文章编号:1002-2082(2011)02-0291-05

基于序列图像的几何参数测量方法研究

刘　鹏,王　鉴,王诗琴

(中北大学　电子测试国家重点实验室,山西 太原 030051)

摘　要:随着测量技术的不断发展,现代工业对物体尺寸检测的准确性及快速性要求越来越高。文中提出了一种利用序列图像来测量物体几何尺寸的方法。使用数码相机获得标定模板的序列图像,通过直接线性变换(DLT)方法来标定相机内部参数,结合透镜成像的知识,对使用数码相机采集到的物体序列图像进行处理和测量,最终计算出物体的宽度和高度。实验证明,该方法简单实用,能够克服传统测量方式的缺点,并且快速获得较为准确的结果(误差控制在 1% 以内),满足工业测量的要求。

关键词:序列图像;图像测量;DLT 标定;角点检测;数码相机

中图分类号:TN247; TP391　　**文献标志码**:A

Geometric parameter measurement based on image sequence

LIU Peng, WANG Jian, WANG Shi-qin

(National Key Laboratory of Electronic Testing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: With the continuous development of measurement technology, modern industry imposes a high demand on product dimension measurement accuracy and speed. This paper presents a method to measure the objects by using image sequences. A digital camera was used to capture calibration template image sequences, and the camera intrinsic parameters were obtained by direct linear transformation (DLT) method. Combined with the knowledge of imaging lens, the object's image sequences provided by digital camera were processed and measured, and the object's width and height were calculated ultimately. Experiments show that the method is simple and practical, which overcomes the shortcomings of traditional measurement and could control measurement error within 1%.

Key words: image sequence; image measurement; DLT calibration; corner detection; digital camera

引言

随着现代工业的不断发展,不但对物体尺寸检测精度的要求越来越高,而且要实现在线实时检测。传统的几何参数检测手段有卡尺、量规、万能工具显微镜、轮廓仪、X 射线等,一般存在开发周期长、价格昂贵、功能比较单一、需要人工操作、离线测量等缺点,例如卡尺、量规等测量手段虽然简便快捷,但存在测量数据少、精度不高等缺陷。万能工具显微镜、轮廓仪等检测手段虽然有较高的精度,但要求在特定的设备、特定的环境下进行检测,不但劳动强度大,效率低,而且检测过程同生产过程是分离的,这与现代工业所要求的在线

收稿日期:2010-06-24;　**修回日期**:2010-11-29

基金项目:山西省自然基金项目资助(20070120003)

作者简介:刘鹏(1986—),男,山西运城人,工学硕士,主要从事图像处理与测量及计算机视觉技术研究。

E-mail:sea3721@qq.com

测量、实时控制的要求不符[1-4]。因此,本文提出一种利用序列图像来测量物件几何尺寸的方法。

1 图像测量方法

一般来说,图像测量方法分为被动式和主动式两大类。前者指不向被测物体发射可控制的光束,而是根据直接拍摄的物体的图像进行距离测量的方法,主要有单目视觉、双目视觉、多目视觉等方法。后者指向被测物体发射可控制的光束,然后拍摄光束在物体表面上所形成的图像,通过几何关系计算出被测物体距离的方法,主要可以分为结构光方法和激光自动聚焦法两类。由于本文的测量对象是外界的建筑物,在自然光的条件下就可以得到理想的图像,故本文采用被动式单目视觉测量方法,其原理如图 1 所示。

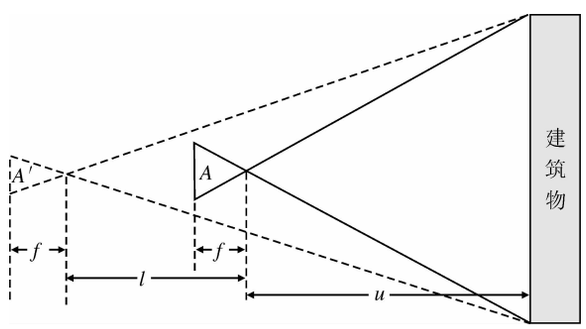


图 1 测量原理图

Fig. 1 Measurement diagram

图 1 为测量原理,建筑物为测量对象,其中 f 为焦距;u(或 $u+l$)为物距。在 A 点拍摄一组图片,向后移动距离 l 后在 A' 点再拍摄一组图片。根据透镜成像的原理,我们知道建筑物将在 A 和 A' 两处呈现大小不同的像。假设建筑物实际尺寸为 H,在 A 和 A' 处成像尺寸分别为 a 和 b。利用透镜成像中的物象关系我们可以得到

$$\frac{f}{u}=\frac{a}{H} \tag{1}$$

$$\frac{f}{u+l}=\frac{b}{H} \tag{2}$$

式中:a 和 b 可以通过测量序列图像来获得(像素数目×每像素所代表的实际尺寸);l 为后移距离,已知。至此,只需要求出相机的焦距 f,就能求出建筑的几何尺寸[5]。

2 相机标定

本文拟选用普通数码相机来获取序列图像。与传统 CCD 摄像头相比,数码相机具有诸多优势:像素数远大于传统 CCD 摄像头,几何畸变小,价格便宜。但由于普通数码相机为非量测相机,为了获得图像上的位置与空间物体表面相应点的几何位置关系,需要获得相机的内方位元素和光学畸变参数,这个过程称为标定。

2.1 相机模型

相机模型一般分为线性与非线性模型两大类[6]。非线性模型的物像关系是非线性的,并且考虑了镜头的径向畸变和切向畸变,适宜于需要高精度的场合。

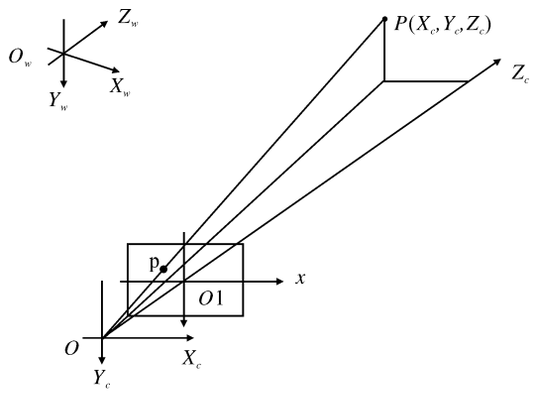


图 2 相机坐标系与世界坐标系

Fig. 2 Camera coordinate system and world coordinate

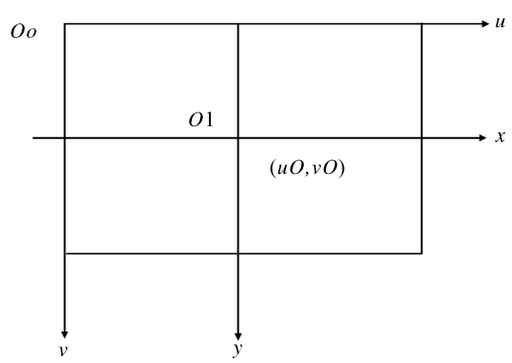


图 3 图像坐标系

Fig. 3 Image coordinate system

图 2 所示,$O_w(X_w,Y_w,Z_w)$ 为世界坐标系;$O(X_c,Y_c,Z_c)$ 是相机坐标系,以针孔相机模型的聚焦中心为原点,以相机光轴为 Z_c 轴建立的三维直角坐标系;$O_o(u,v)$ 为图像坐标系。是空间点 P 在世界坐标系中的三维坐标。使用欧拉角 ω,ψ,κ 表示围绕 x 轴、y 轴、z 轴的旋转角度。为了描述任意 P 点在图像坐标系中的位置,需要将其从世界坐标系转换到相机坐标系中,关系如下:

$$\begin{bmatrix}x_c\\y_c\\z_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&r_{13}\\r_{21}&r_{22}&r_{23}\\r_{31}&r_{33}&r_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}t_x\\t_y\\t_z\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中:

$r_{11}=\cos\varphi\ \cos\kappa$ $r_{12}=\sin\omega\ \sin\kappa\ \cos\kappa-\cos\omega\ \sin\kappa$ $r_{13}=\cos\omega\ \sin\varphi\ \cos\kappa+\sin\omega\ \sin\kappa$

$r_{21}=\cos\varphi\ \sin\kappa$ $r_{22}=\sin\omega\ \sin\varphi\ \sin\kappa+\cos\omega\ \cos\kappa$ $r_{23}=\cos\omega\sin\varphi\sin\kappa-\sin\omega\ \cos\kappa$

$r_{31}=-\sin\varphi$ $r_{32}=\sin\ \omega\cos\varphi$ $r_{33}=\cos\omega\ \cos\kappa$

相机坐标系中的物点 P 在图像物理坐标系中像点 $Pu(x,y)$ 坐标为

$$x=fx_c/z_c \tag{4}$$

$$y=fy_c/z_c \tag{5}$$

在图像坐标系中以像素为单位,进一步转化为像素坐标系:

$$u-u_0=x/d_x=s_xx \tag{6}$$

$$v-v_0=y/d_y=s_yy \tag{7}$$

针孔模型只是真实相机的一种近似表示,却不能准确描述成像几何关系。Atkison 和 Weng 提出了利用下式表示非线性畸变

$$x'=x+\delta_x(x,y) \tag{8}$$

$$y'=y+\delta_y(x,y) \tag{9}$$

式中:(x',y') 为由小孔线性模型计算出来的图像点坐标的理想值;(x,y) 是实际的图像点的坐标;$\delta\sigma'_x$ 与 δ'_y 是非线性畸变值,它与图像点在图像中的位置有关,可用以下公式表达

$$\delta_x(x,y)=k_1x(x^2+y^2)+(p_1(3x^2+y^2)+2p_2xy)+s_1(x^2+y^2) \tag{10}$$

$$\delta_y(x,y)=k_2y(x^2+y^2)+p_2(3x^2+y^2)+2p_1xy)+s_2(x^2+y^2) \tag{11}$$

式中:δ_x 与 δ_y 的第一项称为径向畸变,第二项称为切向畸变,第三项称为薄棱镜畸变;k_1,k_2,p_1,p_2,s_1,s_2 称为非线性畸变参数。

2.2 标定理论

直接线性变换(DLT)[7-8]方法是 Abdel-Aziz 和 Karara 首先于 1971 年提出的。由于它忽略了相机成像过程中的非线性畸变,通过求解线性方程的手段就可以求得摄像机模型的参数。校准过程分为两个步骤:首先,使用 3 * 4 单一矩阵求解物方坐标系到图像坐标系的转换关系,如下式:

$$\begin{bmatrix}u_iw_i\\v_iw_i\\w_i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11}a_{12}a_{13}a_{14}\\a_{21}a_{22}a_{23}a_{24}\\a_{31}a_{32}a_{33}a_{34}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_i\\Y_i\\Z_i\\1\end{bmatrix} \tag{12}$$

通过选择 N 个控制点来解出参数 $a_{11},\cdots a_{34}=0$。为避免零解 $a_{11},\cdots,a_{34}=0$,Abdel-Aziz 和 Karara 使用约束条件 $a_{34}=1$。这些参数并没有任何物理意义,只是给我们提供了引入非线性模型的初始值。

使用真正的相机得到的图像总是受到噪声污染。我们知道,在测量过程中有各种各样的错误分量。如果测量误差的系统的那部分被纠正了,我们可以方便地假设错误是高斯白噪声。然后,该相机参数的最佳估计可以通过求解模型与 N 个观察数据(Ui, Vi),$i=1,\ldots, N.$ 之间的差来得到。在高斯噪声的情况下,对象函数可以用差方和来表达:

$$F=\sum_{i=1}^{N}(U_i-u_i)^2+\sum_{i=1}^{N}(V_i-v_i)^2 \tag{13}$$

利用最小二乘估计法和 Levenberg-Marquardt 最优化方法通常在数次迭代之后得到 F 一个全局最小值。

在实际应用中,两阶径向和切向畸变就可以准确描述相机的畸变情况。

2.3 角点检测

角点是图像中灰度变化剧烈的点,也是轮廓边界上曲率的局部极大值点,是物体形状的重要特征。基于单平面模板的相机标定需要从不同方向拍摄标定模板的图像,提取其中的角点,以此作为计算相机参数的初始输入数据。

常用的角点检测算法有:Moravec 算法、SUSAN 算法及 Harris 算法等。其中,Moravec 算法最显著的优点就是实现简单快速,但它对噪声比较敏感。SUSAN 算法在抗噪声方面有较大的改进,但其定位精度不高。Harris 算法计算简单有效同时非常稳定,在图像旋转、灰度、噪声影响和视点变换的条件下,是一种优良算法,本文选用 Harris 算法提取角点。

Harris 算子定义为

$$I=\det(C)-k\times tr^2(C)$$

式中:$C(i,j)=G(s)\otimes\begin{bmatrix}g_x^{\ 2} & g_xg_y\\ g_xg_y & g_y^{\ 2}\end{bmatrix}$,其中 g_y 为 x 方向的梯度;g_y 为 y 方向的梯度;$G(s)$ 为高斯模板;$\otimes$ 为卷积操作;I 为每点的兴趣值;det 为矩阵的行列式;tr 为矩阵的迹;k 为经验值,一般取 0.04。

3 实验结果

3.1 实验器材

本文使用试验器材为:7 * 9(角点数)棋盘图、数码相机(SONY DSC-W30)、全站仪(型号 302R)。

3.2 相机标定

本文采用 7 * 9(角点数)棋盘图来标定相机,每格边长的实际大小间距为 30 mm,所拍图像大小为 1 632×1 224,如图 4 所示,相机型号为 SONY DSC-W30,标称焦距为 6 mm。

在不同方向拍摄出棋盘的图片(大于 20 张),利用 Harris 算法检测出棋盘角点,如图 5 所示。经过计算,标定结果如表 1 所示。

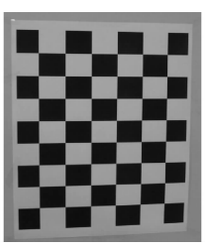


图 4 标定棋盘图

Fig. 4 Calibration board

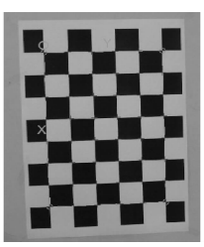


图 5 角点检测图像

Fig. 5 Corner detection image

表 1 标定结果

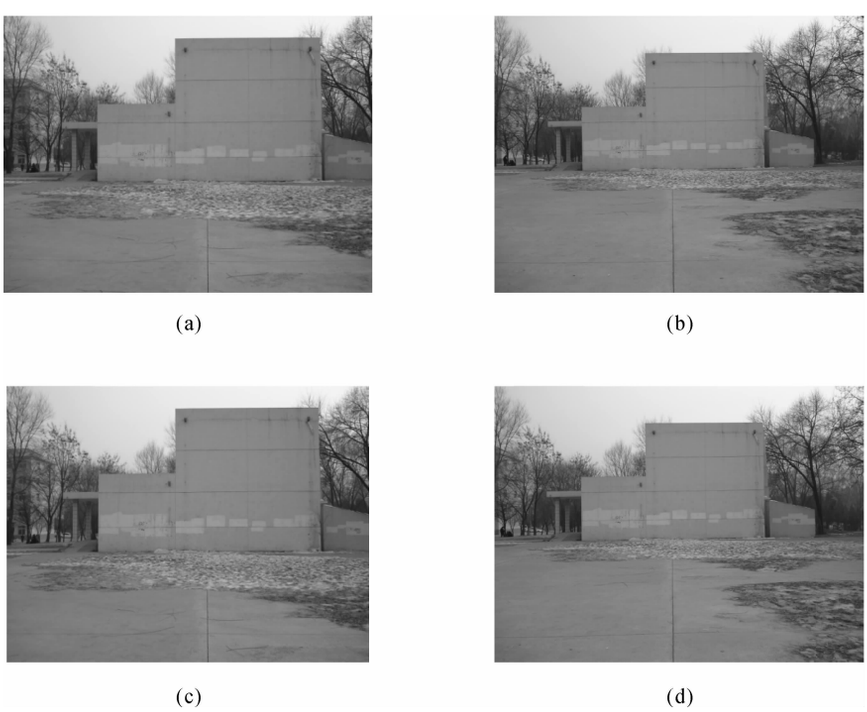
Table 1 Calibration results

f/mm	S_u	u_0/pixel	v_0/pixels
5.760 137	1	846.447 56	547.067 16
k_0/mm^{-2}	k_2/mm^{-4}	p_1/mm^{-1}	p_2/mm^{-1}
−0.095 57	0.119 29	−0.014 02	0.000 18

表 1 中 f 为焦距,S_u 为比例因子,(u_0, v_0) 为图像中心,k_1 和 k_2 为径向畸变的前两阶系数,p_1 和 p_2 为切向畸变的前两阶系数。

3.3 建筑测量

使用数码相机在建筑前拍摄一组(5 张)图像。注意使建筑物正好成像于图像中心,减小畸变。接着垂直建筑平面后移 5 m 后再拍摄一组图像。根据标定所得的畸变参数,再进行图像校正。图 6(a)、图 6(c)分别为首次拍摄和后移 5 m 的图像,图 6(b)、图 6(d)为对应的校正图像。



(a) (b)

(c) (d)

图 6 原图像与校正图像

Fig. 6 Original image and corrected image

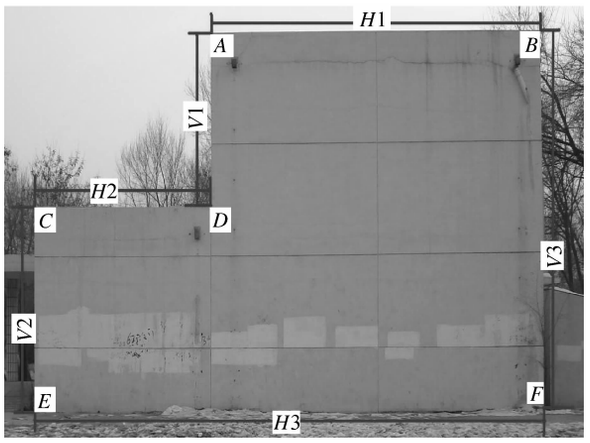


图 7　图像标注

Fig. 7　Image annotation

使用数学软件 MATLAB 获得读取每幅图像,获得上述 6 个点的图像坐标,求得 H_1,H_2,H_3 和 V_1,V_2,V_3 的像素数。每组取其均值,根据每个像素的物理尺寸可求得其实际尺寸。实测值由全站仪(型号 302R)获得,如表 2 所示。

表 2　测量结果

Table 2　Measurement results

	原图像/m	误差	校正图像	误差	实测值
$H1$	7.290 7	−1.2	7.347 6	0.4	7.381
$H2$	4.236 7	4.2	4.104 5	0.9	4.065
$H3$	11.473 6	0.6	11.45 9	0.54	11.397
$V1$	3.434 2	3.6	3.345 2	0.97	3.313
$V2$	4.144 8	3.9	4.023 3	0.91	3.987
$V3$	7.304 2	0.45	7.238 2	−0.45	7.271

分析试验结果可知,未校正前的最大误差为 4.2%,校正后最大误差为 0.97%。而且距离越长,误差越小,反之越大。

4　结语

本文提出了一种利用序列图像测量大型物件的方法,仅利用数码相机等简单器材就能获得建筑的尺寸信息。为获得相机的内部参数,首先采用 DLT 算法进行了相机标定;利用标定结果对一建筑物不同部位进行了测量,获得建筑一个平面的几何尺寸。为了获得更精确的效果,对所拍图像进行了畸变校正。实验证明,该方法能够获得较为准确的结果:未校正前的测量最大误差为 4.2%,校正后达到了 0.97%,测量误差控制在了 1%以内,可满足工业测量的要求,为目标定位等工程应用奠定基础。

参考文献:

[1] 马忠丽,刘宏大,王显峰. 虚拟测量平台的开发与应用[J]. 应用科技,2002,29(11):36-38
MA Zhong-li, LIU Hong-da, WANG Xian-feng. Development and application of dummy measure flat [J]. Applied Science and Technology, 2002, 29(11): 36-38. (in Chinese with an English abstract)

[2] 冀芳. 高精度图像测量技术[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.
JI Fang. High accuracy image measurement technique[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)

[3] 冯卫东. 工业零件形状尺寸图像检测技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2002.
FENG Wei-dong. The research of shape and size of industrial parts of the image detection technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)

[4] 宋振跃. 基于机器视觉的小范围精密测量技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学. 2009.
SONG Zhen-yue. Mini-area precise measurement technology based on machine vision[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009. (in Chinese)

[5] 张尧禹,张明慧,乔彦峰. 一种高精度非接触位置测量系统[J]. 光学精密工程,2001,10(2):41-44.
ZHANG Yao-yu, ZHANG Ming-hui, QIAO Yan-feng. High-precision noncontact position measuring system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 10(2):41-44. (in Chinese with an English abstract)

[6] 马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 北京:科学出版社,2003.
MA Song-de, ZHANG Zheng-you. Computer vision [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

[7] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [J]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Rico, 1997, 17-19: 1106-1112.

[8] ABDEL A, KARARA Y I. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry [C]. Urbana: Univ of Illinois Urbana Champaign, 1971: 1-18.