_u, Y_u) 转换成像素坐标 (u, v) 的表达式为:

$$\begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/du & 0 & 0 \\ 0 & 1/dv & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-c)$$

其中 du 和 dv 分别是一个像素在 X 和 Y 方向上的物理尺寸, (μ_0, ν_0) 为远心摄像设备图像平面上的中心像素点坐标, 也是成像平面上图像坐标的原点。

结合式 (5-a) - (5-c), 远心透镜的正投影形成并通过以下等式表示:

$$\begin{bmatrix} x_\mu \\ y_\mu \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m/d\mu & 0 & 0 \\ 0 & m/dv & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-d)$$

式 (5-d) 即为物像双远心镜头成像时的正射变换模型。

步骤 S322: 考虑所述远心摄像设备的镜头畸变, 镜头畸变主要有三种类型: 径向畸变, 偏心畸变和薄棱镜畸变; 在本实施例中考虑有效的失真, 镜头畸变的表达式为:

$$\begin{bmatrix} \delta_{x_i} \\ \delta_{y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x_{\mu i} (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + h_1 (3x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + 2h_2 x_{\mu i} y_{\mu i} + s_1 (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) \\ k_1 y_{\mu i} (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + 2h_1 x_{\mu i} y_{\mu i} + h_2 (x_{\mu i}^2 + 3y_{\mu i}^2) + s_2 (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, δ_{x_i} 为每个像素在 X 轴方向上的畸变参数, δ_{y_i} 为每个像素在 Y 轴方向上的畸变参数; k_1 为径向畸变程度的参数, h_1 、 h_2 为离心畸变程度的参数, s_1 、 s_2 为薄棱镜畸变程度的参数;

建立所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ_i, ν_i) 与远心摄像设备成像平面上的图像坐标 $(x_{\mu i}, y_{\mu i})$ 的对应关系:

$$\begin{bmatrix} (\mu_i - \mu_0) d\mu \\ (\nu_i - \nu_0) dv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mu i} \\ y_{\mu i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{x_i} \\ \delta_{y_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 (μ_0, ν_0) 为远心摄像设备图像平面上的中心像素点坐标, 也是成像平面上图像坐标的原点。

步骤 S323: 所述远心摄像设备的参量包括外参数旋转矩阵 R 、平移矩阵 T 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值;

由所述一系列特征点的世界坐标 $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 和对应的一系列像素坐标 (μ_i, ν_i) 根据式

(5)、(6) 求在不考虑畸变的情况下远心摄像设备的外参数 R 、 T 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值;

再将式 (8) 中用图像坐标表示的像素坐标带入式 (5) 中求远心摄像设备的内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 的初值;

由远心摄像设备的内外参数初值、物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值和特征点的像素坐标 (μ_i, ν_i) , 反求得到考虑了镜头畸变的一系列特征点的世界坐标 $(\hat{X}_{wi}, \hat{Y}_{wi}, \hat{Z}_{wi})$;

建立目标函数:

$$F = \sum_{i=1}^N \left\| (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) - \begin{pmatrix} \hat{X}_{wi} \\ \hat{Y}_{wi} \\ \hat{Z}_{wi} \end{pmatrix} \right\|^2 \quad (9)$$

其中, N 为特征点总数, 通过最小二乘法精确得到所述远心摄像设备外参数 m 、 R 、 T 和内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 ;

步骤 S324: 根据得到的所述远心摄像设备外参数 R 、 T 和内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m , 将所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ, ν) 转换为世界坐标 (X_w, Y_w) 。

以上所述实施步骤和方法仅仅表达了本发明的一种实施方式, 描述较为具体和详细, 但并不能因此而理解为对本发明专利范围的限制。在不脱离本发明专利构思的前提下, 所作的变形和改进应当都属于本发明专利的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法, 其特征在于: 所述标定方法包括如下步骤:

步骤 S1: 搭建远心三维形貌测量系统, 所述测量系统包括: 远心投影设备、远心摄像设备、平移台; 远心摄像设备的光轴垂直于水平放置的平移台, 远心投影设备的光轴与平移台成一夹角, 并控制远心摄像设备的光轴与远心投影设备的光轴处于同一平面内;

步骤 S2: 使平移台处于远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内, 控制远心投影设备对平移台投射正弦条纹图, 远心摄像设备采集所述正弦条纹图, 选取远心摄像设备图像平面上的任一像素点作为标定用像素点, 利用多步相移法解得该标定用像素点的绝对相位值, 并记录此时的平移台高度值;

控制平移台在远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内沿远心摄像设备的光轴方向进行数次位移, 在移动平移台至不同高度时, 获取此高度下标定用像素点的绝对相位值, 并记录相应的平移台高度值;

对获得的平移台的高度值与相应的标定用像素点的绝对相位值进行线性拟合, 建立远心成像的三维形貌测量系统中绝对相位值与平移台高度值的转换关系;

步骤 S3: 通过标定远心摄像设备的参量, 将远心摄像设备图像平面上的像素坐标转换为世界坐标。

2. 根据权利要求 1 所述一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法, 其特征在于: 所述步骤 S2, 其具体包括:

步骤 S21: 控制所述平移台在所述远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内, 调整所述平移台使它处于高度测量范围的最低位置, 记下平移台的最低高度 z_0 ;

步骤 S22: 利用计算机编写周期为 T_0 的正弦条纹图植入所述远心投影设备, 使所述远心投影设备向所述平移台投射周期恒定的四幅正弦条纹图; 所述四幅正弦条纹图以第一幅正弦条纹图为基础分别进行了 $2\pi L/4$ ($L = 0, 1, 2, 3$) 的相移; 所述远心摄像设备按顺序采集四幅条纹图; 选取所述远心摄像设备图像平面上的任一像素点作为标定用像素点, 设所述标定用像素点在所述远心摄像设备的图像坐标系中的像素坐标为 (μ, ν) ; 所述标定用像素点的光强 $I_L(\mu, \nu)$ 表达式为:

$$I_L(\mu, \nu) = a(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \cos \left[\phi(\mu, \nu) + \frac{2\pi L}{4} \right] \quad (1)$$

其中 $L = 0, 1, 2, 3$, $a(\mu, \nu)$ 为背景光强, $b(\mu, \nu)$ 为条纹对比度, $\phi(\mu, \nu)$ 为标定用像素点 (μ, ν) 处的绝对相位值;

按照四步相移法, 可求得所述标定用像素点 (μ, ν) 处的包裹相位为 $\phi(\mu, \nu)$:

$$\phi(\mu, \nu) = \arctan \left[\frac{\sum_{L=0}^3 I_L(\mu, \nu) \sin \frac{2\pi L}{4}}{\sum_{L=0}^3 I_L(\mu, \nu) \cos \frac{2\pi L}{4}} \right] \quad (2)$$

由于包裹相位的值域被切断在 $[-\pi, \pi]$ 之间, 须将其进行相位展开, 得到所述标定用像素点 (μ, ν) 处绝对相位值 $\phi(\mu, \nu)$ 为:

$$\phi(\mu, \nu) = \phi(\mu, \nu) + 2k(\mu, \nu)\pi \quad (3)$$

其中 $k(\mu, \nu) = \pm 1$;

步骤 S23: 控制所述平移台在所述远心投影设备和远心摄像设备的共同景深范围内沿所述远心摄像设备的光轴方向等间距移动 Δz 的距离, 使所述平移台处于 $z_j = z_0 + j\Delta z$ ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 的不同高度处, 按照所述步骤 S22 的方法分别求得当平

移台处于 Z_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 的高度时标定用像素点 (μ, ν) 处绝对相位值 $\varphi_{Z_j}(\mu, \nu)$;

步骤 S24: 对获得的平移台的不同高度 Z_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 与相应的标定用像素点 (μ, ν) 的绝对相位值 $\varphi_{Z_j}(\mu, \nu)$ 进行线性拟合; 得到远心成像的三维形貌测量系统中绝对相位值与高度的线性转换关系式:

$$z = M\varphi(\mu, \nu) + b(\mu, \nu) \quad (4)$$

其中 M 为线性比例因子。

3. 根据权利要求 1 所述一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法, 其特征在于:

所述步骤 S3, 其具体包括:

步骤 S31: 将所述平移台调整至所述远心投影设备与远心摄像设备的共同景深范围内, 放置标定靶于所述平移台上, 由所述远心投影设备向标定靶投射白光, 所述远心摄像设备采集标定靶图像; 对采集到的图像提取特征点, 得到一系列世界坐标下特征点的世界坐标 $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$, 与特征点成像在所述远心摄像设备的图像坐标系上对应的一系列像素坐标 (μ_i, ν_i) ;

步骤 S32: 利用一系列特征点的世界坐标 $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 与像素坐标 (μ_i, ν_i) 的对应关系, 标定所述远心摄像设备的参量, 将所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ, ν) 转换为世界坐标 (X_{ω}, Y_{ω}) 。

4. 根据权利要求 3 所述一种远心成像的三维形貌测量系统标定方法, 其特征在于:

所述步骤 S32, 其具体包括:

步骤 S321: 在不考虑镜头畸变情况下, 建立物像双远心镜头成像时的正射变换模型; 所述物像双远心镜头成像时的正射变换模型为:

$$\begin{bmatrix} X_{\mu i} \\ Y_{\mu i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m/d\mu & 0 & 0 \\ 0 & m/d\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\omega i} \\ Y_{\omega i} \\ Z_{\omega i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $(X_{\mu i}, Y_{\mu i})$ 为一系列特征点在所述远心摄像设备的成像平面坐标系中的图像坐标, $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 为一系列特征点在世界坐标系中的世界坐标, m 为物像双远心镜头的放大倍数, $R = [r_{ij}]$ 为旋转矩阵, $T = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为平移矩阵, $d\mu$ 和 $d\nu$ 分别为每个像素在 X 轴、 Y 轴方向上的物理尺寸;

在不考虑镜头畸变情况下, 所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标与远心摄像设备成像平面上的图像坐标的对应关系为:

$$\begin{bmatrix} (\mu_i - \mu_0) d\mu \\ (\nu_i - \nu_0) d\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\mu i} \\ Y_{\mu i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 (μ_0, ν_0) 为远心摄像设备图像平面上的中心像素点坐标, 也是成像平面上图像坐标的原点;

步骤 S322: 考虑所述远心摄像设备的镜头畸变, 所述镜头畸变的表达式为:

$$\begin{bmatrix} \delta_{x_i} \\ \delta_{y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x_{\mu i} (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + h_1 (3x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + 2h_2 x_{\mu i} y_{\mu i} + s_1 (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) \\ k_1 y_{\mu i} (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) + 2h_1 x_{\mu i} y_{\mu i} + h_2 (x_{\mu i}^2 + 3y_{\mu i}^2) + s_2 (x_{\mu i}^2 + y_{\mu i}^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, δ_{x_i} 为每个像素在 X 轴方向上的畸变参数, δ_{y_i} 为每个像素在 Y 轴方向上的畸变参数; k_1 为径向畸变程度的参数, h_1 、 h_2 为离心畸变程度的参数, s_1 、 s_2 为薄棱镜畸变程度的参数;

建立所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ_i, ν_i) 与远心摄像设备成像平面上的图像坐标 $(x_{\mu i}, y_{\mu i})$ 的对应关系:

$$\begin{bmatrix} (\mu_i - \mu_0) d\mu \\ (\nu_i - \nu_0) d\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mu i} \\ y_{\mu i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{x_i} \\ \delta_{y_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 (μ_0, ν_0) 为远心摄像设备图像平面上的中心像素点坐标也是成像平面上图像坐标的原点;

步骤 S323: 所述远心摄像设备的参量包括外参数旋转矩阵 R 、平移矩阵 T 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值;

由所述一系列特征点的世界坐标 $(X_{\omega i}, Y_{\omega i}, Z_{\omega i})$ 和对应的一系列像素坐标 (μ_i, ν_i) 根据式 (5)、(6) 求在不考虑畸变的情况下远心摄像设备的外参数 R 、 T 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值;

再将式 (8) 中用图像坐标表示的像素坐标带入式 (5) 中求远心摄像设备的内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 的初值;

由远心摄像设备的内外参数初值、物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的初值和特征点的像素坐标 (μ_i, ν_i) , 反求得到考虑了镜头畸变的一系列特征点的世界坐标 $(\hat{X}_{\omega i}, \hat{Y}_{\omega i}, \hat{Z}_{\omega i})$;

建立目标函数:

$$F = \sum_{i=1}^N \left\| (x_{\omega i}, y_{\omega i}, z_{\omega i}) - (\hat{x}_{\omega i}, \hat{y}_{\omega i}, \hat{z}_{\omega i}) \right\|^2 \quad (9)$$

其中, N 为特征点总数, 通过最小二乘法求得所述远心摄像设备外参数 R 、 T 和内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m 的精确值;

步骤 S324: 根据得到的所述远心摄像设备外参数 R 、 T 和内参数 k_1 、 h_1 、 h_2 、 s_1 、 s_2 以及物像双远心镜头的放大倍数参数 m , 将所述远心摄像设备图像平面上的像素坐标 (μ, ν) 转换为世界坐标 (X_{ω}, Y_{ω}) 。

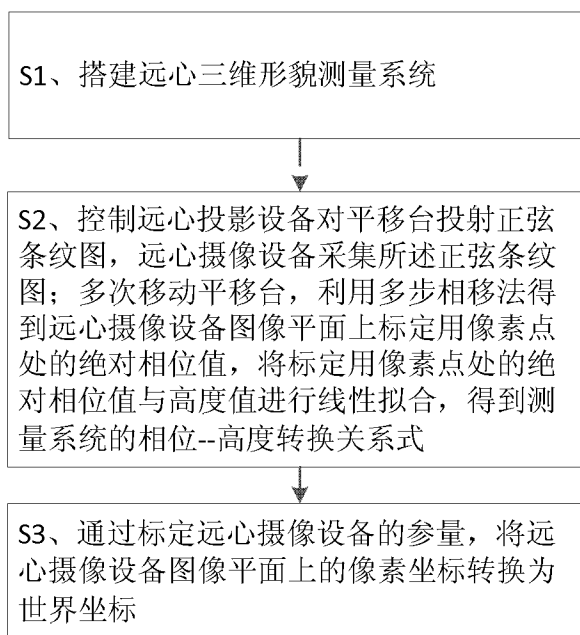


图 1

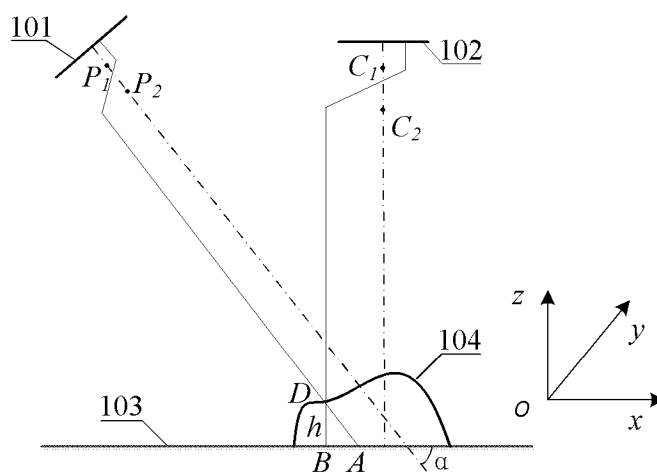


图 2

S21、在平移台处于远心投影设备与远心摄像设备的共同景深范围的前提下，上下调节平移台，使平移台处于高度测量范围的最低位置，记下平移台的最低高度



S22、控制远心投影设备向平移台投射四幅等相移差的正弦条纹图，远心摄像设备按顺序采集此四幅条纹图；选取标定用像素点，用四步相移法求得标定用像素点的绝对相位值



S23、在平移台处于远心投影设备与远心摄像设备的共同景深范围的前提下，移动平移台，使平移台处于不同高度。采用步骤S22的四步相移法分别求得当平移台处于不同高度时摄像机图像平面上像素点(u,v)出的绝对相位值。



S24、对步骤S23中得到的多组数据进行线性拟合，得到远心三维形貌测量系统中绝对相位值与高度的转换关系式

图 3

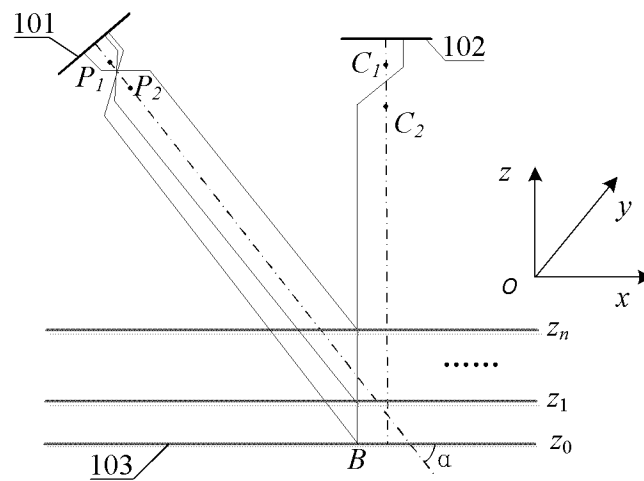


图 4

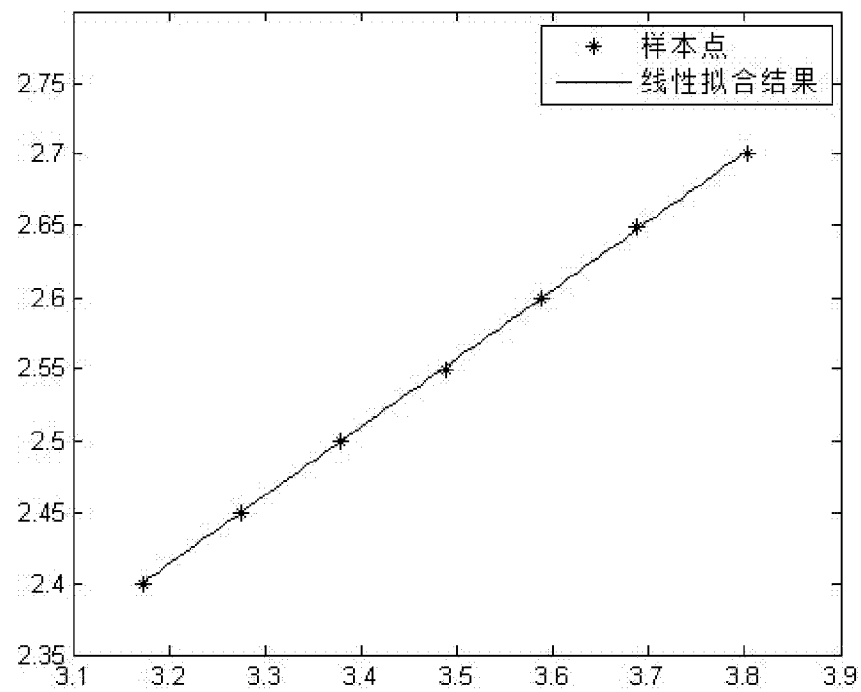


图 5

S31、放置标定靶于平移台上，进行标定靶图像采集，得到一系列特征点的世界坐标与特征点成像在远心摄像设备图像平面上对应的一系列像素坐标



S32、利用一系列特征点的世界坐标与像素坐标的对应关系，标定远心摄像设备，将远心摄像设备图像平面上的像素坐标转换为世界坐标

图 6

S321、利用一系列特征点的世界坐标与不考虑镜头畸变的图像坐标之间的转换关系，得到远心摄像设备外参的初值



S322、考虑远心摄像设备的镜头畸变，利用一系列特征点的世界坐标与图像坐标之间的对应关系，采用最小二乘法得到远心摄像设备的精确内外参数。



S323、建立远心摄像设备图像平面上像素点与世界坐标的一一对应关系

图 7

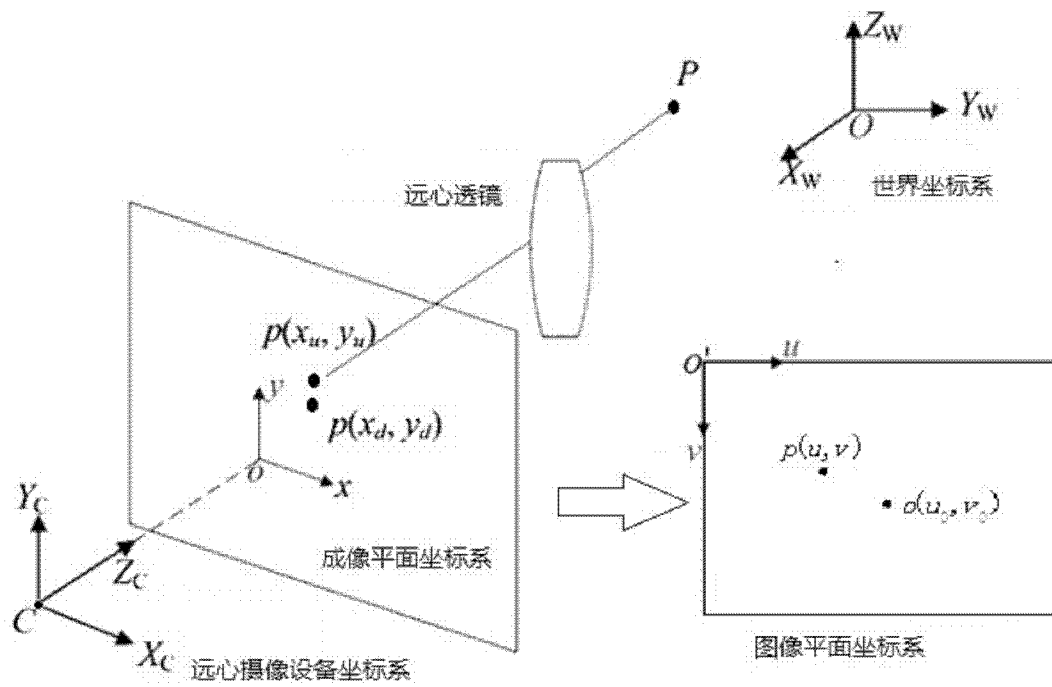


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2015/089903**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G01B 11/25 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01B 11/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, IEEE, ELSEVIER: TIAN, Jindong; LI, Dong; YAN, Sichen; TIAN, Yong; telecentric lens, three-dimension, morphology, phase shift; telecentric, topography, projector, sine, bar, camera, calibration, Shenzhen University, jindong tian, dong li, sichen yan, yong tian, phase, shift+, height, sinusoidal, grating, arbitrary, vertical, absolute, fitting, linear, fitted, position+, depth, fringe

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	LI, Dong et al. "Telecentric 3D Profilometry Based on Phase-Shifting Fringe Projection", OPTICS EXPRESS, vol. 22, no. 26, 16 December 2014 (16.12.2014), ISSN: ISSN 1094-4087, pages 31826-31835	1-3
Y	LIU, Hongyu et al. "Calibration-Based Phase-Shifting Projected Fringe Profilometry for Accurate Absolute 3D Surface Profile Measurement", OPTICS COMMUNICATIONS, vol. 216, no. 1-3, 31 December 2003 (31.12.2003), ISSN: ISSN 0030-4018, pages 65-80	1-3
PX	CN 104729429 A (SHENZHEN UNIVERSITY), 24 June 2015 (24.06.2015), claims 1-4	1-4

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 27 October 2015 (27.10.2015)	Date of mailing of the international search report 20 November 2015 (20.11.2015)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer SONG, Han Telephone No.: (86-10) 62413517

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2015/089903

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LI, Dong et al. "An Accurate Calibration Method for a Camera with Telecentric Lenses", OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, vol. 51, no. 5, 10 January 2013 (10.01.2013), pages 538-541	4
A	CN 102721378 A (BEIHANG UNIVERSITY), 10 October 2012 (10.10.2012), the whole document	1-4
A	US 6577405 B2 (CYBEROPTICS CORP.), 10 June 2003 (10.06.2003), the whole document	1-4
A	US 2003039388 A1 (ULRICH, F.W. et al.), 27 February 2003 (27.02.2003), the whole document	1-4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2015/089903

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104729429 A	24 June 2015	None	
CN 102721378 A	10 October 2012	CN 102721378 B	29 April 2015
US 6577405 B2	10 June 2003	GB 2375392 B	15 December 2004
		GB 0215884 D0	14 August 2002
		DE 10194788 T1	27 February 2003
		JP 2003527582 A	16 September 2003
		WO 0151887 A1	19 July 2001
		US 2001033386 A1	25 October 2001
		GB 2375392 A	13 November 2002
US 2003039388 A1	27 February 2003	US 6956963 B2	18 October 2005
		US 2009073427 A1	19 March 2009
		US 7773209 B2	10 August 2010
		US 2009180679 A1	16 July 2009
		US 7397550 B2	08 July 2008
		US 7719670 B2	18 May 2010
		US 2005111726 A1	26 May 2005

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2015/089903

A. 主题的分类 G01B 11/25 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类														
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01B 11/- 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, IEEE, ELSEVIER; 深圳大学, 田劲东, 李东, 颜思晨, 田勇, 远心镜头, 远心, 垂直, 投影仪, 正弦, 条纹, 摄像机, 标定, 三维, 形貌, 高度, 深度, 相位, 相移, 光栅; telecentric, topography, projector, sine, bar, camera, calibration, Shenzhen university, jindong tian, dong li, sichen yan, yong tian, phase, shift+, height, sinusoidal, grating, arbitrary, vertical, absolute, fitting, linear, fitted, position+, depth, fringe														
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Y</td> <td>LI, Dong等. "Telecentric 3D profilometry based on phase-shifting fringe projection" OPTICS EXPRESS, 第22卷, 第26期, 2014年 12月 16日 (2014 - 12 - 16), ISSN: ISSN 1094-4087, 第31826-31835页</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>LIU, Hongyu等. "Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement" OPTICS COMMUNICATIONS, 第216卷, 第1-3期, 2003年 12月 31日 (2003 - 12 - 31), ISSN: ISSN 0030-4018, 第65-80页</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 104729429 A (深圳大学) 2015年 6月 24日 (2015 - 06 - 24) 权利要求1-4</td> <td>1-4</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	Y	LI, Dong等. "Telecentric 3D profilometry based on phase-shifting fringe projection" OPTICS EXPRESS, 第22卷, 第26期, 2014年 12月 16日 (2014 - 12 - 16), ISSN: ISSN 1094-4087, 第31826-31835页	1-3	Y	LIU, Hongyu等. "Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement" OPTICS COMMUNICATIONS, 第216卷, 第1-3期, 2003年 12月 31日 (2003 - 12 - 31), ISSN: ISSN 0030-4018, 第65-80页	1-3	PX	CN 104729429 A (深圳大学) 2015年 6月 24日 (2015 - 06 - 24) 权利要求1-4	1-4
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求												
Y	LI, Dong等. "Telecentric 3D profilometry based on phase-shifting fringe projection" OPTICS EXPRESS, 第22卷, 第26期, 2014年 12月 16日 (2014 - 12 - 16), ISSN: ISSN 1094-4087, 第31826-31835页	1-3												
Y	LIU, Hongyu等. "Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement" OPTICS COMMUNICATIONS, 第216卷, 第1-3期, 2003年 12月 31日 (2003 - 12 - 31), ISSN: ISSN 0030-4018, 第65-80页	1-3												
PX	CN 104729429 A (深圳大学) 2015年 6月 24日 (2015 - 06 - 24) 权利要求1-4	1-4												
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。														
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件														
国际检索实际完成的日期 2015年 10月 27日		国际检索报告邮寄日期 2015年 11月 20日												
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 中国 传真号 (86-10)62019451		授权官员 宋含 电话号码 (86-10)62413517												

C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	LI, Dong等. "An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses" Optics and Lasers in Engineering, 第51卷, 第5期, 2013年 1月 10日 (2013 - 01 - 10), ISSN: ISSN 0143-8166, 第538-541页	4
A	CN 102721378 A (北京航空航天大学) 2012年 10月 10日 (2012 - 10 - 10) 全文	1-4
A	US 6577405 B2 (CYBEROPTICS CORP.) 2003年 6月 10日 (2003 - 06 - 10) 全文	1-4
A	US 2003039388 A1 (ULRICH, FRANZ W. 等) 2003年 2月 27日 (2003 - 02 - 27) 全文	1-4

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2015/089903

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	104729429	A	2015年 6月 24日	无	
CN	102721378	A	2012年 10月 10日	CN	102721378 B 2015年 4月 29日
US	6577405	B2	2003年 6月 10日	GB	2375392 B 2004年 12月 15日
				GB	0215884 D0 2002年 8月 14日
				DE	10194788 T1 2003年 2月 27日
				JP	2003527582 A 2003年 9月 16日
				WO	0151887 A1 2001年 7月 19日
				US	2001033386 A1 2001年 10月 25日
				GB	2375392 A 2002年 11月 13日
US	2003039388	A1	2003年 2月 27日	US	6956963 B2 2005年 10月 18日
				US	2009073427 A1 2009年 3月 19日
				US	7773209 B2 2010年 8月 10日
				US	2009180679 A1 2009年 7月 16日
				US	7397550 B2 2008年 7月 8日
				US	7719670 B2 2010年 5月 18日
				US	2005111726 A1 2005年 5月 26日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)