

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.03.010

系统标定中的透视投影模型

钟韬, 袁威, 左炜亮

(西安交通大学 自动化系, 西安 710049)

摘要: 以相机的透视投影模型为基础, 根据椭圆拟合与投影变换, 建立使用特定靶标计算两相机相对位置的标定模型。分析在不同坐标系下物点与像点的坐标转换关系, 分别通过椭圆拟合模型和精确模型, 提出求解空间圆的圆心在像平面上的像坐标的算法, 并对精度和稳定性进行检验与分析。分析结果表明, 椭圆拟合模型求解较简单、方便; 基于透视投影变换规律的精度模型结果较精确, 但需给出较多的相机外部参数。

关键词: 系统标定; 透视投影模型; 椭圆拟合; 畸变误差

中图分类号: O241.1; N945.12 **文献标志码:** A

Perspective Projection Model in System Calibration Process

Zhong Tao, Yuan Wei, Zuo Weiliang

(Dept. of Automation, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the ellipse-simulation and projective transform, projective relation about center of certain circle is set up for calibrating the relative position of two cameras, based on the perspective projection model of camera. The transform between object point and image point under different reference frames is analyzed. Based on the ellipse-simulation model and precise model, the method to get the image point of a circle's center is put forward and its precision is checked. The analysis result shows that ellipse-simulation model is simple but convenient, and the precise model is more precise with more parameters from the camera.

Keywords: calibration; perspective projection model; ellipse-simulation; aberrational error

0 引言

数码相机定位是指用数码相机摄制物体的相片来确定物体表面某些特征点的位置。精确确定 2 部相机的相对位置的过程就是系统标定。系统标定的常见做法是在一块平板上画若干个圆, 同时用 2 部相机照相, 得到这些点在像平面上的像点, 利用这 2 组像点的几何关系得到这 2 部相机的相对位置。由于无法直接得到没有几何尺寸的“点”, 实际做法是在物平面上画若干个圆(称为靶标), 它们的圆心就是几何的点。而它们的像一般会变形, 故必须从像中精确地找到成像圆圆心的像, 以实现标定。笔者建立使用特定靶标计算两相机相对位置的 2 种标定模型, 对模型进行求解和分析。

1 靶标的设立

设计靶标如下: 取 1 个边长为 100 mm 的正方形, 分别以 4 个顶点(对应为 A、C、D、E)为圆心, 12 mm 为半径作圆。以 AC 边上距离 A 点 30 mm 处的 B 为圆心, 12 mm 为半径作圆, 如图 1。

该靶标的基本思想是通过圆 A、C、E、D 确定平面, 圆 B 可作为检验。在实际应用中也可根据需要采用其它靶标实现标定。

用一位置固定的数码相机摄得其像, 建立数学模型。确定像中各圆心在该相机像平面的像坐标; 对由图 1 给出的靶标及其像, 计算靶标上圆的圆心在像平面上的像坐标; 通过所得坐标即可建立数学模型。

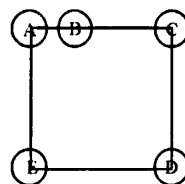


图 1 靶标示意图

在不严重影响准确度的情况下, 可作如下假设: 数码相机的成像原理符合透视投影相机模型; 不考虑实际相机成像的正/负失真, 即不考虑图像坐标系中各坐标轴不正交的情况。

2 模型的建立

2.1 相机的透视投影模型^[1]

常见相机的透视投影模型是针孔成像模型, 即线性相机模型。空间中任何一点 P 在图像中的成像位置可以用针孔成像模型近似表示。

设 P 在图像中的投影位置为 p, p 为光心 O 与

收稿日期: 2010-10-30; 修回日期: 2010-12-13

作者简介: 钟韬(1987—), 男, 福建人, 学士, 从事系统工程研究。

P 点的连线 OP 与图像平面的交点。这种关系也称为中心射影或透视投影摄影。比例关系如下:

$$X = \frac{fx}{z}, Y = \frac{fy}{z} \quad (1)$$

其中, (X,Y) 为 p 点的图像坐标; (x,y,z) 为空间点 P 在相机坐标系下的坐标; f 为 xy 平面与图像平面之间的距离, 即相机的焦距。用齐次坐标和矩阵表示上述透视投影关系如下:

$$s \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = P_r \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, s 为一比例因子; P_r 为透视投影矩阵。而以世界坐标系表示的 P 点坐标与其投影点 p 的坐标 (u,v) 的关系如下:

$$s \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & \vec{r} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & \vec{r} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 X_w = M X_w \quad (3)$$

其中, $\alpha_x = f/dX$ 为 u 轴上尺度因子, 或称 u 轴上归一化焦距; $\alpha_y = f/dY$ 为 v 轴上尺度因子, 或称 v 轴上归一化及焦距; M 为 3×3 矩阵, 称为投影矩阵; M_1 由 α_x 、 α_y 、 u_0 、 v_0 决定, 由于 α_x 、 α_y 、 u_0 、 v_0 只与相机内部参数有关, 这些参数为相机内部参数; M_2 由相机相对于世界坐标系的方位决定, 为相机外部参数。

2.2 靶标上圆心在相机像平面像坐标的求解

2.2.1 椭圆拟合模型 (模型 1)

根据透视投影变换所固有的性质, 靶标上的圆在相机像平面上所成的像一般为椭圆^[2]。

椭圆拟合是指在像平面上对圆投影形成的椭圆的像进行拟合, 可将椭圆图像的中心作为空间圆的圆心对应的像点^[1]。问题可转化为求解像平面中椭圆的中心。

利用线性最小二乘模型, 椭圆可以用一般的圆锥曲线方程表示如下:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (4)$$

另外一种更直观的方式是用几何参数, 即中心位置 (x_c, y_c) 、长轴和短轴 (a,b)、长轴的转角 θ 。

由下面的公式在 2 种参数表示方法之间进行转换:

$$x_c = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}, y_c = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \quad (5)$$

$$\{a, b\} = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A+C + \sqrt{B^2 + (\frac{A-C}{F})^2}}} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B}{A-C} \quad (7)$$

在使用最小二乘法计算椭圆时, 求其代数参数是非常方便的, 而在挑选合适的椭圆进行拟合时, 使用几何参数更为方便和自然。

平面内某点 (x_0, y_0) 到以方程 $f(x,y)=0$ 所代表曲线的代数方程的代数距离是 $f(x_0, y_0)$ 。以下是以代数方程距离作为距离度量的最小二乘法。

对一般形式的椭圆方程, 可增加约束 $A+C=1$ 。则目标函数 $f(B,C,D,E,F)$ 为:

$$\sum_i^n (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2 \quad (8)$$

极小化目标函数, 即可得到系数。由极值原理, 欲使 $f(B,C,D,E,F)$ 值最小, 则:

$$\frac{\partial f}{\partial B} = \frac{\partial f}{\partial C} = \frac{\partial f}{\partial D} = \frac{\partial f}{\partial E} = \frac{\partial f}{\partial F} = 0 \quad (9)$$

由此可得一个线性方程组, 即可建立线性最小二乘模型。求取的椭圆图像的中心点即作为空间圆圆心在该相机像平面的近似像坐标。

2.2.2 基于透视投影变换规律的精确模型 (模型 2)

为准确获取空间圆的圆心, 模型 1 中的方法只是一种近似, 由于透视投影变换所固有的特性, 只有在空间圆截面与相机像平面平行时, 这种处理方法才是准确的。在大多数情形下, 存在一定的偏差, 称为畸变误差。如果在实际应用中直接用像平面上拟合得到的椭圆的中心像点代替空间椭圆中心的实际像点, 必然在测量中引入误差^[3], 如图 2。根据透视投影变换的规律以及空间椭圆中心在相机像平面上的畸变误差模型^[1]建立了一种能精确提取空间圆心图像位置的模型。

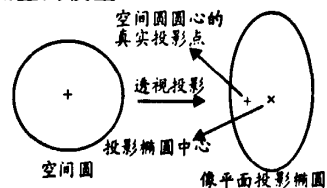


图 2 圆心透视投影示意图^[1]

1) 空间圆的透视投影变换

O 为相机的光心, O_1 为空间圆的中心。 $O-xyz$ 为相机坐标系, $O'-x'y'z'$ 为新建坐标系, 称为空间圆坐标系, 其坐标原点 O' 与 O 重合, z' 轴的正向指向正交于空间圆 $O_1-A_1B_1C_1D_1$ 所在平面, 即为其法线方向。 h 为相机像平面, 与 z 轴正交。 如图 3。

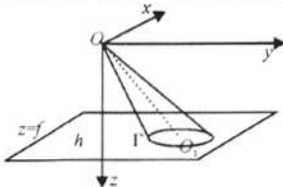


图 3 相机坐标系的圆投影

设 O_1 在 $O'-x'y'z'$ 中的坐标为 $(x'_{eo}, y'_{eo}, z'_{eo})$, 矢量 $\vec{OO_1}$ 在 $O'-x'y'z'$ 坐标系中的方向角分别为 α, β, γ , 如图 4。

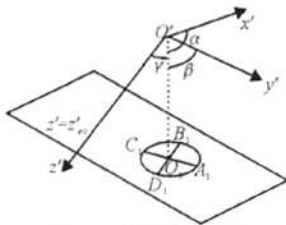


图 4 空间圆坐标系

由于 O' 与 O 重合, 即坐标系 $O-xyz$ 与坐标系 $O'-x'y'z'$ 之间只存在旋转关系。 根据相机针孔成像模型, 三维平移向量 \vec{t} 为零, 有:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $r_1 \sim r_9$ 为旋转矩阵系数。

2) 空间圆的圆心在相机像平面的实际投影坐标空间圆 $O_1-A_1B_1C_1D_1$ 的圆心 O_1 在像平面 h 上的投影点的坐标, 可以利用直线 OO_1 与像平面 h 的交点来求取。

结合式 (10), 有空圆解析几何的知识得到直线 OO_1 在坐标系 $O-xyz$ 下的方程为:

$$\frac{r_1 x + r_2 y + r_3 z}{\cos \alpha} = \frac{r_4 x + r_5 y + r_6 z}{\cos \beta} = \frac{r_7 x + r_8 y + r_9 z}{\cos \gamma} \quad (11)$$

直线 OO_1 与像平面 $h: z=f$ 代入式 (5), 得到 O_1 点的投影像点的坐标 (a', b') 的表达式为:

$$a' = \frac{q_1 l_1 - m_1 p_1}{k_1 p_1 - n_1 l_1}, b' = \frac{m_1 n_1 - k_1 q_1}{k_1 p_1 - n_1 l_1} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} k_1 &= r_1 \cos \gamma - r_7 \cos \alpha, l_1 = r_2 \cos \gamma - r_8 \cos \alpha \\ m_1 &= (r_3 \cos \gamma - r_9 \cos \alpha) f, n_1 = r_4 \cos \gamma - r_5 \cos \beta \\ p_1 &= r_5 \cos \gamma - r_8 \cos \beta, q_1 = (r_6 \cos \gamma - r_9 \cos \beta) f \end{aligned}$$

3 模型的求解

3.1 图像处理及相关算法

将靶标的像转换为一幅深度为 1 的位图, 即可简便地实现图像的边缘检测, 由实际所得可见, 结果保持有很高的检测精度。 设实际拍摄所得图像如图 5。 该相机的像距是 1 577 像素, 相机分辨率为 1 024×768 像素。

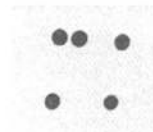


图 5 靶标的像

由于处理后图像 (1 024×768 的点阵) 中各点是相互离散的, 严格来说并不存在图形的切线、公切线等, 因此在实际操作中使用下述算法进行处理:

1) 切线的搜索算法

首先, 扫描图像矩阵, 分别记录下图像中各椭圆圆形的边界的点的坐标。

以过点 A 作圆 C 的像的切线为例, 在圆 C 的像的边界上取一点 C_0 , 连接 AC_0 得直线 L_0 , 设其方程 $f(x, y, z)=0$ 。 在边界上任取一异于 C_0 的点 $C_1(x_1, y_1, z_1)$, 遍历边界上的点 (C_0, C_1 除外), 若存在点 $C_i(x_i, y_i, z_i)$ 使得 $f(x, y, z) \times f(x_i, y_i, z_i) < 0$, 则 L_0 为过圆 C 的割线, 则再取圆 C 上一点重复以上判断过程; 否则, 即边界上其余的所有点都满足 $f(x, y, z) \times f(x_i, y_i, z_i) \geq 0$, 此时像的边界上的所有点 (即像上所有的点) 都在 C_0 的一侧, 此 L_0 即为所求切线。

2) 两曲线公切线的搜索算法

由于公切线可由过特定点的切线唯一表征, 给出了一种无限逼近搜索两曲线公切线切点的算法如图 6。

① 在实际公切线切点附近任取一初始点 A_{10} 。 如图 6, 以圆 A 与圆 C 的像上端的公切线为例, 不妨取圆 A 像的最上端的边界点为初始点, 调用过某一点切线的搜索算法, 过该点向另一条曲线 (即圆 C 的像) 作外切线, 设切点为 C_{10} ;

② 调用过某一点切线的搜索算法, 以 C_{10} 为初始点, 向原曲线做外切线, 记切点为 A_{11} ;

③ 令 $A_{10} = A_{11}$, 反复执行(1)、(2), A_{10} 与 C_{10} 将逐步逼近且稳定在公切线切点处, A_{10} 与 C_{10} 所在的直线即逼近并稳定在所求公切线。

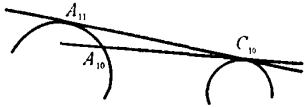


图6 两曲线公切线的搜索算法的原理图

3.2 模型1的求解算法

椭圆拟合模型的求解算法在模型的建立中已得到体现, 通过 Matlab 等软件函数可以容易地求解该线性最小二乘拟合问题, 继而利用式(4)~式(7)算出椭圆的几何参数 $x_c, y_c, (a, b), \theta$ 。求取的椭圆图像的中心点即作为空间圆的圆心在该相机像平面的近似像坐标。

3.3 模型2的求解算法

为确定空间圆在向平面上的投影关系, 必须确定空间圆平面与像平面的相对位置, 即确定在相机坐标系下空间圆平面的坐标表示。

注意到靶标的特殊几何特征, 可利用圆之间的公切线的变换关系, 确定模型2中的旋转矩阵 R 的参数及方向角 α, β, γ 。

在空间圆平面(即靶标平面)作圆A与圆C、圆C与圆D、圆D与圆E、圆E与圆A的外公切线, 如图7, 可得圆A、圆C、圆D与圆E的外切正方形。 $\overline{A_1A_3}$ 与 $\overline{A_2A_4}$ 的交点即为圆A的圆心。同理, $\overline{C_1C_3}$ 与 $\overline{C_2C_4}$ 、 $\overline{D_1D_3}$ 与 $\overline{D_2D_4}$ 、 $\overline{E_1E_3}$ 与 $\overline{E_2E_4}$ 、 $\overline{C_1C_3}$ 与 $\overline{C_2C_4}$ 的交点分别为圆A、B、C的圆心。如图7。

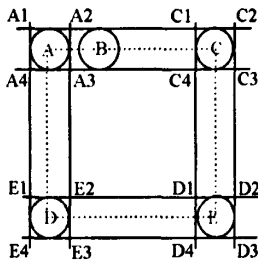


图7 靶标中圆的公切线示意图

根据透视投影规律, 靶标平面上的直线的交点在像平面中仍映射为两直线的交点, 转折点仍映射为转折点。因此, 识别出像平面(靶标的像)上椭圆A、椭圆C、椭圆D、椭圆E的公切线, 即可得到靶标中四个圆的外切四边形。这些四边形的对角线交点即为圆A、圆C、圆D与圆E的圆心在像平面中的投影点。根据这些投影点的坐标与原圆心点

的坐标的几何关系可计算并确定模型2中的旋转矩阵 R 的参数及方向角 α, β, γ 。

3.4 求解结果

将相机的像距(1577个像素), 相机分辨率为(1024×768像素)代入模型, 进行求解可得:

表1 2种模型下靶标上各圆心在像平面上的坐标 (单位: 像素)

	圆A	圆B	圆C	圆D	圆E
模型1	(-189.1, -194.5)	(-89.0, -187.0)	(127.9, -170.8)	(70.7, 119.0)	(-227.3, 117.8)
模型2	(-188.7, -194.1)	(-91.1, -186.8)	(128.1, -170.4)	(71.0, 119.2)	(-227.0, 18.3)

由表1可知, 椭圆拟合模型和投影模型所得各圆圆心在像平面上的像点基本重合。

4 精度分析

对比椭圆拟合模型及基于透视投影变换规律的精确模型, 可以发现: 椭圆拟合模型求解较方便。只需给出图像即可通过椭圆拟合获得圆的圆心在像平面上的像坐标。而精确投影模型则必须给出足够的相机外部参数, 建立起相机与世界坐标系之间的相对位置关系, 才能得出相应结论。

4.1 椭圆拟合模型畸变误差的引入

如图4, 在空间圆坐标系 $O'-x'y'z'$ 中, 建立斜圆锥面 $O'A_1B_1C_1D_1$ 的方程, 其顶点 $O'(0,0,0)$, 准线为平面 $z=z'_{e0}$ 内的曲线:

$$\Gamma: \begin{cases} (x'-x'_{e0})^2 + (y'-y'_{e0})^2 = R^2 \\ Z = Z'_{e0} \end{cases} \quad (13)$$

任取锥面上一点 $P(x', y', z')$, 则该曲面的方程为:

$$\frac{x'}{x'_0} = \frac{y'}{y'_0} = \frac{z'}{z'_0} \quad (14)$$

由此得:

$$x'_0 = \frac{z'x'}{z'_0}, \quad y'_0 = \frac{z'y'}{z'_0} \quad (15)$$

设 $z = z'_{e0}$ 平面与 z' 轴正交, 故 z'_0 取为 $z'_0 = z'_{e0}$, 而点 $P_0(x'_0, y'_0, z'_0)$ 在 T 上, 故有

$$\left(\frac{z'_{e0}x'}{z'_0} - x'_{e0}\right)^2 + \left(\frac{z'_{e0}y'}{z'_0} - y'_{e0}\right)^2 = R^2 \quad (16)$$

令 $z = f$, 可得到在 $O-xyz$ 系中像平面内的方程, 利用式(5)可得其几何中心。

将像平面 $z = f$ 代入并令:

$$A = z_0^2 r_1^2 + z_0^2 r_4^2 + r_7^2 x_0^2 - 2x_0 z_0 r_1 r_7 - 2y_0 z_0 r_4 r_7 - R^2 r_7^2 + y_0^2 r_7^2$$

$$\begin{aligned}
 B &= 2z_0^2 r_1 r_2 + 2x_0^2 r_7 r_8 + r_7^2 x_0^2 - 2x_0 z_0 r_1 r_8 - 2x_0 z_0 r_2 r_7 + \\
 & 2z_0^2 r_4 r_5 + 2y_0^2 r_7 r_8 - 2y_0 z_0 r_4 r_8 - 2y_0 z_0 r_5 r_7 - 2R^2 r_7 r_8 \\
 C &= z_0^2 r_2^2 + z_0^2 r_5^2 + r_8^2 y_0^2 - 2y_0 z_0 r_5 r_8 - 2x_0 z_0 r_2 r_8 - \\
 & R^2 r_8^2 + x_0^2 r_8^2 \\
 D &= f(2z_0^2 r_1 r_3 + 2x_0^2 r_7 r_9 + r_7^2 x_0^2 - 2x_0 z_0 r_1 r_9 - 2x_0 z_0 r_3 r_7 + \\
 & 2z_0^2 r_4 r_5 + 2y_0^2 r_7 r_9 - 2y_0 z_0 r_4 r_9 - 2y_0 z_0 r_5 r_7 - 2R^2 r_7 r_9) \\
 E &= f(2z_0^2 r_3 r_2 + 2x_0^2 r_8 r_9 + r_7^2 x_0^2 - 2x_0 z_0 r_2 r_9 - 2x_0 z_0 r_3 r_8 + \\
 & 2z_0^2 r_5 r_6 + 2y_0^2 r_8 r_9 - 2y_0 z_0 r_5 r_9 - 2y_0 z_0 r_6 r_8 - 2R^2 r_8 r_9) \\
 F &= f^2(z_0^2 r_3^2 + z_0^2 r_6^2 + r_9^2 z_0^2 - 2y_0 z_0 r_6 r_9 - 2x_0 z_0 r_3 r_9 - \\
 & R^2 r_9^2 + z_8^2 r_9^2)
 \end{aligned}$$

即可得到在 $O-xyz$ 系中,空间圆 $O_1-A_1B_1C_1D_1$ 在像平面内的透视投影方程,其几何中心可由式 (5) 求得。又由式 (12) 可求得投影像点的精确位置 (a',b') , 则畸变误差 d 为:

$$d = \sqrt{(X_c - a')^2 + (Y_c - b')^2} \quad (17)$$

4.2 椭圆拟合模型的仿真检验

基于式 (17), 可采用计算机仿真的方法对模型 1 的精度与稳定性进行检验: 仿真的初始条件为: $f=1\ 577$ (像素), 工作距离为 2 000 (像素), 为求解方便, 假设坐标系只绕某一个轴进行旋转变换,

此时 $R = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$, 其中, θ 为转角。

该模型的精度取决于畸变误差 d 的大小, 以下各图分别从不同侧面反映了模型 1 的精度变化。

1) 由图 8 可知, 当空间圆平面与像平面的夹角固定, 空间斜圆锥面的轴与光轴的夹角固定时, 测量精度随圆中心与像平面之间的距离增大而减小。

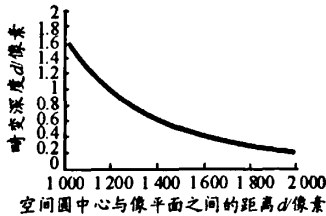


图 8 圆心与像平面间距离对畸变误差的影响

2) 由图 9 可知, 当空间圆中心的位置固定, 圆平面与像平面的夹角固定时, 测量精度随空间圆半径 R 的增加而增加。

3) 由图 10 可知, 当空间斜圆锥面的轴与光轴的夹角固定, 空间圆的中心到像平面的距离固定时, 测量精度与空间圆平面和像平面的夹角呈一种周期

性变化: $0^\circ \sim 180^\circ$ 仿真范围内, 出现了 2 个极大值, 分别在 50° 左右和 140° 左右, 极小值出现在 0° 和 100° 左右。

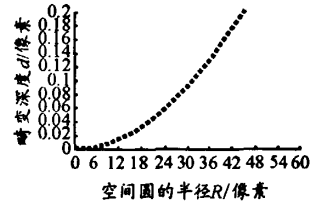


图 9 空间圆的半径大小对畸变误差的影响

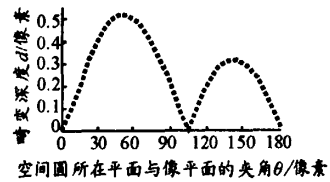


图 10 空间圆平面与像平面夹角对畸变误差的影响

综上所述, 椭圆拟合模型的精度与稳定性与空间圆中心与像平面之间的距离 l 、空间圆的半径 R 、空间圆所在平面与像平面的夹角 θ 等系统参数有关。其中, l 越大, R 越小, θ 越靠近 0° 或 100° , 则系统畸变误差 d 越小, 即模型精度越高。同时, d 在 R 较小、 $\theta=50^\circ$ 或 140° 附件的变化较平缓, 即模型的稳定性较高。由此可见, 椭圆拟合模型对外部条件不敏感, 求解较简单, 适用于远距离对小型靶标摄像的情况、对精度要求不苛刻、各环境情况未知或模糊、对算法实时性较高的环境, 在实际中应用较广泛。而基于透视投影变换规律的精确模型的精度与稳定性主要与相机性能如分辨率大小相关 (图像分辨率越大则精度与稳定性越好), 可保证较高的精度和较好的稳定性, 但对环境信息要求较高, 求解较复杂, 适用于对精度要求较高、各环境参数已知或可知、对算法时间复杂度要求较低的情况。

5 结论

1) 模型 1 的实现较简单, 只需提供 1 幅图像即可; 模型 2 的结果较精确, 但需给出较多的相机外部参数。可根据具体情况, 选择使用不同的模型。

2) 2 种模型都有较广的适用范围。由畸变误差分析可知, 模型 1 适用于远距离对小型靶标摄像的情况, 而模型 2 在参数标定时涉及对 4 个圆的外切矩形的投影变换, 因而对靶标有一定要求。

3) 该研究在现代交通监管 (电子警察)、森林防护、空中巡逻、移动定位、B 超图像模式识别等智能图像识别系统中具有广泛的应用前景。

参考文献：

[1] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
 [2] 罗伊特 F. 画法几何学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
 [3] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
 [4] 席少霖, 赵凤治. 最优化方法[M]. 上海: 上海科技出

版社, 1983.

[5] 张广军, 周富强. 基于标准长度的立体视觉传感器结构参数标定方法[C]. 2001 年航空工业测控技术学术交流会: 中国航空学会, 2001: 259-263.
 [6] 赵秉刚, 吴成柯. 一种基于圆环点的相机定标方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2007(3): 363-367.

第 20 页



图 6 目标搜索射击状态转变描述 OV-6b

3.7 作战规则描述

作战规则描述 OV-6a 是指导作战人员完成作战活动的过渡。以目标搜索为例，在对目标进行搜索的基础上，确定目标距离，然后结合目标距离与武器装备的最佳攻击距离确定攻击方式，选择作战方案。

3.8 作战事件跟踪描述

作战事件踪迹描述定义作战事件的踪迹描述，描述各作战节点在整个作战过程中信息动态交互的时序逻辑，提供作战节点之间的信息交换的时间顺序的检查。以目标搜索射击为例，在确定作战节点和信息流向的基础上，得出目标搜索射击跟踪描述，如图 7。

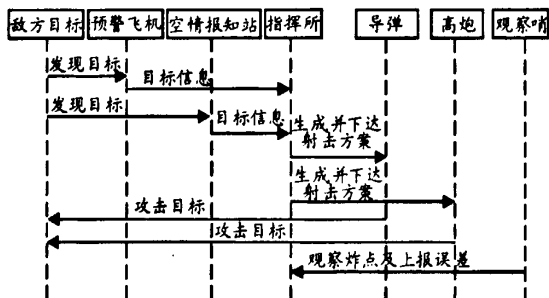


图 7 目标搜索射击踪迹描述 OV-6c

3.9 逻辑数据模型

逻辑数据模型描述体系结构作战视图的数据要求，该产品提供体系结构数据的定义它们的属性或特征以及它们的内部关系，包括系统数据类型、属性、数据之间的关系以及系统内信息产品的定义。以指挥所射击指挥为例，确定的组织包括指挥所、人员、导弹、高炮和观察哨，如图 8。

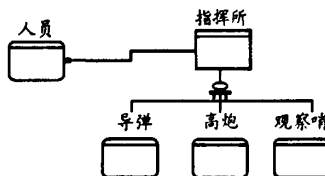


图 8 指挥所逻辑数据模型 OV-7

3.10 作战体系结构模型验证

根据逻辑ISR系统体系结构描述过程中形成的活动模型、数据模型，生成体系结构的可执行模型，然后将可执行模型的仿真运行结果与动态模型进行比较，来对C⁴ISR系统体系结构描述进行逻辑和行为验证。笔者采用 Petri 网方式对防空兵指挥信息系统体系结构进行驱动，验证其动态行为逻辑。验证表明，该逻辑与预期一致，符合系统需求和设计要求。

4 结束语

结果表明，建立的模型直观易懂、便于理解，对加强指挥信息系统顶层设计有着重要的作用。

参考文献：

[1] 罗雪山, 罗爱民, 张耀鸿. 军事信息系统体系结构技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
 [2] 李学超, 张金成, 陈欢欢, 等. 基于 DoDAF 的多层弹道导弹防御系统模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(5): 45-48.
 [3] 左毅. 美国国防部体系结构框架[M]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院编译, 2008.
 [4] 费爱国, 王新群, 王晓辉. C⁴ISR 系统开发设计与实现[M]. 北京: 军事科学出版社, 2005.
 [5] 李玲玮, 刘俊先, 曾熠, 等. 基于作战视图的 C⁴ISR 系统作战使用需求开发方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006(3): 223-227.