

文章编号:1002-2082(2018)03-0301-08

# 一种微小型导引头视场下偏角的标定方法

万子敬,王向军,陈晓昀

(天津大学 微光机电系统技术教育部重点实验室,天津 300072)

**摘 要:**描述了一种应用于微小型光学导引头视场下偏角标定的方法,通过获得导引头绕自身回转轴线转动时拍摄的固定靶标图像计算不同旋转角度时导引头中心视线落点和摄像机坐标系原点在世界坐标系下的坐标,以拟合获得的这 2 组点的分布建立空间几何关系进而得出下偏角。给出了 3 组实验数据,分别检验该方法的标定误差、实际所需的采样点数并给出了实际工作中的应用效果。实验表明该方法可以快速标定导引头系统的下偏角,其标定绝对误差小于  $0.10^\circ$ 。

**关键词:**微小型导引头;摄像机标定;视场下偏角

**中图分类号:**TN202;TP391

**文献标志码:**A

**DOI:**10.5768/JAO201839.0301001

## Calibration method for FOV deflection angle of mini-type seeker

Wan Zijing, Wang Xiangjun, Chen Xiaoyun

(MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A calibration method for deflection angle of mini-type optical seeker is presented. This method firstly obtains the images from the camera in the seeker when the seeker is rotating with its own rotation axis, and then calculates the placement points of central line of sight and the origin of the camera coordinate system in different rotation angles, finally gets the geometric relationship by fitting the distribution of these two groups of points, and then the deflection angle can be calculated. Three sets of experimental data are presented, which give the calibration error of this method, the number of sampling points needed in practice, and the application, respectively. The experimental results show that this method can be used to calibrate the deflection angle of the optical seeker fastly, and the calibration absolute error is less than  $0.10^\circ$ .

**Key words:** mini-type seeker; camera calibration; deflection angle of FOV

## 引言

研制微小型化的智能弹药是各国军事装备发展的一个方向,其中发展光学导引头特别是可见光导引头具有重要的意义。可见光导引头作为一种电视导引头,其通用性较强,可广泛装备于各类导弹系统。随着电子技术的进步和微机械制造能力的提升,可见光成像传感器和配套的光学系统

的质量体积可以适当优化,而探测距离和灵敏程度则可以有效提升。而数字图像处理器的性能提高使得大尺寸 CCD 或 CMOS 成像器件的应用成为必然趋势。

本文方法所涉及的一种微小型导引头是依靠单目可见光相机采集的目标图像来获得目标的偏角和角速率,同时可以向控制系统传送该目标的

收稿日期:2018-01-08; 修回日期:2018-02-09

基金项目:国家自然科学基金(51575388)

作者简介:万子敬(1989—),男,天津人,博士研究生,主要从事机器视觉技术及微小型光机电系统集成技术研究。

E-mail: zjwan@tju.edu.cn

通信作者:王向军(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授、博士生导师,主要从事精密测试技术与仪器、光电探测与传感技术、影像与视觉测量等研究。E-mail: xdocuxjw@vip.163.com

图像信息。单目相机在相对位姿测量方面有广泛的应用,结构简单和泛用性强的特点使得这种技术手段可以应用于许多微小型光电检测设备中。这类方法通常用于解决空间中的相对位姿估计问题<sup>[1]</sup>,其原理在于获得目标图像特征视线信息后,按照摄像机自身的参数给出摄像机坐标系下的偏角。导引头需要建立和弹体控制系统坐标系之间的关联<sup>[2]</sup>,本文所描述的导引头系统的特别之处在于摄像机坐标系相对弹体参考坐标系的水平面有一个向下的偏角,便于当平台处于空中时导引头对地面目标的搜索。在组装之后,导引头的摄像机和下偏角参数需要通过标定环节,来确定摄像机坐标系与导引头坐标系的关系。相机标定方法中,许多方法需要使用已知的控制点或线构造一个空间坐标已知的空间<sup>[3]</sup>,而这些方法面对一些特殊问题如航空相机的标定等往往并不适用<sup>[4]</sup>。针对特殊问题,一些研究工作采取加入精密测试设备如平行光管、经纬仪和精密转台来实现相机参数的精确标定<sup>[5-7]</sup>,但这类方法对实验室的设备要求高,且不适合本文所面临问题。平行光管和精密转台测角可以达到很高精度<sup>[8]</sup>,通常使用已标定的精密转台配合平行光管或精密标靶可以解决标定下偏角的问题<sup>[9]</sup>。文中引入绕光轴旋转的运动,可以利用少量图像获得较高的标定精度,本文借鉴了这种思路,利用绕某个固定轴旋转来标定相机相对于某个坐标系的位置关系。综上所述,如何简便而不失精度地测量一个已安装到设备内部的摄像机相对于系统自身坐标系的相对姿态仍是一个需要研究的问题。

本文提出一种标定该类型光学导引头摄像机下偏角标定方法。该方法基于平面靶标和外参标定相结合的标定该类型光学导引头摄像机下偏角的方法,在传统摄像机标定的操作步骤中使导引头以自身回转轴线转动,依靠不同旋转角度下的图像中心和靶标位置来标定下偏角。该方法只需使用小型的两轴转台和平面棋盘靶标即可完成该项测试工作,整体上对设备依赖程度小且操作简单,适合微小型导引头的大规模出厂测试。

## 1 摄像机模型与导引头坐标系

该导引头搭载一台可见光摄像机,形成一个单目摄像机的机器视觉系统。导引头使用时可对目标图像进行持续跟踪,然后使用摄像机参数和

目标的图像坐标计算得到目标的偏角和角速率。

摄像机模型使用针孔摄像机模型,目标偏角的计算方法是获得目标图像像素的图像坐标和相机的焦距,以此来推算目标偏角和其相对于导引头坐标系的角速率。计算过程中的必要参数是相机的焦距和像元尺寸,像元尺寸由选用的成像器件来保证,而相机焦距等相机内参则在出厂标定环节中获得,摄像机的标定参考张正友标定法。

该摄像机模型的摄像机坐标系人为偏置,这个偏置表现为摄像机在安装时与导引头坐标系的水平面呈一个下偏角,摄像机与导引头坐标系如图1。因此,计算出来的目标与导引头坐标系之间的偏角需要按照这个下偏角进行修正,才能最终获得相对于弹体的正确姿态关系。如何使用简洁而有效的方法标定出这个下偏角是本文所描述的主要内容。本文所描述的方法属于该导引头系统出厂测试的一个单一环节,需要保证测定精度且可以使用摄像机标定时输出的参数作为该环节的主要依据。这就要求一种能够使用简易手段且在测试方法上能够与摄像机标定环节中的一些步骤相重复的新的标定方法。因此,本文的方法需要依赖摄像机模型与标定法。

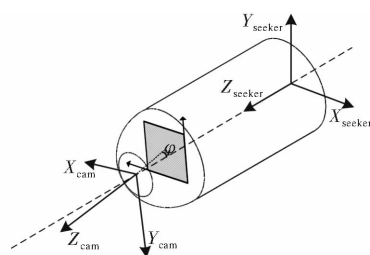


图1 摄像机与导引头坐标系示意图

Fig. 1 Relationship of camera and seeker coordinate systems

先介绍本文所述方法使用的摄像机模型与导引头模型的关系。文中所描述的导引头系统尽量使传感器的安装垂直于光轴,虽然有一个人为的偏置角度,但这并不更改光心、光轴、成像平面的组成,仍然适用于小孔成像模型,而且已有的摄像机标定方法依然适用。因此本文中所涉及的摄像机模型使用小孔成像模型。

小孔成像模型可以表达为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $f_x$ 、 $f_y$  表示 2 个方向的焦距; $u_0$ 、 $v_0$  表示主点坐标;旋转平移矩阵  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  来描述 2 个坐标系之间的变换关系。

从摄像机坐标系与导引头坐标系的关系来看,要求摄像机坐标系的原点位于导引头的回转中心所在直线上。但是由于导引头内部摄像机的安装误差不能确保该性质能够为下偏角标定所用,因此这就要求该方法能够在尽可能简易的环境下使用。

本文所描述的方法则通过多次转动导引头系统,借助一个新引入的旋转角来生成光轴与导引头坐标系之间关系的做法,进而简便地获得所要标定的下偏角,原理示意图如图 2。在实际使用场景中,导引头被固定在一个两轴的测试台上,同时一个平面棋盘靶标被放置在测试台前方,使得在出厂调试时,一次就可以完成摄像机内参标定和实现下偏角的标定测试工作。

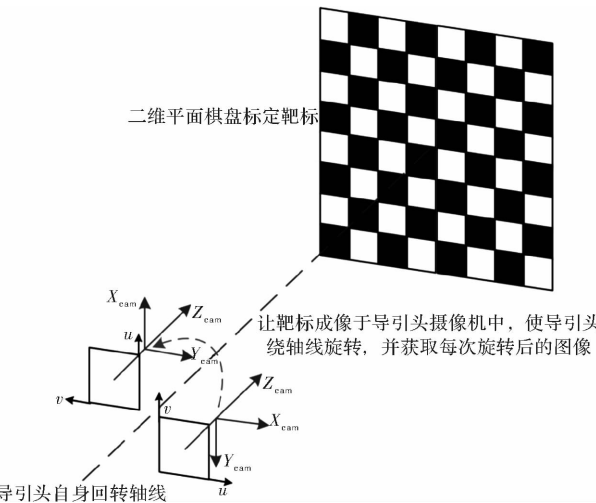


图 2 本文方法原理示意图  
Fig. 2 Principle diagram of our proposed method

2 下偏角标定方法

理想情况下,光轴是通过图像坐标系原点的,但是实际情况却存在偏差,尽管这些偏差可以通过标定过程检测出来。使用通常摄像机标定方法得到的图像坐标系原点坐标与光轴主点会存在微小的偏差,虽然有些情况下该偏差的数值会更大,但这都是光学镜头的装配过程所引入的误差。本文所描述的摄像机成像系统被人为偏置了。在理想情况下,安装完毕之后的摄像机坐标系与导引头水平面之间的夹角为一个特定的设定角度,从标定过程中可以看到无法标定出

下偏角度,使得在这个步骤中无法将其直接转换为下偏角。

下偏角标定的步骤与通常的摄像机标定过程并不矛盾,本文涉及的光学成像系统除下偏角外,仍然需要诸如相机焦距、畸变参数等关键性能指标。在此,本文方法使用张氏标定法作为基本的摄像机标定方法来获得基本的相机内参数。

算法中加入的基本方法主要为最小二乘法,用于摄像机标定、空间曲线拟合和摄像机姿态估计。本文算法流程:1)标定摄像机内参,并将世界坐标系建立在固定的平面靶标上;2)读取待标定图像并估计相机姿态;3)计算图像中心所表示的平面靶标上某点(定义为视线落点)在世界坐标系下的坐标;4)摄像机坐标系原点在世界坐标系下的坐标;5)对中心视线落点分布进行椭圆拟合,并对摄像机坐标系原点分布进行圆拟合;6)根据 2 个空间曲线的方程推算汇聚点的世界坐标;7)计算下偏角。算法流程图见图 3。

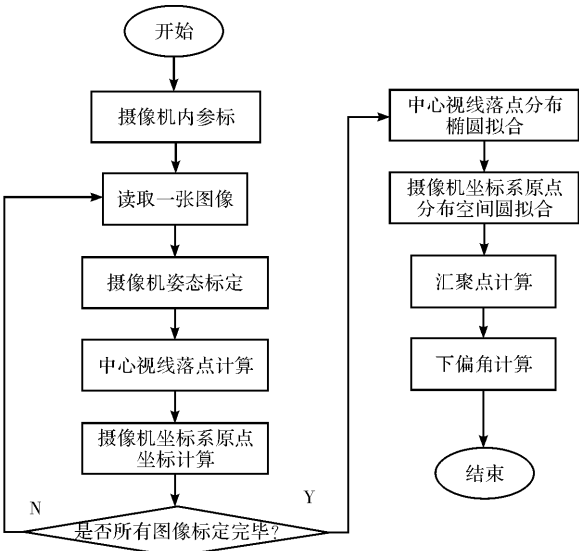


图 3 下偏角解算算法流程图  
Fig. 3 Flow chart of deflection angle calculation

如前文所述,导引头被固定在一个测试台上并接出其视频信号,使之可以绕导引头的中心轴线自由转动,在测试台前方固定一块平面棋盘格型标定板,然后转动导引头并观察其图像,令测试台与标定板的相对位置关系可以满足标定板并完全显示在图像中。然后进入图像采集步骤,使导引头绕中心轴线任意转动若干次,采集每次转动后的标定板图像。最后根据采集到的图像来计算下偏角。标定方法及关键结构的示意图如图 4。

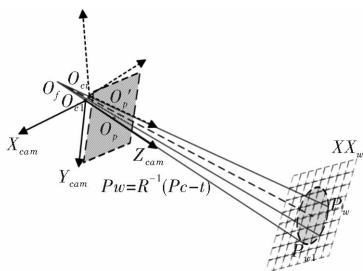


图4 摄像机坐标系、主要结构及各关键点的分布

Fig. 4 Camera coordinate system, main structure of our method and distribution of each key point

## 2.1 相机内参标定和归一化坐标

首先需要通过采集到不同姿态的标定图像来进行相机标定以获得基本的相机内参:焦距  $f_x$ 、 $f_y$ ,畸变参数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $p_1$ 、 $p_2$  和主点坐标  $u_0$ 、 $v_0$ 。这是对之后每一个姿态进行处理前的必要工作,同时也是整个测试工作所需要确定的参数,这个步骤可以独立于之后的步骤进行。图5展示了导引头摄像机在绕中心轴线旋转时所采集到的图像序列,可以看到需要让靶标完整地出现于每一幅图像中。

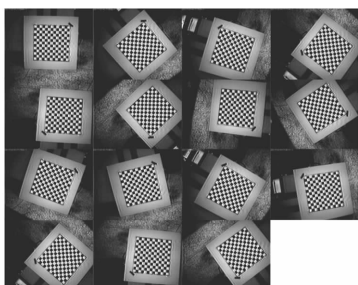


图5 摄像机旋转时采集到的图像

Fig. 5 Obtained images when camera rotates

接下来的运算需要使用这些参数来计算每一个姿态下摄像机坐标系与固定的世界坐标系(由平面靶标的特征点来确定)的相对位置关系,在此仍然使用旋转平移矩阵  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  来描述两个坐标系之间的变换关系:  $P_c = \mathbf{R} \cdot \mathbf{XX}_w + \mathbf{T}$

$\mathbf{XX}_w$  是平面靶标上特征点的世界坐标,此时世界坐标仍建立在平面靶标的特征点上,并且可以在其中选点作为建立世界坐标系的依据。而  $P_c$  是靶标上的点在摄像机坐标系下的坐标,建立两者之间的映射关系来获得旋转和平移矩阵  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ ,这将影响到后面的计算。

定义图像中心与摄像机坐标系原点连线在平面靶标上的交点为中心视线落点。为了计算中心视线落点在世界坐标系下的坐标,先计算图像中心坐标

点的归一化坐标。归一化坐标的计算如下:

首先确定图像正中心点的归一化坐标,令  $u = \text{img\_width}/2$ ,  $v = \text{img\_height}/2$ 。再根据摄像机模型的定义,使用归一化坐标的理想形式:  $\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u/f_x \\ v/f_y \end{bmatrix}$  考虑径向畸变和切向畸变后,其归一化坐标则进一步计算为

$$\begin{cases} x_{n\_distort} = (x_n - (2p_1 \cdot x_n y_n + p_2(r^2 + 2x_n^2))) / (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \\ y_{n\_distort} = (y_n - (2p_2 \cdot x_n y_n + p_1(r^2 + 2y_n^2))) / (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $r^2 = x_n^2 + y_n^2$ 。其他参数由摄像机标定过程得到。

## 2.2 中心视线落点坐标的计算及其分布的椭圆拟合

根据该幅图像所确定的  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  来计算中心视线落点在世界坐标系下的坐标。

$$\text{已知摄像机坐标系 } P_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = z_c \begin{bmatrix} x_{n\_distort} \\ y_{n\_distort} \\ 1 \end{bmatrix},$$

世界坐标系  $P_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$ 。两者之间的变换关系为

$$P_c = \mathbf{R} P_w + \mathbf{T} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

令靶标所在的平面为世界坐标系的  $XY$  平面,即靶标所在平面上的点的  $Z$  轴坐标为 0。因此,所需要确定的落点的世界坐标的  $Z$  坐标就是已知的,那么根据单应性来计算落点在世界坐标系中的  $XY$  坐标即可。先计算旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的逆矩阵:

$$\mathbf{R}^{-1} = [\mathbf{R}_1 \quad \mathbf{R}_2 \quad \mathbf{R}_3]^T \quad (4)$$

代入(3)式以求得  $z_c$ :

$$z_c = (\mathbf{R}_3^T \mathbf{T}) / (\mathbf{R}_3^T \cdot [x_{n\_distort} \quad y_{n\_distort} \quad 1]^T)$$

进而求得靶标上中心视线落点在摄像机坐标

$$\text{系下的坐标 } P_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = z_c \begin{bmatrix} x_{n\_distort} \\ y_{n\_distort} \\ 1 \end{bmatrix}。$$

最后由(3)式将中心视线落点的坐标转化为世界坐标下的坐标  $P_w = \mathbf{R}^{-1}(P_c - \mathbf{T})$ 。

在所有的姿态图像计算完毕后,将得到若干个中心视线落点  $P_w$  在世界坐标系下的坐标。而

且同时也将得到摄像机坐标系原点  $P_{oc}(x_i, y_i, z_i)$  在世界坐标系下的坐标:

$$P_{oc} = -R^{-1}T \quad (5)$$

该坐标在世界坐标系下理论上是固定不动的,但实际上由于安装位置的偏差呈一个圆形分布,将之可视化后,能够得到散点分布图像。平面靶标与成像平面实际上不可能是平行的,从中可以发现,中心视线落点在分布上呈现出一个空间椭圆,该椭圆应落在平面靶标所在的平面上。接下来将这些散点拟合成一个椭圆,确定椭圆参数并计算其圆心。

用于椭圆拟合的点集落在世界坐标系的  $XY$  平面上,只需考虑这些点的  $XY$  坐标以简化拟合过程。利用圆锥曲线方程的代数形式表示该椭圆:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (6)$$

容易想到使用最小二乘法进行椭圆拟合,即是求:

$$\arg \min(f(A, B, C, D, E, F)) = \arg \min\left(\sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2\right) \quad (7)$$

式中,  $\frac{\partial f}{\partial A} = \frac{\partial f}{\partial B} = \frac{\partial f}{\partial C} = \frac{\partial f}{\partial D} = \frac{\partial f}{\partial E} = \frac{\partial f}{\partial F} = 0$ 。

在确定椭圆方程的参数后,根据公式(8)来确定椭圆的中心  $(x_0, y_0)$ 、长短轴  $a, b$  和偏角  $\theta$ :

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \\ a = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A + C - \sqrt{B^2 + (\frac{A-C}{F})^2}}} \\ b = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A + C + \sqrt{B^2 + (\frac{A-C}{F})^2}}} \\ \theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{B}{A - C} \end{cases} \quad (8)$$

## 2.3 摄像机坐标系原点分布及空间圆拟合

还需要确定摄像机坐标系原点的圆形分布和汇聚点  $P_{of}$  在世界坐标系下的坐标。首先需要确定的是摄像机坐标系原点的圆形分布空间模型。建立空间圆方程:

$$\begin{cases} A'x + B'y + C'z + D' = 0 \\ (x - xx_0)^2 + (y - yy_0)^2 + (z - zz_0)^2 = r^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中  $xx_0, yy_0, zz_0$  表示空间圆心  $P_{co}(xx_0, yy_0, zz_0)$ ,  $r$  表示圆半径。先将  $P_{oc}(x_i, y_i, z_i)$  用于

拟合圆所在的平面。由第一个平面方程建立线性方程并求解,将  $P_{oc}$  这些点代入方程(9),并使用最小二乘法求解方程(10)可以得到  $A', B', C', D'$  四个参数的最小二乘解:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' \\ B' \\ C' \\ D' \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

由此得到空间圆所在的平面方程  $A'x + B'y + C'z + D' = 0$ , 将  $(x_i, y_i, z_i)$  投影到该平面可以得到投影点:

$$\begin{cases} x_i' = A'k + x_i \\ y_i' = A'k + y_i \\ z_i' = A'k + z_i \end{cases} \quad (11)$$

式中  $k = -\frac{A'x_i + B'y_i + C'z_i + D'}{A'^2 + B'^2 + C'^2}$ 。

使用该拟合出的平面对三维点投影进行约束之后,可以将投影出来的点用最小二乘法拟合空间圆。这些点应是平面与球面的交界点,因此依照最小二乘法法则建立目标函数:

$$F(xx_0, yy_0, zz_0, r, \lambda) = \sum_{i=1}^n [(x_i' - xx_0)^2 + (y_i' - yy_0)^2 + (z_i' - zz_0)^2 - r^2]^2 + \lambda(A'xx_0 + B'yy_0 + C'zz_0 + D') \quad (12)$$

并有:

$$\frac{\partial F}{\partial xx_0} = \frac{\partial F}{\partial yy_0} = \frac{\partial F}{\partial xx_0} = \frac{\partial F}{\partial r_0} = \frac{\partial F}{\partial \lambda_0} = 0 \quad (13)$$

另外加上圆的约束:

$$(x_i' - xx_0)^2 + (y_i' - yy_0)^2 + (z_i' - zz_0)^2 - r^2 \approx 0 \quad (14)$$

按照最小二乘法的计算来最终获得空间圆方程中的必要参数:空间圆心  $P_{co}(xx_0, yy_0, zz_0)$  和半径  $r$ 。

## 2.4 汇聚点及下偏角的计算

根据以上计算,初步得到了中心落点分布所拟合的椭圆和摄像机坐标系原点分布所拟合的空间圆,使用这2个结果得到汇聚点  $P_{of}$  的空间坐标。由图6可知,椭圆中心、空间圆心和汇聚点处于同一条直线上,而椭圆上和空间圆上的点以及汇聚点都在一个空间锥形曲面上。依据这些性质,可以判断过椭圆中心的一条直线在椭圆上的2个端点,以及空间圆圆心,三点可以构成一个平

面。而汇聚点和该平面与空间圆的交点所连接形成 2 直线则过椭圆上的 2 个端点。因此,在此步骤先求解椭圆短轴两端点,与空间圆心构造一个平面,再由该平面与圆的交点和椭圆两端点所形成的直线的交点,即为汇聚点。图 6 体现了空间圆、椭圆各个关键点的几何关系,图中标识了下偏角  $\varphi$ 。

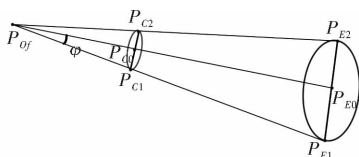


图 6 中心落点椭圆、摄像机坐标系原点空间圆和汇聚点

Fig. 6 Fitting ellipse of placement points of central line of sight, fitting circle of origin of camera coordinate system, and convergence point

先求解椭圆短轴两端的点在世界坐标系下的坐标,联立椭圆方程(6)并建立短轴所在直线方程:

$$\begin{cases} Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \\ y = x \tan(\theta + \pi/2) + (y_0 - x_0 \tan(\theta + \pi/2)) \end{cases} \quad (15)$$

可得到短轴两端点的坐标  $P_{E1}(x_{E1}, y_{E1}, 0)$ ,  $P_{E2}(x_{E2}, y_{E2}, 0)$ 。

再由两端点坐标  $P_{E1}(x_{E1}, y_{E1}, 0)$ ,  $P_{E2}(x_{E2}, y_{E2}, 0)$  和空间圆心  $P_{C0}(xx_0, yy_0, zz_0)$  构成一个平面:

$$A''x + B''y + C''z + D'' = 0 \quad (16)$$

与(9)式表示的空间圆方程联立,得到:

$$\begin{cases} A''x + B''y + C''z + D'' = 0 \\ A'x + B'y + C'z + D' = 0 \\ (x - xx_0)^2 + (y - yy_0)^2 + (z - zz_0)^2 = r^2 \end{cases} \quad (17)$$

求解可得到空间圆上 2 个端点坐标  $P_{C1}(x_{C1}, y_{C1}, z_{C1})$ ,  $P_{C2}(x_{C2}, y_{C2}, z_{C2})$ 。

连接  $P_{C1}$ 、 $P_{E1}$  和  $P_{C2}$ 、 $P_{E2}$  可以得到两条空间直线,其交点为汇聚点坐标  $P_{Of}(x_f, y_f, z_f)$ 。联立 2 个直线方程并计算汇聚点  $P_{Of}$  的空间坐标:

$$\begin{cases} \frac{x_f - x_{C1}}{x_{E1} - x_{C1}} = \frac{y_f - y_{C1}}{y_{E1} - y_{C1}} = \frac{z_f - z_{C1}}{z_{E1} - z_{C1}} \\ \frac{x_f - x_{C2}}{x_{E2} - x_{C2}} = \frac{y_f - y_{C2}}{y_{E2} - y_{C2}} = \frac{z_f - z_{C2}}{z_{E2} - z_{C2}} \end{cases} \quad (18)$$

根据图 6 中所示几何关系,使用余弦定理求得下偏角  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{1}{2} \arccos((d_{c1}^2 + d_{c2}^2 - d_{12}^2) / (2d_{c1}d_{c2})) \quad (19)$$

式中:  $d_{c1} = \|P_{Of} - P_{C1}\|^2$ ;  $d_{c2} = \|P_{Of} - P_{C2}\|^2$ ;  $d_{12} = \|P_{C1} - P_{C2}\|^2$ 。

### 3 实验

本节重点描述使用本文所述方法对导引头系统所实现的验证实验,来证明本文所提出的方法具有有效性。首先使用重复实验验证该方法的稳定性;再通过实验多组不同转动采点个数情况下,重复实验所得到的标定结果,来确定可用于出厂测试环节的转动采点个数;最后通过大型精密转台来标定若干个微小型导引头系统的下偏角,与我们提出的方法所计算得到的结果进行对比。

该实验如前文描述,导引头被固定到实验台上,用 2 个小型精密转台实现绕中心旋转,小型转台的最小刻度为  $0.02^\circ$ 。同时在导引头摄像机前方放置一块平面棋盘靶标,靶标方格的尺寸是  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。实验中设定每组实验转动 15 次,设定下偏角度为  $4.00^\circ$ ,使每组实验转动的角度尽量均匀分割  $360.00^\circ$ ,但不限制每次旋转的角度。实验系统装置如图 7 所示。

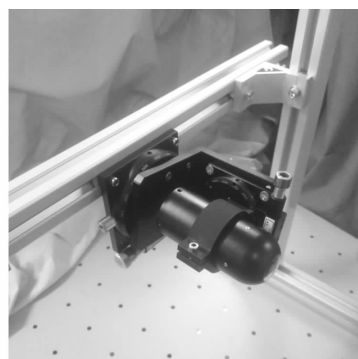


图 7 导引头及实验装置

Fig. 7 Seeker and experimental setccp

本实验使用 Matlab 进行数据处理和统计,先后进行 20 次实验以验证本文方法的有效性。在 Matlab 环境下读取摄像机获取的图片,对摄像机进行标定后,按照文中所描述的算法对中心视线落点坐标和摄像机坐标原点的分布进行了计算,得到各组实验的下偏角。任意选取其中一组数据将计算结果进行可视化,其各点分布如图 8 所示,对比图 6 中所绘的各点几何关系,可以看到实验结果与算法推导过程是接近的。

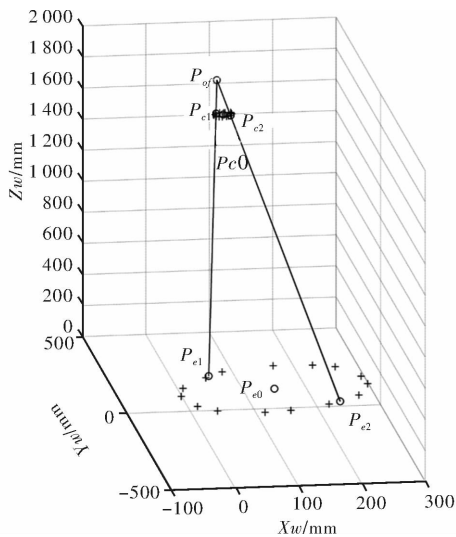


图 8 中心视线落点、摄像机坐标系原点在世界坐标系下的分布和汇聚点计算结果

Fig. 8 Distribution in world coordinate system of placement points of central line of sight and origin of camera coordinate system, and calculated result of coordinates of convergence point

计算得出的下偏角  $\varphi$  的结果如表 1 所示。

表 1 下偏角标定实验结果

Table 1 Experimental result of calibration of deflection angle

序号	下偏角/(°)	序号	下偏角/(°)
1	3.99	11	4.12
2	3.95	12	4.03
3	4.00	13	4.02
4	4.07	14	4.13
5	4.04	15	3.91
6	3.99	16	4.03
7	4.07	17	4.01
8	3.97	V18	4.05
9	4.11	19	4.13
10	4.03	20	4.01

20 次测量的平均值为  $4.033^\circ$ ，标准差为  $0.059^\circ$ ，其平均绝对误差为  $0.045^\circ$ 。因此可以判断本文方法可以提供后续处理一个可以使用的下偏角数据。

第二组实验选择不同的转动采样点数，重复实验所得到的标定结果，以确定可用于出厂测试环节的转动采点个数。由于本文方法使用空间椭

圆和空间圆拟合的方式来确定几个关键点之间的几何关系，而且每次采样的结果会存在一定的误差，因此拟合时样本的数量加上每个样本的误差对于拟合结果会存在一定的影响。根据最小二乘法算法原理，当样本点数量较少时，每个点存在的误差会对拟合的结果产生较大的影响，故应确定一个用于拟合的样本数量的下限。

该组实验设计：下偏角度设定为  $4.00^\circ$ ，采样点数为 6 到 20，每个转动采样点数下进行 10 次重复实验。每次实验的条件设置沿用第一组实验的基本环境条件设置，对测得的下偏角进行平均绝对误差计算，即使用测得的下偏角减去实际设定角度的差值的绝对值作平均值计算。实验结果表明在本文所描述的实验环境下，当转动采样点数低于 10 个时，会对测量误差产生影响，更高的采样点数能够获得较高的实验结果评价，但其平均绝对误差计算结果表明效果提升并不显著。

因此在后续的出厂测试中，转动采样点数选取 15 个。这样的设置既不影响整体测试效果，又不会增加整个测试过程的繁复度。该组实验的实验结果见图 9。

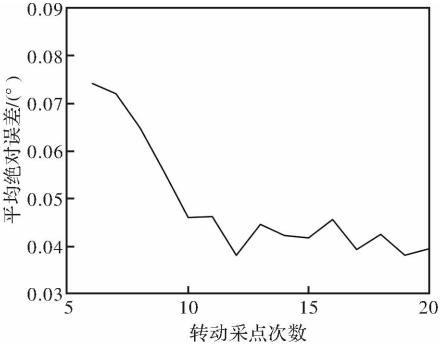


图 9 不同转动采样次数下，重复实验所得到的测量结果的平均绝对误差

Fig. 9 Mean absolute errors of measurement results obtained by repeated experiments under different rotation sampling times

第三组实验选取 10 个批量生产的微小型导引头系统，使用第一组实验测试后，再安装到大型精密转台上进行下偏角标定实验，两者之间进行对比。大型精密转台前方预制十字形标定点，将导引头水平安置在转台之后，读取摄像机获取的标定点图像位置。待转台在俯仰方向旋转后，当标定点位于图像中心时记录转台的旋转角度，比较两者之间的差值。实验结果如表 2 所示。

表 2 本文方法与转台标定结果的对比

Table 2 Comparison of our method and turntable  
calibrating method

序号	本方法	转台法	序号	本方法	转台法
1	3.76°	3.70°	6	3.60°	3.70°
2	3.70°	3.73°	7	4.29°	4.23°
3	3.76°	3.78°	8	4.17°	4.20°
4	3.85°	3.86°	9	4.35°	4.35°
5	3.68°	3.62°	10	3.56°	3.51°

通过观察该 10 次对比实验,两种方法之间的绝对误差不超过  $0.10^\circ$ ,在该导引头的出厂测试环境要求中,可以认为本文方法可以代替大型精密转台标定方法。

## 4 结论

本文提出了一种用于标定微小型光学导引头内部摄像机安装下偏角的简便标定方法。整系统组装完毕后,在不破坏内部结构和外形尺寸的情况下,引入一个绕中心轴的旋转角将下偏角的测量转换为计算导引头的摄像机坐标系在旋转过程中的空间坐标变换。该方法为微小型导引头的测试而提出,其特点是流程简单,可以和摄像机标定过程同时进行,不需要附加高价值的测试仪器即可完成该项测试工作。算法原理直观有效,空间中散点的拟合使用了最小二乘法,若散点误差较大则可以进一步使用筛选策略在拟合前处理散点的分布。最后进行了重复实验对本文方法进行了验证。本文方法除可用于本文所描述的微小型导引头系统外,还可广泛适用于具有该类系统安装结构的机器视觉系统。

### 参考文献:

- [1] SONG Liang, LI Zhi, MA Xingrui. A novel position and attitude estimation for space debris[J]. Journal of Astronautics, 2015,36(8): 906-915.  
宋亮,李志,马兴瑞.对空间碎片的相对位姿估计[J].宇航学报,2015,36(8): 906-915.
- [2] LIU Yongshan, LIU Zaozhen, LI Lancun, Research on fuzzy variable structure guidance law for passive homing missiles against maneuvering targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007,29(2): 254-258.  
刘永善,刘藻珍,李兰付.攻击机动目标的被动寻的模糊变结构制导律研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(2): 254-258.
- [3] YANG Xuerong, ZHANG Xiangwei, CHENG

Siyan, et al. Progress on camera calibration methods in visual measurement[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(3): 259-261.

杨雪荣,张湘伟,成思源,等.视觉测量中的相机标定方法进展研究[J].机械设计与制造,2009(3): 259-261.

- [4] DAI Dongkai, WANG Xingshu, HU Chunsheng, et al. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312005  
戴东凯,王省书,胡春生,等.基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J].光学学报,2012,32(3):100-104.
- [5] WANG Zhihe, SHU Rong, HE Zhiping, et al. New method of CCD camera calibration based on collimator[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007,26(6): 465-468.  
王志和,舒嵘,何志平,等.基于平行光管的 CCD 相机标定新方法[J].红外与毫米波学报,2007,26(6): 465-468.
- [6] YUAN Guoqin, DING Yalin, HUI Shouwen, et al. Calibration method of inner orientation parameters for mapping camera based on orthogonality of orientation matrix[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(1): 185-190.  
远国勤,丁亚林,惠守文,等.基于旋转正交性的测绘相机内方位元素标定方法[J].仪器仪表学报,2014,35(1):185-190.
- [7] SONG Junru, XING Hui, MU Shengbo, et al. Alignment of aerial multi-angle infrared camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2015,3(8): 2125-2133.  
宋俊儒,邢辉,穆生博,等.航空红外相机的装调[J].光学精密工程,2015,3(8):2125-2133.
- [8] WU Guodong, HAN Bing, HE Xu. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab[J]. Optics and Precision Engineering, 2007,15(10): 1628-1632.  
吴国栋,韩冰,何煦.精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J].光学精密工程,2007,15(10):1628-1632.
- [9] ZHANG Weizhong, ZHAO Zhigang, YOU Shiming, et al. Calibrating camera using planar pattern on LCD with a rotating camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(1): 120-125.  
张维忠,赵志刚,油世明,等.绕光轴旋转拍摄 LCD 上平面靶标实现相机标定[J].仪器仪表学报,2011,32(1):120-125.