

文章编号: 0253-2239(2010)05-1308-07

基于可控旋转的像机高精度标定技术

姜广文 晁志超 伏思华 于起峰

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出了一种基于可控旋转的主动视觉标定方法,通过控制像机围绕光心(或光心附近)做旋转运动,能够将等效焦距与其他参数分离开来,求解精确的等效焦距。该方法需要控制像机绕其坐标轴进行两次旋转以标定纵横等效焦距。当采用纵横等效焦距相等并且图像主点取为图像中心的简化成像模型时,只需要一次旋转运动即可标定像机线性参数。在此基础上提出了传统标定方法和基于可控旋转方法相结合的像机标定技术,控制摄像机拍摄空间坐标已知的标定块并做一定的旋转运动,从而高精度标定包含像差系数的像机内外参数。实验表明,使用基于可控旋转运动标定方法得到的像机参数进行位姿测量时达到了很高的精度。

关键词 成像光学; 摄像测量; 计算机视觉; 标定; 旋转

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1308

High-Accurate Camera Calibration Technique Based on Controllable Rotation

Jiang Guangwen Chao Zhichao Fu Sihua Yu Qifeng

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A camera calibration technique based on controllable rotation for active vision system is proposed. The camera is controlled to rotate a known angle around (or around nearby) the optical center to calculate the accurate equivalent focus length departed from other parameters. This method needs two rotations to get the equivalent focus lengths along two axes. Using the simplified imaging model, that two equivalent focus lengths are set to equal and the principal point is on image center, only one rotation is required to get the linear camera parameters. And then a camera calibration method combined by controllable rotation and traditional two steps calibration is put forward to get all parameters including the distortion coefficients. Experiments show that the use of camera parameters obtained by calibration method based on the controlled rotation has a high accuracy for pose measurement.

Key words imaging optics; videometrics; computer vision; calibration; rotation

1 引言

像机(摄像机或照相机)标定是摄影测量、计算机视觉和摄像测量中最基本、最重要的工作之一。像机标定是指通过实验和计算确定像机参数,包括内参数和外参数,对某些高精度测量应用,还需要标定像差系数。像机标定在有些文献中也称之为像机检定或像机定标。

摄影测量和计算机视觉自其产生以来就提出了

像机标定的需求,研究者们提出了许多像机标定方法^[1~12],大致可分为三类:传统标定方法、自标定方法和基于主动视觉的标定方法^[1,2]。传统标定方法又可分为以下几类:直接非线性优化法、直接线性变换解法和两步法^[3,4]。像机自标定方法是计算机视觉界研究的热点和前沿,主要有求解 Kruppa 方程的方法^[5]和分层逐步标定的方法^[6]等。基于主动视觉的标定方法^[7,8]需要控制像机做某些可控的运

收稿日期: 2009-06-22; 收到修改稿日期: 2009-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(10727202)资助课题。

作者简介: 姜广文(1981—),男,博士研究生,主要从事摄像测量方面的研究。E-mail: jianggw@hotmail.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,博士,教授,主要从事摄像测量、视觉导航等方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

动,如绕光心的旋转或纯平移等,利用这种运动的特殊性可以计算出像机参数。也有人将基于主动视觉的标定方法归入自标定方法。

很多方法在求解像机参数时遇到的一个很大困难和缺点是各参数之间的耦合问题,即各参数作为未知数求解时不是相互独立的,像机参数多于实际独立变量数,存在冗余^[2,13]。过分参数化的缺点是,在图像含有噪声的情况下,解得的未知数也许能够很好地符合求解方程组,但未必很好地符合实际情况。为了解决这种参数耦合问题,本文将提出一种基于可控旋转的主动视觉标定方法,将等效焦距与其他参数分离开来,以实现单独的精确求解,然后在些基础上将传统标定方法与该方法结合实现其他参数的标定。这样就构成了一种通过控制像机拍摄空间坐标已知的标定块,并做一定的旋转运动的像机标定技术,从而可以高精度标定包含像差系数在内的像机内外参数。

2 基于可控旋转高精度标定等效焦距

2.1 成像模型

各种摄像测量任务中,都是基于成像映射关系确定各种几何与运动参数,因此成像模型是测量和标定的基础。本文采用中心透视投影模型,即针孔模型^[1]。如图 1 所示,成像模型中主要涉及到如下坐标系:世界坐标系 $W-XYZ$,也称为全局坐标系,是由用户任意定义的三维空间坐标系;摄像机坐标系 $C-X_C Y_C Z_C$,原点为光心, Z_C 轴与摄像机光轴重合,并取摄像方向为正向;摄像平台坐标系 $B-X_B Y_B Z_B$,用以安装摄像机的静止或运动的载体平台坐标系;图像物理坐标系 $O-\hat{x}\hat{y}$,原点为光轴与像平面的交点 O (称为图像主点),坐标单位为实际物理尺度;图像像素坐标系 $I-xy$,原点为图像左上角点,坐标单位为像素。图像实际成像靶面为 S' ,称之为反片;与 S' 平面关于光心 C 中心对称的 S 平面,称之为正片。为了便于像点和对应物点空间位置的相互换算,图像物理坐标系和图像像素坐标系均建

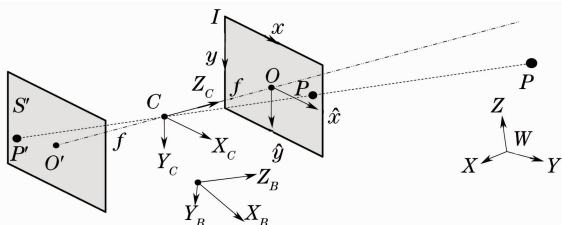


图 1 针孔成像模型

Fig. 1 Pinhole camera model

立在正片平面 S 中。

由于镜头设计的复杂性和工艺水平等因素的影响,实际成像系统不可能严格地满足中心透视投影模型,由于镜头畸变使得实际成像位置与根据中心透视投影模型给出的成像位置之间,存在的偏差称之为像差。因此,在像机标定中需要标定的参数包括内参数、外参数和像差系数,其中内参数包括等效焦距 (f_x, f_y) 、图像主点 (C_x, C_y) ,外参数包括三个方位角 (A_x, A_y, A_z) 和三个平移量 (T_x, T_y, T_z) ,像差系数对于不同的像差模型有不同的表示方法。一般情况下,需要标定内参数和像差系数。对于精度要求不太高的测量应用或者畸变系数很小的镜头,可以不考虑像差系数。

2.2 旋转中心为光心的可控旋转

简单起见,首先考虑围绕光心的可控旋转运动。如图 2 所示, C 为像机光心。设像机围绕摄像机坐标系的 X_C 或 Y_C 轴运动(俯仰或水平运动), CO_1 为像机初状态光轴, CO_2 为像机末状态光轴。 CO_1 与 CO_2 之间的夹角为 θ ,当 θ 为小角度时,可以认为两个状态的像是平行的,仅有一定尺寸的平移,空间某点 Q 在两个状态下的成像在空间是重合的,如图中 P 所示。

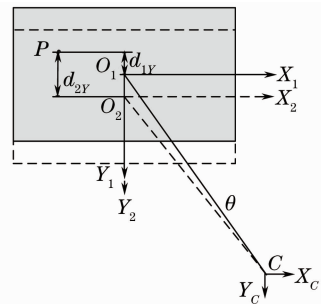


图 2 围绕光心的可控旋转示意图

Fig. 2 Illustration of controllable rotation around optical center

当摄像机俯仰运动(绕 X_C 轴运动角度 θ) 时, d_{1Y}, d_{2Y} 分别为两个状态下像点与主点之间的距离在 Y 轴上的投影,由几何关系得出

$$f_y = (d_{2Y} - d_{1Y}) / \theta. \tag{1}$$

类似地,当摄像机水平运动(绕 Y_C 轴运动角度 φ) 时, d_{1X}, d_{2X} 分别为两个状态下像点与主点之间的距离在 X 轴上的投影,用以标定 f_x , 得

$$f_x = (d_{2X} - d_{1X}) / \varphi. \tag{2}$$

以上是围绕光心运动的情况。如果能够控制像机分别围绕 X_C 和 Y_C 轴进行一定角度的旋转,则可以简单而且高精度的求解等效焦距。实际应用中,

像机一般安装在平台上,旋转中心与光心之间存在一定的差异。下面以矩阵的形式进行推导。

2.3 旋转中心在光心附近的可控旋转

2.3.1 基本变换

通常情况下,像机是安装在可控运动平台上进行旋转或平移运动的。可控运动平台可以是机器人机械手末端关节附体坐标系,也可以是云台。对于主动视觉平台系统来说,这种可控旋转或平移很容易实现。

如图3所示,云台初始坐标系为 $B-X_B Y_B Z_B$,并与世界坐标系重合,云台坐标系原点即为旋转中心。初始状态下,设摄像机坐标系 $C-X_C Y_C Z_C$ 与云台坐标系平行,但存在平移量 $\mathbf{T} = (T_x, T_y, T_z)'$ 。物体上一点 P 在世界坐标系中的坐标为 $(X, Y, Z)'$,根据刚性坐标变换公式,该点在摄像机坐标系中的坐标为

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{R} 为旋转矩阵,公式中采用齐次坐标表示空间三维点。

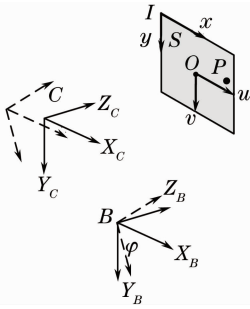


图3 围绕云台原点的可控旋转示意图

Fig. 3 Illustration of controllable rotation around origin of rotary table

图像像素坐标系中坐标 (x, y) 与摄像机坐标系中坐标 (X_C, Y_C, Z_C) 有以下关系

$$\begin{cases} \frac{x - C_x}{f_x} = \frac{X_C}{Z_C} \\ \frac{y - C_y}{f_y} = \frac{Y_C}{Z_C} \end{cases}. \quad (4)$$

为了方便计算,将图像像素坐标系的原点移至图像主点,成为一个新的坐标系 $O-uv$,以下称之为图像坐标系,该坐标系实际上与图像物理坐标系重合,但坐标单位为像素,其坐标 (u, v) 与图像像素坐标系中的坐标 (x, y) 有以下关系

$$\begin{cases} u = x - C_x \\ v = y - C_y \end{cases}. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式并改为矩阵形式,有

$$Z_C \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \\ \frac{1}{Z_C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中等式左边的图像坐标为超齐次坐标表示形式。

将(3)式代入(6)式,得到图像坐标与世界坐标系坐标之间的关系

$$Z_C \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \\ \frac{1}{Z_C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

2.3.2 俯仰运动

首先考虑绕 X_B 轴的旋转,即俯仰运动,设旋转角为 θ 。对于云台旋转前初始状态,有

$$Z_{C1} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \\ \frac{1}{Z_{C1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

对云台旋转后状态,有

$$Z_{C2} \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \\ \frac{1}{Z_{C2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & T_y \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

由(8)式得

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_x \\ 0 & 1 & 0 & -T_y \\ 0 & 0 & 1 & -T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1/f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} Z_{C1} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \\ \frac{1}{Z_{C1}} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式得到

$$Z_{C2} \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \\ \frac{1}{Z_{C2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -f_y \sin \theta & E \\ 0 & \sin \theta / f_y & \cos \theta & D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} Z_{C1} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \\ \frac{1}{Z_{C1}} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

其中

$$E = f_y (T_Y - T_Y \cos \theta + T_Z \sin \theta),$$

$$D = -T_Y \sin \theta - T_Z \cos \theta + T_Z.$$

将矩阵形式分解得到

$$\begin{cases} Z_{C2} u_2 = Z_{C1} u_1 \\ Z_{C2} v_2 = Z_{C1} (v_1 \cos \theta - f_y \sin \theta) + f_y (T_Y - T_Y \cos \theta + T_Z \sin \theta) \\ Z_{C2} = Z_{C1} v_1 \sin \theta / f_y + Z_{C1} \cos \theta - T_Y \sin \theta - T_Z \cos \theta + T_Z \end{cases} \quad (12)$$

通常情况下(或者人为设置使其满足) $T_i \ll Z_{C1}$ ($i = X, Y, Z$), 考虑小角度运动并忽略二阶影响, 得到

$$\begin{cases} Z_{C2} = Z_{C1} [\cos \theta + v_1 \sin \theta / f_y + (-T_Y \sin \theta - T_Z \cos \theta + T_Z) / Z_{C1}] \approx Z_{C1} \\ v_2 = (v_1 \cos \theta - f_y \sin \theta) + f_y (T_Y - T_Y \cos \theta + T_Z \sin \theta) / Z_{C1} \approx v_1 - f_y \theta \\ u_2 \approx u_1 \end{cases} \quad (13)$$

由(13)式得到

$$f_y = (v_1 - v_2) / \theta, \quad (14)$$

将(5)式中 $v = y - C_y$ 代入(14)式得到

$$f_y = (y_1 - y_2) / \theta. \quad (15)$$

2.3.3 水平运动

然后考虑绕 Y_B 轴的旋转, 即水平摆动, 设旋转角为 φ 。云台旋转前初始状态, 图像坐标与世界坐标之间的关系仍为(8)式, 对云台旋转后状态, 有

$$Z_{C2} \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \\ \frac{1}{Z_{C2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & T_X \\ 0 & 1 & 0 & T_Y \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & T_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

将(10)式代入(16)式得到

$$Z_{C2} \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \\ \frac{1}{Z_{C2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & f_x \sin \varphi & A \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi / f_x & 0 & \cos \varphi & B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} Z_{C1} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \\ 1/Z_{C1} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

其中

$$A = f_x (T_X - T_X \cos \varphi - T_Z \sin \varphi),$$

$$B = T_X \sin \varphi - T_Z \cos \varphi + T_Z.$$

由(17)式得到

$$\begin{cases} Z_{C2} u_2 = Z_{C1} (u_1 \cos \varphi + f_x \sin \varphi) + f_x (T_X - T_X \cos \varphi - T_Z \sin \varphi), \\ Z_{C2} v_2 = Z_{C1} v_1, \\ Z_{C2} = -Z_{C1} u_1 \sin \varphi / f_x + Z_{C1} \cos \varphi + T_X \sin \varphi - T_Z \cos \varphi + T_Z. \end{cases} \quad (18)$$

与绕 X_B 轴旋转的情况类似, 使 $T_i \ll Z_{C1}$ ($i = X, Y, Z$), 考虑小角度运动并忽略二阶影响, 得到

$$\begin{cases} Z_{C2} = Z_{C1} [\cos \varphi - u_1 \sin \varphi / f_x + (T_X \sin \varphi - T_Z \cos \varphi + T_Z) / Z_{C1}] \approx Z_{C1}, \\ u_2 = (u_1 \cos \varphi + f_x \sin \varphi) + f_x (T_X - T_X \cos \varphi - T_Z \sin \varphi) / Z_{C1} \approx u_1 + f_x \varphi, \\ v_2 \approx v_1. \end{cases} \quad (19)$$

由(19)式得到

$$f_x = (u_2 - u_1) / \varphi, \tag{20}$$

将(5)式中 $u = x - C_x$ 代入(20)式得到

$$f_x = (x_2 - x_1) / \varphi. \tag{21}$$

由(15)和(21)两式可见,等效焦距只与云台的旋转角度和旋转前后图像上像点的位置有关,而云台的旋转角度是可控的、已知的,像点的位置也可以从图像上定位得到,因此绕 X_B 轴旋转一个小的角度可以精确标定 f_y ,绕 Y_B 轴旋转一个小的角度可以精确标定 f_x 。

由(13)式和(19)式可以看出,对等效焦距标定精度影响最大的是 T_z/Z_C ,该数值越小,等效焦距的标定精度越高。因此,在使用本方法进行等效焦距标定时,应使 T_z/Z_C 尽量小,在实际应用中这是不难做到的。

2.3.4 坐标轴偏差影响分析

分析摄像机坐标系与云台坐标系不一致所带来的影响。实际安装像机时,不可能做到使像机坐标系的三个轴与云台坐标系的三个轴完全平行。分别比较(1)式和(15)式,(2)式和(21)式,发现以光心为旋转中心和以云台坐标系原点为旋转中心得到的结果是一致的,可以认为当以云台坐标系原点为旋转中心,并绕 X_B (或 Y_B) 轴旋转一个角度 θ (或 φ) 时,摄像机坐标系也绕其自身的 X_C 轴(或 Y_C 轴)近似旋转了一个角度 θ (或 φ),两个角度之间的微小差异就反映了标定误差。以此为出发点,讨论坐标轴偏差带来的影响。

设云台坐标系与像机坐标系之间的相对姿态角(代表了坐标轴偏差)为 $(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$,相对平移为 ΔT ,则云台坐标系与像机坐标系之间存在如下的坐标变换

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \Delta R \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} + \Delta T, \tag{22}$$

式中 $\Delta R = R(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$ 是安装偏差 $(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$ 的正余弦函数组成的正交旋转矩阵,具体形式对于不同的旋转方式有不同的表达方式,在此不给出具体表达形式。

对初始状态,有

$$\begin{bmatrix} X_{C0} \\ Y_{C0} \\ Z_{C0} \end{bmatrix} = \Delta R \begin{bmatrix} X_{B0} \\ Y_{B0} \\ Z_{B0} \end{bmatrix} + \Delta T, \tag{23}$$

对云台绕 X_B 或 Y_B 转动后状态,有

$$\begin{bmatrix} X_{B1} \\ Y_{B1} \\ Z_{B1} \end{bmatrix} = R_1 \begin{bmatrix} X_{B0} \\ Y_{B0} \\ Z_{B0} \end{bmatrix}, \tag{24}$$

式中 $R_1 = R[A(X_B), A(Y_B), A(Z_B)]$,是云台转动角度函数组成的旋转矩阵。

云台转动后,像机随之转动,仍然存在如(22)式所示的坐标变换关系,即

$$\begin{bmatrix} X_{C1} \\ Y_{C1} \\ Z_{C1} \end{bmatrix} = \Delta R \begin{bmatrix} X_{B1} \\ Y_{B1} \\ Z_{B1} \end{bmatrix} + \Delta T = \Delta R R_1 \begin{bmatrix} X_{B0} \\ Y_{B0} \\ Z_{B0} \end{bmatrix} + \Delta T, \tag{25}$$

对像机而言是要求解像机转动后状态相对像机初始状态的姿态关系,即

$$\begin{bmatrix} X_{C1} \\ Y_{C1} \\ Z_{C1} \end{bmatrix} = R_X \begin{bmatrix} X_{C0} \\ Y_{C0} \\ Z_{C0} \end{bmatrix} + T_X. \tag{26}$$

对比(25)式和(26)式两式,求得

$$R_X = \Delta R R_1 \Delta R^{-1}, \tag{27}$$

$$T_X = -\Delta R R_1 \Delta R^{-1} \Delta T + \Delta T. \tag{28}$$

然后将 R_X 分解为三个姿态角 $[A(X_C), A(Y_C), A(Z_C)]$,并比较 $A(X_B)$ 与 $A(X_C)$ 的差别。

当三个轴都存在安装偏差时,坐标变换之间的推导相当复杂,采用数值仿真的方法对其中一种情况进行分析。设三轴安装误差都是 1° ,即 $\Delta\alpha = \Delta\beta = \Delta\gamma = 1^\circ$,云台坐标系绕 X_B 轴旋转到 1° , $A(X_B) = 0 \sim 1^\circ$, $A(Y_B) = A(Z_B) = 0$,求解像机绕 X_C 轴转过角度,并与云台绕 X_B 轴转过的角度比较,如图4所示。在云台转动角度较小时,摄像机转过角度与云台转动角度的差值与云台转动角度之间基本上是一个线性关系。云台转过角度越大, $A(X_B) - A(X_C)$ 的值就越大;当云

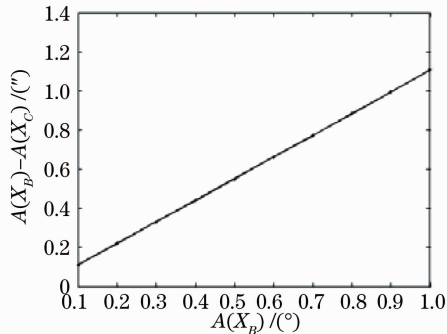


图4 像机转动角度与云台转动角度的比较

Fig. 4 Comparison between rotation angle of camera and that of rotary table

台绕 X_B 轴转动 1° 时,摄像机绕 X_C 轴转过的角度与云台转角的差值大约为 $1.1''$, 误差约为 0.03% 。云台绕 Y_B 轴旋转时可以仿真得到类似的结论。用于标定等效焦距时,绕 X_B (或 Y_B)轴转过的角度一般不超过 1° ,而像机安装时一般可以将安装误差控制在 1° 以内,因此像机安装误差带来的影响可以忽略不计。

3 基于传统标定方法和可控旋转结合的像机标定方法

研究表明^[13],像机参数在成像过程中的作用是相互关联和交叉的,如 f_x 和 A_Y 会引起图象的水平缩放, f_y 和 A_X 会引起图象的竖直缩放,因此标定得到的参数之间也是相互关联的。虽然使用这些标定参数对空间点进行重投影的误差很小,但用于计算像机的位置、姿态(外参数)则会有一定的偏差。这也是第 2 部分提出基于可控旋转的主动视觉方法将等效焦距单独标定的原因所在。然而,第 2 部分给出的基于可控旋转的标定方法中没有考虑像差系数,畸变的存在会影响到等效焦距标定的精度。对像差系数带来的影响可以采用以下两种方法消除:1)采用多个点进行标定并求平均值,这些点在图像上尽量均匀分布;2)由于图像中部区域(如占全场 $1/2 \sim 2/3$ 区域)的畸变很小,因此尽量使用这部分区域的像点进行标定计算。

传统标定方法中影响较大、使用普遍的是 R. Y. Tsai^[3] 和 J. Weng 等^[4] 提出和改进的两步法。为了对像机内外参数和像差系数完整标定,本节将基于可控旋转标定等效焦距和传统的两步法结合起来。首先,使用可控旋转运动标定等效焦距,然后利用两步法标定,将等效焦距作为已知量,标定除等效焦距之外的其它参数。该方法有助于消减部分参数耦合带来的不利影响,对精密测量任务有所帮助。

实际应用中,可以对像机成像模型进行一定的保持精度的简化,主要有以下做法^[13]:a)将图像主点直接取为图像中心;b)将横向等效焦距和纵向等效焦距设为一致(对正方形 CCD 像元);c)对于质量较好的镜头,可以采用线性成像模型,不标定像差。当采用 a),c)时,需要对摄像机进行两次旋转标定等效焦距,当采用 a),b)和 c)时,只需要对摄像机进行一次绕轴旋转即可完成标定。因此,对某些应用,只需要一次旋转运动就能够对像机参数进行标定。

4 验证实验及结果

很多标定算法利用标定得到的参数将空间点重

投影到图像上,计算投影点和实际像点的误差来衡量标定精度。然而,很多优化标定算法中是以理想像点和实际像点之间的误差作为目标函数来求解未知参数的,因此以重投影误差来衡量标定精度有些不妥。本文使用该标定参数进行位姿测量,以位姿测量的精度来反映像机参数的标定精度。当然,位姿测量的精度还与姿态求解算法、标志定位精度有关。实验中,采用定位精度较高的十字丝标志和高精度的正交迭代算法^[14]求解位姿。

如图 5 所示,将电子经纬仪经过简单改造之后作为一个可固定像机的精密可控云台使用,像机拍摄如图 6 所示的标定板,该标定板同时作为待测标志使用。作为待测标志使用时,只选用其中的 9 个异面点。像机分辨率为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,镜头焦距为 35 mm 。



图 5 像机与云台固定装置图

Fig. 5 Setup of a camera and a theodolite fixed together

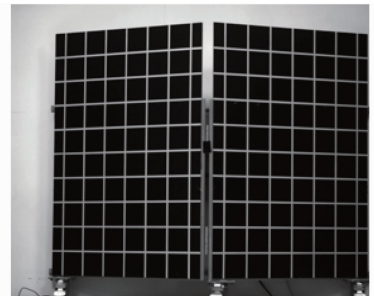


图 6 标定板图像

Fig. 6 Image of calibration grid

采用两种方式对像机进行标定,得到两组参数:

参数 1:采用简化模型标定,纵向和横向等效焦距取为一致,图像主点指定为图像中心(1223.5, 1023.5)。使像机随云台在俯仰角方向上运动 $20'$,用以标定等效焦距,标定结果为 10887.8 pixel 。

参数 2:等效焦距采用参数 1 中标定得到的等效焦距(10887.8 pixel),并根据拍摄标定板图像和标定板上标志点坐标标定图像主点和像差系数,图像主点标定结果为(1234.4,1059.0),采用 Weng 模型^[4]标定得到的像差系数分别为 $-0.041, 0.002$,

-0.012, -0.002, 0.016。图 7 为标定板上十字丝标志的图像定位坐标及经过像差系数校正畸变后的坐标比较图,由该图可以看出,十字丝标志原始图像坐标与畸变校正后坐标之间相差很小,可以判定实验所采用的镜头畸变较小。

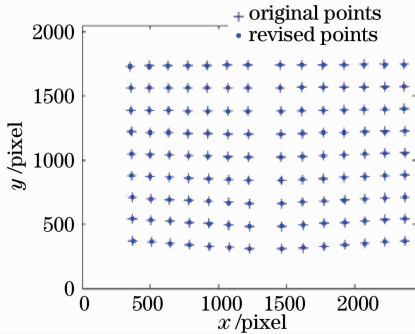


图 7 原始图像坐标与畸变校正后坐标比较图

Fig. 7 Comparison between original coordinates and distortion revised coordinates of points

像机标定完成之后,使像机绕 X_C 轴转动一系列角度,拍摄图像并保存 9 个标志点的坐标,用以求解像机的姿态角变化。分别使用两组像机参数进行位姿计算,结果如表 1 所示, A_{Rot} 表示像机实际转过角度(真值), A_{M1} (A_{M2}) 表示使用参数 1 (2) 的解算结果, ΔA_{M1} (ΔA_{M2}) 表示测量误差。采用参数 1 时的误差均方根 (e_{RMS}) 为 $0.25'$, 采用参数 2 时的误差均方根为 $0.2'$ 。可见,使用简化模型标定时,测量精度稍低,但差距不大。因此当标定板不易获取时,可以采用可控旋转的标定方式进行简化标定。

表 1 像机转过角度与测量结果的比较[单位: ($'$)]

Table 1 Comparison between rotated angle and measured angle of camera [unit: ($'$)]

A_{Rot}	A_{M1}	ΔA_{M1}	A_{M2}	ΔA_{M2}
-10	-9.63	-0.37	-9.69	-0.31
-30	-29.55	-0.45	-29.71	-0.29
-50	-49.84	-0.16	-50.10	0.10
-70	-69.95	-0.05	-70.32	0.32
-90	-89.93	-0.07	-90.39	0.39
-110	-109.67	-0.33	-110.23	0.23
-130	-129.64	-0.36	-130.28	0.28
-150	-149.64	-0.36	-150.36	0.36
-170	-169.38	-0.62	-170.18	0.18
e_{RMS}	—	0.25	—	0.20

5 结 论

首先提出了一种基于可控旋转的主动视觉标定方法,该方法通过控制像机围绕光心(或光心附近)做旋转运动来消减像机参数之间的耦合,能够将等效焦距

从包含像差系数的像机参数中分离出来实现高精度标定。然后将该方法与传统标定方法相结合,实现了其他像机内外参数的精确标定。实验表明,这种基于可控旋转和两步法的像机标定技术不仅操作简单可行,而且能够达到很高的精度,如果采用一次旋转的简化标定方法,也能得到令人满意的标定效果。

参 考 文 献

- 1 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009. 53~55
于起峰, 尚 洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 53~55
- 2 Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1): 43~55
邱茂林, 马颂德, 李 毅. 计算机视觉中摄像机标定综述[J]. 自动化学报, 2000, **26**(1): 43~55
- 3 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J. Robotics Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- 4 J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1992, **14**(10): 965~980
- 5 S. Maybank, O. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. *Int. J. Comput. Vis.*, 1992, **8** (2): 123~151
- 6 R. I. Hartley. Projective reconstruction and invariants from multiple images[J]. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 1994, **16**(10): 1036~1041
- 7 Hu Zhanyi, Wu Fuchao. Review on some active vision based camera calibration techniques[J]. *Chinese J. Computer*, 2002, **25**(11): 1149~1156
胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, **25**(11): 1149~1156
- 8 S. D. Ma. A self-calibration technique for active vision system [J]. *IEEE Trans. Robot Automat.*, 1996, **12**(1): 114~120
- 9 Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Study of stereo vision coordinate measurement system based on optical probe[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2181~2186
徐巧玉, 车仁生. 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2181~2186
- 10 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86
徐巧玉, 叶 东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 81~86
- 11 Xu Qiaoyu, Yao Huai, Che Rensheng. Online calibration of stereo vision measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1546~1551
徐巧玉, 姚 怀, 车仁生. 立体视觉测量系统现场校准技术[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1546~1551
- 12 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single-camera based on difference coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 697~701
李为民, 俞巧云, 刘 超. 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(5): 697~701
- 13 Shang Yang. Researches on vision-based pose measurements for space targets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006
尚 洋. 基于视觉的空间目标位置姿态测量方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学博士学位论文, 2006
- 14 C. P. Lu, G. D. Hager, E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 2000, **22**(6): 610~622