

文章编号: 1671-8860(2006) 02-0099-05

文献标志码: A

影像的数字畸变模型

冯文灏¹ 商浩亮¹ 侯文广¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 阐述了建立各类成像系统通用数字畸变模型并提供对应内方位元素的原理与方法, 并以鱼眼数字相机所摄影像的全处理过程为例, 证实了本文方法的正确性。
关键词: 成像系统; 数字畸变模型; 准二维控制场
中图法分类号: P231.5

数字畸变模型 DDM(digital distortion model)是一种有起伏的三维几何模型。其平面坐标为数字影像行阵和列阵的编号, 高程是相应像素的总体畸变。本文提出的数字畸变模型, 是描述像方空间特征和像方光束整体形状的模式。

对影像畸变的补偿有两种策略, 即惯用的函数模型策略和本文提出的数字畸变模型策略。目前, 国内外对摄影机各类畸变的补偿, 几乎全部采用某种多项式的函数模型。本文提出的数字畸变模型策略是在建立面积不等的含有密集标志点的控制场的基础上, 对于给定相机的给定调焦距, 测定每个像素的总畸变, 以建立该影像专用的数字畸变模型, 从而对各类成像系统的各个环节产生的各种畸变进行总体补偿。同时, 按给定的畸变分布原则, 测定其对应的内方位元素, 以实现后继的三维摄影测量。

1 建立各类成像系统数字畸变模型的流程

- 1) 建立面积适宜的容有足够密集标志的准二维控制场, 选择适宜的技术测定并检查密集标志的三维空间坐标;
- 2) 按给定工作条件(如介质、调焦距), 用检定相机拍摄准二维控制场, 量测各控制标志在影像上的实际位置;
- 3) 按内方位元素的近似值, 测定影像的外方位直线元素;

- 4) 选择像幅 4 个角隅标志, 令其畸变为零;
- 5) 确定通过此 4 个控制标志点的拟合平面, 并对此 4 个点引入投影差;
- 6) 对像幅内所有控制标志引入投影差, 实现准二维控制场至真二维控制场的变换;
- 7) 依据上述 4 个点, 按二维直接线性变换原理, 解求 8 个变换系数, 计算像幅内各控制标志在影像上的理论位置;
- 8) 确定影像上各控制标志的总畸变, 依影像上邻近 4 标志的总畸变, 内插获取各像素的总畸变, 构成该影像的数字畸变模型;
- 9) 按给定的畸变分布原则, 测定对应的内方位元素;
- 10) 按内方位元素解算结果的趋近程度, 判断是否重复 3) 以后的步骤;
- 11) 按已知的数字畸变模型和对应的内方位元素, 实施图像处理和三维摄影测量处理。

2 准二维控制场的建立

二维控制场是建立影像数字畸变模型的基础, 由密度足够大的控制标志组成。根据需要, 二维控制场的面积大小不一, 大至数十 km^2 , 小至数 mm^2 , 但几乎不可能建立面积较大的真二维控制场。

准二维控制场是大体位于同一平面的含有密集控制标志的三维坐标控制系统。含有 1 350 个控制标志的较大面积($3.75\text{ m} \times 2.50\text{ m}$)的准二

维控制场如图 1 所示, 该控制场适用于大多数近景摄影测量的需要。

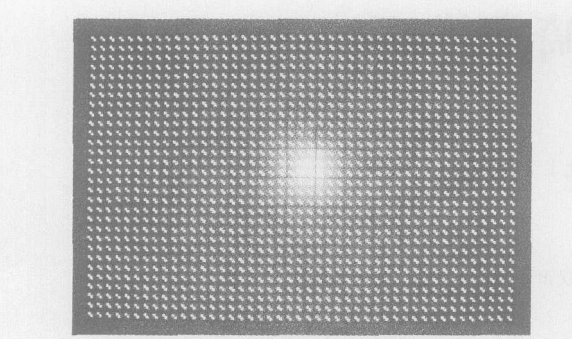


图 1 含有 1 350 个控制标志的准二维控制场
Fig. 1 A Quasi-2D Control Field Composing of
1 350 Control Marks

建立准二维控制, 具有投资少、易保养和易推广的优点。如果使用有限面积的真二维控制场, 则其标定结果不能应用于远距离的工业测量; 若不给定畸变分布条件下的内方位元素的标定, 则根本不能用于三维测量。

建立二维控制场的主要技术包括以下方面。

- 1) 二维控制场面积及其摄影环境的设计;
- 2) 控制标志质地、形状和尺寸的设计;
- 3) 控制标志三维坐标测定方法的合理选择, 其精度的预估与检验;
- 4) 准二维控制场“不平度”的预估;
- 5) 准二维控制场内标志点的理论密度需求。

3 准二维控制场至虚拟真二维控制场的变换

准二维控制场至虚拟真二维控制场的变换, 是构成两平面间严格二维透视变换的基本流程。

室内一般墙上建立的准二维控制场(如图 1 所示), 表面凹凸不平, 标志点相对拟合平面 E 的起伏约为 $\pm 1\text{ cm}$ 。以拟合平面 E 为基准, 参考图 2, 自控制标志 A 在此平面上的正投影为 A_0 , h 为此标志与拟合平面 E 间的高差, H 为相

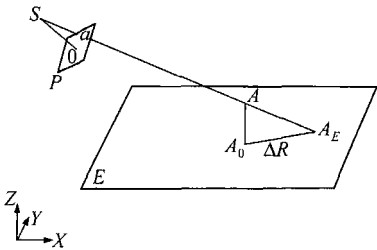


图 2 投影差的引入

对此平面的航高, R 为此平面上正投影点 A_0 的向径, 引入投影差 ΔR 后, 得点 A_E 。按此原理, 即构成虚拟的真二维控制场, 从而完成准二维控制场至真二维控制场的变换。投影差的大小与影像的直线外方位元素有关, 与影像的角外方位元素无关。

像片外方位直线元素误差 (dX_s, dY_s, dZ_s) 对投影差的引入将产生影响 $d\Delta R$ 。当 $h/H = 1/50$, $dH/H = 1/3\ 000$ 时, (dX_s, dY_s, dZ_s) 对 $d\Delta R$ 的影响可忽略不计:

$$d\Delta R = -\frac{h}{H^2}R \cdot dH = 0.02\text{ mm} \tag{1}$$

4 影像数字畸变模型的建立

4.1 数字畸变模型

与数字高程模型 DEM 相似, 数字畸变模型 DDM 也是一种有起伏的三维模型。其平面坐标格网为芯片的行列阵, 而其高程为相应像素的总体畸变。

DDM 是针对给定相机, 在给定工作条件下 (如介质、调焦距) 为所摄影像建立的畸变模型, 旨在逐像素、总体性地改正各类畸变的总和。

4.2 控制标志影像的总畸变测定

控制标志影像的实际位置与其理想位置的差值称为该影像点的总畸变。本文设定像幅 4 个角隅点的畸变分布原则, 并测定与之相应的内方位元素。

借助畸变为零的 4 个角隅控制点, 可实现真二维控制场平面 E 与数字相机芯片面 P 间的严格二维直接线性变换。利用解得的 8 个 l 系数, 即可解算像幅内所有其他控制标志点在影像上的理想位置坐标 (x_i, y_i) 。自动量测控制标志点在影像上的实际位置坐标 (x_i, y_i) 后, 获得该点在构像中引发的各类畸变的总畸变改正数 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$:

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_i - x_i \\ \Delta y_i &= y_i - y_i \end{aligned} \tag{2}$$

二维直接线性变换建立了物方真二维平面与芯片面间严格的投影关系式, 建立了无需像片内方位元素和框标的两透视面间的关系式。而且, 像方 x 轴与 y 轴的不垂直性以及芯片像素是否为正方形, 均不会影响控制点理想坐标的计算。

4.3 数字畸变模型的建立

任意像素的总畸变, 则依据其邻近 4 个控制点的畸变数据, 经内插获取。邻近 4 个控制点不构成规则正方形或矩形, 故必须按照不规则四边形进行内插。参照图 3, 采用如下的双线性内插

式,按邻近 4 点(1, 2, 3, 4)的畸变(f_1, f_2, f_3, f_4),解得内插点的畸变 $f_{(x,y)}$:

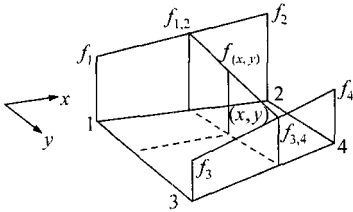


图 3 畸变内插原理图
Fig.3 Theory of Intersecting Distortion

$$\begin{aligned}x_{(1,2)} &= x, y_{(1,2)} = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}(x_{(1,2)} - x_1) + y_1 \\x_{(3,4)} &= x, y_{(3,4)} = \frac{(y_4 - y_3)}{(x_4 - x_3)}(x_{(3,4)} - x_3) + y_3 \\f_{(1,2)} &= f_1 + \frac{\sqrt{(x_{(1,2)} - x_1)^2 + (y_{(1,2)} - y_1)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \cdot (f_2 - f_1) \\f_{(3,4)} &= f_3 + \frac{\sqrt{(x_{(3,4)} - x_3)^2 + (y_{(3,4)} - y_3)^2}}{\sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}} \cdot (f_4 - f_3) \\f_{(x,y)} &= f_{(1,2)} + \frac{\sqrt{(x - x_{(1,2)})^2 + (y - y_{(1,2)})^2}}{\sqrt{(x_{(3,4)} - x_{(1,2)})^2 + (y_{(3,4)} - y_{(1,2)})^2}} \cdot (f_{(3,4)} - f_{(1,2)})\end{aligned}\tag{3}$$

4.4 修正影像的获取

依据建立的影像数字畸变模型获取无畸变的修正影像是本研究的主要目的之一。采用间接法获取修正后的影像,即无任何畸变的影像。此影像已消去包括成像机理在内的各种原因造成的畸变。

5 对应内方位元素的测定

一定的畸变分布原则对应一定的主距 f 。本文的畸变分布原则是设定 4 个角隅点畸变为零。按迭代法解算所摄影像相对虚拟真二维控制场的外方位角元素(φ, ω, κ)后,取得理想的“水平”影像上 4 个角隅控制点构成的四边形的两个

对角线长度(l_1, l_2),按

$$f_1 = \frac{l_1 H}{L_1}, f_2 = \frac{l_2 H}{L_2}\tag{4}$$

取此两个主距的平均值:

$$f = \frac{H}{2} \left(\frac{l_1}{L_1} + \frac{l_2}{L_2} \right)\tag{5}$$

试验结果表明,两个主距基本一致,其平均值为 2 540.88 像素。

借助已建立的数字畸变模型,修正三维控制场影像,并通过多片空间后方交会解算出主点坐标。

6 数字畸变模型的正确性检验

畸变的存在使直线构像为曲线。使用富士 Finepix S1 Pro 型数码相机对控制场上的一条直线摄影,如图 4 所示,其中白色线为曲线构像,灰色线为参考直线。经数字畸变模型修正后的白线构像已与灰色线重合,如图 5 所示。

对图 4 和图 5 进行量测,获取了白线和灰色线间的相对几何关系,具体数据见表 1。

表 1 数据对照表
Tab.1 Table of Data Comparison

修正前数据/像素				修正后数据/像素			
点号	X 坐标	Y 坐标	到直线的距离	点号	X 坐标	Y 坐标	到直线的距离
1	2 523	28	0.0	1	2 523	30	0.0
2	2 533	149	3.3	2	2 530	150	0.6
3	2 541	264	4.9	3	2 536	268	0.3
4	2 548	384	5.2	4	2 543	390	0.7
5	2 556	508	6.4	5	2 549	512	0.2
6	2 564	624	7.9	6	2 555	628	0.0
7	2 572	747	9.1	7	2 562	749	0.5
8	2 580	875	10.0	8	2 569	877	0.7
9	2 586	992	9.5	9	2 575	992	0.5
10	2 593	1 117	9.6	10	2 581	1 119	0.3
11	2 599	1 246	8.4	11	2 588	1 242	0.1
12	2 604	1 370	6.5	12	2 595	1 364	0.6
13	2 609	1 497	4.5	13	2 602	1 492	0.7
14	2 615	1 624	3.4	14	2 608	1 619	0.1
15	2 620	1 743	1.8	15	2 615	1 737	0.6
16	2 625	1 866	0.0	16	2 621	1 861	0.0

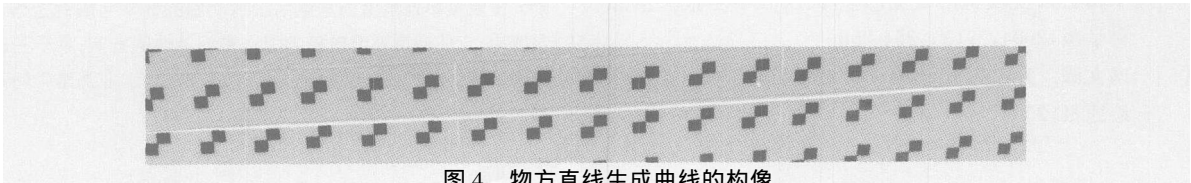


图 4 物方直线生成曲线的构像
Fig.4 Image of Beeline is Curve

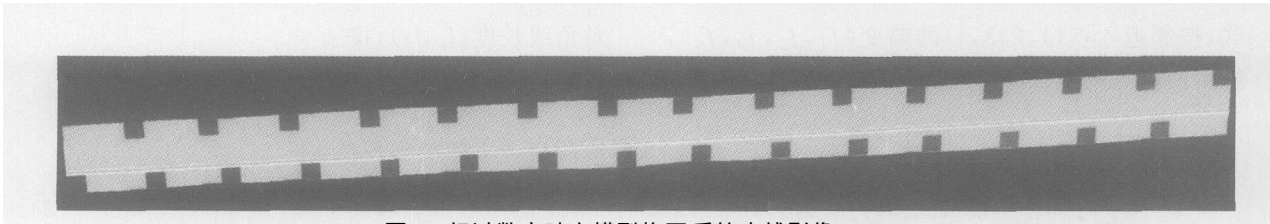


图 5 经过数字畸变模型修正后的直线影像

Fig.5 Image of Beeline After Correction According DDM

使用修正影像, 通过前方交会计算物方坐标, 并与其真值相比较, 借以验证数字畸变模型的正确性。

使用 Nikon D100 型数码相机, 前方交会后, 可以计算 (X, Y, Z) 的相对精度。

7 数字畸变模型的应用实例

数字畸变模型可应用于各种具有特殊成像机

理的成像系统, 如鱼镜头影像、双介质或多介质影像等。

本文使用 Nikon AF Fisheye 型鱼眼数码相机进行了试验。图 6 为鱼镜头所摄建筑物的原始影像, 图 7 为经数字畸变模型修正后的影像, 图 8 为再经平行线组原理处理后的影像。

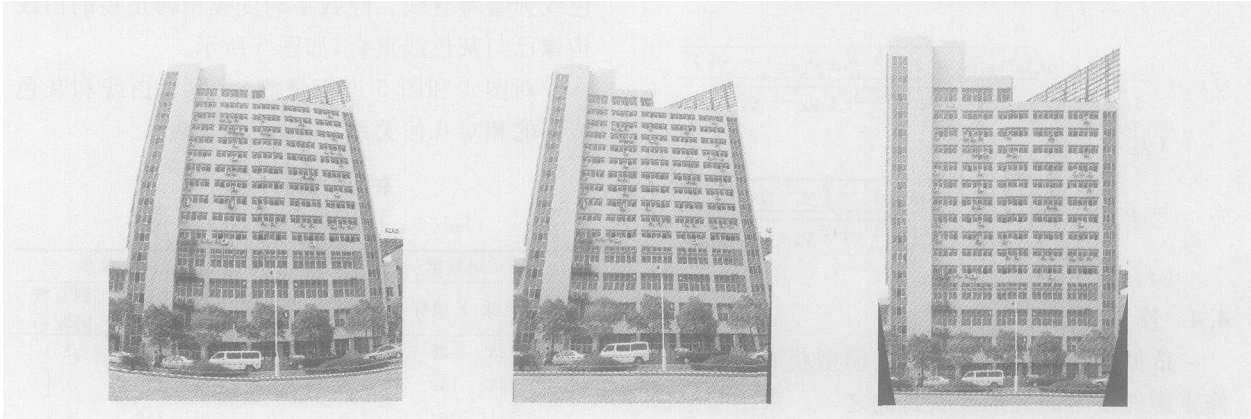


图 6 原始影像
Fig.6 Original Image

图 7 修正畸变后的影像
Fig.7 Image After Correcting

图 8 立面影像
Fig.8 Facade Image

参 考 文 献

[1] 冯文灏. 工业测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004

[2] 冯文灏. 一种测定普通相机畸变差的方法[J]. 测量员, 1988(4): 20-23

[3] 冯文灏. 近景摄影测量(修正版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004

[4] 冯文灏, 李建松, 闫利. 基于二维直接线性变换的数字相机畸变模型的建立[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(3): 254-258

[5] 冯文灏. 关于近景摄影机检校的几个问题[J]. 测绘通报, 2000(10)

[6] 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1988

[7] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996

[8] 张永军. 利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(6): 566-571

第一作者简介: 冯文灏, 国际欧亚科学院院士, 教授, 博士生导师。主要从事近景摄影测量与工业测量的教学与研究工作。代表成果: 立体视觉系统检校中引入约束条件的推演; 基于三旋转自由度激光经纬仪的结构光工业测量原理和工业测量中特高精度控制网的建立方法等。发表论文 120 余篇。

A Digital Distortion Model for all Kinds of Imaging Systems

FENG Wenhao¹ SHANG Haoliang¹ HOU Wenguang¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The digital distortion model (DDM) intends to establish general theory and methods of inspecting the distortions for all kinds of imaging system. In this paper, the theory and methods of establishing DDM have been also expatiated. The ways about getting the exterior and inner elements also have been introduced. In order to validate the theory, image achieved with fisheye digital camera has been tested.

Key words: imaging system; digital distortion model (DDM); quasi-2D control field

About the first author: *FENG Wenhao*, academician for International Eurasian Academy of Sciences, professor, Ph. D supervisor. His chief research aspect involves technique of close range photogrammetry and industrial measurements. His typical achievements including an investigation into the theory and applications of structured light industrial surveying system based on laser theodolite with three freedom of rotation; A deduction of constraints conditions in the calibration of stereovision, etc. He has published more than 120 papers.

许其凤当选为中国工程院院士

近日, 中国工程院 2005 年院士评选工作揭晓, 解放军信息工程大学测绘学院教授许其凤榜上有名。

许其凤教授是大地测量与测量工程专家, 也是我国最早从事卫星大地测量与卫星导航定位研究的学者之一。目前是解放军信息工程大学测绘学院教授, 博士生导师, 政府特殊津贴获得者。

许其凤教授 1958 年毕业于解放军测绘学院大地测量系, 毕业后留校执教至今。从 1980 年起, 他在国家重大工程建设中担当重任, 对卫星导航等高新技术在实践中的应用进行了探索, 先后参加完成了全国 GPS 一级网的布测、主持完成了中苏(俄)边境 GPS 联测等重大工程项目, 作为专家组成员参加了国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”、中国卫星导航增强系统等大型工程建设的总体方案设计和立项认证。他提出地壳运动观测网络与全国 GPS 一级网联测以建立国家大地坐标系的技术方案, 经国家测绘局倡议, 启动了“2000GPS 大地控制网”建设工程, 建成了我国 GPS 接收机综合检定场, 建立了我国第一个高精度动态定位检定标准, 为我国发展第二代卫星导航系统提供了导航性能综合检测的技术方法和手段。上个世纪 90 年代以来, 许其凤致力于我国第二代卫星导航系统的研究。他提出发展我国第二代卫星导航系统的建设和主要技术途径, 参加了我国第二代卫星导航系统的顶层设计, 承担完成了导航卫星的星座设计工作, 为发展我国独立自主的卫星导航系统作出了突出贡献。

许其凤教授多项科研成果获国家和军队科技进步奖, 为我国的航天卫星定位事业作出积极贡献。因其在信息技术领域作出的杰出贡献, 而当选为 2005 年中国工程院土木、水利与建筑工程学部院士。