



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107014312 B

(45)授权公告日 2019.05.24

(21)申请号 201710286051.9

(22)申请日 2017.04.25

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 107014312 A

(43)申请公布日 2017.08.04

(73)专利权人 西安交通大学  
地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 杨树明 杨林林 杨新宇 薛兴昌  
张国锋

(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 闵岳峰

(51)Int.Cl.  
G01B 11/25(2006.01)

(56)对比文件

CN 102944188 A,2013.02.27,  
CN 101329174 A,2008.12.24,  
JP 特开2008-241643 A,2008.10.09,  
许红梅.用于微装配的显微视觉系统标定技术的研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库》.2012,(第1期),正文第1-60页.

审查员 陆颖莹

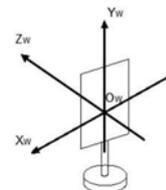
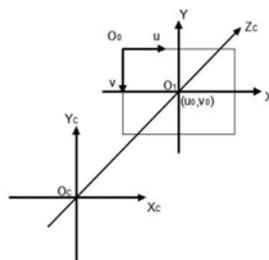
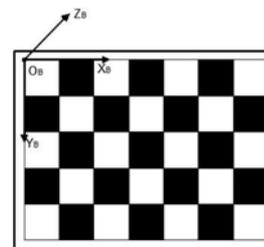
权利要求书2页 说明书10页 附图3页

## (54)发明名称

一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法

## (57)摘要

本发明公开了一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,首先选择两个有效焦距为 $f_1$ 和 $f_2$ 的镜头,利用摄像机对平面靶标进行拍摄并提取特征点坐标,根据变焦距法计算出图像的主点坐标;然后以焦距 $f_1$ 的镜头作为系统的镜头,对其获得的平面靶标上的特征点坐标,根据Tsai两步法,标定出摄像机的内参数与外参数;其次通过改变振镜控制电压与驱动一维平移台移动,获取不同深度方向与不同光平面下的线激光条纹,通过平面拟合并求交线等运算得到靶标坐标系与世界坐标系的转化关系;最后把系统模型下的坐标均统一到图像像素坐标系与世界坐标系下,完成整个系统的标定。该方法具有标定过程简单,标定精度高、标定速度快等优点。



1. 一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,其特征在于,包括如下步骤:

1) 选择两个有效焦距不同的镜头,利用变焦距法的原理通过最小二乘拟合标定出图像的主点坐标;

2) 利用求出的主点坐标,结合Tsai的两步法对摄像机镜头进行标定;

3) 驱动一维精密运动平台与振镜系统,获得不同位置与不同角度的激光线条纹,利用条纹数据的图像坐标与世界坐标完成光平面的标定,实现整个系统的标定;具体为根据系统的数学模型,以摄像机镜头的光心为原点建立摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ ,图像左上角为原点建立图像像素坐标系 $O_0-uv$ ,以摄像机光心与成像平面交点为原点建立图像物理坐标系 $O_1-XY$ ,以平面棋盘格左上角角点为原点建立靶标坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ ,以振镜的转轴方向为 $Y_w$ 轴, $Y_w$ 轴与靶标坐标系 $O_B X_B Z_B$ 平面的交点作为原点 $O_w$ ,当振镜控制电压为 $U_0$ 时,激光平面的法线方向为 $X_w$ 轴建立世界坐标 $O_w-X_w Y_w Z_w$ ,系统标定的过程实质上是计算这五个坐标系映射关系的过程。

2. 根据权利要求1所述的一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,其特征在于,步骤2)中,利用Tsai提出的基于径向约束的摄像机标定法分两步标定出摄像机的有效焦距 $f$ ,二阶径向畸变系数 $k_1$ ,摄像机坐标系与靶标坐标系的变换矩阵 $R$ 和 $T$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,其特征在于,步骤3)中,在世界坐标系下,建立振镜控制电压与光平面方程的对应关系,其关系式为:

$$X_w \cos(2\alpha(U_1 - U_0)) - Z_w \sin(2\alpha(U_1 - U_0)) = 0 \quad (24)$$

式中, $X_w$ 、 $Z_w$ 为点的世界坐标, $U_0$ 为振镜系统的初始控制电压, $U_1$ 为振镜系统的实际控制电压, $\alpha$ 为单位伏特电压振镜转动的角度。

4. 根据权利要求1所述的一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,其特征在于,步骤3)中,通过一维电动平移台与平面标定板对靶标坐标系与世界坐标系的转化关系进行标定,以两个坐标系坐标轴的单位向量与原点确定出旋转矩阵 $R_1$ 和平移向量 $T_1$ ,即:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $(X_w, Y_w, Z_w)$ 为点在世界坐标系下的坐标, $(X_B, Y_B, Z_B)$ 为对应的靶标坐标系下的坐标, $R_1$ 为3x3的单位正交矩阵, $T_1$ 为3x1的平移向量, $0^T$ 为1x3的零矩阵。

5. 根据权利要求4所述的一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,其特征在于,步骤3)中,将坐标系间的转换关系统一到图像像素坐标系与世界坐标系下,得到两者间的对应关系:

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $(u, v)$  为点的图像像素坐标,  $(X_w, Y_w, Z_w)$  为对应的世界坐标,  $f$  为摄像机焦距,  $(u_0, v_0)$  为成像平面的主点坐标,  $dx$ 、 $dy$  为摄像机成像平面的单位像素的尺寸,  $R$ 、 $T$  为相机标定得到的摄像机坐标系与靶标坐标系的转换矩阵,  $R_1$ 、 $T_1$  为靶标坐标系与世界坐标系的转换矩阵;

令  $M = [RR_1 \quad RT_1 + T]$ , 则  $M$  为  $3 \times 4$  矩阵

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ m_5 & m_6 & m_7 & m_8 \\ m_9 & m_{10} & m_{11} & m_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

将  $M$  矩阵代入上式并进一步整理:

$$\begin{cases} \left( \frac{(u-u_0)m_9 dx}{f} - m_1 \right) X_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{10} dx}{f} - m_2 \right) Y_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{11} dx}{f} - m_3 \right) Z_w = m_4 - \frac{(u-u_0)m_{12} dx}{f} \\ \left( \frac{(v-v_0)m_9 dy}{f} - m_5 \right) X_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{10} dy}{f} - m_6 \right) Y_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{11} dy}{f} - m_7 \right) Z_w = m_8 - \frac{(v-v_0)m_{12} dy}{f} \end{cases} \quad (10)$$

上式中,  $m_1, m_2, \dots, m_{12}$  为  $M$  矩阵中的各元素。

6. 根据权利要求5所述的一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法, 其特征在于, 步骤3) 中, 完成振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定, 结合振镜控制电压, 建立起被测物体图像坐标与世界坐标映射关系, 如下:

$$\begin{cases} \left( \frac{(u-u_0)m_9 dx}{f} - m_1 \right) X_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{10} dx}{f} - m_2 \right) Y_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{11} dx}{f} - m_3 \right) Z_w = m_4 - \frac{(u-u_0)m_{12} dx}{f} \\ \left( \frac{(v-v_0)m_9 dy}{f} - m_5 \right) X_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{10} dy}{f} - m_6 \right) Y_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{11} dy}{f} - m_7 \right) Z_w = m_8 - \frac{(v-v_0)m_{12} dy}{f} \\ X_w \cos(2\alpha(U_1 - U_0)) - Z_w \sin(2\alpha(U_1 - U_0)) = 0 \end{cases} \quad (25)。$$

## 一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于光学三维扫描系统标定技术领域,具体涉及一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法。

### 背景技术

[0002] 随着现代精密测量技术的进步,三维测量技术得到了飞速的发展,并被广泛的运用于产品设计、质量控制、逆向工程、生物医疗等诸多领域。由于接触式三维测量的测量速度慢,成本高,测量范围小且易对被测物体表面产生划伤等局限性,近年来,非接触三维测量技术得到了快速发展及广泛应用。其中,基于激光三角法的三维激光扫描测量技术,由于测量精度高、范围广且易于实现智能化集成,成为当下研究的热点。

[0003] 目前,基于激光三角法的三维形貌测量装置多采用机械扫描法,需要利用机械扫描平台如旋转平台和平移平台对物体表面进行扫描测量,使得整个系统结构庞大,扫描速度较慢,限制了其在工业中的应用。

[0004] 振镜式线激光扫描系统利用高精度的振镜代替传统的机械扫描平台,精简了系统的结构;利用振镜的偏转改变线激光出射方向对物体进行主动式扫描测量,扫描速度快,测量范围大,且振镜扫描系统定位精度及重复精度高,分辨率小,能够对被测物体进行高精度的测量。然而,关于振镜扫描测量系统的标定方法较少、且标定方法复杂,耗时较长,标定精度不高,难以满足在工业测量方面的要求。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是在于针对现有的振镜式线激光三维扫描测量系统标定方法存在的问题,提供一种操作简单、可靠性好、精度较高的振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法。

[0006] 为达到上述目的,本发明采用如下技术方案予以实现的:

[0007] 一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,包括如下步骤:

[0008] 1) 选择两个有效焦距不同的镜头,利用变焦距法的原理通过最小二乘拟合标定出图像的主点坐标;

[0009] 2) 利用求出的主点坐标,结合Tsai的两步法对摄像机镜头进行标定;

[0010] 3) 驱动一维精密运动平台与振镜系统,获得不同位置与不同角度的激光线条纹,利用条纹数据的图像坐标与世界坐标完成光平面的标定,实现整个系统的标定。

[0011] 本发明进一步的改进在于,步骤2)中,利用Tsai提出的基于径向约束的摄像机标定法分两步标定出摄像机的有效焦距 $f$ ,二阶径向畸变系数 $k_1$ ,摄像机坐标系与靶标坐标系的变换矩阵 $R$ 和 $T$ 。

[0012] 本发明进一步的改进在于,步骤3)中,根据系统的数学模型,以摄像机镜头的光心为原点建立摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ ,图像左上角为原点建立图像像素坐标系 $O_0-uv$ ,以摄像机光心与成像平面交点为原点建立图像物理坐标系 $O_1-XY$ ,以平面棋盘格左上角角点为原

点建立靶标坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ ,以振镜的转轴方向为 $Y_W$ 轴, $Y_W$ 轴与靶标坐标系 $O_B X_B Z_B$ 平面的交点作为原点 $O_W$ ,当振镜控制电压为 $U_0$ 时,激光平面的法线方向为 $X_W$ 轴建立世界坐标 $O_W-X_W Y_W Z_W$ ,系统标定的过程实质上是计算这五个坐标系映射关系的过程。

[0013] 本发明进一步的改进在于,步骤3)中,在世界坐标系下,建立振镜控制电压与光平面方程的对应关系,其关系式为:

$$[0014] \quad X_W \cos(2\alpha(U_1 - U_0)) - Z_W \sin(2\alpha(U_1 - U_0)) = 0 \quad (24)$$

[0015] 式中, $X_W$ 、 $Z_W$ 为点的世界坐标, $U_0$ 为振镜系统的初始控制电压, $U_1$ 为振镜系统的实际控制电压, $\alpha$ 为单位伏特电压振镜转动的角度。

[0016] 本发明进一步的改进在于,步骤3)中,通过一维电动平移台与平面标定板对靶标坐标系与世界坐标系的转化关系进行标定,以两个坐标系坐标轴的单位向量与原点确定出旋转矩阵 $R_1$ 和平移向量 $T_1$ ,即:

$$[0017] \quad \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0018] 式中,  $(X_W, Y_W, Z_W)$  为点在世界坐标系下的坐标,  $(X_B, Y_B, Z_B)$  为对应的靶标坐标系下的坐标,  $R_1$  为 $3 \times 3$ 的单位正交矩阵,  $T_1$  为 $3 \times 1$ 的平移向量,  $0^T$  为 $1 \times 3$ 的零矩阵。

[0019] 本发明进一步的改进在于,步骤3)中,将坐标系间的转换关系统一到图像像素坐标系与世界坐标系下,得到两者间的对应关系:

$$[0020] \quad \rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0021] 式中,  $(u, v)$  为点的图像像素坐标,  $(X_W, Y_W, Z_W)$  为对应的世界坐标,  $f$  为摄像机焦距,  $(u_0, v_0)$  为成像平面的主点坐标,  $dx$ 、 $dy$  为摄像机成像平面的单位像素的尺寸,  $R$ 、 $T$  为相机标定得到的摄像机坐标系与靶标坐标系的转换矩阵,  $R_1$ 、 $T_1$  为靶标坐标系与世界坐标系的转换矩阵;

[0022] 令  $M = [RR_1 \quad RT_1 + T]$ , 则  $M$  为 $3 \times 4$ 矩阵

$$[0023] \quad M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ m_5 & m_6 & m_7 & m_8 \\ m_9 & m_{10} & m_{11} & m_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0024] 将 $M$ 矩阵代入上式并进一步整理:

[0025]

$$\begin{cases} \left( \frac{(u-u_0)m_9 dx}{f} - m_1 \right) X_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{10} dx}{f} - m_2 \right) Y_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{11} dx}{f} - m_3 \right) Z_w = m_4 - \frac{(u-u_0)m_{12} dx}{f} \\ \left( \frac{(v-v_0)m_9 dy}{f} - m_5 \right) X_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{10} dy}{f} - m_6 \right) Y_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{11} dy}{f} - m_7 \right) Z_w = m_8 - \frac{(v-v_0)m_{12} dy}{f} \end{cases} \quad (10)$$

[0026] 上式中,  $m_1, m_2, \dots, m_{12}$  为6中的M矩阵中的各元素。

[0027] 本发明进一步的改进在于,步骤3)中,完成振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定,结合振镜控制电压,建立起被测物体图像坐标与世界坐标映射关系,如下:

[0028]

$$\begin{cases} \left( \frac{(u-u_0)m_9 dx}{f} - m_1 \right) X_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{10} dx}{f} - m_2 \right) Y_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{11} dx}{f} - m_3 \right) Z_w = m_4 - \frac{(u-u_0)m_{12} dx}{f} \\ \left( \frac{(v-v_0)m_9 dy}{f} - m_5 \right) X_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{10} dy}{f} - m_6 \right) Y_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{11} dy}{f} - m_7 \right) Z_w = m_8 - \frac{(v-v_0)m_{12} dy}{f} \\ X_w \cos(2\alpha(U_1 - U_0)) - Z_w \sin(2\alpha(U_1 - U_0)) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

[0029] 本发明具有如下的有益效果:

[0030] 本发明公开了一种振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定方法,该方法首先根据振镜式线激光扫描系统的数学模型,将标定过程分为相机标定与光平面标定两部分,利用平面标定板对相机进行标定并结合高精度的一维电动平移台对光平面进行标定,最终完成对振镜式线激光扫描系统快速、精确的标定。

[0031] 进一步,在相机标定中,对于常规的Tsai两步法需要估计图像的主点坐标的问题,本发明利用变焦距法,采集有效焦距不同的镜头拍摄的同一靶标图像,提取靶标图像的角点并结合最小二乘法对该主点坐标进行高精度的标定,能有效的减少由于主点坐标的误差对标定结果的影响;利用标定出的主点坐标,并考虑镜头的径向畸变,依据Tsai的两步法相机标定原理,对相机进行高精度的标定。

[0032] 进一步,本发明根据系统的数学模型,建立了五个坐标系,将系统标定的过程转化为计算这五个坐标系间的映射关系,明确了系统标定的实质就是计算这五个坐标系的相互转化关系。

[0033] 进一步,在世界坐标系下,本发明根据振镜的工作特性建立振镜控制电压与光平面方程的对应关系,在该对应关系中,可以设置任意的控制电压为初始控制电压,然后根据控制电压与初始控制电压的差值得到该状态下的光平面方程,由于振镜的扫描范围与初始控制电压有关,所以可以根据系统设计的扫描范围自定义初始控制电压,使得整个标定方案非常灵活。

[0034] 进一步,本发明利用一维电动平移台与平面标定板标定出靶标坐标系与世界坐标系的转换关系,一维电动平移台沿着世界坐标系的Z轴精密移动,在不同的位置通过改变振镜控制电压获得不同光平面下的激光条纹数据,从而精确地拟合出多个光平面的方程,利用光平面与振镜转轴互相垂直的关系建立振镜转轴的误差方程,通过迭代优化最终精确地标定出世界坐标系与靶标坐标系的转换关系,从而提高系统最终的标定精度。

[0035] 进一步,本发明将所有坐标系间复杂的转换关系统一到图像像素坐标系与世界坐

标系下,得到两者之间的映射关系,该映射关系直观的反映了系统标定的步骤和各标定结果对系统最终标定结果的影响,方便把握系统标定的重点。

[0036] 进一步,本发明结合振镜控制电压,得到控制电压和物体图像坐标与物体三维世界坐标的映射关系,完成振镜式线激光扫描三维测量系统的整体标定,该关系式简洁明了,系统标定后,通过扫描测量能快速的计算出物体的三维点云,能够满足工业现场对实时测量的要求。

### 附图说明

[0037] 图1是本发明的系统坐标系建立的示意图;

[0038] 图2是本发明的标定过程示意图;

[0039] 图3是本发明的光平面标定原理图。

### 具体实施方式

[0040] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下面结合实施例和附图,对本发明做进一步详细说明。

[0041] 振镜式线激光扫描三维测量系统是利用振镜来替代传统的机械扫描平台,通过外部输入控制电压来改变振镜的转角,使线激光的反射光线沿着振镜转动的方向对被测物体表面进行扫描的光学测量系统。振镜系统极高的重复精度与极小的分辨率使该测量系统预期有极高的测量精度,标定精度的高低决定系统最终测量系统的高低。本发明将系统整体标定分为两大部分,分别为摄像机标定与光平面标定。

[0042] 本发明旨在对此类振镜系统做较高精度的标定,具体步骤如下:

[0043] 步骤1:图像主点坐标的标定。本发明使用Tsai提出的基于径向约束的摄像机标定法来对摄像机进行标定,而此种方法无法标定图像的主点坐标,使用该方法通常假设图像的主点坐标与理想的主点坐标重合。但由于摄像机的制作与安装等原因,摄像机成像平面的中心与透镜的光学中心并不重合,使实际的主点坐标与理想的主点坐标有一定偏差,所有首先对主点坐标进行标定。根据变焦距法的原理:当摄像机的有效焦距变化时,对应的图像会产生缩放,当透镜的成像光轴保持不变,故光轴与成像平面的交点即主点不变。根据以上原理,选择两个实际焦距为 $f_1$ 和 $f_2$ 的镜头,对一维电动平移台上的平面棋盘格靶标进行成像,分别提取两幅图像中的角点坐标,对每一角点满足关系:

$$[0044] \quad \frac{u_1 - u_0}{u'_1 - u_0} = \frac{v_1 - v_0}{v'_1 - v_0}$$

[0045] 即:

$$[0046] \quad (v_1 - v'_1) u_0 - (u_1 - u'_1) v_0 = v_1 u'_1 - u_1 v'_1 \quad (1)$$

[0047] 其中,  $(u_1, v_1)$  为有效为焦距 $f_1$ 的特征点的像素坐标;  $(u'_1, v'_1)$  为有效为焦距 $f_2$ 的特征点的像素坐标;  $(u_0, v_0)$  为主点坐标。

[0048] 对于 $n$ 个角点,有:

$$[0049] \quad \begin{bmatrix} v_1 - v'_1 & u_1 - u'_1 \\ v_2 - v'_2 & u_2 - u'_2 \\ \vdots & \vdots \\ v_n - v'_n & u_n - u'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 u'_1 - u_1 v'_1 \\ v_2 u'_2 - u_2 v'_2 \\ \vdots \\ v_n u'_n - u_n v'_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0050] 利用最小二乘法可以求得主点坐标  $(u_0, v_0)$ 。

[0051] 步骤2: 系统坐标系的建立。为了更好地描述标定的过程, 本发明建立五个坐标系, 系统成像的过程实质上是确定这五个坐标系之间的转换关系, 这五个坐标系分别为: 图像像素坐标系、图像物理坐标系、摄像机坐标系、靶标坐标系和世界坐标系。如图1为系统坐标系建立的示意图, 图像像素坐标系  $O_0-uv$  是以图像左上角为原点, 以像素的行与列的方向作为  $u$  轴与  $v$  轴的二维直角坐标系, 坐标  $(u, v)$  以像素为单位, 表示该像素在坐标系中的列数与行数; 图像物理坐标系  $O_1-XY$  是以光轴与成像平面的角点作为原点,  $X$  轴与  $Y$  轴分别平行于图像像素坐标系  $u$  轴和  $v$  轴的二维直角坐标系, 坐标  $(X, Y)$  以毫米为单位, 表示图像坐标系中的点; 摄像机坐标系  $O_c-X_cY_cZ_c$  是以摄像机镜头的光心  $O_c$  为原点, 光轴方向为  $Z_c$  轴,  $X_c$  轴与  $Y_c$  轴分别平行于图像物理坐标系的  $X$  轴和  $Y$  轴的三维坐标系; 靶标坐标系  $O_B-X_BY_BZ_B$  是平面棋盘格左上角角点为原点, 以棋盘格行和列的方向作为  $X_B$  轴与  $Y_B$  轴, 以右手定则确定  $Z_B$  轴的三维坐标系; 世界坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$  是以振镜的转轴方向为  $Y_w$  轴,  $Y_w$  轴与靶标坐标系  $O_BX_BZ_B$  平面的交点作为原点  $O_w$ , 当振镜控制电压为  $U_0$  时, 激光平面的法线方向作为  $X_w$  轴, 以右手定则确定  $Z_w$  轴的三维坐标系。

[0052] 步骤3: 确定坐标系间的转换关系。根据步骤2中坐标系的定义, 同时将摄像机的成像模型视为理想的小孔透视模型, 可得到坐标系间的转换关系。其中图像像素坐标系与图像坐标系的转换关系为:

$$[0053] \quad \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0054] 上式中,  $(u, v)$  为图像像素坐标系中的点,  $(X, Y)$  表示对应的图像物理坐标系中的点,  $(u_0, v_0)$  表示图像的主点坐标,  $dx, dy$  表示图像平面在  $X, Y$  方向上单位像素间的距离。

[0055] 根据透视投影原理, 图像坐标系与摄像机坐标系的变换关系为:

$$[0056] \quad \rho \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0057] 上式中,  $(X, Y)$  为图像物理坐标系中的点,  $(X_c, Y_c, Z_c)$  为对应点在摄像机坐标系下的坐标,  $f$  为摄像机的焦距,  $\rho$  为比例因子。

[0058] 根据欧式坐标系间的坐标变换关系可知, 靶标坐标系下的点可以经过旋转变换和平移变换转换到相机坐标系下, 则相机坐标系与靶标坐标系的变换关系为:

$$[0059] \quad \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0060] 上式中,  $(X_C, Y_C, Z_C)$  为点在相机坐标系下的坐标,  $(X_B, Y_B, Z_B)$  为该点对应的靶标坐标系下的坐标,  $R, T$  分别为由靶标坐标系转换到摄像机坐标系的旋转矩阵与平移向量,  $R$  为  $3 \times 3$  的单位正交矩阵,  $T$  为  $3 \times 1$  的平移向量,  $0^T$  为  $1 \times 3$  的零矩阵。

[0061] 根据欧式坐标系间的坐标变换关系可知, 世界坐标系下的点可以经过旋转变换和平移变换转换到靶标坐标系下, 则世界坐标系与靶标坐标系的变换关系为:

$$[0062] \quad \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0063] 其中,  $(X_B, Y_B, Z_B)$  为点在靶标坐标系下的坐标,  $(X_W, Y_W, Z_W)$  为该点对应的世界坐标系下的坐标,  $R_1, T_1$  为由世界坐标系转换到靶标坐标系的旋转矩阵与平移向量,  $R_1$  为  $3 \times 3$  的单位正交矩阵,  $T_1$  为  $3 \times 1$  的平移向量,  $0^T$  为  $1 \times 3$  的零矩阵。

[0064] 综合上述各坐标系间的转换关系, 可以得到图像像素坐标系与世界坐标系之间的转换关系为:

$$[0065] \quad \rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & T_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0066] 根据矩阵乘法的结合律有:

$$[0067] \quad \rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} RR_1 & RT_1 + T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0068] 令  $M = [RR_1 \quad RT_1 + T]$ , 则  $M$  为  $3 \times 4$  矩阵

$$[0069] \quad M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ m_5 & m_6 & m_7 & m_8 \\ m_9 & m_{10} & m_{11} & m_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0070] 将  $M$  矩阵代入上式并进一步整理:

[0071]

$$\begin{cases} \left( \frac{(u-u_0)m_9 dx}{f} - m_1 \right) X_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{10} dx}{f} - m_2 \right) Y_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{11} dx}{f} - m_3 \right) Z_w = m_4 - \frac{(u-u_0)m_{12} dx}{f} \\ \left( \frac{(v-v_0)m_9 dy}{f} - m_5 \right) X_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{10} dy}{f} - m_6 \right) Y_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{11} dy}{f} - m_7 \right) Z_w = m_8 - \frac{(v-v_0)m_{12} dy}{f} \end{cases} \quad (10)$$

[0072] 步骤4:考虑镜头畸变的摄像机成像模型。实际的摄像机光学成像系统并不完全符合小孔透视模型,同时由于镜头的加工及装配误差的存在,物体在摄像机上的成像与物体理想的成像有一定的偏差,产生所谓的光学畸变。摄像机的光学畸变主要分为三种:径向畸变、切向畸变与薄棱镜畸变。这三种畸变中,径向畸变对视觉测量的精度影响最大,为了模型的简化,所以一般只考虑径向畸变。设点 $P_u(X_u, Y_u)$ 为摄像机成像面上理想的像点, $P_d(X_d, Y_d)$ 为考虑二阶径向畸变的实际像点坐标,两者之间的关系为:

$$[0073] \quad \begin{cases} X_u = X_d(1+k_1 q^2) \\ Y_u = Y_d(1+k_1 q^2) \end{cases} \quad (11)$$

[0074] 上式中, $q^2 = X_d^2 + Y_d^2$ , $k_1$ 为摄像机的2阶径向畸变系数。

[0075] 转换到图像像素坐标系下为:

$$[0076] \quad \begin{cases} u = u_d(1+k_1 q^2) \\ v = v_d(1+k_1 q^2) \end{cases} \quad (12)$$

[0077] 上式中, $q^2 = X_d^2 + Y_d^2 = [(u_d - u_0) dx]^2 + [(v_d - v_0) dy]^2$ , $(u, v)$ 为理想的小孔透视模型中图像像素坐标点, $(u_d, v_d)$ 为对应的考虑径向畸变的图像像素坐标点, $dx, dy$ 表示图像平面在 $X, Y$ 方向上单位像素间的距离, $k_1$ 为摄像机的2阶径向畸变系数。

[0078] 步骤5:标定图像的获取。系统的标定过程主要通过摄像机拍摄一幅平面标定板图像与若干幅不同振镜控制电压下投射在不同位置处的平面标定板上的激光线条纹来实现,其中需要用到一维电动平移台与振镜系统。如图2所示,图像获取的主要操作过程如下:

[0079] (1)选择步骤1中焦距为 $f_1$ 的镜头作为最终的镜头,将平面棋盘格标定板放置于扫描系统正前方的一维电动平移台上,调整标定板在平移台上的位置,使得电动平移台的运动方向与标定板平面相互垂直。关闭激光器,利用摄像机拍摄棋盘格图像。

[0080] (2)打开激光器,保持标定板的位置不变,此位置标定板平面上的所有点在靶标坐标系下有 $Z_B = Z_0 = 0$ ,调节振镜系统的控制电压,当控制电压为 $U_0$ 时,通过摄像机采集此电压下的激光线条纹图像;改变振镜系统的控制电压,使振镜偏转一定角度,分别采集控制电压为 $U_1, U_2, \dots, U_m (m \geq 4)$ 时的线激光的条纹图像。

[0081] (3)控制电动平移台沿垂直于标定板平面的方向移动,使标定板平面移动到 $Z_B = Z_1$ ,然后重复步骤2中的操作,获得该位置下振镜在控制电压为 $U_0, U_1, U_2, \dots, U_m (m \geq 4)$ 时的线激光的条纹图像。

[0082] (4)继续控制电动平移台移动,重复(3)中的操作,分别获得标定板位置为 $Z_2, Z_3, \dots, Z_n (n \geq 4)$ 时,振镜控制电压为 $U_0, U_1, U_2, \dots, U_m (n \geq 4)$ 时的激光线条纹图像。

[0083] 步骤6:摄像机镜头的标定。系统选择步骤5中操作(1)所获得的平面棋盘格标定板图像,提取其中的角点像素坐标;根据靶标坐标系的建立可知,靶标平面上的角点的 $Z_B = 0$ ,同时根据各角点与靶标原点的距离可得到所有角点在靶标坐标系中的三维坐标值。根据

Tsai提出的基于径向约束的摄像机标定法的第一步,对于每个角点都有:

$$[0084] \quad \frac{X_d}{Y_d} = \frac{X_u}{Y_u} = \frac{u}{v} = \frac{r_1 X_B + r_2 Y_B + r_3 Z_B + t_x}{r_4 X_B + r_5 Y_B + r_6 Z_B + t_y} \quad (13)$$

[0085] 其中,  $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ ,  $T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ , R和T为公式(5)中靶标坐标系转换到摄像机坐

标系的旋转矩阵与平移向量。

[0086] 对于n个角点,利用最小二乘法并考虑矩阵R的正交性可以计算出R矩阵里的参数及部分平移向量中的参数。

[0087] 根据基于径向约束的摄像机标定法的第二步可求出平移向量剩余的参数、镜头的焦距f1及二阶径向畸变系数k1。

[0088] 步骤7:靶标坐标系与世界坐标系关系的标定。根据步骤3中坐标系间的转换关系可知,靶标坐标系可由世界坐标系讲过旋转变换与平移变换得到,根据以下操作可得到式(6)中的旋转矩阵R<sub>1</sub>与平移向量T<sub>1</sub>:

[0089] (1)对于步骤5中操作工程(2)得到的激光线条纹图像,经过中心线提取后可获得条纹中各点的图像像素坐标(u,v),同时该条纹上各点在靶标坐标系系的Z<sub>B</sub>=Z<sub>0</sub>=0,根据上面摄像机标定得到的内参数与外参数,通过

$$[0090] \quad \rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0091] 可计算得到对应点在靶标坐标系下的三维坐标(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,0),如此便得到靶标位置为Z<sub>0</sub>处,在振镜控制电压为U<sub>0</sub>,U<sub>1</sub>,U<sub>2</sub>⋯,U<sub>m</sub>时的激光线条纹的图像坐标与靶标坐标系下的三维坐标。

[0092] (2)对步骤5中操作工程3、4的激光线条纹经过相同的处理可获得在振镜电压为U<sub>0</sub>,U<sub>1</sub>,U<sub>2</sub>⋯,U<sub>m</sub>,不同位置处激光线条纹的图形坐标(u,v)与三维坐标(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,Z<sub>1</sub>)、(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,Z<sub>2</sub>)⋯⋯(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,Z<sub>n</sub>)。

[0093] (3)由于振镜的转角与其控制电压成线性关系,对于控制电压U<sub>0</sub>,得到该光平面下的一系列激光线条纹的三维坐标(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,Z<sub>1</sub>)、(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,Z<sub>2</sub>)⋯⋯(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,Z<sub>n</sub>),通过平面拟合的方式可以获得该平面在靶标坐标系下的光平面方程。设在靶标坐标系下,光平面方程为:

$$[0094] \quad Ax+By+Cz+D=0 \quad (15)$$

[0095] 采用最小二乘拟合并单位化,可获得该光平面的单位法向量n<sub>0</sub>(j<sub>0</sub>,k<sub>0</sub>,l<sub>0</sub>),同理可获得控制电压为U<sub>1</sub>,U<sub>2</sub>⋯,U<sub>m</sub>时,各光平面单位法向量n<sub>1</sub>(j<sub>1</sub>,k<sub>1</sub>,l<sub>1</sub>),n<sub>2</sub>(j<sub>2</sub>,k<sub>2</sub>,l<sub>2</sub>)⋯⋯n<sub>m</sub>(j<sub>m</sub>,k<sub>m</sub>,l<sub>m</sub>)(m≥4)。

[0096] (4)对所有光平面方程进行最小二乘求解,可获得光所有光平面最近的一点,即世界坐标系Y<sub>w</sub>上一点P在靶标坐标系下的坐标P(x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>,z<sub>0</sub>)。由世界坐标系的定义可知,X<sub>w</sub>轴方

向取振镜控制电压为 $U_0$ 时光平面的法线方向,故在靶标坐标系下, $X_w$ 轴的单位向量 $n_x$  ( $a_x, b_x, c_x$ ) 与 $n_0$ 相等或相反,即 $n_x = n_0$ ,或 $n_x = -n_0$ 。由 $Y_w$ 轴的定义可知, $Y_w$ 轴垂直于所有光平面的法向量,设在靶标坐标系下 $Y_w$ 轴的单位向量为 $n_y$  ( $a_y, b_y, c_y$ ) ,则对所有光平面向量都有:

$$[0097] \quad n_y \cdot n_i = 0 \quad (i=0, 1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

[0098] 实际获得的拟合出的光平面由于误差的存在,会使 $n_y \cdot n_i \neq 0$  ( $i=0, 1, 2, \dots, m$ ) ,误差为:

$$[0099] \quad \begin{aligned} err &= n_y \cdot n_i - 0 \\ &= n_y \cdot n_i \end{aligned} \quad (17)$$

[0100] 以所有光平面与 $Y_w$ 轴的单位向量 $n_y$ 点乘误差的平方为优化对象,得到误差优化方程:

$$[0101] \quad F = \sum_{i=0}^m (err)^2 = \sum_{i=0}^m (a_y j_i + b_y k_i + c_y l_i)^2 \dots (m \geq 4) \quad (18)$$

[0102] 要使得到的 $Y_w$ 轴的单位向量尽可能满足与光平面法向量垂直条件,则转化为使目标函数 $F$ 的值最小,以 $n_0 \times n_1$ 为初值对函数进行优化,当 $F = \min$ 时得到 $a_y, b_y, c_y$ 最优的解,进一步单位化后作为 $Y_w$ 轴的单位向量 $n_y$  ( $a_y, b_y, c_y$ ) 。

[0103] 求出 $Y_w$ 轴的单位向量 $n_y$ 后,通过 $n_x \times n_y$ 得到 $Z_w$ 轴在靶标坐标系下的单位向量 $n_z$  ( $a_z, b_z, c_z$ ) 。

[0104] (5) 由 $Y_w$ 轴的方向向量与前文求得的 $Y_w$ 轴上的一点 $P$ ,可以得到 $Y_w$ 轴在靶标坐标系下的直线方程:

$$[0105] \quad \frac{x-x_0}{a_y} = \frac{y-y_0}{b_y} = \frac{z-z_0}{c_y} \quad (19)$$

[0106] 根据世界坐标系的定义,世界坐标系的原点 $O_w$ 为 $Y_w$ 轴与靶标坐标系 $O_B X_B Z_B$ 平面的交点,则在靶标坐标系下,点 $O_w$ 的纵坐标 $y=0$ ,结合 $Y_w$ 轴的直线方程可以求出原点 $O_w$ 在靶标坐标系下的三维坐标 $O_w$  ( $x_b, 0, z_b$ )

$$[0107] \quad \begin{cases} x_b = x_0 - \frac{a_y}{b_y} y_0 \\ z_b = z_0 - \frac{c_y}{b_y} y_0 \end{cases} \quad (20)$$

[0108] 综合上面得到的世界坐标系三个坐标轴 $X_w$ 轴、 $Y_w$ 轴、 $Z_w$ 轴在靶标坐标系下的单位向量 $n_x, n_y, n_z$ 及原点 $O_w$ 坐标,可求得靶标坐标系变换到世界坐标系下的旋转矩阵 $R_1$ 与平移向量 $T_1$ :

$$[0109] \quad \begin{bmatrix} x_b \\ 0 \\ z_b \end{bmatrix} = R_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + T_1 \quad (21)$$

$$[0110] \quad \begin{cases} [a_x, b_x, c_x]^T = R_1 [1, 0, 0]^T \\ [a_y, b_y, c_y]^T = R_1 [0, 1, 0]^T \\ [a_z, b_z, c_z]^T = R_1 [0, 0, 1]^T \end{cases} \quad (22)$$

[0111] 根据上面两式可完成靶标坐标系与世界坐标系转换关系的标定。

[0112] 步骤8:光平面的标定。光平面的标定过程如图3所示,投射到被测物体上的光平面会随着反射镜平面的转动而变化,反射镜平面随着振镜系统控制电压的变化而转动;当反射镜转动 $\theta$ 角时,由反射定律可知,光平面转动 $2\theta$ 角度;根据振镜的工作原理,反射镜的转角与其控制电压成线性关系,设单位伏特电压反射镜转动的角度为 $\alpha$ ,则光平面转动角度 $\Delta\theta$ 与控制电压 $\Delta U$ 有以下关系:

$$[0113] \quad \Delta\theta = \Delta U \cdot 2\alpha \quad (23)$$

[0114] 由世界坐标系的定义,振镜的转轴为坐标系的 $Y_w$ 轴;当控制电压为 $U_0$ 时,光平面的法向量方向与 $X_w$ 轴一致,则初始光平面方程为 $X_w=0$ ,当控制电压变为 $U_1$ 时,由振镜转角与其控制电压之间的线性关系可知光平面方程为:

$$[0115] \quad X_w \cos(2\alpha(U_1-U_0)) - Z_w \sin(2\alpha(U_1-U_0)) = 0 \quad (24)$$

[0116] 步骤9:根据式(10)得到图像像素坐标与其三维世界坐标之间的关系,结合式(24)中振镜控制电压与世界坐标的关系,完成整个系统的标定:

[0117]

$$[0117] \quad \begin{cases} \left( \frac{(u-u_0)m_9 dx}{f} - m_1 \right) X_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{10} dx}{f} - m_2 \right) Y_w + \left( \frac{(u-u_0)m_{11} dx}{f} - m_3 \right) Z_w = m_4 - \frac{(u-u_0)m_{12} dx}{f} \\ \left( \frac{(v-v_0)m_9 dy}{f} - m_5 \right) X_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{10} dy}{f} - m_6 \right) Y_w + \left( \frac{(v-v_0)m_{11} dy}{f} - m_7 \right) Z_w = m_8 - \frac{(v-v_0)m_{12} dy}{f} \\ X_w \cos(2\alpha(U_1-U_0)) - Z_w \sin(2\alpha(U_1-U_0)) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

[0118] 通过求解式(25)可以得到目标点在世界坐标系下的坐标。

[0119] 以上结合附图对本发明的具体实施方式做了说明,但这些说明并不用于限制本发明,本发明的保护范围由随附的权利要求书限定,任何在本发明权利要求基础上的改动都是本发明的保护范围。

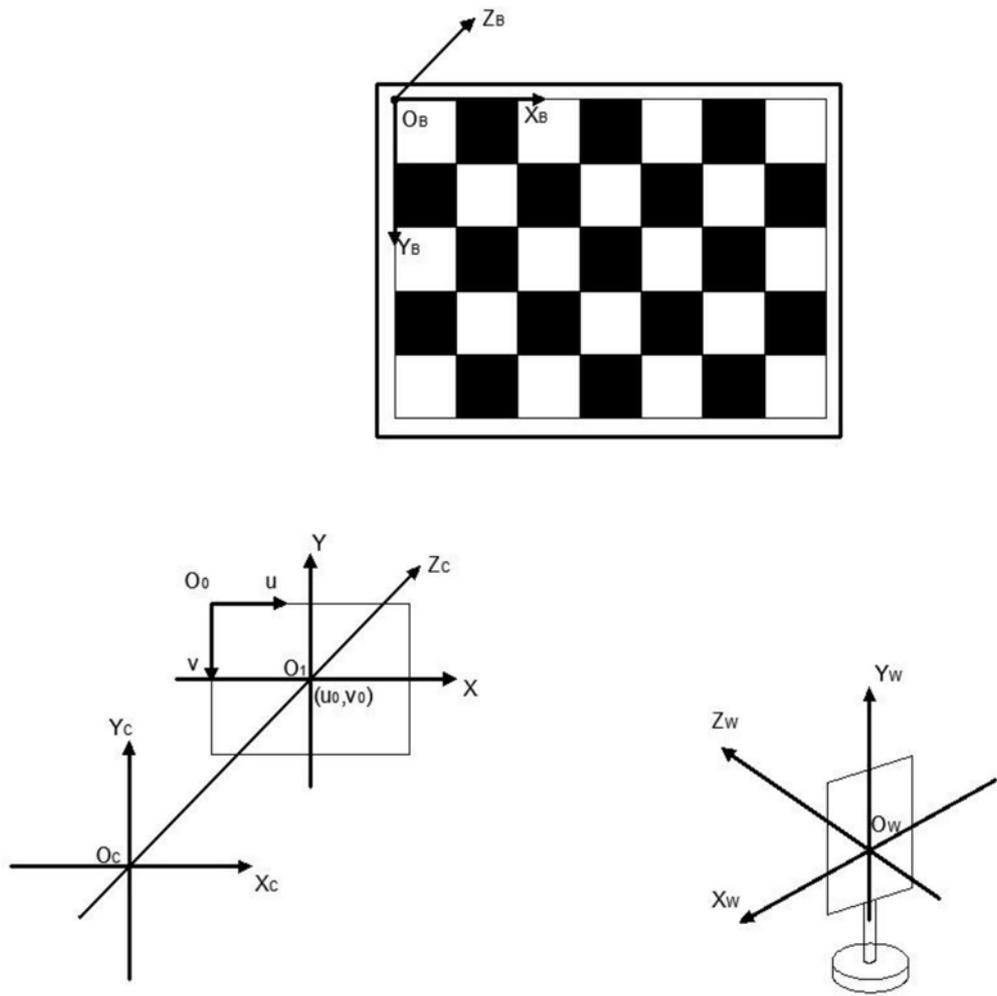


图1

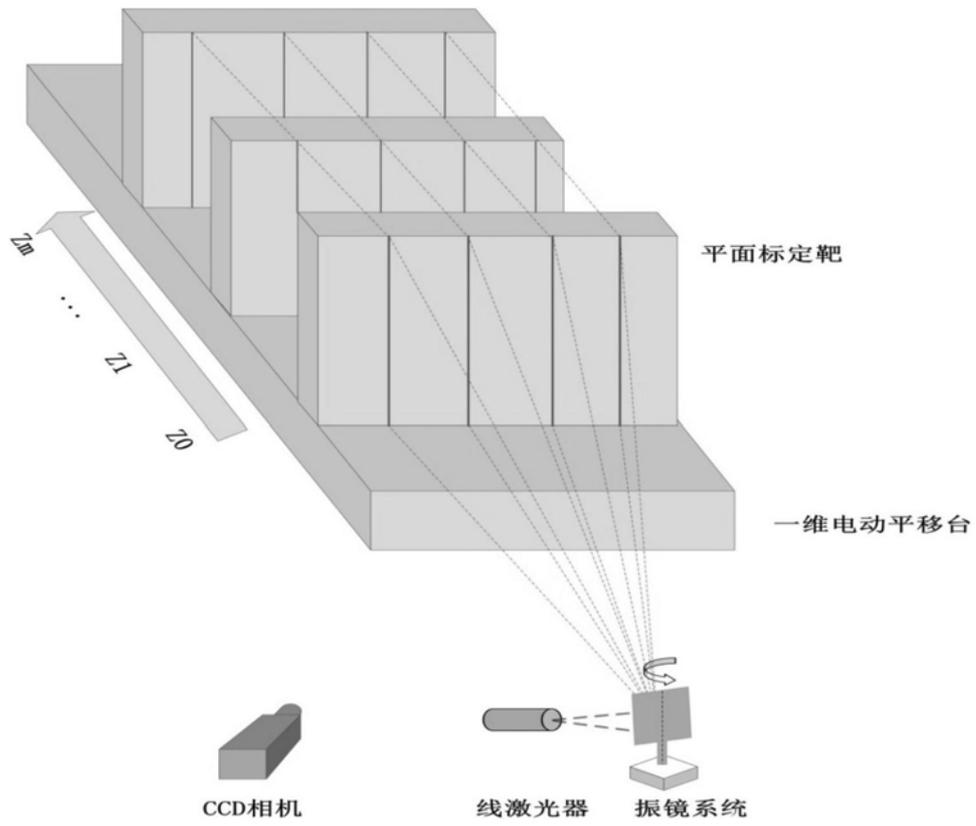


图2

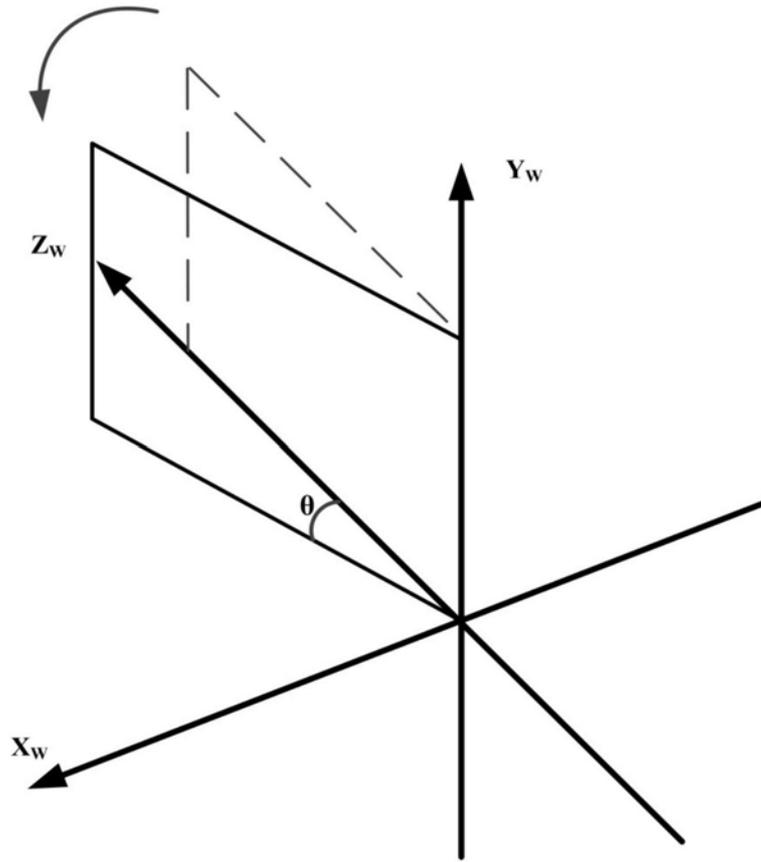


图3