第 26 卷第 1 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 26, No. 1
2005 年 3 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Mar. 2005

文章编号: 1008-1542(2005)01-0047-04

单目视图下相机标定和平面测距研究

李立冬[1], 刘教民[2]

(1. 河北工业大学计算机科学与软件学院, 天津　300130; 2. 河北科技大学信息科学与工程学院, 河北石家庄　050018)

摘　要: 描述了在透视投影和相机针孔模型下从单幅二维投影图像进行目标空间方位测定的方法, 即利用现实场景中一个三维标定块来进行相机标定, 采用线匹配法求出单应矩阵, 即可测量平面上目标距离以及物体高度等。

关键词: 单幅; 相机标定; 线匹配; 测距

中图分类号: TP391.41　　　文献标识码: A

Research on camera calibration and plane measurement from a single view

LI Li-dong[1], LIU Jiao-min[2]

(1. School of Computer Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. College of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: According to the perspective projection and the pin-hole camera model, this paper presents a method for determining the position of an object from a single two-dimensional image. This method uses lines of a certain 3D object matching with their perspective image to calibrate the camera. With the homographies we can then measure distances, height, etc.

Key words: single image; camera calibration; lines matching; distance measurement

在计算机视觉中, 如何由单幅二维投影图像确定目标方位是很重要的研究内容, 在相机标定、三维重建等很多方面有广泛的应用价值。传统方法是假定相机内部参数全部已知, 而现今的数码相机均是变焦的, 不可能每次使用前均标定。本文在相机内部参数未知的条件下解决三维目标定位问题, 采用的三维标定物包含 2 个正交的平面, 每个平面为一个已知大小的矩形, 2 平面的交线是可见的[1]。对图像进行相应的处理后, 目标上几何基元即直线的提取及匹配将是关键的一步, 直接影响到相机参数求解的精度。考虑到系统的实用性以及算法效率, 采取手工点取矩形顶点的方法来确定标定物的大概区域, 进而用随机霍夫变换(RHT)来提取直线基元。

1　坐标系间的相互关系

相机标定的目的是确定相机的图像坐标系与物体空间中的三维参考坐标系之间的对应关系。为此需要知道相机的光学和几何参数(内部参数)以及相机相对外部参考坐标系的位置和方向(外部参数)。相机标定

收稿日期: 2004-11-15; 责任编辑: 李　穆
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60272062)
作者简介: 李立冬(1980-), 男, 河北元氏人, 硕士研究生, 主要从事图像处理与计算机视觉方面的研究。

过程就是根据一组已知其参考坐标系坐标和图像坐标系坐标的控制点来确定相机的内部和外部参数[2]。常用到的 3 种坐标系: 图像坐标系(u,v)或(x,y); 相机坐标系(X_c,Y_c,Z_c); 世界坐标系(X_w,Y_w,Z_w)。

1.1 图像坐标系

图像坐标系定义在图像上, (u,v)以像素为单位, (x,y)用物理单位。(x,y)坐标系以O_1为原点, x轴与y轴分别与u, v轴平行, O_1为相机光轴与图像平面的交点。若O_1在u, v坐标系中的坐标为(u_0,v_0), 像素在x轴与y轴方向上的物理尺寸为$\mathrm{d}x$, $\mathrm{d}y$, 则

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathrm{d}x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{\mathrm{d}y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}。\tag{1}$$

1.2 相机坐标系

相机坐标系的原点O在相机的光心上, X_c轴和Y_c轴与图像坐标系中的x轴与y轴平行, Z_c为相机的光轴, 它与图像平面垂直, 光轴与图像平面的交点即为图像坐标系的原点O_1。OO_1为相机的有效焦距f。

1.3 世界坐标系、相机坐标系下点的关系

若世界坐标系和相机坐标系下点坐标分别为$(X_w,Y_w,Z_w,1)$和$(X_c,Y_c,Z_c,1)$, 则有

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix},\tag{2}$$

其中: $\boldsymbol{R}$为 3×3 正交单位旋转矩阵, $\boldsymbol{R}=R_\alpha R_\beta R_\gamma$; $\boldsymbol{T}$为位移向量, $\boldsymbol{T}=(T_x,T_y,T_z)$。

2 针孔模型下相机参数表达

根据针孔模型成像原理, 空间点$P(X_w,Y_w,Z_w)$在相机坐标系下的坐标为(X_c,Y_c,Z_c), 它在相机成像平面上的投影点为$p'(x,y,f)$, 有

$$\lambda\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}。\tag{3}$$

世界坐标系表示的P点的坐标与投影点p的坐标(u,v)的关系如下:

$$\lambda\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathrm{d}x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{\mathrm{d}y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{M}_1\boldsymbol{M}_2X_w = \boldsymbol{M}X_w。\tag{4}$$

$\boldsymbol{M}$为 3×4 矩阵, 称为投影矩阵。$\boldsymbol{M}_1$完全由a_x, a_y, u_0, v_0决定, 由于a_x, a_y, u_0, v_0只与照相机的内部结构有关, 故称$\boldsymbol{M}_1$为内部参数矩阵, $\boldsymbol{M}_2$只与目标在世界坐标系中的位置有关, 则称之为方位矩阵。

3 相机内外参数的标定

3.1 平面矩形确定相机部分参数

对于某一条空间直线, 它的二维投影为$(a \quad b \quad c)\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} = 0$, 其中$(a, b, c)$为该直线的投影坐标。由于组成矩形的 4 条直线在同一平面上, 则可以认为它们在 $Z_w = 0$ 的平面上。可得

$$\lambda\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} = \boldsymbol{H}\begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

其中: $\boldsymbol{H}$ 为 $R_1(r_1 \quad r_2 \quad \boldsymbol{T})$ 共 9 个未知数; 平面上有 4 条已知直线[3], 对每条直线都有$(a \quad b \quad c)\boldsymbol{H}\begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} = 0$, 可求出相差 1 个倍数的 $\boldsymbol{H}$ 矩阵。此时便可以求解该平面上任意点的坐标, 从而进一步得到距离、面积、角度等信息。

3.2　三维标定物确定相机参数

采用图 1 所示的 2 个正交矩形作为标定物时, 可进一步得到不属于单个平面($Z_w = 0$)的空间点坐标信息。

与上同理, 可以分别得到水平面和垂直面的单应矩阵 $\boldsymbol{H}$ 和 $\boldsymbol{G}$。2 个矩形有公共边和原点, 因此 2 个矩阵间存在一些相关信息: 它们的第 3 列相同(原点相同); 第 1 列相同(X 方向灭点相同)。此时, 相机的投影矩阵可表示为[4]

$$\boldsymbol{P} = [\boldsymbol{H}(1) \quad \boldsymbol{G}(2) \quad \boldsymbol{H}(2) \quad \boldsymbol{H}(3)] = \boldsymbol{M}_1[\boldsymbol{R} | \boldsymbol{T}],$$

$\boldsymbol{P}$ 的前 3 列组成的矩阵记为 $\boldsymbol{Y}$, 可知 $\boldsymbol{Y} \times \boldsymbol{Y}^t = \boldsymbol{M}_1\boldsymbol{M}_1^t$, 从而得出 $\boldsymbol{M}_1$ 各分量。随后, 可以求出外参数 $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{T}$:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{M}_1^{-1} \times \boldsymbol{Y}, \boldsymbol{T} = \boldsymbol{M}_1^{-1} \times P_t,$$

其中 P_t 是 $\boldsymbol{P}$ 的最后一列, 此时求出 $\boldsymbol{M}_2$。

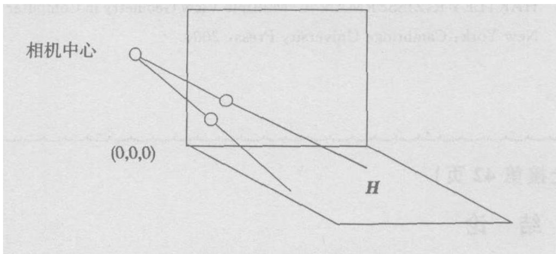

图 1　相机与参考平面示意图

Fig. 1　Camera and two reference planes

4　空间 2 点间距离的测量

当 2 点都位于 $Z_w = 0$ 平面时, 由式(5)可得出点的坐标, 从而得到 2 点间的距离。

当空间点不属于这 2 个矩形所在平面时, 还需知道相机中心点坐标。在 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 已知的基础上, 可以很容易求出中心点坐标为 $-\boldsymbol{R}^t\boldsymbol{T}$。如图 2 所示, 把空间点在二维图像上的对应点看作是水平面上的点 C, 由平面测距可以求得线段 AC 的长度。在图像上取空间点在水平面上的垂点 B, 则线段 AB, BC 的长度都容易得到。由简单的几何比例关系可求得空间点的高度 $h = H_c\dfrac{BC}{AC}$, 其中 H_c 是相机中心到水平面的距离, 从而得到空间的三维坐标。该方法的前提是能正确取空间点所对应的水平面上的垂点位置, 对于有共面性特征的物体很适用。同理, 也可以利用空间点到垂直面的投影来求解坐标。

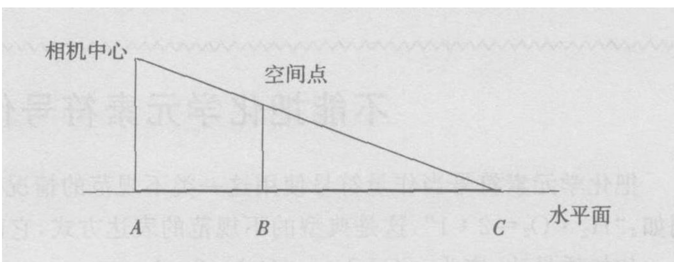

图 2　高度几何关系图

Fig. 2　Geometry relation of height

很明显, 对于任何空间点 P, 如已知它的坐标 $X = (X_w, Y_w, Z_w, 1)$, 就可求得它的图像点 p 的位置(u, v)。反之, 如果已知空间某点 P 对应的图像点 p 位置为(u, v), 即使 $\boldsymbol{M}$ 已知, X 也不是唯一确定的, 因为 $\boldsymbol{M}$ 是 3×4 不可逆矩阵, 只可得到关于 X_w, Y_w, Z_w 的 2 个方程, 由这 2 个线性方程组成的方程组即为射线 OP

的方程。投影点为 p 的所有空间点都在该射线上。但是, 如果能根据目标的约束关系(如共面、共线、平行等关系)确定 X_w, Y_w 或 Z_w 中的某一个时, 则可以由上述关系求出空间点的三维坐标, 然后求出2点间距离。

5 结 论

对实验图像和现场图像进行了测试, 准确率均在98%以上。图3中水平面上白色矩形与相邻的垂直面上矩形构成标定物, 测量结果见表1。

表1 实验图像距离测量结果

Tab.1 Instance measurement of the experimental image

真实值/mm	155	312	320	400	1 300
实验值/mm	157	317	316	407	1312

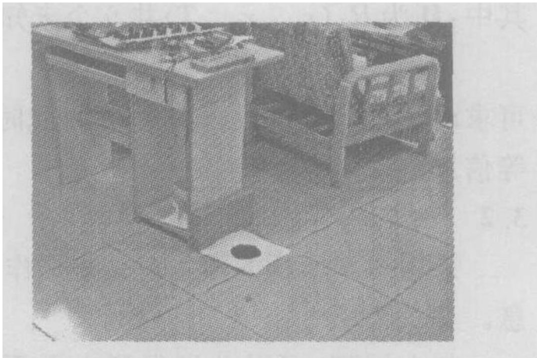

图3 实验图像

Fig.3 Experimental image

参考文献:

[1] KUSHAL A, SANYAL S, BANSAL V, et al. A simple method for interactive 3D reconstruction and camera calibration from a single view[EB/OL]. http://www-cvr.ai.uiuc.edu/~kushal/papers, 2002-12-29/2003-10-06

[2] 黄凤荣, 刘教民, 孙壮志, 等. 基于单幅图像确定目标空间方位新方法的测距系统[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(4): 236-238.

[3] 唐 珉, 胡占义. 参数空间分解法[J]. 计算机学报, 1999, 22(9): 911-917.

[4] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. New York: Cambridge University Press, 2000.

(上接第42页)

4 结 论

以上讨论了E类调谐功率放大器和同相功率合成网络的工作特点, 导出并求解了放大器的工作方程: 1)放大器因开关转换引起的能量损失能通过准确设计而减小; 2)功率合成器的工作特性与参数有关, 也与频率有关, 在元件参数不完全对称的情况下, 频率对电路的工作特性的影响较为明显; 3)在高频电路中, 放大器的负载网络参数与合成器的元件参数还应结合阻抗匹配的实际情况来确定。

参考文献:

[1] 吴大正. 电路基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.

[2] 李大年. 微波原理与技术[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1994.

[3] 李振玉. 高效率放大及功率合成技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.

不能把化学元素符号作为量符号使用

把化学元素符号当作量符号使用这一类不规范的情况比较普遍, 即使在化学专业书刊中, 也比比皆是。例如:“H_2∶O_2=2∶1”, 这是典型的不规范的表达方式, 它的含义也不清楚。该式的规范化表示如下:

如指质量比, 应为 $m(H_2)$∶$m(O_2)$=2∶1;

如指体积比, 应为 $V(H_2)$∶$V(O_2)$=2∶1;

如指物质的量比, 应为 $n(H_2)$∶$n(O_2)$=2∶1。

还常见把元素或分子式等符号后加“%”当作量符号使用, 如 MnO_2%=58.4%, 也是不正确的, 这里指的是 MnO_2 的质量分数, 所以规范的表示为 $w(MnO_2)$=58.4%。

此外, 如wt%, vot%, mol%, at%等均属于不规范的符号, 它们的规范符号分别为质量分数 w, 体积分数 φ, 摩尔分数 x 或 y, 原子数分数 x 或 y。

顺便说明一下, 以往的许多文献中, 将 $m(H_2)$ 表示为 m_{H_2}。按照新标准, 代表物质的符号表示成右下标, 如 m_B 等, 而将具体物质的符号及其状态等置于与主符号齐线的圆括号中, 如 $m(H_2SO_4)$ 等。 (关标)