

相机光轴视觉反馈校正研究

王富治, 黄大贵

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

【摘要】提出了基于视觉伺服的相机光轴反馈校正法, 将图像的线性畸变与非线性畸变相分离, 先采用多幅模板图像对相机进行高精度标定, 获得相机非线性系数; 根据这些系数经反复迭代后消除非线性畸变; 再利用线性畸变, 引入反馈环节精细调节相机至精确位置。该方法不需要特殊的导引装置, 很好地解决了相机光轴的高精度校正问题。

关键词 相机标定; 图像测量; 光轴校正; 视觉伺服

中图分类号 TP216

文献标识码 A

Research on Rectification of Camera's Optical Axis Based on Vision Feedback

WANG Fu-zhi and HUANG Da-gui

(School of Mechatronics Engineering, University Electronic and Science Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A new method to rectify the optical axis based on visual servoing is given in this paper. This method separates the linear distortion from the non-linear distortion. Firstly, the non-linear distortion is removed through iterations on the basis of the non-linear distortion coefficients obtained by accurately calibrating camera with many pattern images. Then the position of the camera is finely adjusted by a way of feedback elements according to the linear distortion without special guiding equipment. With the help of this method, finally the problem of rectification of optical axis is perfectly solved.

Key words camera calibration; image measurement; rectification of optical axis; visual servoing

图像测量可分为二维测量和三维测量。三维测量又可称为立体视觉测量, 与二维测量相比, 其优越性较明显。但是, 三维测量需要标定出两架甚至多架相机的相互位置, 以及找出同一目标点在两架相机所成图像上的相互对应关系, 这就涉及到甚为复杂的立体匹配问题, 影响了测量精度。如球面孔系的测量, 由于小孔很难精确定位, 采用三维测量将带来较大的测量误差, 因此, 一般都采用二维测量, 但需要特殊的激光导引装置将镜头引导到正确的位置^[1]。石油管螺纹梳刀刀尖结构参数测量, 所有的被测参数都在一个平面上, 没有必要采用立体测量法^[2]。如果把二维测量与高精度的运动控制机构结合起来, 可将三维测量的问题转化为二维测量问题。二维测量的关键技术问题是保证相机光轴与被测面相垂直^[3](对于孔的测量, 还需保证圆心与相机光心重合); 否则, 图像将发生失真, 从而影响测

量精度。本文提出了基于视觉伺服的相机光轴校正法, 不需要特殊的导引装置, 实现了相机光轴的高精度校正。

1 基于视觉伺服的相机光轴反馈校正法的基本原理

实际的相机光学系统是非线性成像系统, 所成的像既包括了由于成像靶面与被测面不相平行产生的线性畸变, 也包括了由于相机镜头的加工误差而产生的非线性畸变。

基于视觉伺服的相机光轴反馈校正法的基本思想为: 线性畸变的大小反映了相机光轴的倾斜程度, 如果将其中的线性畸变检测出来, 判断出相机的倾斜情况; 在此基础上利用驱动机构对相机的位置进行伺服反馈调节, 即可实现对相机光轴的精确校正。

实际所成的像, 其线性畸变与非线性畸变是线性叠加关系, 可以采用以下方法将两种畸变分离:

(1) 利用相机标定, 标定出相机的非线性畸变系数;
 (2) 利用非线性畸变系数, 对所成的像进行非线性校正, 得到只存在线性畸变的图像; (3) 利用该图像对相机光轴进行反馈校正。

基于视觉伺服的相机光轴反馈校正系统如图1所示。系统主要由工业计算机、CCD相机、驱动系统、反馈系统和测量平台组成。CCD相机既是输出检测元件, 也是输入检测元件。系统采用了4个步进电机, 分别对应相机光轴高精度校正所需的4个自由度, 即2个移动自由度, 2个转动自由度。图像的几何特征反映了相机光轴的倾斜情况, 由于两个平移自由度上的运动情况, 容易通过图像几何中心的坐标值来判断。因此, 最好选取经成像后某特征只具备两个状态的对象, 分别反映了两个旋转自由度上的不同状况, 从而有利于构造伺服校正控制算法。

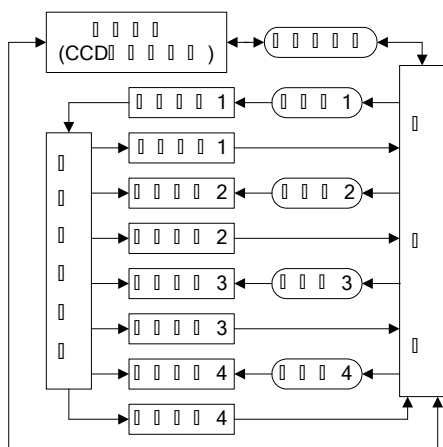


图1 系统结构图

2 相机的标定

相机标定的目的在于提供校正图像非线性畸变所需要的非线性畸变系数。相机标定的实质是确定空间点与其图像上的相应点之间的对应关系, 这些位置关系由相机的成像几何模型决定。为此可建立4个坐标系^[4], 如图2所示: (1) 世界坐标系 (x_w, y_w, z_w) ; (2) 相机坐标系 (x_c, y_c, z_c) ; (3) 像面坐标系 (x, y) ; (4) 像素坐标系 (u, v) 。

在图2中, o_c 为相机光心, p 为物体上一点, $p(x, y)$ 为线性模型下的理想成像位置, $p(x_d, y_d)$ 为实际成像位置。

2.1 透镜的像差

从图2可看到, 点 $p(x, y)$ 与点 $p(x_d, y_d)$ 在径向与切向方向不一致, 即是镜头的径向畸变与切向畸变。径向畸变关于相机镜头主光轴对称, 切向畸变则并不关于相机镜头的主光轴对称。

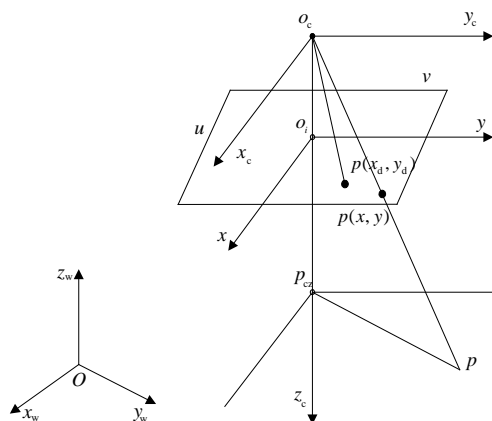


图2 相机非线性成像模型

为了便于后续处理, 本文首先对空间点的相机坐标作归一化处理:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c / z_c \\ y_c / z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

在只考虑径向畸变与切向畸变时, 总的像差模型^[5]为:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + k_3\rho^6) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x(x, y) \\ \delta_y(x, y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$; k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数; k_3, k_4 为切向畸变系数。前一项为径向畸变, 后一项为切向畸变。

2.2 相机的标定模型

借助于图2所示的相机成像示意图, 根据线段 $o_i-p(x, y)$ 与线段 o_c-p 的平行关系, 可推导出理想成像模型^[6-7]:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为世界坐标系与相机坐标系之间的正交旋转变换矩阵和平移向量; $f_x = f/d_x$; $f_y = f/d_y$, 其中, f 为相机焦距, d_x, d_y 分别为每1个像素在 x, y 轴方向的物理尺寸; (u_0, v_0) 表示摄像机光轴与图像平面的交点坐标。

式(3)描述了像素坐标与世界坐标之间的关系, 因此, 需要将式(2)左端的像面坐标变换为像素坐标:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x(x_d + \alpha y_d) + u_0 \\ f_y y_d + v_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 α 为考虑到像元两边夹角并非严格等于 90°

而引入的参数, 实际夹角为 $(\pi/2 - \alpha)180/\pi$ 。

以理想像素坐标作为中间过渡变量, 联立式(3)和式(4), 非线性畸变系数以及 α 的初值取为0, 其余相机的内外参数的初值均取为不考虑畸变时的估计值, 利用Jacobi迭代法求解。通过最速下降法更新所有内外参数, 继续迭代至再投影差^[8]最小。再投影差定义为:

$$\text{proj}_e = \sum_{i=1}^N (u_i - u_{d_i})^2 + \sum_{i=1}^N (v_i - v_{d_i})^2 \quad (5)$$

由式(5)可知, 标定的图像数目愈多, 愈有利于提高标定的精度。

相机标定完毕, 将会得到相机的内部参数 $f_x, f_y, u_0, v_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \alpha$; 相机的外部参数为决定旋转矩阵和平移矩阵 R, T 的6个变量, 共计16个变量的值。

相机的非线性畸变系数仅决定于相机本身, 与外界因素无关。因此, 对所应用的相机可事先以多幅模板图像, 精确标定出其非线性畸变系数, 以备后续测量^[9-10]。

2.3 非线性畸变的消除

由于采用了归一化处理, 式(2)给出的以理想坐标为自变量的函数关系。但从式(2)得出理想坐标的显式解显然是不可能的。为了得到理想坐标, 可采用迭代逼近求解的方式, 即:

$$p'' = p' - \delta(p' - \delta(p')) \quad (6)$$

式中 p' 为校正后的坐标; p'' 为校正前的坐标。此为1个二重循环。如果需要更高的精度, 增加循环次数即可(一般为15~20次)。

3 相机光轴的反馈校正

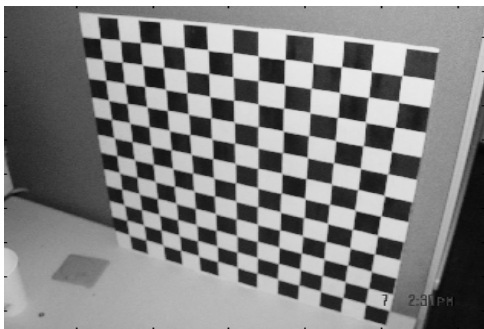


图3 畸变模板图像

用非线性畸变系数只能校正非线性畸变, 下面的实验结果说明了上述的结论。图3是原始图像, 图4是非线性校正后的图像。比较两幅图可发现, 模板所有线条都已拉直, 但存在“透视”, 这是线性畸变下的典型现象。

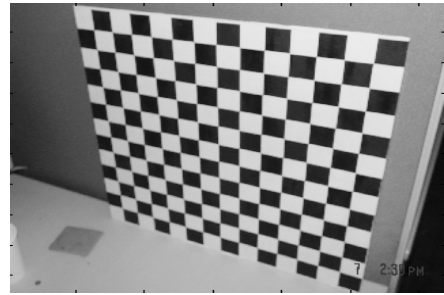


图4 非线性畸变校正后的模板图像

3.1 平面相机光轴校正

相机光轴校正的内容, 依据不同的测量对象而有所不同。当所有的测量对象均在同一个平面上时, 则主要是保证相机光轴与被测面垂直; 如有孔, 还需保证光心与圆心的重合(孔较小, 畸变较小, 则可忽略)。

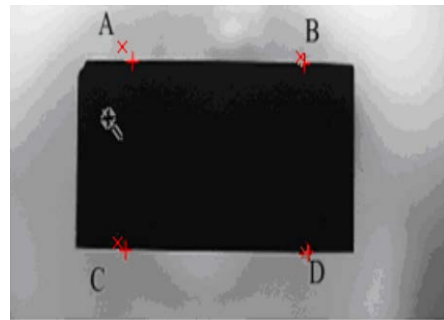


图5 平面相机光轴校正示意图

如图5所示, 将一标准长方形量块置于视场中, 由于相机光轴不垂直于量块表面, 量块也未置于视场中心, 图像将发生明显的畸变。图中, 以“+”表示量块边缘某像素的实际位置; 以“x”表示该像素校正后的位置, 二者不相重合。调节相机的位置, 摄像; 从外轮廓上精密提取4个点, 标记为A、B、C、D(要求A与C, B与D的列坐标相同), 进行非线性校正得到A'、B'、C'、D'。重复上述过程, 当两组标记重合, 且AD=BC, 即表明相机光轴得到了精密校正。

3.2 曲面相机光轴校正

当所测对象位于曲面上时, 需借助于运动控制系统将被测对象引导至与相机光轴大致正对位置, 再采集图像。不同的是, 曲面上不可能安放标准量块, 因此, 直接以被测对象作为调节标准。球面孔系测量即属于这种情况。孔径投影后成为一个椭圆, 椭圆的一般表达式为:

$$f(\bar{a}, \bar{x}) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$

式中

$$\bar{a} = [a \ b \ c \ d \ e \ f]$$

$$\bar{x} = [x^2 \ x y \ y^2 \ x y \ 1]$$

引入约束 $|\bar{a}|=1$, 建立如下目标函数:

$$F(\bar{a}) = \sum_{i=1}^N f(\bar{a}, \bar{x}_i)^2 + m(|\bar{a}|^2 - 1)^2 \quad (7)$$

式中 M 为罚因子。于是, 椭圆的拟合转换成极小化 $F(\bar{a})$, 即非线性最小二乘化问题。这是一个外罚函数法无约束优化问题^[11], 可用牛顿-高斯法求出 \bar{a} , 进而可得到该椭圆的中心 (o_{eu}, o_{ev}) 与长轴 l_{ax} 与短轴 s_{ax} 。比较椭圆的中心坐标与相机光心坐标 (o_u, o_v) (由相机标定过程求出), 值如果不相等, 运动控制机构根据椭圆中心坐标对平移自由度进行调节, 根据椭圆的长、短轴进行旋转自由度的调节。当椭圆几何中心与光心重合, 且长、短轴相等时, 校正完成。

4 结 论

本文针对二维测量系统的关键问题, 提出了基于视觉伺服的光轴校正方法, 事先通过相机标定去除非线性畸变, 再通过线形畸变对光轴位置施以反馈校正。实验证明, 该方法对相机光轴校正具有很好的效果, 避免了以往方法需要特殊的导引设备(如激光导引装置)的缺点。影响相机光轴对正的有4个自由度, 其中2个平移自由度, 2个转动自由度, 若配以4个步进电机, 再配以具有很强硬件柔性的 DSP+FPGA 运动控制系统, 实际上构成了一个通用的单相机精密自动测量平台。另外, 在整个处理过程中都涉及到对图像目标的高精度定位, 因此, 相关亚像素算法必不可少。

参 考 文 献

- [1] 黄 劼, 周肇飞. 机器视觉精密测量系统研究[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 491-494.
HUANG Jie, ZHOU Zhao-fei. Study on precision measure system based on machine vision[J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 491-494.

- [2] 侯学智, 杨 平, 赵云松. 基于图像处理技术的刀具测量系统[J]. 制造技术与机床, 2004, (3): 33-35.
HOU Xue-zhi, YANG Ping, ZHAO Yun-song. A measurement system of cutting tools based on image processing technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2004, (3): 33-35.
- [3] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
YU Qi-feng. Precision measurement and motion measurement based on image[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [4] ROGER Y T. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [5] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [6] 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, 2003.
MA Song-de, ZHANG Zheng-you. Computer vision — computation theory and algorithm foundation[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 1997: 1106-1112.
- [9] STURM P F, MAYBANK S J. On plane-based camera calibration: a general algorithm, singularities, applications [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Colorado: IEEE Computer Society Press, 1999: 432-437.
- [10] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference. Manchester: [s.n.], 1988: 147-151.
- [11] 何坚勇. 最优化方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
HE Jian-yong. Optimization method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

编辑 黄 莘