

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210301

基于鱼眼相机畸变图像的大尺寸目标测量方法

兰颖华^{1,2} 王 鉴^{1,2} 韩 焱^{1,2}

(1. 中北大学山西省信息探测与处理重点实验室 太原 030051; 2 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

摘要: 为满足大尺寸目标高精度图像测量的需求,提出一种利用鱼眼畸变图像实现宽视野、大几何尺寸目标测量方法。根据非线性畸变的多项式逼近函数建立鱼眼相机成像模型,通过立体标定板来确定相机参数;将相机沿光轴方向移动采集一组图像,建立鱼眼相机的测量模型实现待测目标尺寸的测量。通过对棋盘格和某大型建筑物几何尺寸的测量实验表明,本文提出的直接利用畸变图像进行测量的方法优于传统的将畸变图像校正成线性图像测量的方法,具有更高的测量精度和稳定性。

关键词: 大尺寸目标;图像测量;鱼眼相机;畸变特性;立体标定

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Large size target measurement method based on distorted image of fish eye camera

Lan Yinghua^{1,2} Wang Jian^{1,2} Han Yan^{1,2}

(1. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to meet the demand of high precision image measurement of large object, a method of measuring large size target with wide field of vision by using fish eye camera image distortion is proposed. According to the polynomial approximation function of nonlinear distortion, the camera imaging model is established, and the camera parameters are determined through the stereo calibration plate; Move the camera along the optical axis to collect two images, and establish a measurement model to measure the size of the target to be measured. Through the measurement experiments of checkerboard and the geometric dimensions of a large building, it is shown that the method of directly using the distorted image proposed in this paper is superior to the traditional method of correcting the distorted image into a linear image, and has higher measurement accuracy and stability.

Keywords: large size target; image measurement; fish eye camera; distortion characteristics; stereo calibration

0 引 言

摄影测量技术是计算机视觉的一个重要研究方向,通过处理摄像机采集的图像进而获取目标物体的空间位置、形状大小和几何尺寸等信息^[1]。该技术已被广泛应用于建筑测量、军事测距、航空遥感测量、三维重建、目标定位等多个领域^[2]。在实际工程应用中,常常需要在近距离下对宽视野、大尺寸目标进行测量,此时需要摄像机具有很大的视场范围^[3]。传统相机的视场角只有 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,测量大尺寸目标时,需要在较远距离下,或是通过镜头的旋转拼接来实现。而超广角鱼眼相机视场范围可达到甚至超过 180° ,在近距离下即可采集到大尺寸目标的图像,并且体积小安装简单,在大尺寸目标和大视场的近景摄影测量中发挥着

重要作用^[4]。

鱼镜头在增大视场的同时带来了严重的非线性径向畸变,越远离图像中心,畸变程度越大^[5]。基于传统针孔成像模型的图像测量方法不能用于非线性畸变严重的鱼眼图像测量^[6],需根据鱼眼相机的非线性畸变特性重新建立鱼眼相机的成像模型。通用的多项式逼近的鱼眼相机模型可以精确地描述鱼眼相机图像的非线性畸变,通过对多项式中畸变系数的标定,拟合不同的鱼眼畸变模型^[7]。标定鱼眼成像模型的相机参数时。传统棋盘格平面标定方法鲁棒性较好^[8],但平面标定板难以覆盖整幅图像,需要将标定板放置于相机前不同位置拍摄多幅图像,无法通过一幅图像获取相机参数,标定过程复杂且速度较慢。

利用鱼眼相机测量物体尺寸时,传统的方法是将鱼眼

收稿日期:2022-06-13

畸变图像校正为线性图像,然后通过相机标定求解出像素所表示被测物的实际尺寸,进而求出被测目标的尺寸^[9]。然而在畸变校正时存在较大的误差,容易产生图像边缘的伪影或模糊,严重影响了图像测量的精度^[10]。

针对以上问题,本文提出一种基于鱼眼相机畸变图像的大尺寸目标测量方法,无需校正畸变。根据相机非线性成像模型,利用立体标定板快速确定相机参数,建立鱼眼相机测量模型进而实现目标尺寸的高精度测量。

1 鱼眼相机的非线性畸变成像模型

1.1 相机投影模型

普通相机采用的针孔模型为线性投影,入射光线经过镜头后仍沿着直线传播。具有宽视野的鱼眼相机服从非线性投影模型,入射光线经鱼眼镜头后发生折射,产生了严重的非线性径向畸变。针孔相机与鱼眼相机的投影模型如图 1 所示。

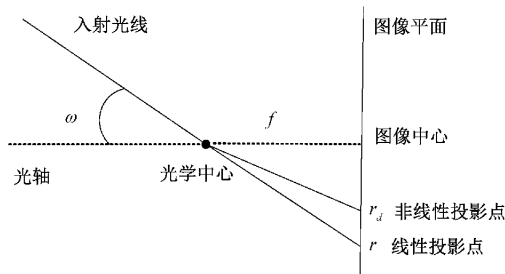


图 1 相机的线性和非线性投影模型

针孔相机线性投影模型可由式(1)的函数关系表示:

$$r = f \tan \omega \quad (1)$$

其中, r 为线性投影点到图像主点的径向距离, f 为相机的焦距, ω 为入射光线相对于光轴的入射角。

鱼眼相机的投影模型可表述为式(2)的 4 种投影函数,最常用的是等距投影模型^[11]。

等距投影: $r_d = f \omega$

正交投影: $r_d = f \sin \omega$

体视投影:

$$r_d = 2f \tan(\omega/2) \quad (2)$$

等立体角投影: $r_d = 2f \sin(\omega/2)$

其中, r_d 为非线性畸变投影点到图像主点的径向距离。

由于实际的鱼眼相机镜头曲率半径各异,难以用模型精准描述,为此,Kannala 在等距投影模型的基础上,提出了一种通用于不同鱼眼相机投影模型的多项式逼近模型,如式(3):

$$r_d = f \omega_d = \sum_i k_i f \omega^{2i+1} \approx f(\omega + k_1 \omega^3 + k_2 \omega^5 + k_3 \omega^7) \quad (3)$$

其中, ω_d 是 ω 的奇函数,根据泰勒级数展开可用 ω 的奇次多项式表示,变换畸变系数 k_1, k_2, k_3 可近似拟合不同

的投影模型,OpenCV 中使用的是这种多项式逼近模型。由式(3)可看出,多项式模型可很好地描述鱼眼投影的过程,精细表述不同视场角 ω 的畸变特性。离光轴越远即 ω 越大,畸变越大,鱼眼相机的这种非线性特性,特别适用于大目标尺寸的精确测量和目标检测等应用领域。

1.2 鱼眼相机的非线性成像模型

鱼眼相机的非线性成像模型的映射关系可以简化为球面映射,其映射关系是目标点世界坐标到成像平面像素坐标的转换,如图 2 所示。

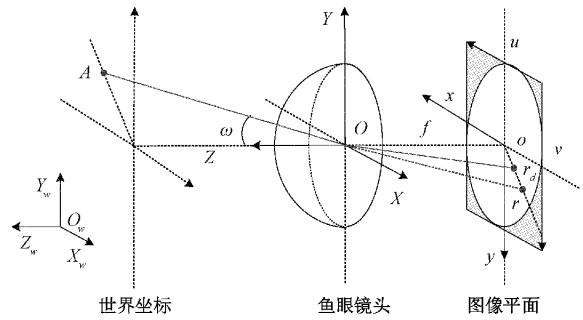


图 2 鱼眼相机的成像模型

图 2 中 O_w, X_w, Y_w, Z_w 是世界坐标系,是一个在适当空间中选取的参考坐标系; $OXYZ$ 是鱼眼相机坐标系,以鱼眼镜头光心为原点的球面坐标; (x, y) 为图像物理坐标; (u, v) 为图像像素坐标。世界坐标系中一点经过鱼眼相机投影到图像平面上。 A 是世界坐标中的一点,鱼眼非线性投影的畸变点为 A_d ,产生了严重的径向畸变。鱼眼相机的坐标的转换过程如下:

1) 由世界坐标到相机坐标的转换

相机坐标与世界坐标间的转换关系如式(4)所示。

$$[X, Y, Z]^T = \mathbf{R}[X_w, Y_w, Z_w]^T + \mathbf{t} \quad (4)$$

其中, \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{t} 为平移向量,是相机的外部参数。

2) 由相机坐标到图像平面坐标的转换

A 点经过鱼眼相机非线性投影到图像上的 A_d 点, (x, y) 为 A_d 的图像平面坐标,图像平面坐标与相机坐标的转换关系如式(5)所示。

$$\begin{cases} x = r_d \cos \varphi = f \omega_d X / \sqrt{X^2 + Y^2} \\ y = r_d \sin \varphi = f \omega_d Y / \sqrt{X^2 + Y^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中, φ 为 A 点的方位角, ω_d 为入射角。

$$\omega_d \approx \omega + k_1 \omega^3 + k_2 \omega^5 + k_3 \omega^7 \quad (6)$$

入射角 ω 与相机坐标 (X, Y, Z) 间的关系如式(7)所示。

$$\omega = \arctan(\sqrt{X^2 + Y^2} / Z) \quad (7)$$

3) 由图像平面坐标到像素坐标的转换

A 点的像素坐标 (u_d, v_d) 与图像平面坐标 (x, y) 及相机坐标 (X, Y) 间的转换关系如式(8)所示。

$$\begin{cases} u_d = x/dx + u_0 = f_x \omega_d X / \sqrt{X^2 + Y^2} + u_0 \\ v_d = y/dy + v_0 = f_y \omega_d Y / \sqrt{X^2 + Y^2} + v_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, dx 、 dy 为感光元件上的实际尺寸, u_0 、 v_0 为像素主点坐标, 其中 $f_x = f/dx$ 、 $f_y = f/dy$ 。

鱼眼相机的参数 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 及畸变系数 k_1 、 k_2 、 k_3 可通过相机标定来确定。

2 鱼眼相机参数的确定

对于针孔相机而言, 只要已知焦距, 其投影关系即可确定。而对于鱼眼相机其投影关系与鱼眼相机的镜头密切相关, 需根据实际的相机标定来确定其内部参数及非线性畸变参数。

为了实现目标特征点从三维坐标到图像像素坐标的转换, 需求解出鱼眼非线性畸变成像模型中相机的内参和畸变系数^[12]。传统的棋盘格平面标定方法, 需要在不同位置拍摄多幅标定板图像, 无法通过一幅图像获取相机参数, 且标定过程比较复杂。本文采用立体板标定方法, 该方法只需采集一幅图像即可得到相机参数^[13]。用三块两两垂直的黑白棋盘格平面组成立体标定板, 如图 3(a) 所示。将标定板按棋盘格所在平面分割成 P_1 、 P_2 、 P_3 三部分, 如图 3(b) 所示。

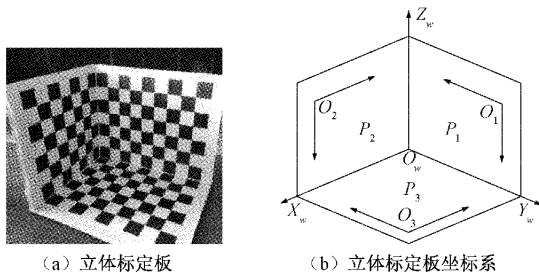


图 3 立体标定板示意图

固定立体标定板, 利用鱼眼相机采集一幅立体标定板的图像, 使棋盘格分布在整幅图像。采集的图像中包含这三部分的角点信息。

将世界坐标系定义在立体标定板上; P_1 、 P_2 、 P_3 的标定板世界坐标系分别取 $X_w = 0$ 、 $Y_w = 0$ 、 $Z_w = 0$; 根据棋盘格的间距得到标定板上角点的世界坐标。采用 Harris 角点检测算法来提取鱼眼图像中三部分平面中间部分角点的像素坐标^[14], 无需考虑各部分平面边界线上的角点。

由于假设了标定板上角点的世界坐标, 所以需要考虑标定板世界坐标系和相机坐标系之间的转换。根据旋转矩阵的约束关系, 结合成像模型中的转换关系构建方程组即可求解出外参, 内参和畸变系数的初值。将 3 部分平面上所有角点的数据进行非线性优化, 最小化标定点的实际坐标 p 和重投影点 p' 的位置, 如式(9)所示。

$$F = \min \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_i} \| p_{ij} - p'_{ij}(f_x, f_y, u_0, v_0, k_1, k_2, k_3) \|^2 \quad (9)$$

其中, N_i 为 P_i 平面提取的角点个数, 本文通过 Levenberg-Marquardt 算法来非线性优化所有标定参数^[15], 将畸变系数的初值设为 0, 迭代数次后得到最优的标定参数。至此, 求解出相机内参 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 和畸变系数 k_1 、 k_2 、 k_3 从而确定了目标特征点的世界坐标到像素坐标的转换关系。

3 基于鱼眼相机图像的目标尺寸测量模型

基于鱼眼相机畸变图像的目标尺寸测量的方法是利用鱼眼相机的畸变特性直接测量的, 无需将图像校正成线性图像。测量的主要思路是将图像畸变特征点从像素坐标反投影到世界坐标, 直接在世界坐标系下对目标尺寸进行测量。为简化转换关系, 将世界坐标直接定义在相机坐标系下; 设外参 $R = 0$ 、 $t = 0$, 世界坐标为 (X, Y, Z) 。

在内参与畸变系数确定后, 根据目标特征点的距离 Z 和像素坐标 (u_d, v_d) , 联立式(6)~(8)即可求得目标特征点的世界坐标 (X, Y) 。由式(7)可知, 在测量时需已知目标到相机的距离 Z , 在实际工程实施中距离是未知的, 利用单幅图像无法获取^[16]。所以本文借助双目视觉方法, 通过沿光轴方向移动鱼眼相机采集两幅畸变图像来求取。使鱼眼相机沿光轴移动一定距离 l 由 O_1 点到 O_2 点, 使待测目标分布在图像区域, 且移动前后有明显差别; 在 O_1 和 O_2 点处分别拍摄两幅畸变图像 I_1 和 I_2 , 如图 4 所示。提取两幅图像中的目标特征点并进行特征点匹配, (u_{d1}, v_{d1}) 为特征点在图像 I_1 中的像素坐标, (u_{d2}, v_{d2}) 为在图像 I_2 中的像素坐标。根据特征点对的像素坐标获取世界坐标 (X, Y, Z) 计算出特征点间实际尺寸。

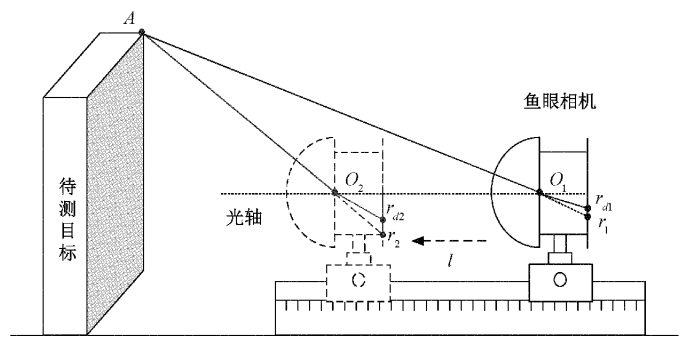


图 4 鱼眼相机的测量模型

待测目标上特征点 A 在图像 I_1 和 I_2 上的实际畸变特征点到图像主点的像素距离分别为 r_{d1} 和 r_{d2} , 理想线性图像的特征点到图像主点的距离为 r_1 和 r_2 。测量的几何模型如图 5 所示。

由三角形相似原理得到 r_1 、 r_2 与 Z 的关系如式(10)所示。

$$\begin{cases} r_1/R = f/Z \\ r_2/R = f/(Z+l) \end{cases} \quad (10)$$

通过求解方程组式(10)可求解距离如式(11)所示。

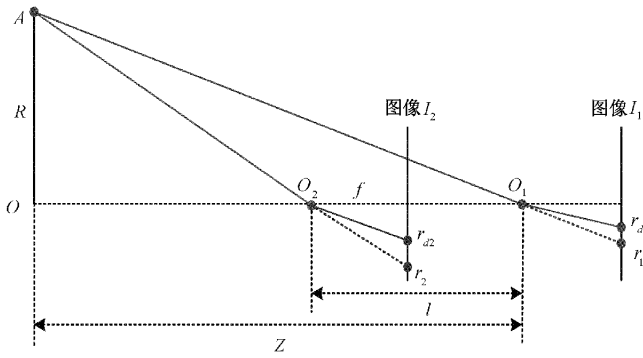


图 5 测量的几何模型

$$Z = lr_2 / (r_1 - r_2) \tag{11}$$

根据线性投影模型式(1)和多项式畸变模型式(3)得到 r 与 r_d 的关系,如式(12)所示。

$$r/r_d = \tan\omega/\omega_d \tag{12}$$

式(12)中的 r_d 可由式(13)求得:

$$r_d = \sqrt{(u_d - u_0)^2 + (v_d - v_0)^2} \tag{13}$$

结合鱼眼成像模型中式(6)~(8)可列出非线性方程组如式(14)所示。

$$\begin{cases} Z = lr_2 / (r_1 - r_2) \\ r_1 = r_{d1} \tan\omega_1 / \omega_{d1} \\ r_2 = r_{d2} \tan\omega_2 / \omega_{d2} \\ r_{d1} = \sqrt{(u_{d1} - u_0)^2 + (v_{d1} - v_0)^2} \\ r_{d2} = \sqrt{(u_{d2} - u_0)^2 + (v_{d2} - v_0)^2} \\ \omega_1 = \arctan(\sqrt{X^2 + Y^2} / Z) \\ \omega_2 = \arctan(\sqrt{X^2 + Y^2} / (Z + l)) \\ u_{d1} = f_x \omega_{d1} X / \sqrt{X^2 + Y^2} + u_0 \\ v_{d1} = f_y \omega_{d1} Y / \sqrt{X^2 + Y^2} + v_0 \\ \omega_{d1} = \omega_1 + k_1 \omega_1^3 + k_2 \omega_1^5 + k_3 \omega_1^7 \\ \omega_{d2} = \omega_2 + k_1 \omega_2^3 + k_2 \omega_2^5 + k_3 \omega_2^7 \end{cases} \tag{14}$$

通过求解该非线性方程组进而可以求解出目标点世界坐标 (X, Y, Z) 。将相机移动距离 l , 特征点 A 在图像 I_1 和 I_2 上的像素坐标 (u_{d1}, v_{d1}) 和 (u_{d2}, v_{d2}) , 将标定求得相机的参数 f_x, f_y, u_0, v_0 及畸变系数 k_1, k_2, k_3 带入式(14),通过求解非线性方程组,即可求出实际世界坐标 (X_A, Y_A, Z_A) 。求解非线性方程组时,为了简化计算过程,先将畸变系数设为 0 求出初值,然后再带入实际畸变系数和初值进行迭代求解。同理也可求出另一点 B 的坐标 (X_B, Y_B, Z_B) , 根据欧式距离公式可求解出 AB 间的实际尺寸,如式(15)所示。

$$|AB| = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \tag{15}$$

根据上述公式推导,可通过鱼眼相机畸变图像实现目标特征点间实际尺寸的测量。

4 实验与分析

为了验证本文提出的利用鱼眼相机畸变图像测量目标尺寸方法的有效性和普适性,本文进行了棋盘格和建筑物几何尺寸测量实验。

4.1 实验准备

实验设备包括鱼眼相机、立体棋盘格标定板、移动滑轨及三脚架。鱼眼相机为得图 Dokicam 全景相机,分辨率为 2048×2048 ,视场角为 190° ,如图 6 所示。棋盘格的间隔为 30 mm。算法均在一台电脑上运行,电脑的具体配置为:CPU 2.5 GHz,内存 8 GHz,操作系统是 windows10,运行环境为 Visual studio 2019 及 OpenCV。

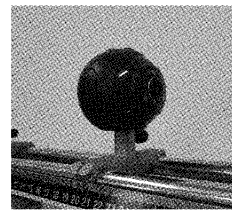
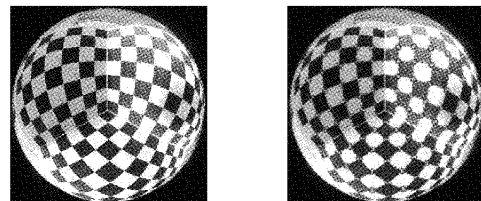


图 6 鱼眼相机

4.2 实验及数据结果

首先标定鱼眼相机的内参和畸变系数,采用立体黑白棋盘格标定板,黑白棋盘格间的间距为 30 mm。用鱼眼相机拍摄一张立体标定板的图像,然后在 OpenCV 及 Visual studio 2019 的环境下用 C 语言编写标定程序对鱼眼相机进行标定。立体棋盘格标定板的鱼眼图像如图 7 所示。求得鱼眼相机的畸变参数的内参如表 1 所示。通过反投影验证标定的精度,反投影误差为 0.02%,证明了标定参数的准确性。



(a) 鱼眼图像 (b) 角点提取

图 7 立体标定板

表 1 标定的相机参数值

参数	标定数据
(k_1, k_2, k_3)	$(-0.0302, 0.0052, -0.0025)$
(f_x, f_y)	$(725, 726)$
(u_0, v_0)	$(1012, 1027)$

1) 测量棋盘格的几何尺寸

选取黑白棋盘格间距 30 mm 的平面板为实际被测物,在棋盘格上取 4 组尺寸 AB, BC, CD, AD 测量,如图 8 所示。将鱼眼相机垂直被测物平面沿光轴方向移动拍摄一组

图像如图 9 所示,然后分别用传统方法和本文方法测量。

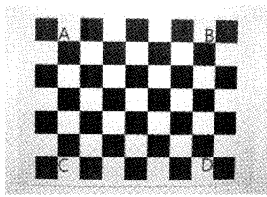


图 8 棋盘格标注图

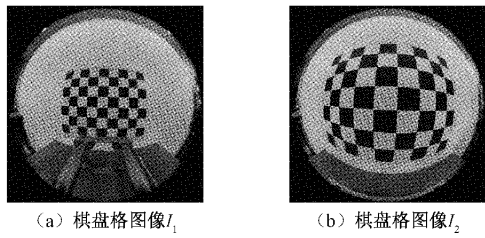


图 9 棋盘格的鱼眼图像

传统方法进行测量时,先将畸变图像校正成线性图像。根据被测平面已知尺寸的两点间距确定每个像素表示的物

理尺寸,提取特征点像素坐标求出像素距离,从而求得实际尺寸。校正后的图像如图 10 所示,从图中看出只有部分图像区域得到校正且边缘校正不准确。

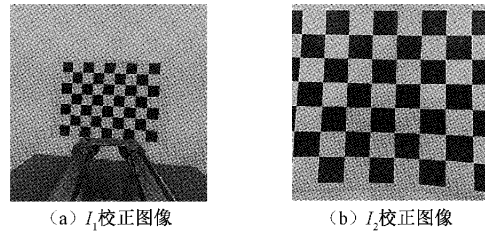


图 10 传统方法畸变校正后的图像

本文方法进行测量时,直接利用鱼眼图像,无需将畸变图像校正成线性图像。标定鱼眼相机的参数并提取特征点像素坐标,根据本文提出的测量模型编程求解式(14)求出特征点世界坐标,再通过式(15)得到待测实际尺寸,如表 2 所示。两种方法测量棋盘格上 AB、BC、CD、AD 四组尺寸的结果如表 3 所示。

表 2 棋盘格几何尺寸测结果

距离	特征点	I_1 像素坐标	I_2 像素坐标	世界坐标/mm	计算值/mm
AB	A	(703, 755)	(512, 600)	(-95.60, -84.03, 199.69)	206.8
	B	(1 374, 778)	(1 572, 614)	(110.99, -76.24, 194.40)	
CD	C	(673, 1 233)	(475, 1 352)	(-108.10, 65.60, 207.67)	213.65
	D	(1 358, 1 274)	(1 570, 1 419)	(104.92, 74.79, 194.07)	
AC	A	(703, 755)	(512, 600)	(-95.60, -84.03, 199.69)	150.36
	C	(673, 1 233)	(475, 1 352)	(-108.10, 65.60, 207.67)	
BD	B	(1 374, 778)	(1 572, 614)	(110.99, -76.40, 194.40)	151.15
	D	(1 358, 1 274)	(1 570, 1 419)	(104.92, 74.79, 194.07)	

表 3 棋盘格尺寸的对比测量结果

距离	实测值/mm	传统方法		本文方法	
		计算值/mm	误差/%	计算值/mm	误差/%
AB	210	218.67	4.13	206.80	1.52
CD	210	216.85	3.26	213.65	1.74
AC	150	143.69	4.21	150.36	0.24
BD	150	154.76	3.17	151.15	0.77
			3.69		1.07

根据表 3 中的棋盘格间距离的计算值,与实测后的误差分析可得,传统方法测量的相对误差在 3.17%~4.21%,平均相对误差为 3.69%。本文方法测量的相对误差在 0.24%~1.52%,平均相对误差为 1.07%。测量结果证明了本文提出的测量模型的有效性和准确性。

2)测量建筑物的几何尺寸

利用本文提出的测量模型对建筑目标的尺寸进行测

量,验证在实际的工程应用中,本文提出的图像测量方法的精确性,在建筑物上取 6 组尺寸 AB、CD、EF、AD、CE、BF 测量,如图 11 所示;分别用传统方法和本文方法进行测量。测量时借助三角架将鱼眼相机沿光轴移动 1 m 拍摄两张棋盘格的鱼眼图像如图 12 所示。建筑物上的 AB、CD、EF、AD、CE、BF 测量测量结果如表 4 所示。利用线性相机拍摄建筑物图像,对比鱼眼相机和线性相机初始位置及移动的距离。

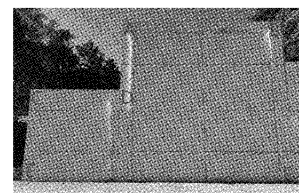


图 11 建筑物标注图

根据表 4 可知,测量建筑物的几何尺寸时,传统方法测量相对误差在 2.08%~3.46%,平均相对误差为 2.76%。

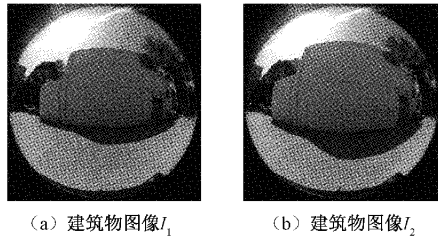


图 12 建筑物的鱼眼图像

表 4 建筑物几何尺寸的对比测量结果

距离	实测值/ mm	传统方法		本文方法	
		计算值/ mm	误差/ %	计算值/ mm	误差/ %
AB	7 483	7 718.1	3.14	7 506.9	0.32
CD	4 031	4 138.6	2.67	4 077.0	1.14
EF	11 540	11 780.0	2.08	11 449.2	0.79
AD	3 347	3 462.8	3.46	3 312.5	1.03
CE	4 025	4 129.2	2.59	4 062.8	0.94
BF	7 368	7 166.1	2.74	7 378.3	0.14
			2.76		0.73

利用本文方法测量相对误差在 0.14%~1.14%，平均相对误差为 0.73%。测量结果证明了本文提出的测量模型在实际工程应用中的有效性和准确性。

利用针孔线性相机拍摄图像测量该建筑的尺寸，通过将相机沿光轴移动一定的距离拍摄两幅或多幅图像，在距离建筑物 15 m 处向前移动 6 m 拍摄图像，而鱼眼相机在距离建筑 5 m 处只需移动 1 m 拍摄图像即可实现测量。

4.3 实验数据分析

由表 3 和 4 所示的实验结果可知，当分别测量小尺寸棋盘格和大尺寸建筑物的几何尺寸时，应用传统方法测量的平均相对误差为 3.69% 和 2.76%，而本文方法测量的平均相对误差仅为 1.07% 和 0.73% 在被测物相同的情况下，测量棋盘格尺寸时，本文方法比传统方法的平均相对误差低 2.62%；测量建筑物尺寸时，本文方法比传统方法的平均相对误差低 2.03%；可知本文方法比传统方法的测量精度更高。当被测物从棋盘格转换到建筑物时，测量距离相应变远从 0.2~5 m，传统方法测量建筑物尺寸比测量棋盘格尺寸的平均相对误差减小了 0.93；而本文方法测量建筑物尺寸比测量棋盘格尺寸的平均相对误差只减小了 0.34%。本文方法相比传统方法受被测物及测量距离的影响较小，在实现高精度测量的同时有较好的稳定性。且与针孔相机测量相比，鱼眼相机在较近距离下移动较小距离即可实现测量。

5 结 论

本文研究了直接利用鱼眼相机畸变图像对目标尺寸

进行测量的方法，根据相机的非线性成像模型及立体标定技术，定向移动鱼眼相机建立图像测量模型，进而获取目标尺寸。实验结果表明本文方法比传统畸变校正后图像测量的方法具有更高的测量精度和稳定性，且相机移动距离小，特别适用于大尺寸目标的高精度图像测量，增大了测量范围且应用场合广泛。但是本文方法未能针对不同的测试目标给出鱼眼相机测量距离的具体范围大小，这是在接下来的研究中需要改善的方向。

参考文献

- [1] 张宗华,刘巍,刘国栋,等.三维视觉测量技术及应用进展[J].中国图象图形学报,2021,26(6):1483-1502.
- [2] 宋平,杨小冈,齐乃新,等.基于序列图像的空间目标姿态估计方法[J].仪器仪表学报,2020,41(11):226-234.
- [3] 李威静,王鉴,韩焱,等.宽视角相机相对姿态测量方法研究[J].电子测量技术,2022,45(4):107-113.
- [4] KHOMUTENKO B, GARCIA G, MARTINET P. An enhanced unified camera model[J]. IEEE Robotics and Automation Letters,2016,1(1):137-144.
- [5] ZHU H, WANG X, ZHOU J, et al. Approximate model of fisheye camera based on the optical refraction[J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 73(3): 1445-1457.
- [6] 徐响泽,赵汝进,马跃博,等.一种用于鱼镜头的线性标定方法[J].计算机工程,2019,45(12):196-200.
- [7] 张春森,严露,于振.一种 Kannala 模型的鱼眼相机标定方法优化[J].西安科技大学学报,2019,39(6):1026-1032.
- [8] 吴军,王玲容,黄明益,等.多几何约束下的鱼眼相机单像高精度标定[J].光学学报,2018,38(11):199-210.
- [9] 师蒙蒙.基于图像畸变与位移图像序列的测量方法研究[D].太原:中北大学,2012.
- [10] 魏利胜,张平改,费敏锐.基于非线性方程的鱼眼图像畸变矫正方法研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(11):1584-1593.
- [11] 张宝峰,冯为嘉,宗晓宁,等.基于鱼镜头的全景立体视觉研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(S1):95-99.
- [12] 张静,柴兴华,裴春琴,等.一种适用于广角、鱼眼及折反射系统的标定方法[J].科学技术与工程,2018,18(5):252-257.
- [13] 高秀丽,迟瑞娟,王建强.采用立体标定板的鱼眼相机快速标定方法[J].哈尔滨工程大学学报,2016,37(11):1594-1599.
- [14] 周伟,巢渊,李龔,等.基于改进 Harris 角点检测的芯片图像快速校正[J].电子测量与仪器学报,2020,34(10):74-81.
- [15] 杨宇,赵成星,张晓玲.鱼眼相机的视觉标定及畸变校正[J].激光杂志,2020,41(9):20-23.
- [16] 李占旗,高继东,彭凯,等.基于 PnP 算法的前方车辆测距方法[J].国外电子测量技术,2020,39(12):104-108.

作者简介

兰颖华,硕士研究生,主要研究方向为计算机视觉。

E-mail:3206163058@qq.com

王鉴,副教授,主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail:9036944@qq.com

韩焱,教授,博士生导师,主要研究方向为通信技术、信号处理和识别,数字图像处理与信息重建等。

E-mail:hanyan@nuc.edu.cn