文章编号：1002-2082(2008)SO-0124-03

一种非线性摄像机标定的仿真实现

鱼奋岐，雷金利
（西安应用光学研究所，陕西 西安 710065）

摘 要：在从二维图像获取三维信息的过程中，摄像机标定是必不可少的步骤之一，而且摄像机的标定结果在很大程度上会影响机器视觉系统的性能。在摄像机标定过程中，采用非线性摄像机模型对摄像机成像关系进行描述，以便获取更加准确的摄像机参数来改善机器视觉系统的性能。最后，给出了该非线性摄像机模型标定的仿真结果。

关键词：机器视觉；摄像机标定参数；非线性模型；标定
中图分类号：TN142 **文献标志码**：A

Simulation realization of nonlinear camera calibration

YU Fen-qi, LEI Jin-li
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the process acquiring three-dimensional information from the two-dimensional picture, the camera calibration is one of essential steps. Moreover, the result of the camera calibration will affect the performance of the machine vision system to a great extent. In the camera calibration process, the camera imaging relations are accurately described using the nonlinear camera model to gain the more accurate camera parameters for improving the performance of the machine vision systems. Finally, the simulation result of the nonlinear camera model calibration is given.

Key words: machine vision; camera calibration parameter; nonlinear model; calibration

引言

在机器视觉系统中，视觉传感器(如摄像机)获取图像信息，由二维图像信息计算空间三维物体的几何信息，并重建和识别物体。空间物体表面某点的几何位置与图像对应点之间的相互关系由摄像机的成像几何模型决定。这些几何模型的参数即是摄像机标定的参数。摄像机标定就是确定摄像机内部光学和几何特性(内部参数)世界坐标系下摄像机的三维位置和方向(外部参数)。显然，机器视觉系统的整体测量性能在很大程度上依赖于摄像机标定的精度。

1 摄像机模型

摄像机模型[1]是光学成像几何关系的简化，最简单的模型为线性模型，或称为针孔模型。当计算精度要求较高，尤其是当摄像机的镜头是广角镜头时，线性模型不能准确地描述摄像机的成像几何关系。而非线性模型考虑了摄像机镜头的成像畸变，能较为准确地描述摄像机成像的几何关系。

1.1 线性摄像机模型

设(u,v)表示以像素为单位的图像坐标系的坐标，(x,y)表示以毫米为单位的图像坐标系的坐标，则图像中任意一个像素在2个坐标系下的坐标

收稿日期：2007-12-30； 修回日期：2008-03-24
作者简介：鱼奋岐(1975—)，男，陕西省大荔县，硕士研究生，主要研究方向为跟踪与稳瞄。E-mail：yfqem@sohu.com

有如下关系:

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

空间点 P 在世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 与摄像机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) 下有如下关系:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \vec{\boldsymbol{t}} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{R}$ 为 3×3 正交单位矩阵; $\boldsymbol{t}$ 为三维平移向量; $0=(0,0,0)^T$; $\boldsymbol{M}_1$ 为 4×4 矩阵。

空间任何一点 P 的成像位置可以用针孔模型近似,即任何点 P 在图像上的投影位置 p 为光心 O 与 P 点连线 OP 与图像平面的交点。由比例关系可得如下关系式:

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

式中: (x, y) 为 p 点的图像坐标; (X_c, Y_c, Z_c) 为空间点 p 在摄像机坐标系中的坐标。

将(1)式与(2)式代入(3)式,可得到以世界坐标系下 p 点坐标与投影点 p 的坐标关系:

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

$$\begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: $\alpha_x = f/dx$; $\alpha_y = f/dy$; $\boldsymbol{M}_1$ 由 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 决定,由于这些参数只与摄像机内部的结构有关,故称之为摄像机内部参数; M_2 由摄像机相对与世界坐标系的方位决定,称其为摄像机的外部参数。

线性摄像机模型是摄像机成像几何关系的近似描述,在计算精度要求不高的情况下,可以通过线性变换对摄像机标定求解。

1.2　非线性摄像机模型

在使用摄像机成像时,远离图像中心处会有较大畸变。一般情况下,非线性畸变包括径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变。其中,薄棱镜畸变是由镜片设计、制作和安装时产生的。这种类型的畸变可以通过光学系统的校正将其对摄像机标定的影响降到足够小的程度,但是这种校正会带来更多的径向畸变和离心畸变。

径向畸变可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} \delta'_x \\ \delta'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \cdots) \\ y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \cdots) \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中: $k_1, k_2, \cdots$ 为径向畸变系数。

离心畸变可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中: p_1, p_2 为离心畸变系数。

考虑非线性畸变后,摄像机模型为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathrm{d}x}(x + \delta'_x + \delta_x) \\ \frac{1}{\mathrm{d}y}(y + \delta'_y + \delta_y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

和线性模型相比,非线性模型考虑到摄像机的畸变,能更准确地描述摄像机的成像几何关系。

2　摄像机标定的实现

摄像机标定一般是在摄像机前放置 1 个特定的标定参照物,摄像机获取该物体的图像,并由此计算摄像机的内部参数。标定参照物上每个特征点相对于世界坐标系的位置(在制作时应精确确定)得到这些已知点在图像上的投影位置后,由直接线性变换(DLT)方法[2]就可以求出 M 矩阵。在许多应用场合,计算出 M 矩阵后,不必再分解 M 矩阵求解摄像机内外参数,这些参数没有具体的物理意义,在有些文献中称为隐参数。在某些场合,则需要将 M 矩阵 RQ 分解,从而求出摄像机的内外参数。

由于不需要迭代,直接线性变换方法计算相对简单,但直接线性变换方法很难把镜头的畸变考虑到参数的标定过程中,畸变对摄像机标定的影响不能得到校正。另外,直接线性变换方法没有考虑中间参数的实际约束条件,因此,在存在噪声的条件下,中间参数往往不满足约束条件且最后的标定结果精度相对较差。

对非线性模型摄像机内部参数求解,一般都会提出这些参数标定的非线性优化算法,这些方法都涉及非线性方程的求解,或者假设摄像机的部分参数可由其他方法解出,或者用线性模型先计算出线性模型的参数作为近似初值,再用迭代方法计算精确解。也可以用摄像机参数与非线性参数组合成一些中间参数,用线性计算方法标定这些参数,简化计算过程,改善摄像机非线性参数的标定精度。

上述方法存在运算量大,或者非线性优化不满足要求,或者在求解的过程中依赖已知的物理参数等,这些缺点[3-6]限制上述方法的使用。

针对上述非线性模型的不足,在考虑非线性畸变的条件下,由直接线性变换求出摄像机的内外参数值(作为非线性求解的近似初始值),采用Lenenberg-Marquardt 优化算法快速收敛,校正不对称投影和图像从而减小对标定的影响。

3 模型仿真

3.1 仿真的过程

依据标定参照物的图像,提取图像中的角点;先用直接线性变换(DLT)方法求解迭代的初始值;然后进行非线性优化,最后,根据校正后图像优化标定结果。

在仿真过程中,有2种非线性畸变:

1) 径向畸变

$$\begin{bmatrix}\delta'_x\\ \delta'_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x(k_1r^2+k_2r^4+k_5r^6)\\ y(k_1r^2+k_2r^4+k_5r^6)\end{bmatrix}$$

2) 离心畸变

$$\begin{bmatrix}\delta_x\\ \delta_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2k_3xy+k_4(r^2+2x^2)\\ k_3(r^2+2y^2)+2k_4xy\end{bmatrix}$$

式中:$k_1,k_2,\cdots,k_5$ 为非线性畸变系数,其结果在仿真后以向量的形式给出。

3.2 仿真结果

3.2.1 迭代的初始值

焦距 $fc=[670.654\,80\quad 670.654\,80]$

图像中心点 $cc=[319.500\,00\quad 239.500\,00]$

畸变系数向量 $k=[0.000\,00\quad 0.000\,00\quad 0.000\,00\quad 0.000\,00\quad 0.000\,00]$

3.2.2 优化结果

焦距 $fc=[662.495\,13\quad 664.677\,19]\pm[1.434\,00\quad 1.542\,61]$

图像中心点 $cc=[306.512\,81\quad 241.751\,01]\pm[2.834\,84\quad 2.608\,28]$

畸变系数向量 $k=[-0.279\,08\quad 0.320\,25\quad 0.000\,50\quad 0.000\,28\quad 0.000\,00]\pm[0.011\,44\quad 0.047\,29\quad 0.000\,64\quad 0.000\,67\quad 0.000\,00]$

像素误差 $err=[0.590\,62\quad 0.421\,84]$

3.2.3 图像校正后的优化结果

焦距 $fc=[657.643\,75\quad 658.041\,13]\pm[0.402\,43\quad 0.430\,56]$

图像中心点 $cc=[303.192\,39\quad 242.555\,66]\pm[0.818\,60\quad 0.748\,81]$

畸变系数向量 $k=[-0.256\,10\quad 0.130\,89\quad -0.000\,19\quad 0.000\,04\quad 0.000\,00]\pm[0.003\,14\quad 0.012\,51\quad 0.000\,17\quad 0.000\,17\quad 0.000\,00]$

像素误差 $err=[0.152\,97\quad 0.139\,65]$

4 结论

在精度要求高的场合中,非线性模型能较为准确地描述摄像机的成像几何关系。但由于非线性模型标定计算量大且非线性解不易收敛等,非线性模型标定结果往往不理想。在总结几种非线性摄像机模型的基础上,给出一种非线性模型。仿真结果表明:该模型使摄像机标定参数达到了较高的精度。

参考文献:

[1] 马颂德,张正友.计算机视觉计算理论与算法基础[M].北京:科学出版社 1998.

[2] ABDEL-AZI Y I, KARARA H M. Direct linear transfor-mation into object space coordinates in close-range photogrammetry[C]. Proc. Symposium on close-Range Photo-grammetry, Urana, Illinois, 1971.

[3] WENG J, COHEN P, HERNION M. Cammera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, PAMI-14(10): 965-980.

[4] FAIG W. Calibration of close-range photogra-mmetric systems[J]. Mathematical formulation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1975, 41(12): 1479-1486.

[5] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-self TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(4): 323-344.