

基于三维控制场的鱼眼影像检校和纠正方法

皮英冬¹, 李 欣¹, 陈智勇¹, 汪宏晨^{2*}

¹ 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430072;

² 武汉大学科学技术发展研究院, 湖北 武汉 430072

摘要 视场在 180°左右的鱼眼影像的变形主要包括由镜头球形结构引起的变形和光学畸变, 针对这两种畸变提出一种基于三维控制场的分步检校方法, 该方法基于直接线性变换(DLT)建立像方空间与物方空间的对应关系模型, 结合球面透视模型迭代解算与鱼眼结构有关的变换半径, 在第一步检校结果的基础上建立影像的畸变模型, 并将该模型引入到 DLT 中对光学畸变参数进行检校, 利用第二步检校的结果对影像进行再纠正, 解决了鱼眼影像严重的畸变问题, 并通过实验验证了该方法的有效性及其精度。

关键词 机器视觉; 相机检校; 鱼眼影像; 直接线性变换; 球面模型; 畸变模型

中图分类号 P234.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0115001

Calibration and Rectification of Fisheye Images Based on Three-Dimensional Control Field

Pi Yingdong¹, Li Xin¹, Chen Zhiyong¹, Wang Hongchen²

¹ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

² Institute of science and technology development, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

Abstract The main distortions of fisheye images of a field view 180° are the distortion due to the spherical structure and optical distortion. A step-wise calibration method based on the three-dimensional control field is proposed, in which the relationship between 3D space and imagery space is constructed with direct linear transformation (DLT), and the transformation radius associated with fisheye structure is calibrated with the iteration method combining the spherical perspective model. The distortion model is constructed based on the correction result of the first calibration, and introduced into DLT to calibrate the distortion parameters. The images are corrected again with the result of second calibration, which solves the serious distortion of fisheye images. The experiments verify the effectiveness and accuracy of the proposed method.

Key words machine vision; camera calibration; fisheye image; direct linear transformation; spherical model; distortion model

OCIS codes 150.1488; 280.4788; 150.1135; 150.6910

1 引 言

相较于普通相机, 鱼镜头相机具有更大的视场, 一次拍摄获取的影像包含更多的空间信息, 在拍摄高大建筑物以及狭长目标时优势更加明显^[1-2]。然而, 其影像变形过大, 不符合中心投影, 更不能满足精确的测量需要, 因此, 在鱼眼影像应用之前需要对其进行纠正, 校正其几何变形。

收稿日期: 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(41271431)、国家 973 计划(2012CB719900)、航空遥感技术国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(2014B07)

作者简介: 皮英冬(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事航空航天摄影测量与近景摄影测量方面的研究。

E-mail: piyingdong@whu.edu.cn

导师简介: 李 欣(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事摄影测量与遥感以及工业测量方面的研究。

E-mail: xli2126@whu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: wanghc@whu.edu.cn

针对鱼眼影像的检校和纠正问题,国内外学者已进行了大量的研究^[3-5],这些研究主要针对物理模型^[6]以及畸变模型^[7-8],其中,物理模型通过模拟鱼眼相机的成像原理,建立鱼眼影像与中心投影影像的对应关系;畸变模型从影像的变形出发,通过对像点的畸变进行拟合,实现像点变形的逐一纠正。然而,由于影像的畸变并非由单一因素引起的,所以不可能构建绝对严密的物理模型,从而导致纠正后的影像仍存在较大的变形;畸变模型虽然在理论上是严密的,但鱼眼影像的变形过大,同样难以构建合适的数学模型对其进行拟合。

针对上述问题,本文通过对鱼眼镜头的结构进行分析,将鱼眼影像畸变分为两类:1)与鱼眼镜头的球形结构有关的球面畸变;2)镜头的传统光学畸变差。针对这两类畸变,本文提出一种分步的10参数检校方法,首先,在原始影像上检校与鱼眼镜头变换模型有关的变换半径;然后,在检校参数的基础上利用球面变换模型对影像进行纠正,再在纠正影像的基础上检校纠正后影像的内参数和相机畸变系数;最后,根据这10个检校参数对影像变形进行改正。改正方法仍分为两步:1)检校参数改正球面变形;2)检校参数改正镜头畸变。

2 鱼眼影像畸变分析

通过对鱼眼镜头的结构进行分析,可认为鱼眼影像包含两个方面的畸变:1)与鱼眼镜头的球形结构有关的球形畸变;2)镜头的光学畸变。图1显示了鱼眼镜头的成像原理,光线A、B、C在直线传播时应相交于像平面E的中心O,当光线进入鱼眼镜头时传播方向变为垂直于像平面E,光线在像平面上的成像分别为a、b、c,该成像方式为非中心投影成像,此时影像的几何畸变即为由鱼眼镜头的球形结构引起的变形。

若在与球面相切处有一虚拟的像平面E',则光线A、B、C在E'上的成像为a'、b'、c',该虚拟成像面符合中心投影方式,且该虚拟像平面的主距f与球面的变换半径R相等,若通过两个平面之间的几何变换关系以及准确的变换半径R将鱼眼影像的像点变换到虚拟像平面E'上,则球形结构畸变将得到改正。然而,由于镜头设计制作等原因实际的鱼眼镜头与理想的球形镜头之间仍存在偏差,这种偏差在虚拟像平面E'上主要表现为一种光学畸变,并可根据畸变特性将其分解为径向畸变、偏心畸变以及薄棱镜畸变^[9]。其中,径向畸变dr与偏心畸变dt,如图2所示。

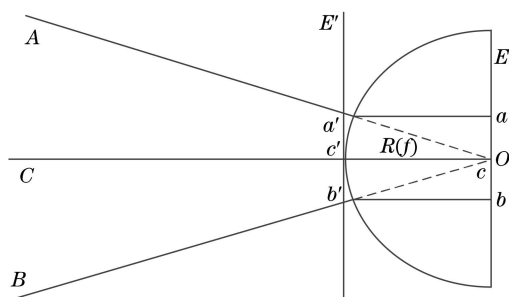


图1 鱼眼镜头成像原理

Fig. 1 Imaging principle of fisheye lens

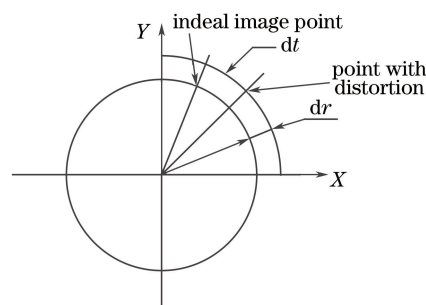


图2 径向畸变与偏心畸变

Fig. 2 Radial distortion and eccentric distortion

1) 径向畸变差为发生畸变的像点与理论像点间的径向位移,是一种轴对称畸变。镜头的径向畸变有两种趋势:一种是像点的畸变朝着离开中心的趋势,又称为鞍形畸变;另一种是像点的畸变朝着向中心点聚缩的趋势,又称为桶形畸变。径向畸变的模型为

$$\begin{cases} \Delta x_r = (x - x_0) \{k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + o[r^8]\} \\ \Delta y_r = (y - y_0) \{k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + o[r^8]\} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ 分别为坐标 (x, y) 处的两个方向上的非线性畸变分量, (x_0, y_0) 为像主点的坐标, k_1, k_2, k_3 均为径向畸变系数。

2) 中心投影的光学系统都存在不同程度的偏心畸变,包含了径向畸变和切向畸变,产生这种变形的原因主要是透镜的光轴与摄像机光轴不同轴,其畸变模型为

$$\begin{cases} \Delta x_d = p_1 [r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2p_2 (x - x_0)(y - y_0) + o[(x - x_0, y - y_0)^4] \\ \Delta y_d = p_2 [r^2 + 2(y - y_0)^2] + 2p_1 (x - x_0)(y - y_0) + o[(x - x_0, y - y_0)^4] \end{cases}, \quad (2)$$

式中 p_1, p_2 均为偏心畸变系数。

3) 薄棱镜畸变是由于摄像机镜头中的透镜制造和装配误差引起的,该畸变模型可以表示为

$$\begin{cases} \Delta x_p = s_1 r^2 + o [(x - x_0, y - y_0)^4] \\ \Delta x_p = s_2 r^2 + o [(x - x_0, y - y_0)^4] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 s_1, s_2 均为薄棱镜畸变系数。

3 检校数学模型

3.1 直接线性变换模型

直接线性变换(DLT)建立了像点坐标与物方空间坐标之间的线性关系,理论上为共线方程的一种变换形式,因无需内方位元素值和外方位元素初值,故特别适用于非量测相机所摄影像的摄影测量处理^[10]。直接线性变换的公式为

$$\begin{cases} x + \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0 \\ y + \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

由 DLT 解算的系数 L_i 的值可计算影像主距的值,计算公式分别为

$$\begin{cases} A = (L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2) - x_0^2 \\ B = (L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2) - y_0^2 \\ C = (L_1 L_5 + L_2 L_6 + L_3 L_7) / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2) - x_0 y_0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$f = \sqrt{\frac{AB - C^2}{B} + \frac{AB - C^2}{A}}, \quad (6)$$

式中 f 为影像的主距, A, B, C 均为中间变量。

3.2 球面透视模型

球面透视投影模型^[11]建立了球面点与理想中心投影影像点的一一对应关系,如图 3 所示,原点 O 为镜头中心, OUV 平面为鱼眼镜头像平面, OZ 为主光轴,虚拟中心投影平面为 E ,其像空间坐标系 $O-UVZ$,投影球面方程为 $u^2 + v^2 + z^2 = R^2$, P 为空间任意一点, OP 连线与投影球面相交于点 P' , P' 点正投影到 $O'U'V'$ 像平面上,得到像点 P'' ,坐标为 (u, v) ,即 (u, v) 为 P' 的球面投影。

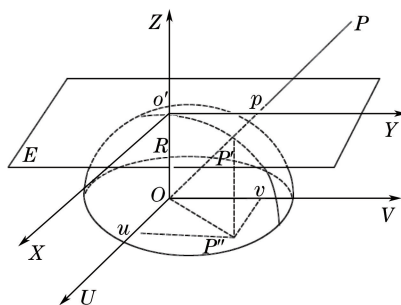


图 3 鱼眼镜头球面投影示意图

Fig. 3 Spherical projection of fisheye lens

假设在 $Z=R$ 的平面处有一虚拟的像平面 E ,对应的坐标轴方向与像平面 OUV 中的坐标轴平行, OP 连线与 $O'XY$ 交点 p 坐标的像平面坐标为 (x, y) 。则 p 与 P'' 之间关系为

$$\begin{cases} x = \frac{R \cdot u}{\sqrt{R^2 - u^2 - v^2}} \\ y = \frac{R \cdot v}{\sqrt{R^2 - u^2 - v^2}} \end{cases}. \quad (7)$$

采用该模型进行影像纠正时,若使用(7)式直接纠正可能会造成影像的像素重叠(多个像点)或像素空白(无像点),为了避免该问题,采用间接法重采样的方式,按照(7)式的关系,从虚拟二维平面出发,反推当前像

素在鱼眼影像上的位置,生成基于球面透视投影模型的中心投影影像结果,计算公式为

$$\begin{cases} u = \pm \sqrt{\frac{x^2 R^4}{R^4 + x^2 R^2 + y^2 R^2}} \\ v = \pm \sqrt{\frac{y^2 R^4}{R^4 + x^2 R^2 + y^2 R^2}} \end{cases} \quad (8)$$

4 鱼眼相机检校方法

针对鱼眼影像包含的两种误差,采用分步检校的方法对与影像的变形有关的参数进行检校。第一步,结合 DLT 模型和球面变换模型迭代解算球面模型的变换半径 R ,然后根据检校的参数将原始影像根据球面变换模型进行纠正;第二步,结合 DLT 模型与影像的畸变模型构建其检校模型,在第一步的结果上对影像中残余的光学畸变参数进行检校,包括主距 f 、主点 (x_0, y_0) 以及畸变系数 $(k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2)$,分步检校方法的整体流程如图 4 所示。

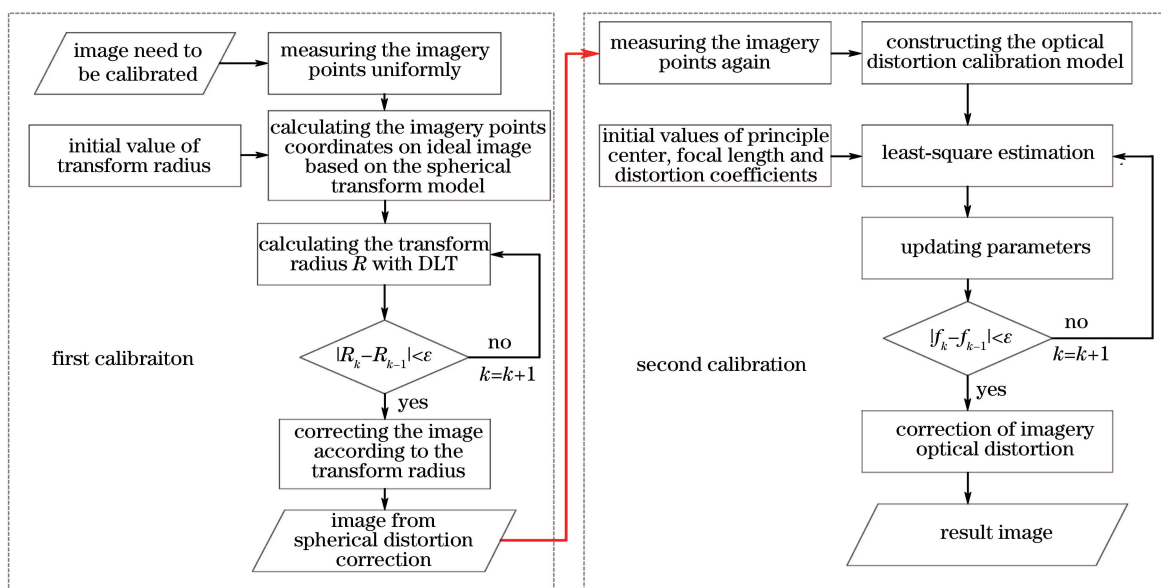


图 4 鱼眼相机检校与纠正流程图

Fig. 4 Flowchart of calibration and rectification of fisheye camera

4.1 第一步检校

球面透视关系直接建立了鱼眼影像与虚拟中心投影影像的一一对应关系,因此通过(8)式即可直接确定虚拟影像上每个像素在鱼眼影像上的位置,从而实现对球形畸变的纠正,在 R 未知的情况下能准确改正影像的球面变形,若残余的畸变过大会影响第二步检校的精度,如图 5 所示,使用不准确的 R 进行纠正时结果会产生纠正不足或纠正过量的情况,图 5(a)、(b)分别给出了使用不同的 R 对同一幅二维控制场影像进行纠正的结果。

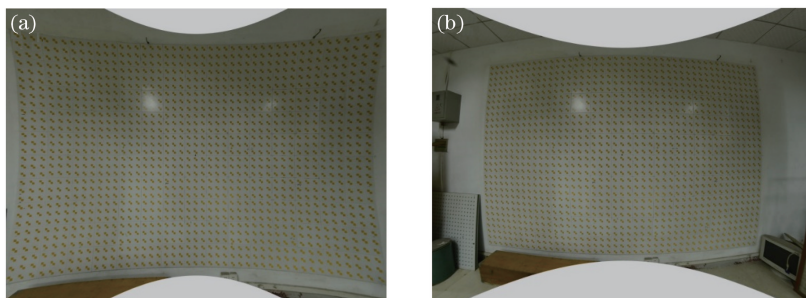


图 5 球面变换纠正的结果。(a)过度纠正;(b)纠正不足

Fig. 5 Correction results of spherical transform. (a) Excessive correction; (b) inadequate correction

考虑到球面变换半径与虚拟影像的主距在理论上是相等的,结合球面变换模型与 DLT 模型,并采用迭代方法解算准确的变换半径,具体方法为

- 1) 手动量测一定数量的原始鱼眼影像的标志点,量测的精度优于 1 pixel;
- 2) 根据(7)式计算这些量测像点坐标在虚拟中心投影影像上的坐标;
- 3) 根据计算坐标以及相应标志点的物方坐标解算 DLT 的系数,并根据(5)、(6)式计算虚拟影像的主距;
- 4) 判断两次迭代解算的变换半径之间的差值是否小于限差,若小于限差,则第一步检校结束;否则,将 3)中解算的主距作为变换半径重新进行 2)~4)。

变换半径初值的选择直接影响解算是否收敛,对于满幅的鱼眼影像, R 的初值可以设置为 $R = \sqrt{(h/2)^2 + (w/2)^2}$,其中, w 和 h 分别为原始影像的宽和高,而对于非满幅的鱼眼影像可用焦距值作为变换球面半径 R 的初值。

4.2 第二步检校

第一步检校完成了与相机镜头的球性结构相关参数的确定,根据这些参数可以改正鱼眼影像的球面变形,但由于相机镜头的光学畸变仍然存在,第一步纠正结果中仍存在几何畸变,需要在第一步检校的基础上进行光学畸变参数的检校。

综合考虑三种光学畸变,其中,偏心畸变系数取 k_1, k_2 ,径向畸变系数取 p_1, p_2 ,薄棱镜畸变系数取 s_1, s_2 ,通过对三种畸变叠加,可以建立非线性畸变模型

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 [r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2p_2(x - x_0)(y - y_0) + s_1 r^2 \\ \Delta y = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_2 [r^2 + 2(y - y_0)^2] + 2p_1(x - x_0)(y - y_0) + s_2 r^2 \end{cases} \quad (9)$$

将上述畸变模型引入到 DLT 模型中,可构建第二步检校的畸变模型

$$\begin{cases} x + \Delta x - x_0 + \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0 \\ y + \Delta y - y_0 + \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

式中待解参数为影像的畸变系数及主点主距,利用控制场物方约束条件,采用最小二乘法即可实现对于参数的解求,最后根据畸变参数及光学中心即可实现影像的光学畸变的纠正。

5 实验与分析

5.1 实验数据

实验前对三维控制场进行拍摄,所用相机为 Nikon D800E,鱼镜头视场角为 180° ,实验中采用的鱼镜头的成像方式为对角线成像,得到的影像布满整个像幅,没有出现遮角现象,选取的实验数据为不同角度拍摄的 9 张影像,如图 6 所示,其中,利用第一张检校相机参数,其余 8 张影像用来进行精度验证。

5.2 实验结果与分析

1) 第一步检校

根据所设计方法的第一步检校对该相机的变换半径及球面模型的中心进行解算,得到结果如表 1 所示。

表 1 球面变换半径

Table 1 Radius of spherical transform

Item	Transform radius R /pixel
Initial value	2884.44
Theoretical value	2072.36

利用表 1 中参数根据球面变换模型对原始影像进行纠正,得到的结果如图 7 所示。

2) 第二步检校

在第一步检校及纠正的结果的基础上进行第二步的检校,检校与相机镜头畸变有关的参数,利用所设计的检校模型及方法,得到的结果如表 2 所示。

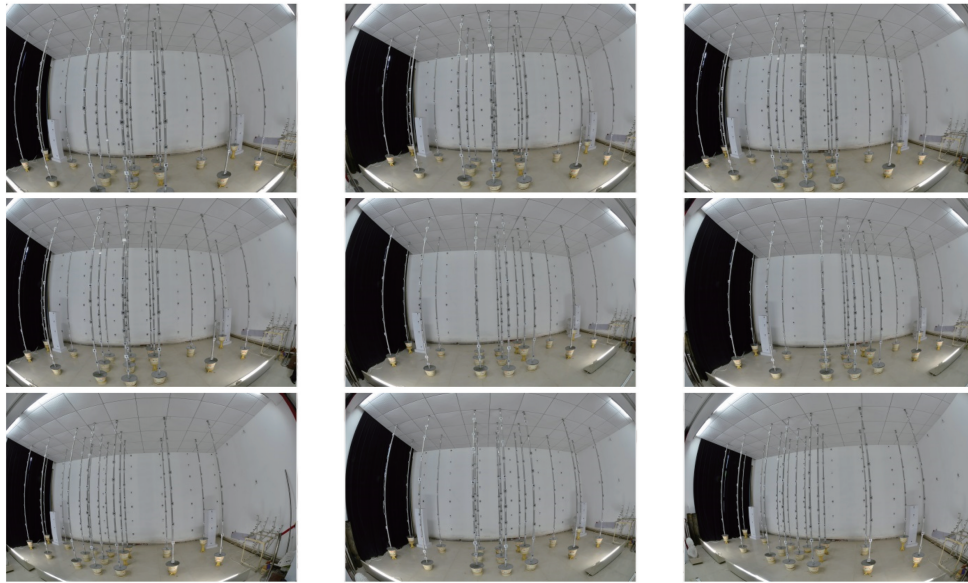


图 6 原始影像数据
Fig. 6 Original image data

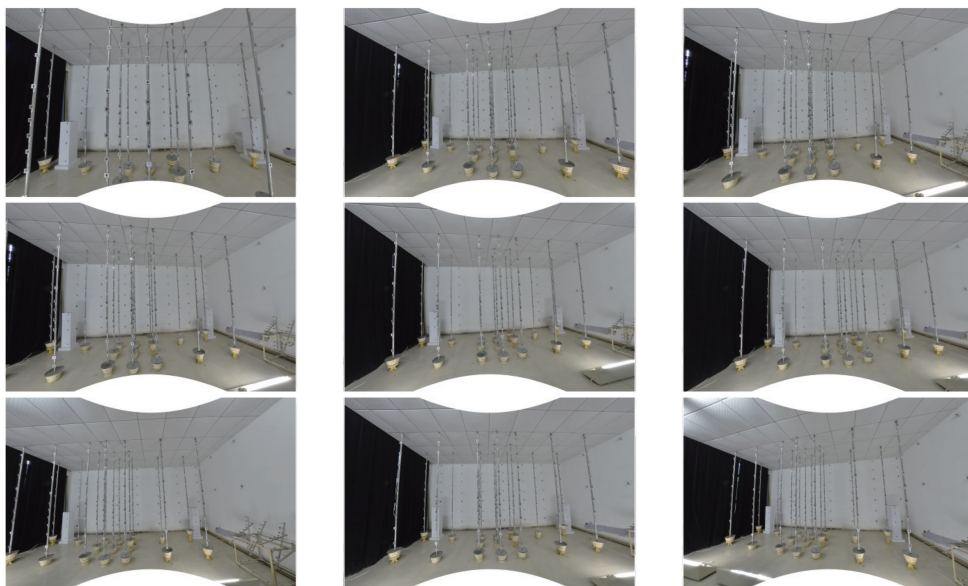


图 7 第一步检校纠正结果影像
Fig. 7 Correction results of first calibration

表 2 第二步检校结果

Table 2 Results of second calibration

Item	Focal length	Optical center		Distortion coefficient					
	f / pixel	x_0 / pixel	y_0 / pixel	k_1 / pixel ⁻²	k_2 / pixel ⁻²	p_1 / pixel ⁻¹	p_2 / pixel ⁻¹	s_1 / pixel ⁻²	s_2 / pixel ⁻²
Initial value	2072.36	0	0	0	0	0	0	0	0
Theoretical value	2075.25	-2.311	3.343	1.9291 $\times 10^{-9}$	-8.66836 $\times 10^{-17}$	7.59293 $\times 10^{-10}$	1.67757 $\times 10^{-8}$	-3.34138 $\times 10^{-8}$	-4.92685 $\times 10^{-8}$

根据第二步检校的参数对第一步纠正的结果进行再纠正,得到的结果如图 8 所示。

通过评价最终修正影像结果的物方定位精度来对本文方法的有效性进行验证,验证方法为在结果影像上选取一定数量的相同标志点作为控制点,其他的标志点作为检查点,然后将 8 张影像进行联合平差,解算每张影像的 DLT 系数,最后采用前方交会的方式解算每个像方标志点的物方坐标,统计每张影像的物方残差,并以该值表示每张影像的几何精度,8 张精度评价影像的几何精度统计情况如表 3 所示。

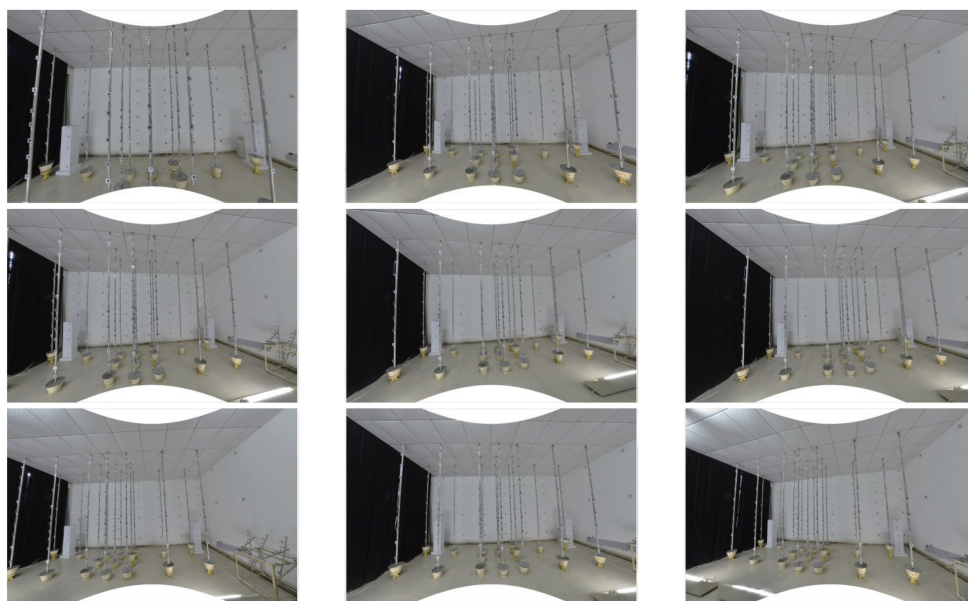


图 8 第二步检校纠正结果

Fig. 8 Correction results of second calibration

表 3 精度统计表

Table 3 Statistics of accuracy

Image number	X /cm			Y /cm		
	RMSE	V_{max}	V_{min}	RMSE	V_{max}	V_{min}
1	0.92136	2.15472	-2.84418	1.02132	2.61852	-2.76006
2	1.16712	2.41734	-3.01008	1.2231	2.80092	-2.91702
3	1.14288	2.34402	-3.14868	1.28742	2.80404	-2.96148
4	0.77658	1.80738	-2.34204	1.11432	2.55762	-2.87784
5	0.97734	2.22138	-2.72436	1.24416	2.64138	-2.86248
6	1.32042	2.52018	-3.00366	1.44534	3.02532	-2.9637
7	1.10934	2.33472	-2.72334	1.32132	2.72772	-2.78298
8	0.86334	2.118	-2.61726	0.98238	2.42142	-2.57034

从表 3 中可以看出,影像的内部畸变在行列两个方向的中误差(RMSE)均为 1 cm 左右,纠正后的影像几何精度趋于一致,畸变得到了较好的修正,然而由于原始影像边缘区域的变形过大,物方平面误差达到几米,因此纠正后仍存在一定程度的畸变。最后,利用检校后的摄影机对室外目标进行拍摄,拍摄影像如图 9 所示。

根据相机的检校参数,利用所设计的方法逐步对图 9 中影像进行纠正,结果如图 10 所示。



图 9 室外拍摄的原始影像

Fig. 9 Original images from outside

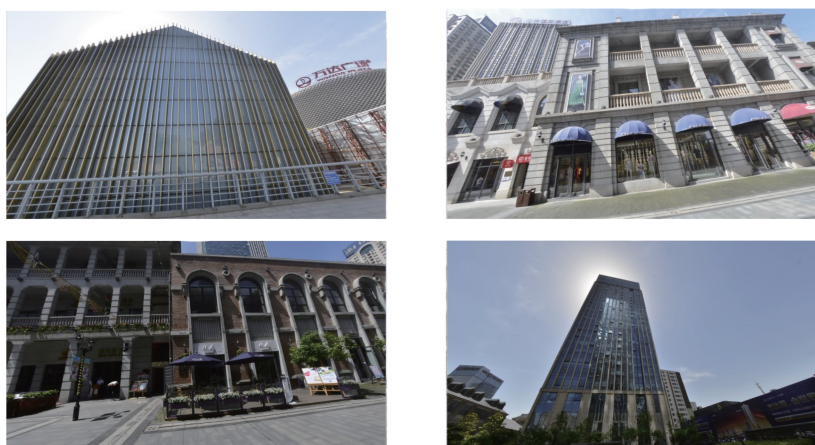


图 10 纠正结果

Fig. 10 Correction results

从目视效果可以看出,影像畸变得到了充分纠正,结果影像符合人眼习惯,可以满足数字城市等领域的应用需求。

6 结 论

在对鱼眼影像中的畸变进行分析的基础上,提出一种分步的鱼眼影像检校和修正的方法。在第一步检校中,针对传统方法不能准确确定球面变换模型的变换半径,进而造成纠正后影像残留的球形畸变仍然较大的问题,结合球面变换模型和 DLT 模型,采用迭代求解方法实现了精确球面变换半径的解算;第二步检校在第一步球形畸变修正结果的基础上,构建影像的光学畸变模型,并将其引入 DLT 模型中构建畸变系数的检校模型,并根据检校的畸变系数实现对影像光学畸变的补偿。最后,通过目视判读和定量分析的来评价实验纠正结果,验证了所提方法的有效性和稳健性。实验结论对于发挥鱼眼影像的优势,实现自动化、快速纠正鱼眼影像的几何畸变具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Hou Wenguang, Shang Tao. A new method for obtaining facade image of building by using fish-eye lens [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(1): 105-109.
侯文广, 尚涛. 鱼眼镜头在获取建筑物立面影像中的新方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(1): 105-109.
- [2] Shah S, Aggarwal J K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation[J]. Pattern Recognition, 1996, 29(11): 1775-1788.
- [3] Duane C. Close-range camera calibration[J]. Photogrammetric Engineering, 1971: 855-866.
- [4] Feng Weijia, Zhang Baofeng, Cao Zuoliang. Omni-directional vision parameter calibration and rectification based on fish-eye lens[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(5): 417-424.
冯为嘉, 张宝峰, 曹作良. 基于鱼眼镜头的全方位视觉参数标定与畸变矫正[J]. 天津大学学报, 2011, 44(5): 417-424.
- [5] Nomura Y, Sagara M, Naruse H, *et al.* Simple calibration algorithm for high-distortion lens camera [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(11): 1095-1099.
- [6] Ying Xianghua, Hu Zhanyi. Fisheye lens distortion correction using spherical perspective projection constraint [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(12): 1702-1708.
英向华, 胡占义. 一种基于球面透视投影约束的鱼眼镜头校正方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1702-1708.
- [7] Wang J H, Shi F H, Zhang J, *et al.* A new calibration model and method of camera lens distortion [C]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: 5713-5718.
- [8] Brauer-Burchardt C, Voss K. A new algorithm to correct fisheye and strong wide angle lens distortion from single images[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2001: 225-228.
- [9] Jia Yunde, Lü Hongjing, Xu An, *et al.* Fish-eye lens camera calibration for stereo vision system [J]. Chinese Journal of

Computers, 2000, 23(11): 1215-1219.

贾云得, 吕宏静, 徐 岸, 等. 一种鱼眼镜头成像立体视觉系统的标定方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1215-1219.

[10] Feng Wenhao. Close-range photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002: 142-162.

冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 142-162.

[11] Wu Guiping, Wu Wei, Wang Cheng, *et al.* A fisheye image correction method based on bilinear interpolation[J]. Computer Application and Software, 2012, 29(2): 122-124.

吴桂萍, 吴 巍, 王 成, 等. 基于双线性插值的鱼眼图像校正方法[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(2): 122-124.