

文章编号:1007-2780(2016)10-0958-09

一种双正交消隐点的双目相机标定方法

赵亚凤, 胡峻峰*

(东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了保证双目相机标定精度的同时,提高算法速度。利用田字形模板中的两对正交消隐点,拍摄两幅图像,实现快速标定。首先,提出了消隐点寻优的方法来提取每幅图像中误差最小的两对正交消隐点,线性计算相机主点和归一化焦距,作为内参数的初值。再根据同一幅图像消隐点共线和所有直线畸变后也为直线的原则,构建约束函数,利用优化的差分进化算法进行全局寻优,完成相机畸变校正。最后,根据优化后消隐点坐标求得左右相机的旋转矩阵,并结合左右相机的角点世界坐标,利用刚性变换求得平移向量。双目标定的平均重构误差为 0.598 pixel,跟传统方法标定误差相当。该标定算法重构误差与传统算法在一个级别,能满足标定中稳定可靠、精度高、抗干扰能力强等要求。

关键词:消隐点;标定;内参数;畸变校正;外参数

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163110.0958

Binocular self calibration using two pairs of orthogonal vanishing points

ZHAO Ya-feng, HU Jun-feng*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University,
Harbin 150040, China)

Abstract: In order to realize fast and accurate binocular calibration, two pairs of orthogonal vanishing points product from square template were used. This method requires only two images. Firstly, two pairs of orthogonal vanishing point were extracted from each image; secondly, winner point and focal length on each single camera were solved by linear algorithm; thirdly, considering the radial lens distortion, distortion correction was implemented by linear constraints. During this process, the optimization differential evolution algorithm was proposed. Parameters within the solution were set as initial value. Line collinear features were set as constrained optimization parameters. According to the coordinates of 4 vanishing point, by using the infinite homography matrix rotation orthogonal constraint, the initial values of the rotation matrix can be obtained and more accurately calculated rotation matrix can be obtained by the iterative method. Experimental results indicate that the reconstruction error is 0.598 pixel. The experimental results show that the calibration method can meet the precision require-

收稿日期:2016-06-12;修订日期:2016-07-18.

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(No. 2572015BB11);黑龙江省青年基金(No. QC2015080)

Supported by Fundamental Research Funds For the Central Universities of China(No.257215BB11) and Heilongjiang Province Science Foundation for Youth(No.QC2015080)

* 通信联系人, E-mail:heaven_pro@163.com

ments, and it is stable and reliable, high precision and strong robustness for self calibration.

Key words: vanishing points; self calibration; intrinsic parameters; distortion correction; external parameters

1 引言

摄像机标定是三维计算机视觉中的一个必要步骤,目的是从二维图像中提取度量信息。双目立体视觉系统与单摄像机标定不同,不仅需要确定其内在的参数,而且还需要对双摄像机的相对位置关系进行确定^[1]。随着双目视觉技术在不同领域的应用,也促进了双目视觉标定技术的发展^[2]。

B.CAPRILE 和 V.TORRE 首次提出了应用消隐点进行相机标定的思想。使用消隐点属性,分两步进行标定。第一步从立方体中恢复相机内参数;第二步计算相机外参数,首先利用消隐点计算旋转矩阵,再图像中的任意平面图像对,计算平移向量。他们根据消隐点的属性找出了相机的内参数与消隐点之间的关系。假定摄像机无畸变且像素是正方形的,可直接由三组正交方向的消隐点标定相机内参数^[3]。He^[4-5], Gramatikopoulos^[6], Li^[7]随后在这基础上提出了利用 3 维模型标定相机的内参数和旋转矩阵的算法改进。还有一些文献提出了用二维模板进行标定,卢津等人提出了最少拍摄不同位置的三幅棋盘格图片标定相机内外参数^[8],zhao^[9]利用 4 幅 2 维模板图片完成相机自标定。Guillou^[10]和 Orghidan^[11-13]利用 2 维模板做相机标定,再利用 3 维重建进行误差分析。

以上利用消隐点标定的文献中,消隐点被认为是精确的,但是在实际测量中很难做到。特别是空间的平行直线在图像中也平行时,会出现退化现象^[14],近似平行时,消隐点误差非常大,这就限制了消隐点标定的应用。为了解决这个问题,作者提出了新的模板,在平面网格模板中,可提取出 4 对相互正交的平行线,这 4 对平行线可产生 4 对正交消隐点,这 8 个消隐点在同一条直线,其中有两对消隐点为冗余量。作者利用 8 点在同一直线作为约束,实现直线拟合,并利寻优计算提取误差最小的两对正交消隐点。在不同角度拍摄两幅图像,即可线性求解摄像机内参数和旋转矩阵,

以此为初值进行优化克获得全部参数。

2 相机内参数标定

2.1 消隐点标定模板分析

设空间共面的平行直线 L_1, L_2 与 L_3, L_4 垂直,经过投影变换,图像坐标系中对应的直线 l_1, l_2 延长线相交于消隐点 A, l_3, l_4 交于消隐点 A' 。

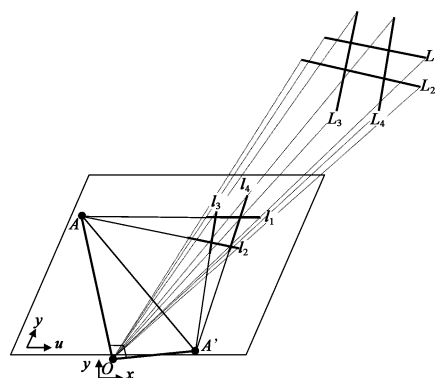


图 1 正交消隐点关系

Fig.1 Relation of orthogonal vanishing point

两消隐点在图像坐标系的坐标为: $A(u_A, v_A), A'(u_{A'}, v_{A'})$ 。在摄像机坐标系中, A, A' 点在摄像机坐标系下的坐标为:

$$A: ((u_A - u_0)d_x, (v_A - v_0)d_y, f) \quad A': ((u_{A'} - u_0)d_x, (v_{A'} - v_0)d_y, f)$$

$$A': ((u_{A'} - u_0)d_x, (v_{A'} - v_0)d_y, f)$$

设主点 O 在摄像机坐标系的坐标为 $(0, 0, 0)$ 。根据消隐点属性,空间直线 $OA \parallel L_3 \parallel L_4$, $OA' \parallel L_1 \parallel L_2$, 由于两组平行直线相互垂直,则 $OA \perp OA'$ 。为三维空间中两条互相垂直的直线, O 点在以 AA' 为直径的球面上。这两条直线形成的消隐点在摄像机坐标系下的坐标分别为 $A(x_A, y_A, f), A'(x_{A'}, y_{A'}, f)$, 有:

$$x_A x_{A'} + y_A y_{A'} + f^2 = 0, \quad (1)$$

代入 A, A' 的两点坐标,有

$$(u_A - u_0)(u_{A'} - u_0)d_x^2 + (v_A - v_0)(v_{A'} - v_0)d_y^2 + f^2 = 0. \quad (2)$$

令 $(f_x, f_y) = (f/d_x, f/d_y)$ 分别为 x 轴和 y 轴上的归一化焦距, 可得到:

$$\frac{(u_A - u_0)(u_{A'} - u_0)}{f_x^2} + \frac{(v_A - v_0)(v_{A'} - v_0)}{f_y^2} + 1 = 0. \quad (3)$$

式(3)是关于摄像机内参数 u_0, v_0, f_x, f_y 的方程, 有 4 个未知数, 若能找到 4 对相互正交的消隐点, 即可求解方程得出摄像机内参数^[15-16]。

为了提取消隐点, 靶标需要有多对平行线。设靶标为正方形网格, 如图 2 所示的大正方形, 将其中点连接可分为 4 个小正方形, 提取角点 a, b, c, d, e, f, g, h 。其中平行线 $ac \parallel hd \parallel ge$ 与平行线 $ag \parallel bf \parallel ce$ 相互垂直; 平行线 $hf \parallel ae \parallel bd$ 与平行线 $bh \parallel cg \parallel df$ 相互垂直; 平行线 $ch \parallel dg$ 与平行线 $af \parallel be$ 相互垂直; 平行线 $bg \parallel cf$ 与平行线 $ad \parallel he$ 相互垂直, 即可提取出 4 组相互垂直的平行线。

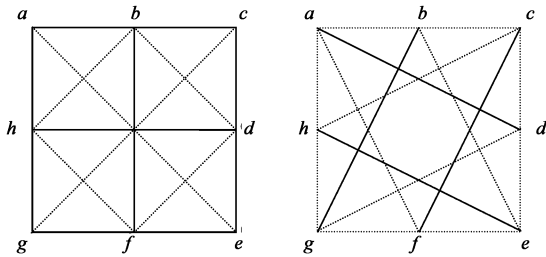


图 2 正交消隐点示意图

Fig.2 Sketch of orthogonal vanishing point

对于多条直线组成的平行直线束, 只要摄像机平面与模板平面不平行, 图像平面中的直线束必定会产生一个合理的消隐点。本文选取的模板, 利用 4 组相互正交的平行直线相交, 在图像上产生 4 对消隐点。根据消隐点属性可知, 这四对消隐点在图像平面中共线, 且光心在以 AA', BB', CC' 和 DD' 为直径的球体交点处。可绘制 4 对消隐点 $A, A', B, B', C, C', D, D'$, 如图 3 所示。

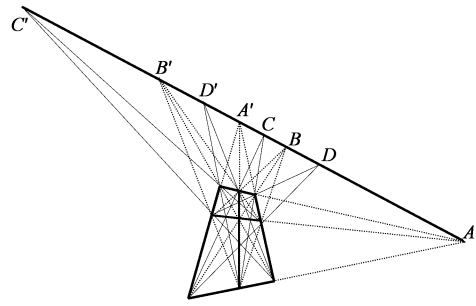


图 3 共线消隐点示意图

Fig.3 Collinear vanishing point diagram

由于平行于非成像平面的同一平面的直线形成的所有消隐点共线, 即 AA', BB', CC' 和 DD' 都在同一条直线上。通过这一原理, 可以利用这个约束判定消隐点是否合理, 并且继续优化消隐点坐标。

从空间几何关系上解释, 光心 O 在以 AA', BB', CC' 和 DD' 为直径的球上, 即空间平面上有 $OA \perp OA', OB \perp OB', OC \perp OC', OD \perp OD'$ 。求得四个球体的交点即可计算光心 O , 获取内部参数。但 4 个球体共轴, 四个球的相交部分并不为一个点, 而是任意两个球相交的圆形平面。该平面垂直于图像平面, 以 O 点到直线 AC' 的垂心 O' 为圆心, OO' 为半径。为了标定相机内参数 f_x, f_y, u_0, v_0 , 就需要将模板任意改变位置, 拍摄至少两副图像, 提取不在一条直线上的两组正交消隐点, 即可线形计算得到内参数中的焦距和主点。

2.2 内参数线形计算

公式(3)是关于摄像机内参数 u_0, v_0, f_x, f_y 的非线性方程, 为了简化计算, 对其作线性化处理。采集两幅图像, 令第一幅图像中的正交消隐点为 $A_1(u_{A1}, v_{A1}), A_1'(u_{A1'}, v_{A1'})$, 第二幅图像中正交消隐点为 $A_2(u_{A2}, v_{A2}), A_2'(u_{A2'}, v_{A2'})$, 这两对正交消隐点代入公式(3)并相减, 可得:

$$\begin{aligned} (u_{A2} + u_{A2'} - u_{A1} - u_{A1'}) \frac{u_0}{f_x^2} + (v_{A2} + v_{A2'} - v_{A1} - v_{A1'}) \frac{v_0}{f_y^2} + (u_{A1}u_{A1'} - u_{A2}u_{A2'}) \frac{1}{f_x^2} + \\ (v_{A1}v_{A1'} - v_{A2}v_{A2'}) \frac{1}{f_y^2} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

代入两幅图像中各自提取的 2 对正交消隐点 A_1, A_1', B_1, B_1' 和 A_2, A_2', B_2, B_2' , 这 2 对正交

消隐点交叉相减,构建矩阵 $\mathbf{A}$ 和向量 $\mathbf{X}$,求解线性方程组 $\mathbf{AX}=\mathbf{0}$ 。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_{A2} + u_{A2'} - u_{A1} - u_{A1'} & v_{A2} + v_{A2'} - v_{A1} - v_{A1'} & u_{A1}u_{A1'} - u_{A2}u_{A2'} & v_{A1}v_{A1'} - v_{A2}v_{A2'} \\ u_{A2} + u_{A2'} - u_{B1} - u_{B1'} & v_{A2} + v_{A2'} - v_{B1} - v_{B1'} & u_{B1}u_{B1'} - u_{A2}u_{A2'} & v_{B1}v_{B1'} - v_{A2}v_{A2'} \\ u_{B2} + u_{B2'} - u_{A1} - u_{A1'} & v_{B2} + v_{B2'} - v_{A1} - v_{A1'} & u_{A1}u_{A1'} - u_{B2}u_{B2'} & v_{A1}v_{A1'} - v_{B2}v_{B2'} \\ u_{B2} + u_{B2'} - u_{B1} - u_{B1'} & v_{B2} + v_{B2'} - v_{B1} - v_{B1'} & u_{B1}u_{B1'} - u_{B2}u_{B2'} & v_{B1}v_{B1'} - v_{B2}v_{B2'} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \frac{u_0}{f_x^2} & \frac{v_0}{f_y^2} & \frac{1}{f_x^2} & \frac{1}{f_y^2} \end{bmatrix}^T$$

利用该方程可用来求解内参数。若相减的两对消隐点在同一幅图像中,这四点共线,矩阵 $\mathbf{A}$ 的行列式为零,该矩阵可用来约束消隐点的准确性。对方程(4)稍作变形,取 $x_1 = u_0, x_2 = v_0 f_x^2 / f_y^2, x_3 = f_x^2 / f_y^2$, 则

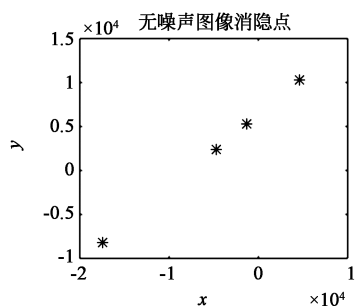
$$\begin{aligned} & (u_{A2} + u_{A2'} - u_{A1} - u_{A1'})x_1 + \\ & (v_{A2} + v_{A2'} - v_{A1} - v_{A1'})x_2 + \\ & (u_{A1}u_{A1'} - u_{A2}u_{A2'})x_3 = \\ & v_{A2}v_{A2'} - v_{A1}v_{A1'} \end{aligned} \quad (5)$$

任取矩阵 $\mathbf{A}$ 中的三行代入方程,可解得 x_1, x_2, x_3 , 求出 $u_0, v_0, f_x^2 / f_y^2$ [16], 代入方程(4), 可解得 f_x, f_y 。

2.3 消隐点优化

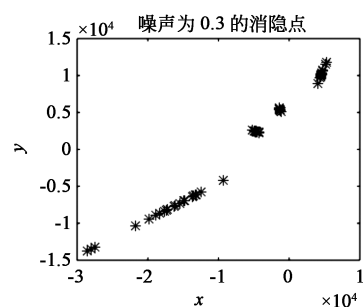
随着消隐点噪声的增大,内参数误差随之增加,在精度要求不高的场合,可利用该方法线形求解相机内参数。但在图像中加入噪声信息时,消隐点会产生较大偏差,模拟的网格图中,7条直线会产生不同的21个消隐点。在第一幅图像中加入0.3像素的随机噪声,其中两个方向的消隐点如图4所示。

由图4可见噪声会对消隐点产生较大影响,如何减小消隐点误差是本节的关键。在无噪声



(a) 无噪声图像消隐点

(a) Noise-free vanishing points



(b) 噪声为 0.3 pixel 的消隐点

(b) Vanishing points with noise

图4 有噪声和无噪声图像消隐点

Fig.4 Vanishing point of noise and noise free image

时,多条直线汇聚为一点,该点到直线距离和为零。加入噪声后,每个消隐点到直线距离和都不可能为零,作者利用消隐点到直线距离和最短作为约束,进行消隐点寻优。将所有消隐点取平均,作为消隐点寻优的初值,在消隐点最小值到最大值坐标范围内利用 Levenberg-Marquardt 算法寻优。

令一条直线方程为 $y = kx + b$, 点 (x_1, y_1) 到直线间距离为 $d = \frac{|y_1 - kx_1 - b|}{\sqrt{1 + k^2}}$, n 条直线, 构建目标函数为点到 n 条直线的距离和:

$$F = \min \left(\sum_{i=1}^n \frac{|y - kx - b|}{\sqrt{1 + k^2}} \right) \quad (6)$$

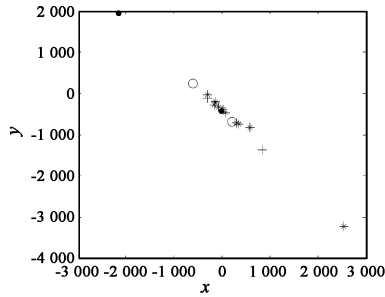
具体的算法步骤如下:

- (1) 读取网格图像并检测角点;
- (2) 由对应点求出同一方向的平行直线,对每条直线,利用最小二乘法拟合得到 n 条直线方程;
- (3) 每两条直线交点为消隐点,共得到 $n(n-1)/2$ 个消隐点;
- (4) 对所有消隐点求平均,该平均值为初值,

利用式(6)为目标函数,利用 Levenberg-Marquardt 算法寻优;

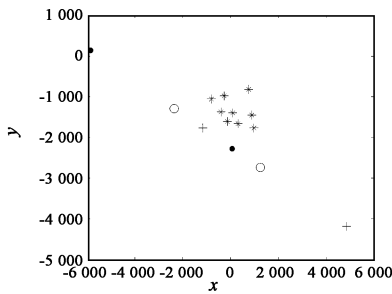
(5)获得每组直线对应的最优消隐点。

利用该方法,对两幅噪声为 0.3 pixel 的图像消隐点寻优,可得到如图 5 所示的消隐点最优结果。图像中红色“*”号为原始消隐点,蓝色“△”为最佳消隐点。对图像做 100 次仿真实验,得到消隐点平均误差为 2.193 pixel。



(a) 图像 1 消隐点

(a) Result of the image 1



(b) 图像 2 消隐点

(b) Result of the image 2

图 5 消隐点寻优结果

Fig.5 Vanishing point search results

3 非量测方法的畸变校正

上述标定过程,没有考虑畸变的影响,且选择的图片较为理想。实际使用的摄像机镜头在远离图像中心处时会产生一定的几何畸变,需要进行畸变校正。在理想摄像机线形参数成像模型中,

空间直线成像后仍为直线。镜头畸变中加入非线性因素,直线畸变后会有一定的弧度,不再为直线。摄像机镜头畸变主要包括径向畸变和切向畸变。实际应用中,径向畸变远大于切向畸变,本文中只考虑二阶径向畸变。

设径向畸变系数为 k_1, k_2 , 可得畸变模型:

$$\begin{cases} u_d = (u_u - u_0)(1 + k_1 r_u^2 + k_2 r_u^4) + u_0 \\ v_d = (v_u - v_0)(1 + k_1 r_u^2 + k_2 r_u^4) + v_0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: (u_d, v_d) 为畸变校正后图像坐标,即理想线形参数模型下的图像坐标。 (u_u, v_u) 为测得有畸变的图像坐标, r_u 为图像点离主点的距离, k_1, k_2 为径向畸变系数。目前,摄像机标定中的镜头畸变参数确定主要有两类方法。一类是摄像机内外参数同步标定的方法,与内参数同时优化;另一类是不依赖于标定摄像机内外参数的方法,这类方法中不用先标定摄像机的内外参数,直接根据透视投影不变性,即直线或同心圆等几何图形投影后某些参数的不变性来求解镜头的畸变系数^[17-18]。

作者融合以上两类方法的特点,利用初步标定的内参数,根据“空间直线经过透视模型的相机投影,在图像平面上仍是直线”的基本准则和同一平面消隐点共线的原理,提出一种基于共线特征点的像机畸变校正算法。

平面靶标提取的角点在同一行或同一列的,满足共线的原则。本文利用直线上不同点相减得到的向量外积之模最小值作为约束,构建目标函数。测得的角点变为行和列的矩阵,直线上 i 行 j 列处的角点像素坐标为 $(u_{i,j}, v_{i,j})$, 同一行上另外两点坐标为 $(u_{i,m}, v_{i,m})$ 和 $(u_{i,n}, v_{i,n})$, $j \neq m \neq n$, 可得到两个向量 $A = [u_{i,j} - u_{i,m}, v_{i,j} - v_{i,m}]$ 和 $B = [u_{i,j} - u_{i,n}, v_{i,j} - v_{i,n}]$, 则有: $|A \times B| = |(u_{i,j} - u_{i,m})(v_{i,j} - v_{i,n}) - (u_{i,j} - u_{i,n})(v_{i,j} - v_{i,m})| = 0$

根据模板,将角点坐标变形为 $M \times N$ 的矩阵,可以构建向量和约束函数为:

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |(u_{i,j} - u_{i,m})(v_{i,j} - v_{i,n}) - (u_{i,j} - u_{i,n})(v_{i,j} - v_{i,m})| + \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |(u_{m,j} - u_{i,j})(v_{n,j} - v_{i,j}) - (u_{n,j} - u_{i,j})(v_{m,j} - v_{i,j})|. \quad (8)$$

根据畸变模型,畸变中心为相机主点 (u_0, v_0) 。设 (u, v) 为无畸变的像素坐标, (u_d, v_d) 为实际测得有畸变的像素坐标,根据投影关系,其对应的图像坐标分别为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = k^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = k^{-1} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

对应的半径为:

$$r^2 = x^2 + y^2, r_d^2 = x_d^2 + y_d^2. \quad (10)$$

径向畸变可描述为:

$$r_d = rf(r) = r(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots), \quad (11)$$

式中: $k_1, k_2, k_3, \dots$ 为 1, 2, 3, ... 阶畸变系数,作者在本文中取 2 阶畸变,则有:

$$\begin{cases} u_d = u + (u - u_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \\ v_d = v + (v - v_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \end{cases}. \quad (12)$$

由于角点坐标为畸变后坐标,计算向量和 F 时,需要带入畸变校正后的角点坐标。首先根据内参数 k 和 (u_d, v_d) 计算 r_d ,再利用公式(11)和预估的 k_1, k_2 求解 r_d 附近的正实数值 r ,可得 $f(r)$,利用公式(12)反算出畸变校正后像素坐标 (u, v) ,并用 (u, v) 计算同一直线任意两点间向量和 F 。

以上分析可见,利用消隐点的非量测方法计算内参数和畸变系数有较高的精度,在某一个参数无误差时,另一个参数很容易确定。但内参数和畸变系数互相制约,利用差分进化算法求解全局最优值即可寻优得到所有内参数。

4 双目摄像机外参数标定

摄像机外参数的标定即要确定世界坐标系与相机坐标系间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。

相机坐标系设定为世界坐标系时,旋转矩阵取决于标定板相对于相机坐标系三轴的旋转角度。设标定板中角点直线如图 1 所示的方向, L_1, L_2 方向为 X 轴,则 L_3, L_4 为 Y 轴,由于 $OA \parallel L_1, OA' \parallel L_3$,可见 OA 和 OA' 与 X 轴和 Y 轴平行,根据 OA 和 OA' 稍作变化即可得旋转矩阵。

消隐点 A, A' 在图像坐标系中坐标为 $(u_A, v_A), (u_{A'}, v_{A'})$,转换为相机坐标系,以光

心 O 为原点。

$$OA = [(u_A - u_0)d_x, (v_A - v_0)d_y, f],$$

$$OA' = [(u_{A'} - u_0)d_x, (v_{A'} - v_0)d_y, f].$$

为了将其转换为已知的内参数形式,两个向量都除 d_x ,可以写为:

$$OA = [(u_A - u_0), (v_A - v_0)\frac{f_x}{f_y}, f_x];$$

$$OA' = [(u_{A'} - u_0), (v_{A'} - v_0)\frac{f_x}{f_y}, f_x].$$

这两个向量即为 X 轴和 Y 轴的方向向量, Z 轴的方向向量可由这两个向量直接计算为 $OA \times OA'$ 。对这 3 个向量进行归一化后得到旋转矩阵。令 OA 为 X 轴, OA' 为 Y 轴,可直接写出 3×3 的旋转矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} \frac{OA}{|OA|} \\ \frac{OA'}{|OA'|} \\ \frac{OA \times OA'}{|OA \times OA'|} \end{bmatrix} = [R_1 \ R_2 \ R_3], \quad (13)$$

若已知标定模板的实际坐标,可计算平移矩阵。

5 实验及结果分析

5.1 模拟标定实验

标定板采用图 1 所示的方形棋盘格,每格边长为 80 cm,采用两组该标定板的二维角点进行模拟实验。令标定板所在平面为世界坐标系上轴为 0 的平面,右摄像机绕左摄像机 X, Y, Z 轴旋转角度分别为 $20^\circ, 15^\circ, 45^\circ$,平移矩阵为 $t = [10 \text{ cm}, 0 \text{ cm}, 0 \text{ cm}]^T$ 。并设左右模拟摄像机的内参数为: $u_0 = 80 \text{ pixel}, v_0 = 80 \text{ pixel}, f_x = 500 \text{ pixel}, f_y = 550 \text{ pixel}$,畸变系数 $k_1 = 0.01, k_2 = -0.02$ 。设为标定板第一次绕左摄像机 X, Y, Z 轴旋转角度分别为 $-45^\circ, -60^\circ, -50^\circ$,即左摄像机相对于世界坐标系三轴旋转角度为 $45^\circ, 60^\circ, 50^\circ$,左摄像机相对于标定板,即世界坐标系三轴的平移矩阵为 $t_1 = [30 \text{ cm}, 40 \text{ cm}, 30 \text{ cm}]^T$;第二次左摄像机分别绕世界坐标是 X, Y, Z 轴旋转角度分别为 $60^\circ, 35^\circ, -15^\circ$,平移矩阵为 $t_2 = [40 \text{ cm}, 40 \text{ cm}, 35 \text{ cm}]^T$ 。

利用图 1 的模型,可得到角点坐标和消隐点坐标如图 6 所示。

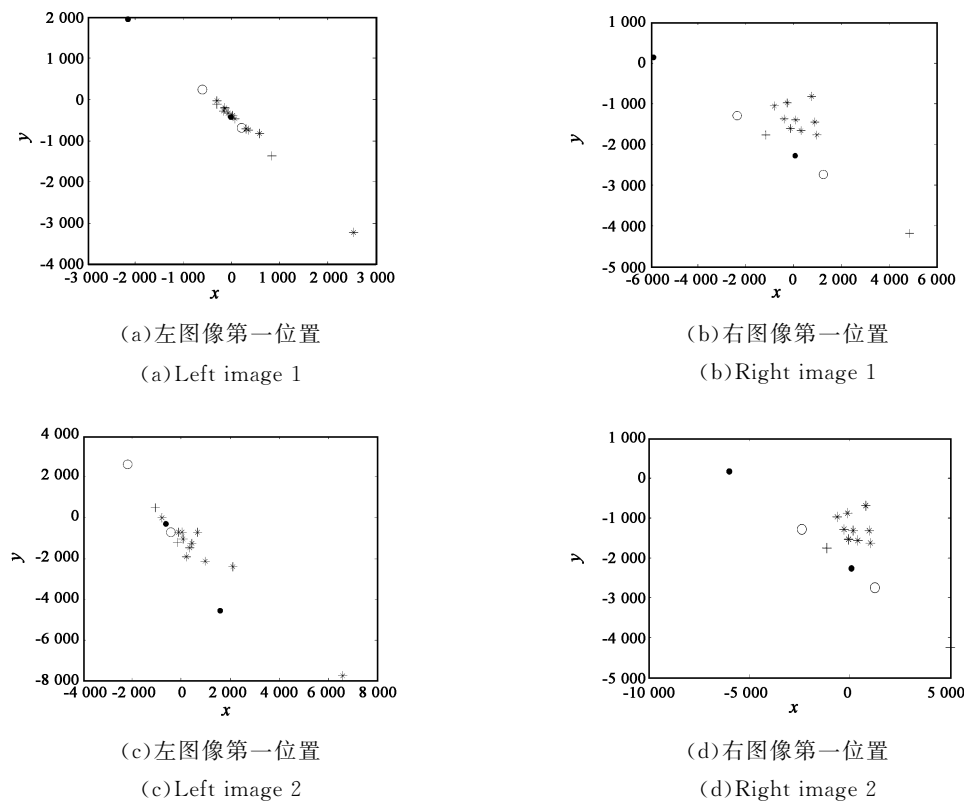


图 6 角点坐标和消隐点坐标
Fig.6 Coordinates of corner points and vanishing points

利用优化差分进化算法,设置种群数为 30,交叉率 0.7,变异率 0.85 进行全局寻优,运算结果如表 1。

表 1 标定结果
Tab.1 Calibration result

相机	内参数标定				旋转矩阵
	u_0	v_0	f_x	f_y	
左	79.96	80.14	500.15	500.07	$R = \begin{bmatrix} 0.4309 & -0.8980 & 0.0885 \\ 0.8837 & 0.3999 & -0.2432 \\ 0.1830 & 0.1830 & 0.9659 \end{bmatrix}$
右	79.92	80.12	500.49	500.33	

5.2 现场标定板实验

作者采用两台性能相同的逐行扫描 CCD 摄像机组成双目视觉传感器,实际应用中的双目视觉传感器位置固定,可任意旋转,如图 7 所示。选用两台中国大恒集团有限公司的 DH-SV2001GC 摄像机和两个日本 Kowa 公司生产的手动调焦镜头,二维标定靶标为角点 7×7 的方形棋盘格靶标,先用激光打印机打印,粘贴于硬纸板上。

由于标定板是工作人员手持,而左、右相机在时间拍摄上不能完全同步,拍摄时刻人的晃动会造成左右图像有较大误差。利用 Matlab 工具箱进行双目标定时,单个摄像机标定有较高的精度,双目标定时由于有拍摄间隔的晃动引起的误差,相机内外参数都出现较大误差,对误差大的图像对进行剔除,得到标定结果如表 2 所示。工具箱单独标定时两相机平均重构误差为 0.365 pixel,

双目标定后的内参数发生较大变化,平均重构误差为 0.769 pixel。本文的方法分两步进行标定,先进行左右相机的内参数各标定,再依据内参数

进行外参数的标定,双目标定的平均重构误差为 0.598 pixel,与传统的标定方法重构误差数量级相同。

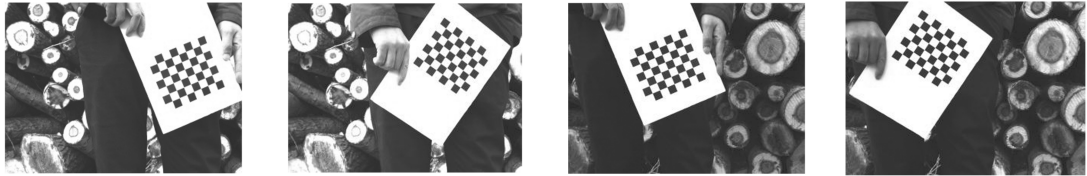


图 7 标定图像
Fig.7 Calibration image

表 2 标定结果对比

Tab.2 Comparison of calibration results

Matlab 工具箱标定结果		本文标定结果	
左相机 内参数	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1692.409 & 0 & 780.4518 \\ 0 & 1692.436 & 518.787 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\mathbf{k} = [-0.155 \quad 0.421]$	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1700.260 & 0 & 760.452 \\ 0 & 1700.816 & 534.565 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\mathbf{k} = [0.057 \quad -0.304]$	
右相机 内参数	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1659.081 & 0 & 832.366 \\ 0 & 1661.114 & 530.950 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\mathbf{k} = [-0.152 \quad -0.257]$	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1680.226 & 0 & 855.048 \\ 0 & 1683.309 & 545.206 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\mathbf{k} = [0.025 \quad -0.053]$	
旋转矩阵	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.999 & -0.003 & -0.026 \\ 0.012 & 0.993 & 0.031 \\ 0.024 & -0.031 & 0.993 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.997 & -0.002 & -0.064 \\ 0.007 & 0.996 & 0.086 \\ 0.064 & -0.087 & 0.994 \end{bmatrix}$	
平移矩阵	$\mathbf{T} = [-212.449 \quad 20.481 \quad -23.474]$	$\mathbf{T} = [-217.480 \quad 21.354 \quad -21.409]$	

6 结 论

本文提出的双正交消隐点标定方法,在基线距离确定时,可用非量测信息完成内参数和旋转矩阵的标定,不借助于有精确位置的标定板。该方法对实验环境要求低,且正交消隐点的模板在

建筑物中随处可见。多消隐点的模型成功避免了其退化情形,不需要对图像作额外的预处理,利用角点就可达到求解最佳消隐点的目的,确保了内部参数的精度。实验结果表明,该方法在现场标定时,平均重构误差为双目标定的平均重构误差为 0.598 pixel,保证了标定精度,具有较高的可靠性和较强的适应性。

参 考 文 献:

[1] 杨景豪,刘巍,刘阳,等.双目立体视觉测量系统的标定[J].光学 精密工程,2016,24(2):300-308.
YANG J H, LIU W, LIU Y, et al. Calibration of binocular vision measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 300-308. (in Chinese)

[2] 孙军华,吴子彦,刘谦哲,等.大视场双目视觉传感器的现场标定[J].光学 精密工程,2009,17(3):633-640.

- SUN J H, WU Z Y, LIU Q Z, *et al.* Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 633-640. (in Chinese)
- [3] CAPRILE B, TORRE V. Using vanishing points for camera calibration[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1990, 4(2): 127-139.
- [4] HE B W, ZHOU X L, LI Y F. A new camera calibration method from vanishing points in a vision system[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2011, 33(7): 806-822.
- [5] HE B W, LI Y F. Camera calibration from vanishing points in a vision system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(3): 555-561.
- [6] GRAMMATIKOPOULOS L, KARRAS G, PETSA E. An automatic approach for camera calibration from vanishing points[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(1): 64-76.
- [7] LI C, ZHAO Y. Camera self-calibration method by using three orthogonal vanishing points[J]. *AISS (Advances in Information Sciences and Service Sciences)*, 2011, 3(8): 45-52.
- [8] 卢津, 孙惠斌, 常智勇. 新型正交消隐点的摄像机标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0208001.
- LUJ, SUN H B, CHANG Z Y. A novel method for camera calibration with orthogonal vanishing points[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0208001. (in Chinese)
- [9] DUAN S L, ZANG H P, XU M M, *et al.* Camera self-calibration method based on two vanishing points[C]// *Proceedings of SPIE 9675, AOPC 2015: Image Processing and Analysis*, Beijing, China: SPIE, 2015.
- [10] GUILLOU E, MENEVEAUX D, MAISEL E, *et al.* Using vanishing points for camera calibration and coarse 3D reconstruction from a single image[J]. *The Visual Computer*, 2000, 16(7): 396-410.
- [11] ORGHIDAN R, SALVI J, GORDAN M, *et al.* Structured light self-calibration with vanishing points[J]. *Machine Vision and Applications*, 2014, 25(2): 489-500.
- [12] ORGHIDAN R, SALVI J, GORDAN M, *et al.* Camera calibration using two or three vanishing points[C]// *Proceedings of Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Wroclaw: IEEE, 2012: 123-130.
- [13] ORGHIDAN R, GORDAN C M, VLAICU D A, *et al.* Projector-camera calibration for 3D reconstruction using vanishing points[C]// *Proceedings of International Conference on 3D Imaging*, Liège, Belgium: IEEE, 2012: 1-6.
- [14] ZHENG Y, HE Z Y, YANG W G, *et al.* An efficient and practical calibration method for roadside camera using two vanishing points[J]. *International Journal of Nursing Studies*, 2014, 21(3): 183-192.
- [15] 洪洋, 孙秀霞, 蔡鸣, 等. 基于正交消隐点无穷单应的摄像机内参数自标定方法[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1208001.
- HONG Y, SUN X X, CAI M, *et al.* An intrinsic parameters self-calibration technique based on infinite homography between orthogonal vanishing points[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1208001. (in Chinese)
- [16] 霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 465-472.
- HUO J, YANG W, YANG M. A Self-Calibration Technique Based on the Geometry Property of the Vanish Point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 465-472. (in Chinese)
- [17] 贺俊吉, 张广军, 杨宪铭. 基于交比不变性的镜头畸变参数标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 597-599.
- HE J J, ZHANG G J, YANG X M. Approach for calibration of lens distortion based on cross ratio invariability[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(5): 597-599. (in Chinese)
- [18] 赵振庆, 叶东, 吴斌, 等. 消隐点共线约束逐点畸变校正算法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1196-1204.
- ZHAO Z Q, YE D, WU B, *et al.* Point wise distortion correction algorithm with vanishing point collinear constraint[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1196-1204. (in Chinese)

作者简介: 赵亚凤(1980—), 女, 湖北公安人, 博士, 讲师, 分别于 2006 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 2016 年获得东北林业大学博士学位, 主要研究方向为机器视觉及模式识别。E-mail: nefuzyf@126.com

胡峻峰(1980—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 讲师, 分别于 2008, 2015 年获得东北林业大学硕士、博士学位。主要研究方向为图像处理、智能控制和机器视觉。E-mail: heaven_pro@163.com