



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110196031 B

(45)授权公告日 2020.06.09

(21)申请号 201910345608.0

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2019.04.26

G01B 21/04(2006.01)

G01B 11/24(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110196031 A

审查员 郑俊

(43)申请公布日 2019.09.03

(73)专利权人 西北大学

地址 710069 陕西省西安市碑林区太白北路229号

(72)发明人 汪霖 丁则玮 张万绪 赵伟明

李园园 沈应喆 姜博 周延

张欣媛

(74)专利代理机构 西安嘉思特知识产权代理事

务所(普通合伙) 61230

代理人 尹晓雪

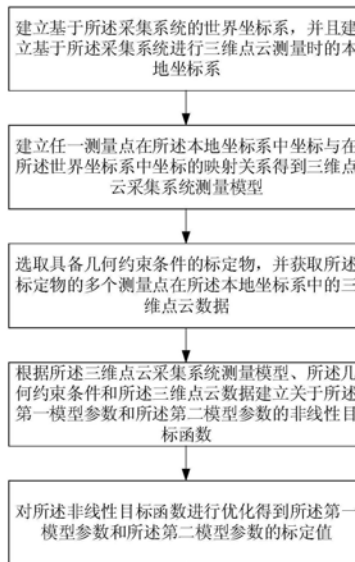
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54)发明名称

一种三维点云采集系统的标定方法

(57)摘要

本发明涉及一种三维点云采集系统的标定方法,包括步骤:建立世界坐标系和本地坐标系;建立三维点云采集系统测量模型;选取具备几何约束条件的标定物,并获取所述标定物的多个测量点在所述本地坐标系中的三维点云数据;根据所述三维点云采集系统测量模型、所述几何约束条件和所述三维点云数据建立关于所述第一模型参数和所述第二模型参数的非线性目标函数;利用优化算法对所述非线性目标函数进行优化得到所述第一模型参数和所述第二模型参数的标定值。本发明实施例三维点云采集系统标定方法解决了在标定物参数未知的情况下对三维点云采集系统进行标定的问题,无需对标定物的相关尺寸进行测量,从而提高了模型参数的估计精度。



1. 一种三维点云采集系统的标定方法,其特征在于,所述三维点云采集系统由Kinect传感器和高精度云台组成,所述标定方法包括步骤:

建立基于所述采集系统的世界坐标系,并且建立基于所述采集系统进行三维点云测量时的本地坐标系;

建立任一测量点在所述本地坐标系中坐标与在所述世界坐标系中坐标的映射关系得到三维点云采集系统测量模型,其中,所述三维点云采集系统测量模型为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{g}(x', y', z', \varphi, \Delta x, \Delta z) = \begin{bmatrix} (x' + \Delta x) \cos \varphi + (z' + \Delta z) \sin \varphi \\ y' \\ -(x' + \Delta x) \sin \varphi + (z' + \Delta z) \cos \varphi \end{bmatrix},$$

其中,  $\mathbf{g}(x', y', z', \varphi, \Delta x, \Delta z)$  为三维点云采集系统测量模型,  $(x, y, z)^T$  为测量点P在世界坐标系中的坐标,  $(x', y', z')^T$  为测量点P在本地坐标系中的坐标,  $\Delta x$  为第一模型参数,  $\Delta z$  为第二模型参数,  $\varphi$  为偏转角,  $\varphi \in [-180^\circ, 180^\circ]$ ;

选取具备几何约束条件的标定物,其中,所述标定物为标定球,所述几何约束条件为所述标定球的表面点距离球心的距离等于所述标定球半径;

将所述标定球固定于所述采集系统的测量范围内;

以所述世界坐标系为基准使所述本地坐标系旋转,获取不同偏转角下所述标定球的多个表面点在所述本地坐标系中的三维点云数据  $\{p'_{ij}\}$  ( $j=1, 2, \dots, N_i$ ), 其中,  $p'_{ij} = (x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij})^T$ ,  $x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}$  为  $p'_{ij}$  在本地坐标系中的坐标;

根据所述三维点云采集系统测量模型、所述几何约束条件和所述三维点云数据建立关于所述第一模型参数和所述第二模型参数的非线性目标函数;

对所述非线性目标函数进行优化得到所述第一模型参数和所述第二模型参数的标定值。

2. 如权利要求1所述的三维点云采集系统的标定方法,其特征在于,建立基于所述采集系统的世界坐标系,包括:

以采集系统旋转轴作为第一Y轴,以所述采集系统的测量零点在所述第一Y轴上的投影作为第一原点,在预设偏转角下以采集系统测量中心轴方向作为第一Z轴,以与所述第一Z轴和所述第一Y轴垂直的方向作为第一X轴,建立所述世界坐标系。

3. 如权利要求2所述的三维点云采集系统的标定方法,其特征在于,建立基于所述采集系统进行三维点云测量时的本地坐标系,包括:

采用所述采集系统进行三维点云测量,以所述测量零点作为第二原点,以所述采集系统测量中心轴方向作为第二Z轴,以平行于所述采集系统旋转轴的方向作为第二Y轴,以与所述第二Z轴和所述第二Y轴垂直的方向作为第二X轴,建立所述本地坐标系;

其中,所述第二原点在所述第一X轴上具有第一偏移量  $\Delta x$ ,在所述第一Z轴上具有第二偏移量  $\Delta z$ 。

4. 如权利要求2所述的三维点云采集系统的标定方法,其特征在于,建立任一测量点在所述本地坐标系中坐标与在所述世界坐标系中坐标的映射关系得到三维点云采集系统测量模型,包括:

以所述世界坐标系为基准,使所述本地坐标系绕所述第一Y轴旋转得到旋转矩阵  $\text{Rot}(Y, \varphi)$ ;

根据所述旋转矩阵  $\text{Rot}(Y, \varphi)$  得到任一所述测量点在所述本地坐标系中坐标在所述世界坐标系中坐标的映射关系,由所述映射关系得到所述三维点云采集系统测量模型:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{g}(x', y', z', \varphi, \Delta x, \Delta z) = \begin{bmatrix} (x' + \Delta x) \cos \varphi + (z' + \Delta z) \sin \varphi \\ y' \\ -(x' + \Delta x) \sin \varphi + (z' + \Delta z) \cos \varphi \end{bmatrix},$$

其中,  $\mathbf{g}(x', y', z', \varphi, \Delta x, \Delta z)$  为三维点云采集系统测量模型,  $(x, y, z)^T$  为测量点P在世界坐标系中的坐标,  $(x', y', z')^T$  为测量点P在本地坐标系中的坐标,  $\Delta x$  为第一模型参数,  $\Delta z$  为第二模型参数,  $\varphi$  为偏转角,  $\varphi \in [-180^\circ, 180^\circ]$ 。

5. 如权利要求1所述的三维点云采集系统的标定方法,其特征在于,根据所述三维点云采集系统测量模型、所述几何约束条件和所述三维点云数据建立关于所述第一模型参数和所述第二模型参数的非线性目标函数,包括:

根据所述三维点云采集系统测量模型和所述三维点云数据  $\{p'_{ij}\}$  得到所述表面点在所述世界坐标系中的坐标  $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$  为:

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = \mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z), \quad \forall i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, N_i,$$

其中,  $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$  为标定球表面点  $P_{ij}$  在世界坐标系中的坐标,  $\varphi_i$  为第  $i$  个偏转角 ( $i=1, 2, \dots, N$ ),  $N$  为偏转角  $\varphi_i$  的个数,  $N_i$  为第  $i$  个偏转角下获取标定球表面点的个数;

根据所述几何约束条件结合所述表面点  $P_{ij}$  在所述世界坐标系中的坐标得到所述表面点与所述球心的关系式:

$$\|p_{ij} - p_s\| = \|\mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z) - p_s\| = R, \quad \forall i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, N_i,$$

其中,  $\|\cdot\|$  表示欧氏范数,  $p_s = (x_s, y_s, z_s)^T$  为标定球的球心  $O_s$  在世界坐标系中的坐标,  $R$  为标定球的半径;

对所述表面点与所述球心的关系式变换得到:

$$f(\Delta x, \Delta z, p_s, R) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} \left( \|\mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z) - p_s\| - R \right)^2,$$

其中,  $f(\Delta x, \Delta z, p_s, R)$  为关于  $\Delta x$  和  $\Delta z$  的非线性目标函数。

6. 如权利要求1所述的三维点云采集系统的标定方法,其特征在于,对所述非线性目标函数进行优化得到所述第一模型参数和所述第二模型参数的标定值,包括:

利用入侵性杂草优化算法对所述非线性目标函数进行优化得到第一优化数组,所述第一优化数组中包含所述第一模型参数的标定值和所述第二模型参数的标定值。

7. 如权利要求6所述的三维点云采集系统的标定方法,其特征在于,利用入侵性杂草优

化算法对所述非线性目标函数进行优化得到第一优化数组之后,还包括:

将所述第一优化数组作为Levenberg-Marquardt算法的初值,利用Levenberg-Marquardt算法对所述非线性目标函数进行优化得到第二优化数组,所述第二优化数组包含所述第一模型参数的标定值和所述第二模型参数的标定值。

## 一种三维点云采集系统的标定方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于三维点云数据采集技术领域,具体涉及一种三维点云采集系统的标定方法。

### 背景技术

[0002] 在数字化现实世界的过程中,三维点云数据记录了物体表面的几何属性和位置信息。高精度的三维点云数据能够为计算机视觉在人类日常生活中的应用提供大量帮助,因此搭建高精度的三维点云采集系统具有重要的意义。

[0003] 目前,对三维点云数据的采集具有多种采集系统,例如基于云台和二维激光扫描仪的三维点云采集系统、基于云台和Kinect传感器的三维点云采集系统等。对这些三维采集系统进行标定是获取高精度三维点云数据的前提,其标定精度将直接影响三维点云数据采集的精度。现有标定方法中,基于云台和Kinect传感器的三维点云采集系统的标定方法比较少,多数是针对基于云台和二维激光扫描仪的三维点云采集系统的标定算法,例如,Antone等人提出一种基于多足标定物的推扫式激光扫描仪标定算法;项志宇采用细杆作为标定物,提出一种基于最小二乘法的俯仰式激光扫描仪标定算法;等等。

[0004] 然而,现有标定算法多数需要给出标定物的相关尺寸,例如,基于最小二乘法的俯仰式激光扫描仪标定算法需要测量激光扫描仪旋转中心到细杆的距离;而实际情况中,通常难以对标定物的相关尺寸进行精确测量,从而导致现有标定算法的模型参数估计精确度较低。

### 发明内容

[0005] 为了解决现有技术中存在的上述问题,本发明提供了一种三维点云采集系统的标定方法。本发明要解决的技术问题通过以下技术方案实现:

[0006] 本发明实施例提供了一种三维点云采集系统的标定方法,包括步骤:

[0007] 建立基于所述采集系统的世界坐标系,并且建立基于所述采集系统进行三维点云测量时的本地坐标系;

[0008] 建立任一测量点在所述本地坐标系中坐标与在所述世界坐标系中坐标的映射关系得到三维点云采集系统测量模型,其中,所述三维点云采集系统测量模型具有第一模型参数和第二模型参数;

[0009] 选取具备几何约束条件的标定物,并获取所述标定物的多个测量点在所述本地坐标系中的三维点云数据;

[0010] 根据所述三维点云采集系统测量模型、所述几何约束条件和所述三维点云数据建立关于所述第一模型参数和所述第二模型参数的非线性目标函数;

[0011] 对所述非线性目标函数进行优化得到所述第一模型参数和所述第二模型参数的标定值。

[0012] 在本发明的一个实施例中,建立基于所述采集系统的世界坐标系,包括:

[0013] 以采集系统旋转轴作为第一Y轴,以所述采集系统的测量零点在所述第一Y轴上的投影作为第一原点,在预设偏转角下以采集系统测量中心轴方向作为第一Z轴,以与所述第一Z轴和所述第一Y轴垂直的方向作为第一X轴,建立所述世界坐标系。

[0014] 在本发明的一个实施例中,建立基于所述采集系统进行三维点云测量时的本地坐标系,包括:

[0015] 采用所述采集系统进行三维点云测量,以所述测量零点作为第二原点,以所述采集系统测量中心轴方向作为第二Z轴,以平行于所述采集系统旋转轴的方向作为第二Y轴,以与所述第二Z轴和所述第二Y轴垂直的方向作为第二X轴,建立所述本地坐标系;

[0016] 其中,所述第二原点在所述第一X轴上具有第一偏移量  $\Delta x$ ,在所述第一Z轴上具有第二偏移量  $\Delta z$ 。

[0017] 在本发明的一个实施例中,建立任一测量点在所述本地坐标系中坐标与在所述世界坐标系中坐标的映射关系得到三维点云采集系统测量模型,包括:

[0018] 以所述世界坐标系为基准,使所述本地坐标系系统绕所述第一Y轴旋转得到旋转矩阵  $\text{Rot}(Y, \varphi)$ ;

[0019] 根据所述旋转矩阵  $\text{Rot}(Y, \varphi)$  得到任一所述测量点在所述本地坐标系中坐标在所述世界坐标系中坐标的映射关系,由所述映射关系得到所述三维点云采集系统测量模型:

$$[0020] \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{g}(x', y', z', \varphi, \Delta x, \Delta z) = \begin{bmatrix} (x' + \Delta x) \cos \varphi + (z' + \Delta z) \sin \varphi \\ y' \\ -(x' + \Delta x) \sin \varphi + (z' + \Delta z) \cos \varphi \end{bmatrix},$$

[0021] 其中,  $\mathbf{g}(x', y', z', \varphi, \Delta x, \Delta z)$  为三维点云采集系统测量模型,  $(x, y, z)^T$  为测量点P在世界坐标系中的坐标,  $(x', y', z')^T$  为测量点P在本地坐标系中的坐标,  $\Delta x$  为第一模型参数,  $\Delta z$  为第二模型参数,  $\varphi$  为偏转角,  $\varphi \in [-180^\circ, 180^\circ)$ 。

[0022] 在本发明的一个实施例中,所述标定物包括标定球。

[0023] 在本发明的一个实施例中,所述几何约束条件为所述标定球的表面点距离球心的距离等于所述标定球半径。

[0024] 在本发明的一个实施例中,获取所述标定物的多个测量点在所述本地坐标系中的三维点云数据,包括:

[0025] 将所述标定球固定于所述采集系统的测量范围内;

[0026] 以所述世界坐标系为基准使所述本地坐标系旋转,获取不同偏转角下所述标定球的多个表面点在所述本地坐标系中的三维点云数据  $\{p'_{ij}\}$  ( $j=1, 2, \dots, N_i$ ), 其中,  $p'_{ij} = (x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij})^T$ ,  $x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}$  为  $p'_{ij}$  在本地坐标系中的坐标。

[0027] 在本发明的一个实施例中,根据所述三维点云采集系统测量模型、所述几何约束条件和所述三维点云数据建立关于所述第一模型参数和所述第二模型参数的非线性目标函数,包括:

[0028] 根据所述三维点云采集系统测量模型和所述三维点云数据  $\{p'_{ij}\}$  得到所述表面点在所述世界坐标系中的坐标  $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$  为:

$$[0029] \quad \mathbf{p}_{ij} = \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = \mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z), \quad \forall i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, N_i,$$

[0030] 其中,  $\mathbf{p}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$  为标定球表面点  $P_{ij}$  在世界坐标系中的坐标,  $\varphi_i$  为第  $i$  个偏转角 ( $i=1, 2, \dots, N$ ),  $N$  为偏转角  $\varphi_i$  的个数,  $N_i$  为第  $i$  个偏转角下获取标定球表面点的个数;

[0031] 根据所述几何约束条件结合所述表面点  $P_{ij}$  在所述世界坐标系中的坐标得到所述表面点与所述球心的关系式:

$$[0032] \quad \|\mathbf{p}_{ij} - \mathbf{p}_s\| = \|\mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z) - \mathbf{p}_s\| = R, \quad \forall i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, N_i,$$

[0033] 其中,  $\|\cdot\|$  表示欧氏范数,  $\mathbf{p}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$  为标定球的球心  $O_s$  在世界坐标系中的坐标,  $R$  为标定球的半径;

[0034] 对所述表面点与所述球心的关系式变换得到:

$$[0035] \quad f(\Delta x, \Delta z, \mathbf{p}_s, R) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} \left( \|\mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z) - \mathbf{p}_s\| - R \right)^2,$$

[0036] 其中,  $f(\Delta x, \Delta z, \mathbf{p}_s, R)$  为关于  $\Delta x$  和  $\Delta z$  的非线性目标函数。

[0037] 在本发明的一个实施例中, 对所述非线性目标函数进行优化得到所述第一模型参数和所述第二模型参数的标定值, 包括:

[0038] 利用入侵性杂草优化算法对所述非线性目标函数进行优化得到第一优化数组, 所述第一优化数组中包含所述第一模型参数的标定值和所述第二模型参数的标定值。

[0039] 在本发明的一个实施例中, 利用入侵性杂草优化算法对所述非线性目标函数进行优化得到第一优化数组之后, 还包括:

[0040] 将所述第一优化数组作为 Levenberg-Marquardt 算法的初值, 利用 Levenberg-Marquardt 算法对所述非线性目标函数进行优化得到第二优化数组, 所述第二优化数组包含所述第一模型参数的标定值和所述第二模型参数的标定值。

[0041] 与现有技术相比, 本发明的有益效果:

[0042] 1、本发明的三维点云采集系统标定方法通过测量具有几何约束条件的标定物表面点的三维点云数据, 建立三维点云采集系统测量模型参数的非线性目标函数, 进而得到模型参数, 解决了在标定物参数未知的情况下对三维点云采集系统进行标定的问题, 无需对标定物的相关尺寸进行测量, 从而提高了模型参数的估计精度。

[0043] 2、本发明的三维点云采集系统标定方法测量通过测量标定物的多个测量点的点云数据, 能够减弱三维点云采集系统测量噪声对标定精度的影响, 从而提高标定方法的模型参数估计精度。

[0044] 3、本发明的三维点云采集系统标定方法可以应用于多种三维点云采集系统, 具有较强的通用性, 适用性广泛。

[0045] 以下将结合附图及实施例对本发明做进一步详细说明。

## 附图说明

[0046] 图1为本发明实施例提供的一种三维点云采集系统的标定方法的流程示意图；

[0047] 图2为本发明实施例提供的一种基于高精度云台和Kinect传感器的三维点云采集系统的结构示意图；

[0048] 图3为本发明实施例提供的一种本地坐标系与世界坐标系的位置关系图；

[0049] 图4为本发明实施例提供的一种优化方法的流程示意图；

[0050] 图5为本发明实施例提供的另一种优化方法的流程示意图。

## 具体实施方式

[0051] 下面结合具体实施例对本发明做进一步详细的描述,但本发明的实施方式不限于此。

[0052] 实施例一

[0053] 请参见图1,图1为本发明实施例提供的一种三维点云采集系统的标定方法的流程示意图。该标定方法包括步骤:

[0054] S1、建立基于所述采集系统的世界坐标系,并且建立基于所述采集系统进行三维点云测量时的本地坐标系。

[0055] 具体地,本发明实施例的标定方法适用于具有基座和测量仪器的三维点云采集系统,例如:基于高精度数字云台和Kinect传感器的三维点云采集系统、基于高精度数字云台和二维激光扫描仪的三维点云采集系统、基于高精度数字云台和RealSense深度相机的三维点云采集系统等。其中,采集系统旋转轴为垂直旋转轴,具体是指基座的垂直旋转轴,位于基座的竖直方向上;采集系统测量中心轴和测量零点分别是指测量仪器在其照射方向上的测量零点和测量中心轴。基座可以带动测量仪器绕垂直旋转轴作偏转运动,测量仪器通过基座的偏转获取不同偏转角下的三维点云数据。

[0056] 本发明实施例的三维点云采集系统标定方法可以应用于多种三维点云采集系统,具有较强的通用性,适用性广泛。

[0057] 本发明实施例采用包括高精度云台和Kinect传感器的三维点云采集系统,其中,高精度云台为基座,Kinect传感器为测量仪器,请参见图2,图2为本发明实施例提供的一种基于高精度云台和Kinect传感器的三维点云采集系统的结构示意图,其中,1为高精度云台,2为Kinect传感器。

[0058] 建立本地坐标系和世界坐标系的方法为:

[0059] 首先建立世界坐标系:以采集系统的旋转轴(即云台的垂直旋转轴)为第一Y轴,记为Y轴,Y轴竖直向下;以采集系统的测量零点(即Kinect传感器的测量零点)在第一Y轴上的投影作为第一原点,记为0;使基座旋转预设偏转角,将该偏转角下测量仪器的测量中心轴方向(即Kinect传感器的照射中心轴方向)作为第一Z轴,记为Z轴;以与第一Y轴和第一Z轴共同垂直的方向作为第一X轴,记为X轴,形成世界坐标系OXYZ。

[0060] 其中,预设偏转角可以为 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间的任一角度,优选的预设偏转角为 $0^{\circ}$ ,预设偏转角选用 $0^{\circ}$ 可以使测量模型的建立更为简单方便。

[0061] 然后建立本地坐标系:使基座偏转角度 $\varphi$ ,测量仪器随基座偏转角度 $\varphi$ 时进行三维点云测量,此时将测量仪器中的测量零点作为第二原点,记为 $0'$ ,以测量仪器的测量中心



轴方向作为第二Z轴,记为Z'轴,以平行于采集系统旋转轴的方向作为第二Y轴,记为Y'轴,以与第二Z轴和第二Y轴垂直的方向作为第二X轴,记为X'轴,形成本地坐标系 $O'X'Y'Z'$ 。其中,使基座偏转角度 $\varphi$ ,偏转角 $\varphi$ 的取值范围为 $-180^\circ\sim 180^\circ$ 。

[0062] 由于第一原点为测量零点即第二原点在第一Y轴上的投影,因此,第二原点在第一X轴上的投影与第一原点之间具有一段距离,该距离为第一偏移量 $\Delta x$ ;同理,第二原点在第一Z轴上的投影与第一原点之间具有一段距离,该距离为第二偏移量 $\Delta z$ 。

[0063] 需要说明的是,世界坐标系是在 $-180^\circ\sim 180^\circ$ 预设偏转角中的其中一个偏转角下建立的,并不随偏转角的变化而变化,是固定不变的;而本地坐标系是在采集系统进行测量时建立的,随偏转角的变化而变化,是动态变化的。

[0064] 请参见图3,图3为本发明实施例提供的一种本地坐标系与世界坐标系的位置关系图。图3中世界坐标系和本地坐标系的偏转角均为 $0^\circ$ ,其中 $\Delta x$ 和 $\Delta z$ 分别为偏转角为 $0^\circ$ 时 $O'$ 在X轴和Z轴方向上的坐标偏移量。

[0065] S2、建立任一测量点在所述本地坐标系中坐标与在所述世界坐标系中坐标的映射关系得到三维点云采集系统测量模型。

[0066] 任选一个测量点P,该测量点P在本地坐标系中的坐标记为 $(x',y',z')^T$ ,在世界坐标系中的坐标记为 $(x,y,z)^T$ , $(x',y',z')^T$ 与 $(x,y,z)^T$ 的映射关系即为三维点云采集系统测量模型。

[0067] 当基座水平偏转角为 $\varphi=0^\circ$ 时,对本地坐标系下坐标为 $(x',y',z')^T$ 的测量点P,其世界坐标系下坐标 $(x,y,z)^T$ 为 $(x'+\Delta x,y',z'+\Delta z)^T$ 。

[0068] 以第二坐标系为基准,使其固定不动,绕旋转轴旋转基座使测量仪器随基座的旋转而旋转,即使本地坐标系绕第一Y轴旋转,得到偏转角为 $\varphi$ 的旋转矩阵 $\text{Rot}(Y,\varphi)$ 。

[0069] 对于本地坐标为 $(x',y',z')^T$ 的测量点P,其世界坐标系中的坐标 $(x,y,z)^T$ 即测量点P在本地坐标中的坐标 $(x',y',z')^T$ 与在世界坐标系中的坐标 $(x,y,z)^T$ 的映射关系为:

$$[0070] \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \text{Rot}(Y,\varphi) \cdot \begin{bmatrix} x'+\Delta x \\ y' \\ z'+\Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'+\Delta x \\ y' \\ z'+\Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0071] 因此,图3中的三维点云采集系统测量模型为:

$$[0072] \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{g}(x',y',z',\varphi,\Delta x,\Delta z) = \begin{bmatrix} (x'+\Delta x)\cos\varphi + (z'+\Delta z)\sin\varphi \\ y' \\ -(x'+\Delta x)\sin\varphi + (z'+\Delta z)\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0073] 其中, $\mathbf{g}(x',y',z',\varphi,\Delta x,\Delta z)$ 为三维点云采集系统测量模型, $(x,y,z)^T$ 为测量点P在世界坐标系中的坐标, $(x',y',z')^T$ 为测量点P在本地坐标系中的坐标, $\Delta x$ 为第一模型参数, $\Delta z$ 为第二模型参数, $\varphi$ 为偏转角, $\varphi \in [-180^\circ, 180^\circ)$ 。

[0074] 三维点云采集系统标定的目标是估计其测量模型(2)中的第一模型参数 $\Delta x$ 和第二模型参数 $\Delta z$ ,而模型参数标定的通常方法是将其转化为非线性优化问题进行求解。

[0075] S3、选取具备几何约束条件的标定物,并获取所述标定物的多个测量点在所述本

地坐标系中的三维点云数据。

[0076] 具体的,本发明实施例中所选取的标定物可以为球体、正方体、正三棱锥、正三角体等具有规则形状的三维物体;几何约束条件可以为标定物的多个测量点距离某一点或某一条线或某一个面的距离均相等,也可以为多个测量点距离某一点或某一条线或某一个面的距离之间存在一定的规律,但是不限于此。不论选用哪种标定物,其相关尺寸均未知。

[0077] 本发明实施例的标定物选取标定球,几何约束条件选取标定球的表面点距离球心的距离等于标定球的半径,其中,标定球的半径R未知。因此,标定物的测量点选取标定球的多个表面点。

[0078] 采用基于高精度云台和Kinect传感器的三维点云采集系统,获取标定球的多个测量点在本地坐标系中的三维点云数据的具体方法为:

[0079] 将标定球固定于该三维点云采集系统的测量范围中的某一位置,其球心在 $O_s$ 在世界坐标系下坐标记为 $p_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ ,半径记为R(未知)。

[0080] 使高精度云台水平偏转运动,即以世界坐标系为基准,保持世界坐标系固定不变,使本地坐标系绕第一Y轴旋转,获取不同偏转角 $\varphi_i (i=1,2,\dots,N)$ 下标定球的多个表面点的本地三维点云数据 $\{p'_{ij}\} (j=1,2,\dots,N_i)$ ,其中标定球的表面点 $P_{ij}$ 在本地坐标系下的三维坐标测量值为 $p'_{ij} = (x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij})^T$ 。

[0081] 需要说明的是,在测量过程中,保持标定球固定不动直至标定球的一侧的表面点测量完毕,得到三维点云数据 $\{p'_{ij}\}$ ,也就是说,得到的 $\{p'_{ij}\}$ 为标定球表面的朝向三维点云采集系统的一侧的点的坐标,因为这些点的坐标组成的数据有几万个,能够减弱三维点云采集系统测量噪声对标定精度的影响,提高标定方法的模型参数估计精度,因而背向三维点云采集系统的一侧的点无需进行测量。当数据量过多时,模型参数估计精度提高的幅度并不明显,但是会大幅度提高计算量;当数据量过少时,测量噪声的影响较大,模型参数估计精度较低。

[0082] S4、根据所述三维点云采集系统测量模型、所述几何约束条件和所述三维点云数据建立关于所述第一模型参数和所述第二模型参数的非线性目标函数。

[0083] 本发明实施例中,利用该三维点云采集系统对标定球进行扫描,获得不同云台偏转角下标定球表面点的本地坐标系的三维点云数据,然后再利用标定球的表面点到球心距离等于半径的几何约束条件,建立模型参数的非线性目标函数。

[0084] 具体地,根据三维点云采集系统测量模型和三维点云数据 $\{p'_{ij}\}$ ,得到表面点 $P_{ij}$ 在世界坐标系中的坐标 $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$ 为:

$$[0085] \quad p_{ij} = \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = g(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z), \quad \forall i=1,2,\dots,N, \quad j=1,2,\dots,N_i \quad (3)$$

[0086] 其中, $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$ 为标定球表面点 $P_{ij}$ 在世界坐标系中的坐标, $\varphi_i$ 为第i个偏转角( $i=1,2,\dots,N$ ),N为偏转角 $\varphi_i$ 的个数, $N_i$ 为第i个偏转角下获取标定球表面点的个数。

[0087] 由于点 $P_s$ 位于球心,记为 $O_s$ ,标定球的半径为R,因此,标定球的表面点 $P_{ij}$ 到球心 $O_s$

的距离为R,得到标定球的表面点与球心的关系式为:

$$[0088] \quad \|\mathbf{p}_{ij} - \mathbf{p}_s\| = \|\mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z) - \mathbf{p}_s\| = R, \quad \forall i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, N_i \quad (4)$$

[0089] 其中,  $\|\cdot\|$  表示欧氏范数,  $\mathbf{p}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$  为标定球的球心  $O_s$  在世界坐标系中的坐标, R 为标定球的半径。

[0090] 根据平方和最小原则,对所述表面点与所述球心的关系式变换得到三维点云采集系统测量模型的模型参数  $\Delta x$  和  $\Delta z$  估计的非线性目标函数:

$$[0091] \quad f(\Delta x, \Delta z, \mathbf{p}_s, R) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} \left( \|\mathbf{g}(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \varphi_i, \Delta x, \Delta z) - \mathbf{p}_s\| - R \right)^2 \quad (5)$$

[0092] 其中,  $f(\Delta x, \Delta z, \mathbf{p}_s, R)$  为关于  $\Delta x$  和  $\Delta z$  的非线性目标函数。

[0093] 由此,第一模型参数  $\Delta x$  和第二模型参数  $\Delta z$  的标定问题转化为非线性目标函数 (5) 的最小优化问题,非线性目标函数 (5) 中包含  $\Delta x$ 、 $\Delta z$ 、 $\mathbf{p}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ 、R 共 6 个未知参数。

[0094] S5、对所述非线性目标函数进行优化得到所述第一模型参数和所述第二模型参数的标定值。

[0095] S51、利用入侵性杂草优化算法 (Invasive weed optimization, 简称 IWO 算法) 对所述非线性目标函数进行优化,得到第一优化数组,所述第一优化数组中包含所述第一模型参数的标定值和所述第二模型参数的标定值。

[0096] IWO 算法首先由 Mehrabian 和 Lucas 于 2006 年提出,是一种模拟杂草的生长于繁殖过程的仿生随机搜索优化算法。IWO 算法简单易于实现,全局寻优能力强。因此本专利将 IWO 算法用于优化目标函数,得到第一优化数组,第一优化数组包含有  $\Delta x$  和  $\Delta z$  的标定值。

[0097] 请参见图 4,图 4 为本发明实施例提供的一种优化方法的流程示意图,该优化方法采用 IWO 算法,具体包括步骤:

[0098] S511:参数和原始种群的初始化。给定解空间维数  $D=6$  (非线性目标函数包含 6 个未知参数,因此,设定空间维数为 6)、初始种群数  $m_0$  和最大种群数  $m_{\max}$ 、单个杂草产生的最小种子数  $s_{\min}$  和最大种子数  $s_{\max}$ 、最大迭代次数  $k_{\max}$ 、非线性调制指数  $p$ 、种子正态扩散的各维最小标准差  $\sigma_{\min, i}$  ( $i=1, 2, \dots, D$ ) 以及式 (5) 可行解的取值范围  $[q_{\min}, q_{\max}]$ ;令迭代次数  $k$  为 0,当前种群数  $m_k$  为  $m_0$ ,将式 (5) 作为杂草的适应度函数,随机初始化由  $m_0$  个杂草组成的原始种群

$$\Omega^k = \{q_1^k, q_2^k, \dots, q_{m_0}^k\}。$$

[0099] S512:杂草繁殖。根据下式计算种群  $\Omega^k$  中各个杂草  $a$  ( $a=1, 2, \dots, m_k$ ) 产生的种子数  $w_a^{k+1}$ 。

$$[0100] \quad w_a^{k+1} = \left| \frac{(f_{\max}^k - f(q_a^k))(s_{\max} - s_{\min})}{(f_{\max}^k - f_{\min}^k)} \right| + s_{\min}, \quad \forall a=1, 2, \dots, m_k \quad (6)$$

[0101] S513:种子空间扩散。根据下式计算种子正态随机扩散的各维标准差  $\sigma_i^{k+1}$  ( $i=1, 2, \dots, D$ ),并对各种子在其父代杂草个体附近进行正态随机扩散。按照可行解的取值范围,对空间扩散后的各个种子进行箝位操作。

$$[0102] \quad \sigma_i^{k+1} = \frac{(k_{\max} - k - 1)^p (\sigma_{\max,i} - \sigma_{\min,i})}{k_{\max}^p} + \sigma_{\min,i}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, D \quad (7)$$

[0103] S514: 杂草及其后代种子竞争排斥。计算第(k+1)次迭代中生成的种子总数

$w_a^{k+1} = \sum_{a=1}^{m_k} w_a^{k+1}$ 。若  $W^{k+1} + m_k \leq m_{\max}$ , 则由种群  $\Omega^k$  所有杂草及其后代组成第(k+1)次迭代后的种群  $\Omega^{k+1}$ , 并且令  $m_{k+1} = W^{k+1} + m_k$ ; 否则, 将种群  $\Omega^k$  各个杂草及其后代按照适应度大小排序, 将适应度最小的前  $m_{\max}$  个个体组成种群  $\Omega^{k+1}$ , 并且令  $m_{k+1} = m_{\max}$ 。

[0104] S515: 判断迭代是否终止。迭代次数k增加1, 若  $k \leq k_{\max}$  成立, 则转到步骤S52; 否则, IWO算法终止迭代, 得到第一优化数组  $q_a^{k_{\max}}$ , 第一优化数组  $q_a^{k_{\max}}$  包括  $\Delta x$ 、 $\Delta z$ 、 $x_s$ 、 $y_s$ 、 $z_s$  和R的优化值。

[0105] 请参见图5, 图5为本发明实施例提供的另一种优化方法的流程示意图, 该优化方法采用IWO和Levenberg-Marquardt算法(简称LM算法)相结合的方法进行优化。进一步, 在采用IWO算法对非线性目标函数(5)进行优化后还可以采用传统非线性优化算法进行再次优化, 以提高  $\Delta x$  和  $\Delta z$  的估计精度。具体包括步骤:

[0106] S51、采用IWO算法对非线性目标函数(5)进行优化, 其优化步骤请参见上述步骤S511~S515, 在此不再赘述。

[0107] S52、将所述第一优化数组作为LM算法的初值, 利用LM算法对所述非线性目标函数进行优化, 得到第二优化数组, 所述第二优化数组包含所述第一模型参数的标定值和所述第二模型参数的标定值。

[0108] 具体地, 将IWO算法第  $k_{\max}$  次迭代后的种群  $\Omega^{k_{\max}}$  中具有最小适应度的杂草位置  $q_a^{k_{\max}}$  作为LM算法的初值, 利用LM算法对式(5)进行优化, 得到第二优化数组, 第二优化数组中同样包括  $\Delta x$ 、 $\Delta z$ 、 $x_s$ 、 $y_s$ 、 $z_s$  和R的优化值, 第二优化数组的精度大于第一优化数组的精度, 因此, 将第二优化数组中的  $\Delta x$  和  $\Delta z$  的最优解作为三维点云采集系统测量模型的模型参数标定值。

[0109] 其中, LM算法为传统的非线性优化算法, 在此不再赘述其优化步骤。

[0110] 本发明实施例的三维点云采集系统标定方法通过测量具有几何约束条件的标定物表面点的三维点云数据, 建立三维点云采集系统测量模型参数的非线性目标函数, 从而将模型参数  $\Delta x$  和  $\Delta z$  的标定问题转化为非线性目标函数的最小优化问题, 进而对该非线性目标函数进行优化得到模型参数, 解决了在标定物参数未知的情况下对三维点云采集系统进行标定的问题, 无需对标定物的相关尺寸进行测量, 从而提高了模型参数的估计精度。

[0111] 以上内容是结合具体的优选实施方式对本发明所作的进一步详细说明, 不能认定本发明的具体实施只局限于这些说明。对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明构思的前提下, 还可以做出若干简单推演或替换, 都应当视为属于本发明的保护范围。

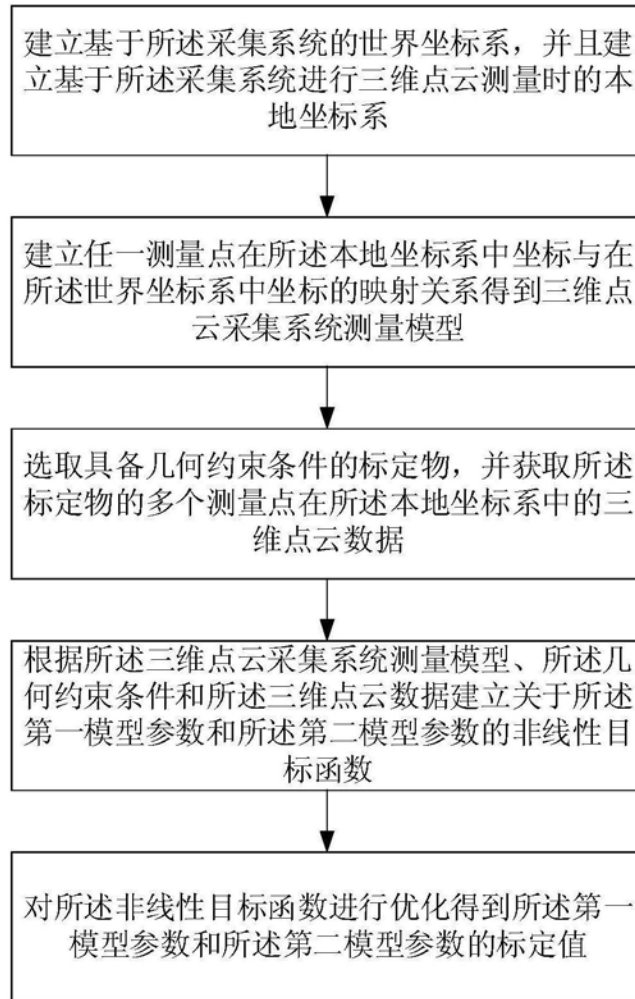


图1

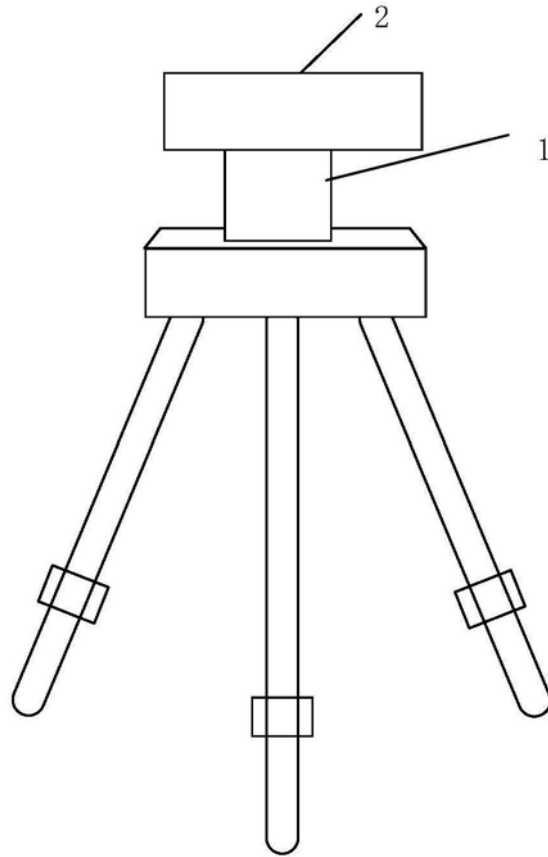


图2

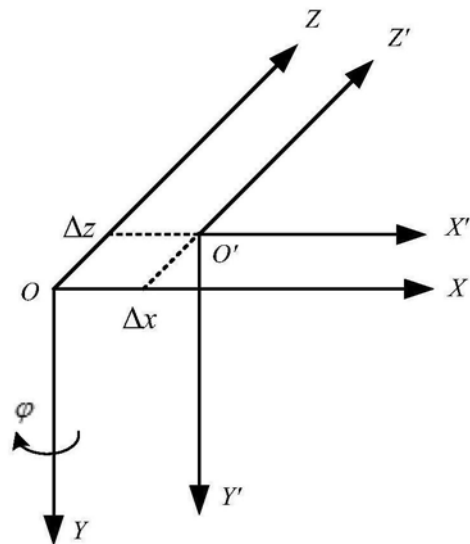


图3

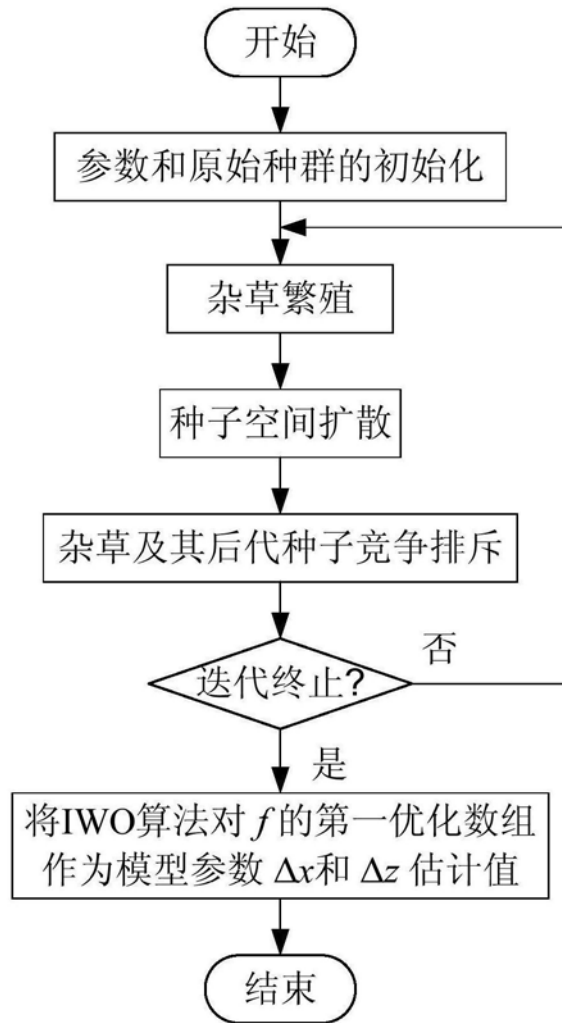


图4

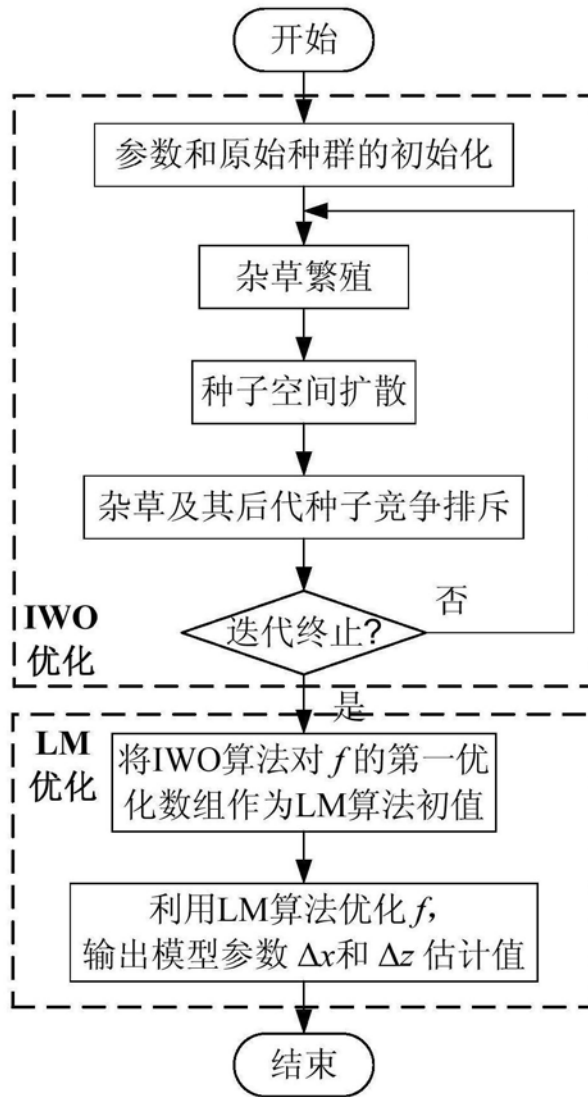


图5