



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103162622 A

(43) 申请公布日 2013. 06. 19

(21) 申请号 201310064021. 5

(22) 申请日 2013. 02. 28

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

(72) 发明人 赵宏 谷飞飞 马跃洋 卜鹏辉

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任  
公司 61200

代理人 徐文权

(51) Int. Cl.

G01B 11/00 (2006. 01)

G01B 11/24 (2006. 01)

G01B 11/22 (2006. 01)

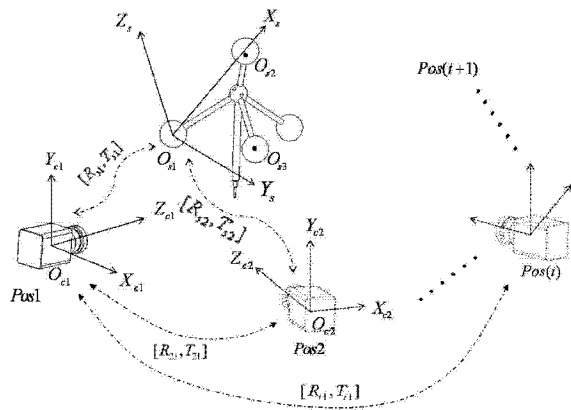
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

单目视觉系统及其使用的便携式球靶标及其测量方法

(57) 摘要

本发明提供一种单目视觉系统及其使用的便携式球靶标及其测量方法,球靶标由球体、连接块和一系列不同形状和长度的探针组成,探针由接长杆和测头组成,连接块用于支撑每个球体以及连接探针,球形连接块表面打有均匀的 14 个螺纹孔,与接长杆和球之间采用螺杆连接。设计不同的连接杆以适应不同的测量场合。球体部分由三个以上非共面圆球组成,单个相机拍摄一幅图像即可快速标定摄像机内部参数、确定球心位置,从而得到待测点的三维坐标,为单目测量系统下的深度信息获取提供了一种可行途径。相机移动后,根据球靶标的球体部分单幅图像即可快速标定相机移动外参,实现空间数据拼接,有效扩大测量范围和测量速度。



1. 一种用于单目视觉系统快速标定和测量的便携式球靶标,其特征在于:主要由球体、连接块(5)和探针组成;所述连接块(5)用于支撑每个球体以及连接探针,所述探针由接长杆(2)和测头(1)组成,所述球体由三个以上非共面圆球组成,所述球体通过螺杆(4)与连接块连接。

2. 根据权利要求1所述的便携式球靶标,其特征在于:所述连接块(5)为球体形状。

3. 一种基于权利要求1所述的便携式球靶标的单目视觉系统,其特征在于:所述单目视觉系统包括便携式球靶标及摄像机,所述摄像机能看见完整的球靶标球体部分。

4. 一种基于权利要求3所述的单目视觉系统的测量方法,其特征在于:(1)由单目视觉系统拍摄一幅球靶标图像,根据摄像机透视成像模型和球体投影模型基于绝对二次曲线成像几何标定摄像机内部参数K,所述摄像机内部参数K包括摄像机光心 $(u_0, v_0)$ ,焦距f以及倾斜因子s;(2)利用标定的摄像机内部参数和球透视成像几何模型确定各个球心在摄像机坐标系下的三维坐标;(3)求取球靶标中每个圆球球心到测头的距离;(4)根据球靶标圆球和测头的位置关系确定测头的位置,即待测点的三维坐标。

5. 如权利要求4所述的测量方法,其特征在于:步骤(1)的具体方法包括以下步骤:

(5.1)采用图像处理方法和边缘检测算子提取每个圆球在摄像机内所成的椭圆轮廓,然后采用最小二乘法拟合对应椭圆轮廓的曲线方程 $C_i$ ,其中,i为圆球的个数;

(5.2)根据球体透视投影成像模型,摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 与第i个圆球的球坐标系 $O_{si} X_{si} Y_{si} Z_{si}$ 之间的单应性矩阵为: $H_i = KR_i \text{diag}\{1, 1, \Lambda_i\}$ ,其中, $\Lambda_i = Z_{i0}/r_i$ , $Z_{i0}$ 为第i个圆球的球心到摄像机光心之间的距离, $r_i$ 为第i个圆球的半径, $R_i$ 为旋转矩阵,圆球在摄像机内成像椭圆的二次曲线方程 $C_i$ 在对偶空间中表示形式为:

$$C_i^* = H_i C_{im}^* H_i^T = KR_i \text{diag}(1, 1, -\Lambda_i^2) R_i^T K^T = KK^T - o_i o_i^T, \text{公式}(5.1)$$

其中, $o_i = \sqrt{(\Lambda_i^2 + 1)} Kr_{3i}$ 是第i个圆球的球心成像坐标, $r_{3i}$ 为相应的旋转矩阵 $R_i$ 的第3列, $R_i$ 为旋转矩阵,K为摄像机内部参数形成的矩阵。

6. 如权利要求5所述的测量方法,其特征在于:所述步骤(5.2)中,求解摄像机内部参数K时,引入绝对二次曲线,该绝对二次曲线在单应性矩阵下的图像为 $w = (KK^T)^{-1}$ ,在对偶空间中表示为: $w^* = KK^T$ ;球靶标中的每两个圆球的成像椭圆曲线方程之间的单应性矩阵为 $H_{AB} = C_B C_A^*$ , $A, B=1, 2, 3$ 且 $A \neq B$ ,其中, $C_A^*$ 为圆球A的成像椭圆曲线方程 $C_A$ 在对偶空间中的表示形式, $C_B$ 为圆球B的成像椭圆曲线方程;根据视图几何理论,每一对成像椭圆的单应性矩阵均包括一个穿过相应的椭圆对的特征向量,称为单应性矩阵的极线,表示为 $l_{AB}$ ,其中, $A, B=1, 2, 3$ 且 $A \neq B$ ,每个特征向量对应的特征值称为极点,表示为 $v_{AB}$ , $A, B=1, 2, 3$ 且 $A \neq B$ . $l_{AB}$ 、 $v_{AB}$ 以及w满足以下公式(6.1):

$$[l_{AB}] \times w v_{AB} = 0 \quad (6.1)$$

根据奇异值分解得到w,进而根据公式 $w^* = KK^T$ 正交分解即得摄像机内部参数K。

7. 如权利要求5所述的测量方法,其特征在于:步骤(2)的具体方法为:对步骤(5.2)中的公式(5.1)进行变形得到:

$$\beta_i K^{-1} C_i^* K^{-T} = R_i \text{diag}(1, 1, -\Lambda_i^2) R_i^T, \text{其中}, \beta_i \text{为第} i \text{个圆球的成像比例因子};$$

将等式左边的表达式通过奇异值分解得到与等式右边一致的形式,从而,得到旋转矩

阵  $R_i$  和  $\Lambda_i$ , 得到各个球心的三维坐标。

8. 如权利要求 4 所述的测量方法, 其特征在于: 所述待测点的位置坐标  $(x, y, z)$  根据以下计算:

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = (d_i)^2, \text{公式 (8.1)}$$

其中,  $i$  为圆球的个数,  $(x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  个圆球球心坐标,  $d_i$  为圆球与测头之间的距离,  $i$  个圆球即得  $i$  个公式 (8.1), 联合即得待测点的位置坐标  $(x, y, z)$ 。

9. 如权利要求 8 所述的测量方法, 其特征在于: 测量之前, 首先对球靶标进行自标定, 得到圆球与测头之间的距离, 自标定的方法为: 令测头固定在一处不动, 球靶标绕测头旋转多个角度拍摄  $m$  幅图像, 利用同心圆半径不变的约束联合所有球心建立误差最小化函数, 通过最小化总距离误差得到待测点空间位置, 最后即得得到每个圆球的球心与待测点之间的距离。

10. 一种基于权利要求 3 所述的单目视觉系统进行移动标定和数据拼接的方法, 其特征在于: (10.1) 首先将球靶标放置在合适的位置, 保证摄像机能够看到球靶标球体部分; (10.2) 建立世界坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$ , 按照顺序选取球靶标的三个圆球, 其中, 世界坐标系的原点  $O_w$  为第一个圆球的球心, 世界坐标系的  $X_w$  轴为第二个圆球的球心到第一个圆球的球心的向量  $\overline{O_2 O_1}$ , 世界坐标系的  $Z_w$  轴为:  $\overline{O_w Z_w} = \overline{O_2 O_1} \times \overline{O_3 O_1}$ , 世界坐标系的  $Y_w$  轴为  $\overline{O_w Y_w} = \overline{O_w Z_w} \times \overline{O_2 O_1}$ ; (10.3) 由步骤 (10.2) 即得摄像机坐标系和世界坐标系之间的关系  $[R_{w-1}, T_{w-1}]$ , 当摄像机移动到其他非第一位置时, 摄像机在该位置的坐标系与世界系之间的关系为  $[R_{w-i}, T_{w-i}]$ , 设定摄像机在第一位置时的坐标系为参考坐标系, 将其他所有位置时测量的数据统一到参考坐标系下实现数据的拼接。

## 单目视觉系统及其使用的便携式球靶标及其测量方法

### 【技术领域】

[0001] 本发明属于视觉测量技术领域,涉及一种可用于单目视觉测量系统快速标定、测量和数据拼接的便携式球靶标。

### 【背景技术】

[0002] 随着工件外形检测需求的增多,视觉测量技术得到越来越多的应用。较之需要多台摄像机的立体视觉系统,单摄像机无需摄像机同步设备和保持摄像机相对位置的机械装置,因此使用方便、价格低廉、便于实现。然而单纯利用单目视觉系统进行测量时无法恢复三维物体的深度信息,往往需要借助线激光等额外条件构成三角约束、约束测量物体在特定的位置成像或者使用标记点或标定面约束待测量面等方法来确定三维深度信息,测量过程十分复杂,应用受限。同时标定相机内、外部参数的过程费时费力,不利于工件快速测量。另外,单目视觉系统测量范围有限,在测量大型工件时往往只能测量局部信息,采用拼接靶标进行三维数据拼接成为扩大测量范围的有效途径。目前常用的拼接靶标主要是平面靶标,存在相机移动视角过大时畸变过大甚至观测不到的不足。

### 【发明内容】

[0003] 针对上述现有单目测量系统的缺陷或不足,本发明的目的在于提供一种更加灵活简便、且视角不受靶标单面约束的单目视觉系统及其使用的便携式球靶标及其测量方法,实现单目测量系统快速标定、测量和数据拼接。由于球具有外轮廓连续性好等优点,可以实现 360 度空间视场无视角限制、便捷标定,消除了平面靶标在摄像机移动视角太大时畸变过大甚至观测不到的不足。本发明采用球体作为拼接靶标和标定靶标,将标定过程和拼接过程使用球靶标同步完成。

[0004] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0005] 一种用于单目视觉系统快速标定和测量的便携式球靶标,主要由球体、连接块和一系列不同形状和长度的探针组成;所述连接块用于支撑每个球体以及连接探针,所述探针由连接长杆和测头组成,设计不同的连接杆以适应不同的测量场合;所述球体部分由三个以上非共面圆球组成,所述球体通过螺杆与连接块连接。

[0006] 作为本发明的优选实施例,所述连接块为球体形状。

[0007] 一种基于所述的便携式球靶标的单目视觉系统,所述单目视觉系统包括便携式球靶标及摄像机,所述摄像机能看见完整的球靶标球体部分。

[0008] 一种基于所述的单目视觉系统的测量方法,(1)由单目视觉系统拍摄一幅球靶标图像,根据摄像机透视成像模型和球体投影模型基于绝对二次曲线成像几何标定摄像机内部参数  $K$ ,所述摄像机内部参数  $K$  包括摄像机光心  $(u_0, v_0)$ ,焦距  $f$  以及倾斜因子  $s$ ;(2)利用标定的摄像机内部参数和球透视成像几何模型确定各个球心在摄像机坐标系下的三维坐标;(3)求取球靶标中每个圆球球心到测头的距离;(4)根据球靶标圆球和测头的位置关系确定测头的位置,即待测点的三维坐标。

[0009] 作为本发明的优选实施例,上述步骤(1)的具体方法包括以下步骤:

[0010] (5.1)采用图像处理方法和边缘检测算子提取每个圆球在摄像机内所成的椭圆轮廓,然后采用最小二乘法拟合对应椭圆轮廓的曲线方程  $C_i$ ,其中,  $i$  为圆球的个数;

[0011] (5.2)根据球体透视投影成像模型,摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$  与第  $i$  个圆球的球坐标系  $O_{s_i} X_{s_i} Y_{s_i} Z_{s_i}$  之间的单应性矩阵为:  $H_i = KR_i \text{diag}\{1, 1, \Lambda_i\}$ ,其中,  $\Lambda_i = Z_{i0}/r_i$ ,  $Z_{i0}$  为第  $i$  个圆球的球心到摄像机光心之间的距离,  $r_i$  为第  $i$  个圆球的半径,圆球在摄像机内成像椭圆的二次曲线方程  $C_i$  在对偶空间中表示形式为:

$$[0012] \quad C_i^* = H_i C_{im}^* H_i^T = KR_i \text{diag}(1, 1, -\Lambda_i^2) R_i^T K^T = KK^T - o_i o_i^T, \text{公式}(5.1)$$

[0013] 其中,  $o_i = \sqrt{(\Lambda_i^2 + 1)} Kr_{3i}$  是第  $i$  个圆球的球心成像坐标,  $r_{3i}$  为相应的旋转矩阵  $R_i$  的第 3 列,  $R_i$  为旋转矩阵,  $K$  为摄像机内部参数形成的矩阵。

[0014] 作为本发明的优选实施例,所述步骤(5.2)中,求解摄像机内部参数  $K$  时,引入绝对二次曲线,该绝对二次曲线在单应性矩阵下的图像为  $w = (KK^T)^{-1}$ ,在对偶空间中表示为:  $w^* = KK^T$ ;球靶标中的每两个圆球的成像椭圆曲线方程之间的单应性矩阵为  $H_{AB} = C_B C_A^*$ ,  $A, B=1, 2, 3$  且  $A \neq B$ ,其中,  $C_A^*$  为圆球  $A$  的成像椭圆曲线方程  $C_A$  在对偶空间中的表示形式,  $C_B$  为圆球  $B$  的成像椭圆曲线方程;根据视图几何理论,每一对成像椭圆的单应性矩阵均包括一个穿过相应的椭圆对的特征向量,称为单应性矩阵的极线,表示为  $l_{AB}$ ,其中,  $A, B=1, 2, 3$  且  $A \neq B$ ,每个特征向量对应的特征值称为极点,表示为  $v_{AB}$ ,  $A, B=1, 2, 3$  且  $A \neq B$ .  $l_{AB}$ 、 $v_{AB}$  以及  $w$  满足  $[l_{AB}] \times w v_{AB} = 0$ ,根据奇异值分解得到  $w$ ,进而根据公式  $w^* = KK^T$  正交分解即得摄像机内部参数  $K$ 。

[0015] 作为本发明的优选实施例,步骤(2)的具体方法为:对步骤(5.2)中的公式(5.1)进行变形得到:  $\beta_i K^{-1} C_i^* K^{-T} = R_i \text{diag}(1, 1, -\Lambda_i^2) R_i^T$ ,其中,  $\beta_i$  为第  $i$  个圆球的成像比例因子;将等式左边的表达式通过奇异值分解得到与等式右边一致的形式,从而,得到旋转矩阵  $R_i$  和  $\Lambda_i$ ,得到各个球心的三维坐标。

[0016] 作为本发明的优选实施例,所述待测点的位置坐标  $(x, y, z)$  根据以下计算:

$$[0017] \quad (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = (d_i)^2, \quad \text{公式}(8.1)$$

[0018] 其中,  $i$  为圆球的个数,  $(x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  个圆球球心坐标,  $d_i$  为圆球与测头之间的距离,  $i$  个圆球即得  $i$  个公式(8.1),联合即得待测点的位置坐标  $(x, y, z)$ 。

[0019] 作为本发明的优选实施例,测量之前,首先对球靶标进行自标定,得到圆球与测头之间的距离,自标定的方法为:令测头固定在一处不动,球靶标绕测头旋转多个角度拍摄  $m$  幅图像,利用同心圆半径不变的约束联合所有球心建立误差最小化函数,通过最小化总距离误差得到待测点空间位置,最后即得得到每个圆球的球心与待测点之间的距离。

[0020] 一种基于所述的单目视觉系统进行移动标定和数据拼接的方法,(10.1)首先将球靶标放置在合适的位置,保证摄像机能够看到球靶标球体部分;(10.2)建立世界坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$ ,按照顺序选取球靶标的三个圆球,其中,世界坐标系的原点  $O_w$  为第一个圆球的球心,世界坐标系的  $X_w$  轴为第二个圆球的球心到第一个圆球的球心的向量  $\overline{O_2 O_1}$ ,世界坐标系的  $Z_w$  轴为:  $\overline{O_w Z_w} = \overline{O_2 O_1} \times \overline{O_3 O_1}$ ,世界坐标系的  $Y_w$  轴为  $\overline{O_w Y_w} = \overline{O_w Z_w} \times \overline{O_2 O_1}$ ;(10.3)由步骤

(10.2) 即得摄像机坐标系和世界坐标系之间的关系  $[R_{w-1}, T_{w-1}]$ , 当摄像机移动到其他非第一位置时, 摄像机在该位置的坐标系与世界系之间的关系为  $[R_{w-i}, T_{w-i}]$ , 设定摄像机在第一位置时的坐标系为参考坐标系, 将其他所有位置时测量的数据统一到参考坐标系下实现数据的拼接。

[0021] 与现有技术相比, 本发明具有以下有益效果: 本发明测量时, 对球靶标中的不同圆球进行拍摄, 从而得到待测点的位置坐标。由于球具有外轮廓连续性好等优点, 可以实现 360 度空间视场无视角限制、便捷标定, 消除了平面靶标在摄像机移动视角太大时畸变过大甚至观测不到的不足。

### 【附图说明】

[0022] 图 1 为本发明球靶标结构及摄像机透视成像模型示意图;

[0023] 图 2 为本发明球靶标球体部分透视成像模型示意图;

[0024] 图 3 为本发明球靶标自标定及测头位置计算原理示意图;

[0025] 图 4 为本发明球靶标的摄像机移动位置标定示意图。

### 【具体实施方式】

[0026] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述。

[0027] 图 1 为本发明球靶标结构及摄像机透视成像模型示意图。其中的标号分别表示: 1、测头, 2、接长杆, 3、圆球, 4、螺杆, 5、球形连接块。  $O_c X_c Y_c Z_c$  为摄像机坐标系,  $O_c$  为摄像机光心,  $Z_c$  轴与摄像机光轴方向重合。  $O_{s1}, O_{s2}, O_{s3}$  分别为用于建立靶标坐标系的三个球的球心,  $O_s X_s Y_s Z_s$  为靶标坐标系。  $uv$  表示图像像素坐标系(即实物在摄像机内成像的图像坐标系),  $(u_0, v_0)$  表示图像中心。

[0028] 本发明以由 4 个圆球组成的球靶标为例进行具体说明。球靶标的探针由测头 1 和接长杆 2 组成, 测头 1 通过接长杆 2 连接到球形连接块 5 上, 球形连接块 5 表面打有均布的 14 个螺纹孔, 与接长杆 2 和圆球 3 之间采用螺杆连接, 螺纹孔的数量保证了可以根据需要确定需要安装的球体数量。每两个移动位置的摄像机要求有重叠的视场。本方法先根据空间球成像和绝对二次曲线的关系标定摄像机内部参数, 然后根据球透视成像模型和矩阵分解法求得各个球的球心位置, 由此计算测头的空间三维坐标。最后利用球靶标作为拼接靶标, 标定摄像机移动位置关系, 实现不同位置的数据拼接。

[0029] 图 2 为球靶标球体部分透视成像模型示意图。  $O_c X_c Y_c Z_c$  为摄像机坐标系,  $O_{si} X_{si} Y_{si} Z_{si}$  为以摄像机光心为原点、光心与球心连线为  $Z$  轴建立的第  $i$  个球的球坐标系。球心  $O_i$  到摄像机光心  $O_c$  的距离为  $Z_{i0}$ , 球的半径为  $r_i$ , 根据射线跟踪, 由出射的射线与球相切的点组成一个圆, 即轮廓生成元  $\bar{C}_i$  (轮廓生成元即每一个圆球实际的轮廓),  $\bar{C}_i$  在摄像机像平面上的成像椭圆表示为  $C_i$ ,  $uv$  表示图像像素坐标系。

[0030] 图 3 为球靶标自标定及测头位置计算原理示意图。其中的标号分别表示:  $P_0$  表示待测点三维坐标, 也即靶标测头所在位置,  $O_s X_s Y_s Z_s$  表示靶标坐标系,  $d_1 \sim d_4$  表示四个球的球心到测头的距离。

[0031] 图 4 为能同时覆盖球靶标的摄像机移动位置标定示意图。其中的标号分别表示:  $O_{ci} X_{ci} Y_{ci} Z_{ci}$  表示摄像机在第  $i$  个位置构建的摄像机坐标系,  $O_s X_s Y_s Z_s$  表示靶标坐标系,  $Pos(i)$

代表摄像机移动位置,  $[R_{ab}, T_{ab}]$  代表坐标系 a 到坐标系 b 的转换关系, 脚标 a、b 代表各个位置的摄像机坐标系和靶标坐标系。

[0032] 下面, 对各步骤进行具体介绍。

[0033] 第一阶段: 硬件的建立

[0034] 参见图 1, 搭建单目视觉测量系统, 建立摄像机透视成像模型。球靶标的球体部分包括三个以上由球形连接块 5 连接的圆球 3, 所述圆球 3 通过螺杆 4 连接在球形连接件 5 上, 圆球半径  $r_i$  可以不一样, 根据测量视场确定球的数量和大小; 探针的接长杆 2 连接在球形连接块 5 上, 其长度和形状根据实际的测量场合确定; 测头 1 设置在接长杆的末端, 圆球与测头 1 的位置可以通过球靶标自标定确定。球靶标置于摄像机视场内合适位置, 测头 1 与被测点接触。拍摄一幅图像。

[0035] 第二阶段: 基于球靶标和绝对二次曲线的摄像机内部参数 K 的单幅图像标定。

[0036] 参见图 2, 球体部分透视成像, 每个圆球在像平面上成像为椭圆。所述像平面即实际圆球在摄像机内的成像所在的平面。摄像机内部参数 K 主要是由摄像机光心和焦距形成的矩阵, 标定过程如下:

[0037] 2.1、采用二值化、膨胀、阈值等图像处理方法和边缘检测算子提取球体所成椭圆轮廓, 采用最小二乘法拟合椭圆曲线方程  $C_i (i=1 \sim 4)$ ,  $i$  为球靶标中圆球的个数。将每个圆球的投影二次曲线  $C_i$  按一定的顺序保存待用。

[0038] 2.2、根据球体透视投影成像模型, 摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$  与第  $i$  个圆球的球坐标系  $O_{si} X_{si} Y_{si} Z_{si}$  之间只存在一个旋转, 因此两者之间的单应性矩阵  $H_i = KR_i \text{diag}\{1, 1, \Lambda_i\}$ , 其中,  $\Lambda_i = Z_{i0}/r_i$ ,  $Z_{i0}$  为第  $i$  个圆球的球心到摄像机光心之间的距离,  $r_i$  为第  $i$  个圆球的半径,  $R_i$  为旋转矩阵, 球的轮廓生成元在像平面上的成像椭圆二次曲线方程为  $C_i = H_i^{-T} \bar{C}_i H_i^{-1} = H_i^{-T} \text{diag}(1, 1, -1) H_i^{-1}$ 。在对偶空间中表示形式为:

$$[0039] \quad C_i^* = H_i C_{i0}^* H_i^T = KR_i \text{diag}(1, 1, -\Lambda_i^2) R_i^T K^T = KK^T - o_i o_i^T \quad (1)$$

[0040] 其中  $o_i = \sqrt{(\Lambda_i^2 + 1)} K r_{3i}$  是第  $i$  个圆球的球心所成像坐标,  $r_{3i}$  为相应的旋转矩阵  $R_i$  的第 3 列。

[0041] 绝对二次曲线 IAC 是无穷远平面  $\pi_\infty = (0, 0, 0, 1)^T$  上的二次曲线, 在单应性矩阵  $H=KR$  下的图像  $w=(KK^T)^{-1}$  其在对偶空间中可表示为

$$[0042] \quad w^* = KK^T \quad (2)$$

[0043] 由空间三个球体成像可以得到如(3)所示的三个方程。计算每两个成像椭圆曲线方程之间的单应性矩阵  $H_{AB} = C_B C_A^* (A, B=1, 2, 3 \text{ 且 } A \neq B) C_A^*$  为  $C_A$  在对偶空间中的表示形式。根据视图几何理论, 每一对成像椭圆的单应性矩阵均包括一个穿过相应的椭圆对的特征向量, 称为单应性矩阵的极线, 表示为  $l_{AB} (A, B=1, 2, 3 \text{ 且 } A \neq B)$ , 每个特征向量对应的特征值称为极点, 表示为  $v_{AB} (A, B=1, 2, 3 \text{ 且 } A \neq B)$ 。  $l_{AB}$ 、 $v_{AB}$  以及  $w$  满足方程(3):

$$[0044] \quad [l_{AB}] \times w v_{AB} = 0 \quad (3)$$

[0045] , 根据奇异值分解可以得到  $w$ , 进而根据式(2)正交分解得到摄像机内部参数 K。进而可求取。

[0046] 第三阶段: 基于球靶标成像模型利用矩阵奇异值分解获得每个球心位置  $O_i$ , 通过

球靶标自标定确定球心与测头之间的位置关系;位置参数一旦标定,可以作为已知量,在球靶标在不拆斜(增减球或换测头接长杆等)的情况下用于接下来的工件表面测量。

[0047] 3.1、对步骤2中的公式(1)进行简单变形可得到

$$[0048] \quad \beta_i K^{-1} C_i^* K^{-T} = R_i \text{diag}(1, 1, -\Lambda_i^2) R_i^T \quad (4)$$

[0049] 其中,  $\beta_i$  为第  $i$  个圆球的成像比例因子;

[0050] 等式左边为对称阵,通过奇异值分解可以得到与等式右边一致的形式,从而得到旋转矩阵  $R_i$  和  $\Lambda_i$ ,得到各个球心的三维坐标。

[0051] 3.2、参见图3,由步骤3.1中的计算可以得到球心的三维坐标,为了得到准确的球心和测头之间的位置关系,在使用靶标进行三维测量之前,对球靶标进行自标定。令测头固定在一处不动,球靶标绕测头旋转多个角度拍摄  $m$  幅图像,球靶标中使用的圆球个数  $n=4$ ,设第  $j$  幅图像中球心  $O_i$  ( $i=1 \sim n$ ) 的坐标为  $(x_i^j, y_i^j, z_i^j)$ ,利用步骤3.1可以确定该坐标。第  $i$  个球在第  $j$  个位置时到测头的距离  $d_i^j$  和测头位置  $(x, y, z)$  为未知量,

$$[0052] \quad (x_i^j - x)^2 + (y_i^j - y)^2 + (z_i^j - z)^2 = (d_i^j)^2, \quad (5)$$

[0053] 对每一个球,均可以利用同心圆半径不变的约束得到  $m-1$  个约束方程,联合所有球心建立误差最小化函数

$$[0054] \quad \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_i^j - d_i) \quad (6)$$

[0055] 通过最小化总距离误差得到优化的待测点空间位置,然后将该空间位置作为已知量带入(5),每个球的球心与待测点之间距离利用  $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m d_i^j$  求得。将得到的距离值作为已知量用于后续测量过程中。因为自标定过程只需要一次,后续测量过程只需拍摄单幅图像即可得到待测点三维坐标。

[0056] 第四阶段:基于球靶标的单目测量系统移动标定和数据拼接

[0057] 参见图4,首先基于向量标准正交法以空间球为基准建立世界坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$  作为拼接坐标系,然后利用拼接坐标系实现摄像机在不同位置的坐标转化。

[0058] 4.1、将球靶标放置在视场中合适的位置,摄像机在位置1拍摄一幅图像,然后移动摄像机到位置  $i$ ,要求两个位置的摄像机均可以看到球靶标球体部分。若需要更多的位置以实现大型工件表面测量,则要求每个位置均可以看到球靶标球体部分。要求每个位置拍摄的球按相同顺利排列,保证世界坐标系的统一性。

[0059] 4.2、以不动的空间球为基准建立世界坐标系,三个球即可根据标准正交法建立笛卡尔直角坐标系。选取特定的三个球,如序号1~3的球。首先将世界坐标系原点  $O_w$  置于球1的球心位置,确定球2、球3的球心到球心1的向量  $\overline{O_2 O_1}$ 、 $\overline{O_3 O_1}$ ,  $\overline{O_2 O_1}$  定义为  $X_w$  轴方向,由此可确定  $Z_w$  轴,  $\overline{O_w Z_w} = \overline{O_2 O_1} \times \overline{O_3 O_1}$ ,最后确定  $Y_w$  轴:  $\overline{O_w Y_w} = \overline{O_w Z_w} \times \overline{O_2 O_1}$ 。将坐标轴向量方向确定出来后,将各个方向向量单位化,即完成了世界坐标系的建立。

[0060] 4.3、当摄像机处于位置1时,由步骤2确立世界坐标系,则摄像机坐标系和世界坐标系之间的关系确定  $[R_{w-1}, T_{w-1}]$ ,当摄像机移动到第  $i$  个位置后,同理可确定第  $i$  个位置摄



像机坐标系和世界坐标系之间的关系  $[R_{w-i}, T_{w-i}]$ 。选取摄像机在第一个位置时的坐标系为参考坐标系,将所有位置时测量数据统一到参考坐标系下实现数据拼接。第  $i$  个摄像机坐标系与第 1 个位置摄像机坐标系的关系可推出:

$$[0061] \quad R_{1-i} = R_{w-i} R_{w-1}^{-1}$$

$$[0062] \quad T_{1-i} = T_{w-i} - R_{w-i} R_{w-1}^{-1} T_{w-1} \quad (7)$$

[0063] 本发明为实现单目测量系统下的深度信息获取提供了一种可行途径,实施快速方便,成本低廉。在实现摄像机标定的同时完成了空间点测量,可以通过增加球体部分圆球数量和保持测尖不动旋转球靶标多幅拍摄的方式优化测量精度。本发明同时为多目系统和单目测量系统移动标定和数据拼接提供了一种可行途径,多目系统标定原理和单目移动标定原理类似,可以通过第四阶段的步骤完成坐标系统一和数据拼接。

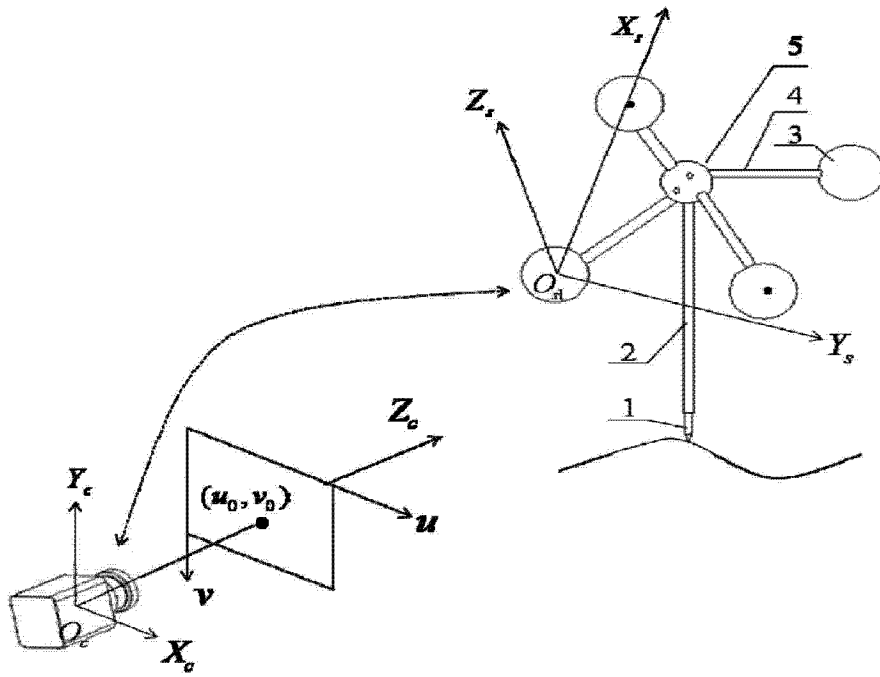


图 1

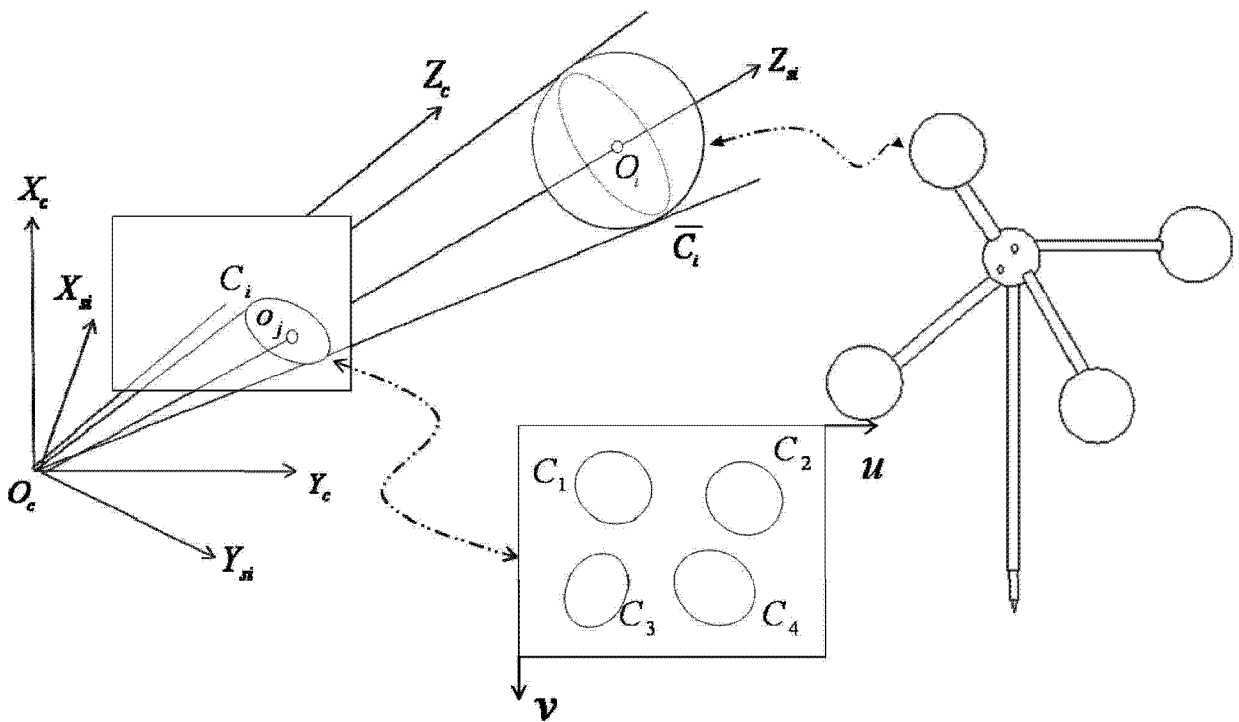


图 2

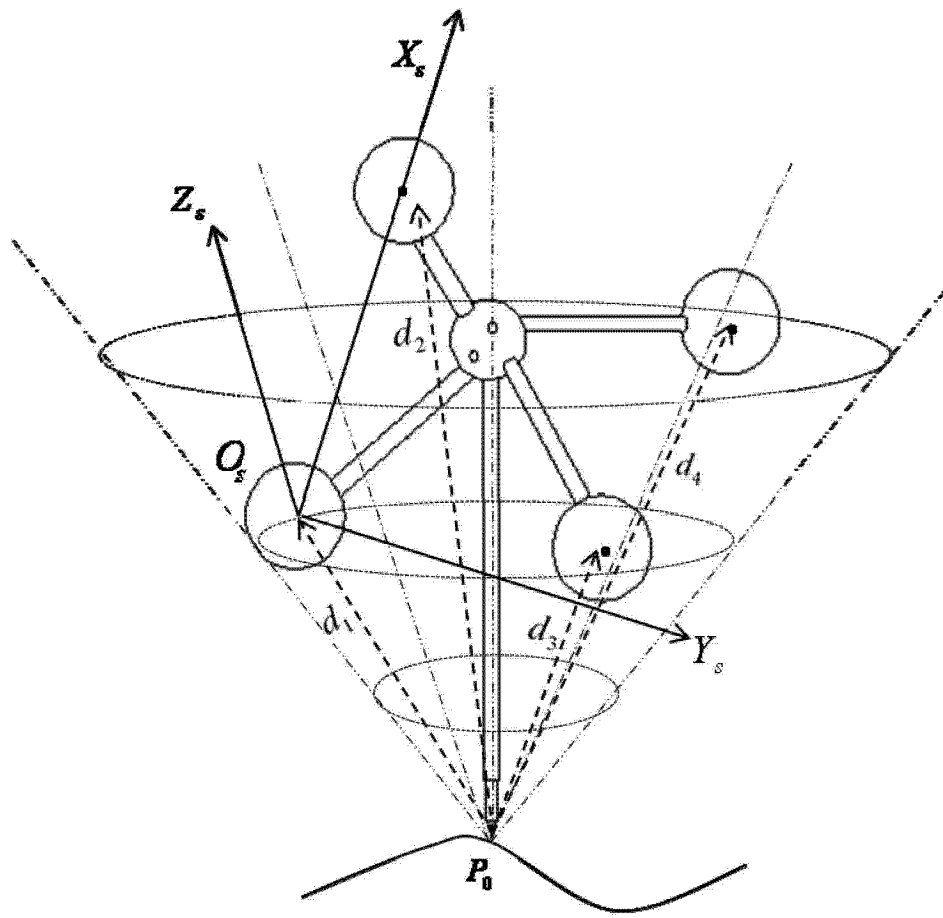


图 3

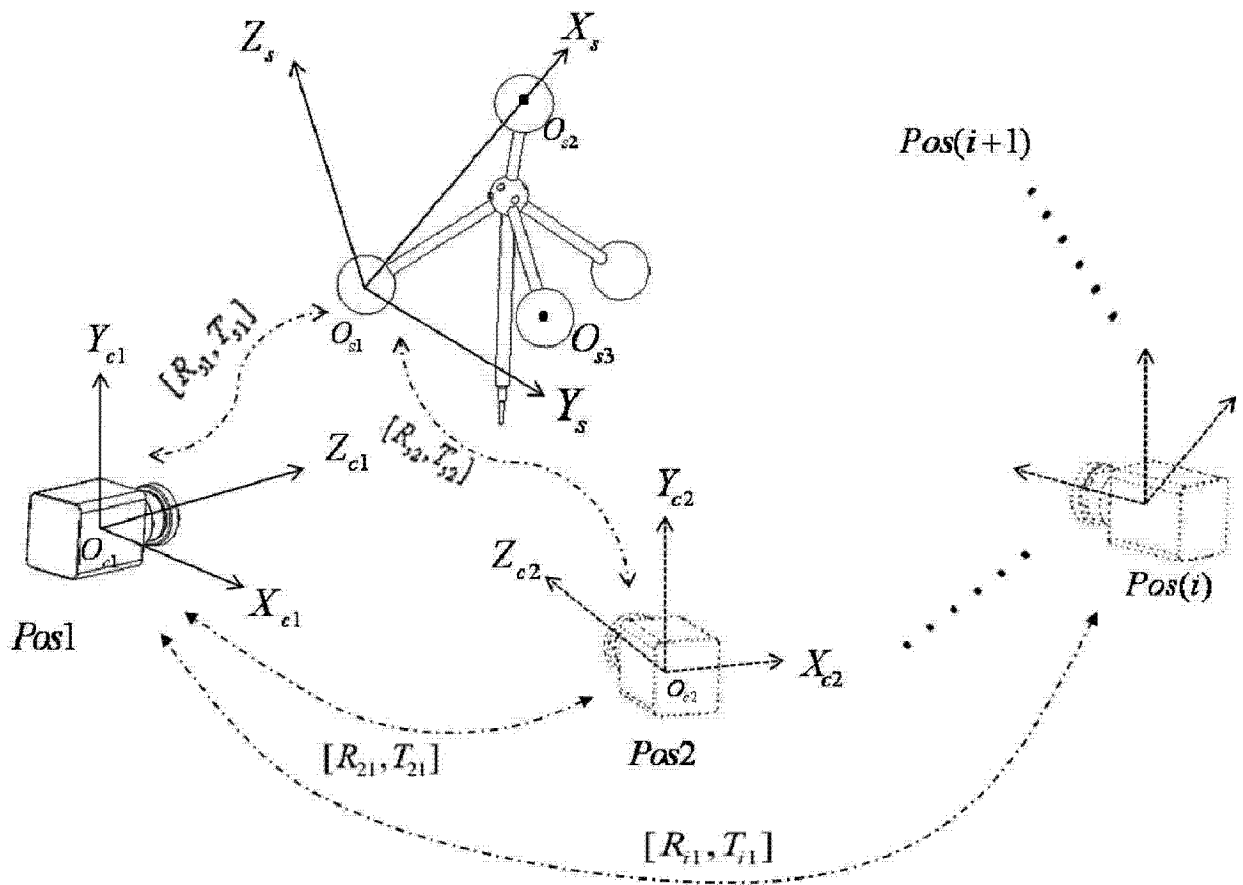


图 4