

# 偏振成像仪几何定标数据处理及软件设计

陶菲<sup>1,2,3</sup>, 洪津<sup>1,2</sup>, 宋茂新<sup>1,2</sup>, 李双<sup>1,2</sup>, 涂碧海<sup>1,2</sup>, 王羿<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>3</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 偏振成像仪(DPC)是获取目标多光谱、多角度、多偏振信息的航天遥感器,它的几何定标过程特殊、复杂,需要处理庞大的数据,现有人工处理方法无法满足实时得出结果的要求。通过分析 DPC 的实验室几何定标原理、模型和流程,对处理软件的需求和设计框架进行讨论,研制了基于信息流的数据处理软件。该软件可对定标测试原始图像数据进行原始数据解包、图像数据识别、帧转移校正、去本底等预处理工作,并根据几何定标模型快速计算得到几何定标参数。与人工计算结果的对比验证了软件的有效性,一组数据计算的时间成本可由 40 min 缩短至 50 s,满足了定标实验实时得出结果的需要。

**关键词** 图像处理; 几何定标; 自动化处理软件; 信息流; 偏振成像仪

**中图分类号** V557+.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.091005

## Geometric Calibration Data Processing and Software Design of Directional Polarization Camera

Tao Fei<sup>1,2,3</sup>, Hong Jin<sup>1,2</sup>, Song Maoxin<sup>1,2</sup>, Li Shuang<sup>1,2</sup>, Tu Bihai<sup>1,2</sup>, Wang Yi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Directional polarization camera (DPC) is a space remote sensor with multi-spectrum, multi-angle and multi-polarization data. The procedure of laboratory geometric calibration is complex and it needs to process a large amount of data. By analyzing the principle, model and flow of the DPC laboratory geometric calibration and discussing the demand and framework of the software, we develop a flow-based data-processing software. The software is able to pre-process various calibration test data of the original image and calculate various scaling parameters rapidly. Compared with the manual calculation time of 40 min, the data processing software costs only 50 s. In conclusion, the software can meet the real-time requirement of laboratory calibration.

**Key words** image processing; geometric calibration; automated processing software; dataflow; directional polarization camera

**OCIS codes** 100.2000; 100.2960; 200.4560

## 1 引言

偏振信息可用于大气探测和校正<sup>[1-9]</sup>。星载多角度偏振成像仪(DPC)是利用偏振探测的手段获取大气

收稿日期: 2017-02-27; 收到修改稿日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1331111)

作者简介: 陶菲(1988—),女,博士研究生,主要从事光学偏振遥感技术与应用方面的研究。

E-mail: taofei8981@126.com

导师简介: 洪津(1969—),男,本科,研究员,博士生导师,主要从事航天遥感器工程方面的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn (通信联系人)

气溶胶及细颗粒物组分和分布的卫星遥感仪器<sup>[10]</sup>,用于全球范围的大气气溶胶观测和气候研究。其设计方案沿用了法国 POLDER<sup>[11]</sup>的技术路线,在消色差广角镜头与面阵 CCD 之间放置滤光片/偏振片转轮分时获取同一目标的多光谱、多偏振态图像信息,结合卫星平台的移动在 9 个角度下观测同一目标多次成像以获取多角度信息。

大气气溶胶的偏振特性对观测角度具有敏感性,遥感信息中加入观测角度能更好地描述目标的偏振特性<sup>[12]</sup>。这种技术路线有其得天独厚的优势,但其光学成像系统需具备超大视场角,宽视场物镜系统会存在较大的成像畸变,并在不同视场表现出显著的偏振传输特性差异。而空间分辨率的提升又给分时获取的图像配准工作带来更高的精度要求和难度。

视场畸变可以通过常规的几何定标进行校正<sup>[13]</sup>,但是 DPC 需要更多地考虑像元配准的问题,包括同一波段不同偏振态图像间、不同波段图像间、不同观测角度图像间的像元配准。为保证 DPC 的数据精度,有必要建立遥感器像面成像位置与实际地物在仪器坐标系下准确的对应关系。DPC 像面上共有  $512 \times 512$  个像元,均需进行几何校正,导致几何定标的数据处理过程极其复杂。因此根据仪器的定标模型优化数据处理流程并设计专用数据处理软件非常必要。

本文通过介绍 DPC 的遥感原理、几何定标模型和定标方案,设计了定标数据处理软件的架构和功能,并在实际定标过程中验证了该软件的有效性、可靠性和效率。

## 2 DPC 偏振测量原理

DPC 的特点是多角度、多光谱、多偏振态<sup>[14]</sup>。成像光学原理如图 1 所示,DPC 由最前端的光学望远系统、最后端的大面阵成像 CCD 以及中间装有偏振片和滤光片的精密电动转轮组成,其成像视场角高达  $118^\circ$  (对角线)。DPC 共设置 8 个波段 15 个通道,除用于测量暗电流的一个本底通道外,还有 5 个非偏通道和 3 个波段共 9 个偏振通道,主要探测水汽、云、海洋和气溶胶。通过转轮的转动,DPC 以宽视场成像的方式分时获取连续多光谱和  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  三个偏振方向的气溶胶遥感图像。

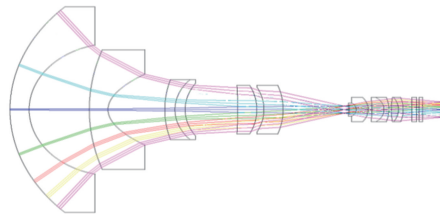


图 1 多角度偏振成像仪光学原理图

Fig. 1 Schematic of DPC optical system

DPC 采用大视场凝视成像系统实现多角度观测。DPC 探测器有效像元的数量为  $512 \times 512$ ,每个像元可等效于一个观测角度的偏振探测通道,通过在运行轨道上不同位置的宽幅成像,可以为目标提供至少 9 个不同角度的偏振数据,观测原理如图 2 所示。

因自然目标圆偏振分量很小,可以忽略不计,DPC 设计为只进行线偏振测量。假设被探测目标反射的

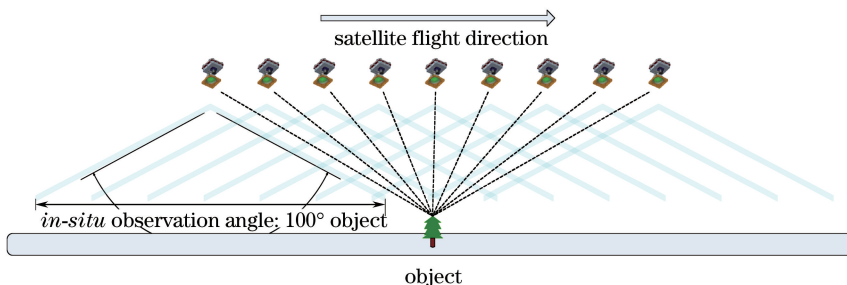


图 2 多角度偏振成像仪在轨运行观测示意图

Fig. 2 Schematic of DPC on-orbit detection

光入射到 DPC 某一像元[设为 $(i, j)$ ]的斯托克斯矢量为 $[I \ Q \ U]^T$ ,其中  $I$  表示总光强, $Q, U$  分别代表  $0^\circ, 90^\circ$  和  $45^\circ, 135^\circ$  两个正交方向上的线偏振光强度之差。

同时假设入射光在 DPC 入瞳处的斯托克斯矢量为  $[I_0 \ Q_0 \ U_0]^T$ , 通过理想光学透镜组后, 经由偏振方位角为  $\alpha$  的偏振片到达像元 $(i, j)$ 。光电转换器件只对强度敏感, 探测到的强度可由斯托克斯矢量表示为<sup>[15]</sup>

$$I_{i,j}(\alpha) = \frac{I_0 + Q_0 \cos(2\alpha) + U_0 \sin(2\alpha)}{2} \quad (1)$$

由(1)式可知, 只需三次不同偏振方位角的辐射测量就可以得到一组完整的入射光斯托克斯矢量, 且三偏振方向设置为  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$  时 DPC 具有最高的偏振测量精度<sup>[16]</sup>, 像元强度值和入射光斯托克斯矢量的关系为

$$\begin{bmatrix} I_{i,j}(0^\circ) \\ I_{i,j}(60^\circ) \\ I_{i,j}(120^\circ) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据(2)式由探测器获得的强度信息反演入瞳光的偏振态。用偏振度和偏振角来表征目标的偏振态具有广泛应用<sup>[17]</sup>, 计算其对应的偏振度为

$$P = \sqrt{Q_0^2 + U_0^2} / I_0, \quad (3)$$

偏振角为

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{U_0}{Q_0} \quad (4)$$

在现实中反演气溶胶光学偏振特性时最常用的大气参量是偏振反射率<sup>[18]</sup>, 其计算公式为

$$R_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_0 F_0}, \quad (5)$$

式中  $F_0$  为太阳常数,  $\mu_0$  为太阳天顶角的余弦。一般将此参数代入矢量辐射传输方程, 得到的计算值与查找表中相应字段进行对比。

### 3 几何定标模型及定标实验

DPC 仪器中 CCD 像面上每一个像元代表一个入射角度方向, 相当于分孔径观测。线偏振测量需要三个偏振通道辐射信息, 其中某一通道像元的偏移可能造成最终遥感数据的不准确。因此几何定标是 DPC 实验室定标的关键部分之一, 也是偏振辐射定标的基础<sup>[18]</sup>。

DPC 实现多角度观测所需的宽视场成像系统属于非理想线性系统, 其最主要的畸变为径向畸变, 而且该畸变对波长敏感<sup>[20]</sup>。根据偏振片滤光片转轮的安装需求, DPC 要满足反远距和像方远心, 导致透镜种类复杂、数目较多, 多个透镜的安装又可能会引起更大的视场畸变。DPC 一个像元记录一个特定视场角的强度信息, 其偏振探测精度依赖同一波段 3 个偏振方向成像的像元匹配精度。综上可得 DPC 几何定标的重点是精准确定仪器坐标系下目标入射光到达 CCD 时对应的像面位置, 精度需优于 0.1 个像元<sup>[21]</sup>。

要快速获得每个像元和观测目标准确的几何对应关系, 需要建立一个映射函数, 对整个像面的畸变进行校正。由于透镜加工和装调的过程会引入误差, 不能直接使用镜头的设计值作为畸变映射函数的输入。大面阵相机的几何定标一般通过采集多对具有精确对应关系的目标和像面位置, 根据该镜头的曲面类型选取可以适应全部采集数据对的映射函数, 利用曲面拟合最小二乘逼近的方法来确定映射函数的系数。

为了确定宽视场遥感图像上每个点与对应目标之间的数学关系, 建立图 3 所示坐标系和观测的几何模型。

分别设  $O, S$  为理想坐标系和畸变坐标系的原点, 其中  $O$  为 CCD 像面中心位置、 $S$  为实际像面发生畸变后图像的中心位置。  $P$  为 DPC 视场内任意一点,  $M$  为与物点  $P$  对应的像点。  $M$  在理想坐标系和畸变坐标系下的坐标分别为  $M(M_x, M_y)$  和  $(M_x, M_y)$ ,  $S$  在理想坐标系下的坐标为  $(S_x, S_y)$ 。  $\theta$  为视场角,  $\varphi$  为方位角。根据向量运算有如下关系:

$$\mathbf{OM} = \mathbf{OS} + \mathbf{SM} \quad (6)$$

模型中  $\mathbf{OM}$  可以由实际像点在 CCD 上的坐标计算得到(测量值),  $\mathbf{OS}$  为畸变坐标系和理想坐标系的关系

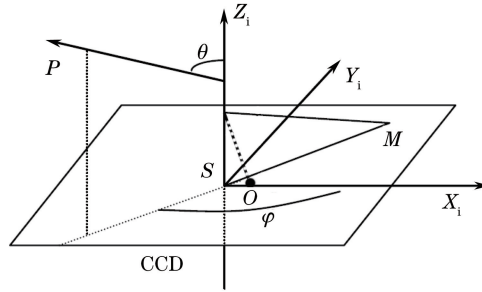


图3 DPC 光学几何模型图

Fig. 3 Geometry calibration model of DPC

系,需要通过定标试验求出。根据公式(6)即可计算得到我们想要的像点  $M$  在畸变坐标系下的坐标:

$$(M_{s_x}, M_{s_y}) = (M_x, M_y) - (S_x, S_y). \quad (7)$$

实验室利用几何视场专用定标装置对 DPC 进行几何定标,该装置光源为小积分球与平行光管的组合,通过立式转台和卧式转台的转动,每次成像获取一个小亮斑。几何定标实验中采样点的增加会减小测量过程中的随机误差,但对数据处理算法和设备的要求更高。综合考虑定标精度要求、实验便利性和后期数据处理复杂程度,选择采集“米”字型对称分布的 40 个点,如图 4 所示。

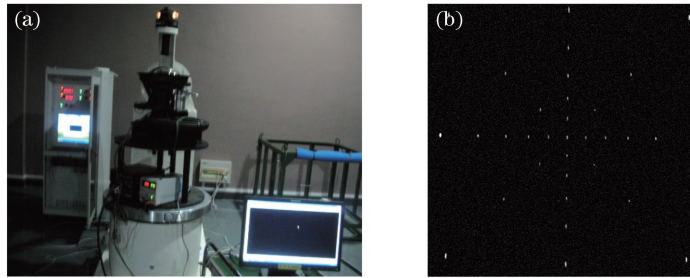


图4 (a) DPC 几何定标实验图;(b)像面亮斑合成图

Fig. 4 (a) Experimental setup of DPC geometrical calibration; (b) bright spot pieced image

## 4 数据处理及算法优化

为了摒弃帧转移效应<sup>[22]</sup>和杂散光<sup>[23]</sup>等产生的干扰,首先要对采集的光斑图像分别进行帧转移校正,然后根据实测背景噪声设定阈值,将小于阈值的图像灰度值都设置为 0。

由于每个小亮斑在图像上跨越多个像素值,采集后发现位于视场边缘的像斑呈类似弥散斑的椭圆形状,强度值在被照亮的像元上的分布也很不均匀,每个像斑在靠近像面中心处像元的响应值较大。因此以每个像素的 DN 值为权重来计算亮斑的重心坐标,以 40 个重心坐标重新合成一副新的“米”字图。由于曲面拟合运算量十分庞大,且容易发生拟合错误而增加人工判读的需求,考虑到镜头的畸变可简化为中心对称曲面,因此只要找到像面畸变的中心对称点,就可以将笛卡儿坐标系转化为以畸变中心为原点的平面极坐标系。这样做的一个好处是目标位置的输入可以很自然地由坐标值转化为入射角的函数和方位角,由于畸变只在径向发生,目标的方位角在畸变前后保持不变,后期进行复杂几何校正时只需重点处理入射角的变换即可。经过上述优化后,点到点的曲面映射即可简化为角度到角度的线性映射。像面的阵列排布更适合应用笛卡儿直角坐标,因此最终处理时,需再根据畸变中心坐标、校正后的平面极坐标(校正后的入射角函数,原始方位角)计算出被观测目标映射到像面的笛卡儿坐标,根据图 3 所示几何模型及(7)式,最终畸变极坐标系下像点的计算公式可表示为

$$M_{s_p} = |\mathbf{SM}|, \quad (8)$$

$$M_{s_\theta} = \varphi, \quad (9)$$

式中  $\varphi$  为目标方位角;  $|\mathbf{SM}|$  为目标入射角的函数,其数学意义为成像位置与畸变中心的距离。根据图 3 所示关系可得:

$$|\mathbf{SM}| = f \tan \theta_s, \quad (10)$$

式中  $f$  为 DPC 光学系统焦距,  $\theta_s$  为通过畸变中心的光线与通过  $M$  点的光线的夹角。假设视场角的畸变量为  $\Delta\theta$ , 有

$$\theta_s = \theta + \Delta\theta, \quad (11)$$

代入(10)式, 有

$$|\mathbf{SM}| = f \tan(\theta + \Delta\theta). \quad (12)$$

将二维全视场平面考虑为方位角  $0^\circ \sim 180^\circ$ 、视场角  $-59^\circ \sim 59^\circ$ 。当  $\Delta\theta$  接近于零时, 通过级数展开并扣除偶次项及 5 次以上的高阶项, (12)式可近似表达为

$$|\mathbf{SM}| = f_1 \tan \theta + f_3 \tan^3 \theta + f_5 \tan^5 \theta, \quad (13)$$

式中  $f_1$ 、 $f_3$  和  $f_5$  分别代表级数展开后的一阶、三阶、五阶项的系数, 也称为畸变率系数。

整个像面的畸变中心称为主点, 主点和畸变率系数可以通过几何定标数据求解, 用来计算不同像面上不同视场角的畸变程度, 从而实现整个像面几何校正的目的。图像主点坐标可以利用“米”字图中重心坐标值取平均得到。然后根据(13)式计算得到各个像斑重心坐标到主点的距离, 每个像元对应的视场角在定标实验时测得, 则畸变率系数可用最小二乘法确定。主点坐标和畸变率系数共同构成 5 个几何定标系数, 用于对  $512 \times 512$  像面上每一个像元分别进行几何校正。

计算得到几何定标系数后, 需要评价几何定标精度, 即一个可测量量与该量经过几何定标系数间接测量推出值之间的绝对偏差。该偏差的计算公式为

$$\Delta r = \left| \frac{\sum_{i=1}^n [L_{\theta_i} - (f_1 \tan \theta_i + f_3 \tan^3 \theta_i + f_5 \tan^5 \theta_i)]}{n} \right|, \quad (14)$$

式中  $L_{\theta}$  代表视场角为  $\theta$  的入射光束与主点的距离;  $n$  为  $\theta$  视场角的入射光束像面像斑个数, 取  $n = 40$ ;  $f_1$ 、 $f_3$ 、 $f_5$  为实验获取的畸变率系数。

## 5 几何定标数据处理软件设计

定标数据处理软件的数值计算方法应该具有数据吞吐能力大、高效等特点, 此外软件还应具有帧转移校正、去噪声、大图像显示、图像配准、光斑主点、畸变率系数的计算等实时处理功能。由于人工计算无法满足实时计算和结果显示的要求, 目前处理方法为利用 Matlab 对 40 幅图像分别进行帧转移校正、去噪声等预处理和结果计算, 用 Stling 导入查看图像, 用文件系统存储图像。这种传统的数据处理方式对人员和时间耗费严重, 重复性工作量大, 数据存放位置靠人脑记忆, 极易造成混乱和差错。因此要求 DPC 几何定标数据处理软件应该具有性能可靠、运行稳定、计算高效、人机接口友好的特性。

定标数据的处理有较强的模块间依赖性, 软件设计过程中选用高内聚低耦合的模块化软件框架, 封装数据处理算法, 明确各模块接口, 使得软件有较好的可靠性和易用性。软件需求分析使用比文本叙述更正式的流程和符号表示。

根据实验室几何定标实验流程、实验数据的关联度和图像数据结果显示要求, 基于信息流分析方法, 将多角度偏振成像仪实验室几何定标数据处理软件分为 CCD 采集图像预处理模块、图像与结果显示模块、计算主点坐标模块和计算畸变率系数模块。整个数据和操作序列流程如图 5 所示。

首先采集的原始图像进入 CCD 采集图像预处理模块, 该模块主要功能为数据文件解包、图像读取、数据有效性验证、帧转移校正及去噪声。对原始图像调用图像预览结果显示模块, 显示原始图像。

图像与结果显示模块功能贯穿于涉及图像文件的其他模块, 主要功能为: 将 raw 格式图像转化为带文件头的 bmp 格式图像, 图像缩放, 实时显示各类图像文件和计算结果。

然后计算主点坐标, 对预处理后的 40 幅原始图像进一步去除本底, 并计算图像的重心, 对所有重心图像进行融合后生成新的图像文件, 显示在软件界面上。去本底后计算主点坐标模块的详细设计流程步骤如下:

1) 分别计算 40 幅定标点光源图像的重心; 2) 对 40 个重心进行图像融合, 融合时要考虑对称分布; 3) 对所有重心  $x$  坐标和  $y$  坐标进行分别累加除总, 计算主点坐标  $X_s$  和  $Y_s$ 。由于仪器一共有 14 个探测通道, 需要

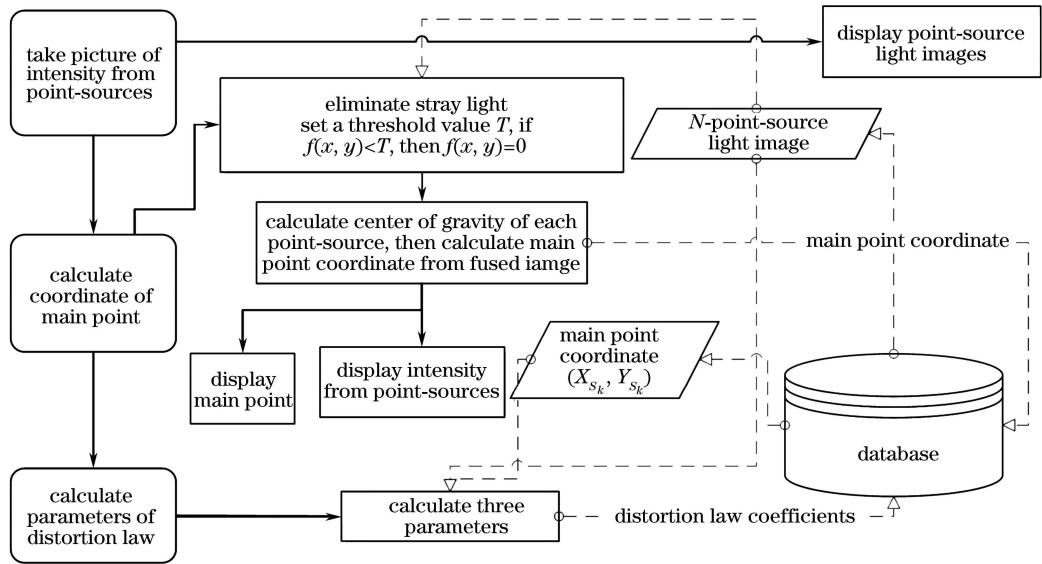


图5 几何定标数据处理模块设计

Fig. 5 Design of geometrical calibration data processing section

进行14次重复调用算出每个通道的主点坐标,保存到数据库中。

最后计算畸变率系数,该模块的详细设计流程步骤如下:

- 1) 从数据库中读入上一个模块计算得到的主点坐标以及计算主点所用的40组重心坐标。
- 2) 计算每一个重心到主点的距离  $L(i, k)$  ( $i$  为重心序号,  $k$  为波段号)。
- 3) 计算中间变量  $L \times 1 \sim L \times 8$  (视场角和距离  $L$  的函数)为

$$\left\{ \begin{array}{l} L \times 1 = \tan^2 \theta \\ L \times 2 = \tan^4 \theta \\ L \times 3 = \tan^6 \theta \\ L \times 4 = \tan^8 \theta \\ L \times 5 = \tan^{10} \theta \\ L \times 6 = L(i, k) \cdot \tan \theta \\ L \times 7 = L(i, k) \cdot \tan^3 \theta \\ L \times 8 = L(i, k) \cdot \tan^5 \theta \end{array} \right. , \quad (15)$$

以及它们组成的4个中间量矩阵  $\mathbf{F}_{1\text{temp}} \sim \mathbf{F}_{4\text{temp}}$  为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{F}_{1\text{temp}} = \begin{pmatrix} L \times 6 & L \times 2 & L \times 3 \\ L \times 7 & L \times 3 & L \times 4 \\ L \times 3 & L \times 4 & L \times 5 \end{pmatrix} \\ \mathbf{F}_{2\text{temp}} = \begin{pmatrix} L \times 1 & L \times 6 & L \times 3 \\ L \times 2 & L \times 7 & L \times 4 \\ L \times 3 & L \times 8 & L \times 5 \end{pmatrix} \\ \mathbf{F}_{3\text{temp}} = \begin{pmatrix} L \times 1 & L \times 2 & L \times 6 \\ L \times 2 & L \times 3 & L \times 7 \\ L \times 3 & L \times 4 & L \times 8 \end{pmatrix} \\ \mathbf{F}_{4\text{temp}} = \begin{pmatrix} L \times 1 & L \times 2 & L \times 3 \\ L \times 2 & L \times 3 & L \times 4 \\ L \times 3 & L \times 4 & L \times 5 \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (16)$$

- 4) 调用3阶行列式计算函数 Function1 计算  $\mathbf{F}_{1\text{temp}} \sim \mathbf{F}_{4\text{temp}}$  的行列式  $f_{1\text{det}} \sim f_{4\text{det}}$ 。

- 5) 由4个行列式计算得到最终的畸变率系数  $f_1, f_3, f_5$  为

$$\begin{cases} f_1 = \frac{f_{1\text{det}}}{f_{4\text{det}}} \\ f_3 = \frac{f_{2\text{det}}}{f_{4\text{det}}} \\ f_5 = \frac{f_{3\text{det}}}{f_{4\text{det}}} \end{cases} \quad (17)$$

## 6 几何定标数据处理软件代码实现及数据验证

编程语言的选择除个人经验外,还需要考虑该语言现有库文件的侧重点、算法实现的复杂性、所需资源、编译和运行效率、界面人性化以及时间代价。C++和JAVA是面向对象设计语言,在架构上有其独特的优越性,而JAVA一般用于网络、ERP等端到端交互系统的应用系统编写;VC、VB、Delphi等可视化编程语言具有直观的所见即所得人机界面,C++的MFC同样集成了可视化编程界面;Fortran和Matlab分别具有高效的数值计算和图像处理功能。本软件中涉及到的数值计算尚不复杂,可以将Matlab图像处理的动态链接库文件嵌入C++环境中。

综合以上考虑,DPC几何定标数据处理软件的实现最终选用Visual C++下的MFC可视化编程环境,并添加了软件的容错性设计等关键技术。

为了检验设计软件的可靠性和准确性,使用DPC工程样机几何定标实验的40幅不同位置光斑图像数据对软件性能进行了多次运算测试,软件运算结果如图6所示。图6(a)为主点和畸变率系数的计算界面,可以一次性导入经过预处理模块处理后的图像,直接计算显示全部重心坐标、主点坐标以及各重心到主点的距离。输入原始图像各自对应的视场角后可以计算得到畸变率系数。图6(b)为计算并显示几何定标精度的软件界面,可以对定标数据进行增减重复计算定标精度,从而有利于定标实验过程的反馈和优化。

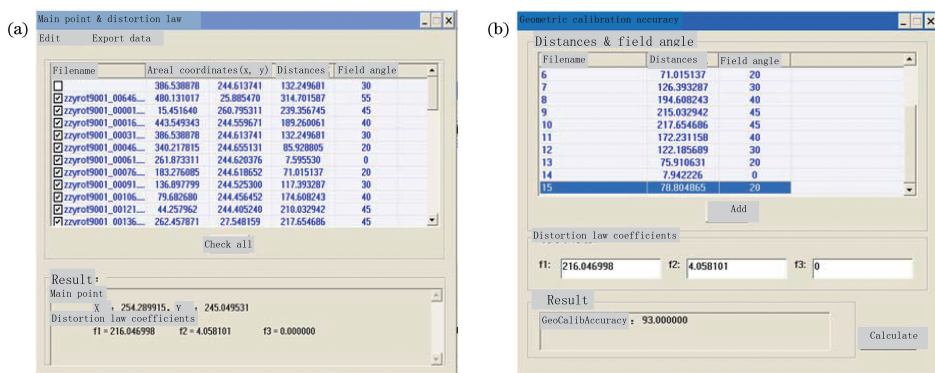


图6 几何定标软件界面和计算结果

Fig. 6 Interface of geometry calibration software and calculation results

表1所示为使用DPC几何定标软件进行数据处理的结果,该结果与人工计算结果完全一致,表明所设计软件系统结果可靠。

为检验几何定标软件对数据处理效率的定量影响,分别测量了使用软件和人工方法进行数据处理所耗费的时间。

软件数据处理用时统计为:选取原始图像数据包5s;软件自动解包、预处理,计算重心坐标、主点、重心到主点距离用时约为2s;输入视场角40s;计算畸变率系数约1s。因此使用软件总用时约为50s。

人工数据处理用时统计为:图像数据解包,40幅图像分别读取,帧转移校正、去噪声等预处理时间 $35s + (10s + 10s) \times 40 = 835s$ ;计算40幅图像重心、主点、重心到主点平均距离,手工输入视场角求取畸变率系数用时 $10s \times 40 + 5s + 15s + 20s \times 40 = 1220s$ 。因此人工处理总用时约为40min。

同样处理一组定标数据,软件用时仅需为人工处理用时的2%,大大提高了定标试验的处理效率,从而满足DPC实时几何定标和校正的需求。

表1 几何定标实验原始数据处理结果  
Table 1 Calculation results of geometrical calibration by software

Field of view / (°)	Distance from main point / pixel				Main point (x, y)	Distortion law coefficient	Geometric calibration accuracy / %
0	7.6	7.9	7.8	7.2			
20	85.9	71.0	78.9	78.8			
	83.9	73.4	73.3	83.9			
30	132.2	117.3	125.1	125.0		216.05	
	130.1	119.7	119.7	130.1			
40	189.2	174.6	182.2	181.9	(254.2, 245.0)	4.06	93
	187.1	176.8	176.8	187.1		0.00	
45	239.3	210.0	217.6	217.4			
	222.5	212.3	212.2	222.6			
50	264.1	254.1	254.0	264.2			
55	314.6	304.7	304.5	314.7			

## 7 结 论

由于其超广角、大面阵和偏振配准等设计要求, DPC 定标测试及数据处理工作十分复杂。从采集数据到保存、预处理、计算, 到最终的定标结果, 庞大的数据转移、管理工作会耗费很多时间资源, 降低工作效率。根据 DPC 几何定标原理和模型, 对数据处理算法进行了优化, 设计和实现了实验室定标数据处理软件, 该软件采用基于信息流的结构化设计, 功能明确, 运行效率高。通过处理 DPC 实验室定标数据, 验证了该软件的正确性和可靠性, 明显提高了定标数据的处理效率。

偏振成像仪的定标工作目前已经开发了部分控制软件、数据采集软件和定标数据处理软件, 下一步将基于现有基础开发大型数据库管理软件平台, 实现控制、采集、存储、分析处理为一体的集成和互访, 有望进一步提高定标效率。

## 参 考 文 献

- [1] Gong Jieqiong, Zhan Haigang, Liu Dazhao. A review on polarization information in the remote sensing detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(4): 1088-1095.  
弓洁琼, 詹海刚, 刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1088-1095.
- [2] Hess M, Priest R. Comparison of polarization bidirectional reflectance distribution function (BRDF) models[J]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1999, 4: 95-102.
- [3] Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system[J]. Nature, 2002, 419(6903): 215-223.
- [4] Richard J P, Nardell C, Cairns B, *et al.* Aerosol polarimetry sensor for the glory mission[C]. SPIE, 2007, 6786: 67865L.
- [5] Tang Weiping, Hong Jin, Wang Yuanjun, *et al.* Airborne directional polarization camera and its optical system design [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(3): 212-216.  
汤伟平, 洪 津, 汪元钧, 等. 航空多角度偏振成像仪及其光学系统设计[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(3): 212-216.
- [6] Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, *et al.* Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 616-623.  
乔沿利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 616-623.
- [7] Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing, *et al.* Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 999-1003.  
叶 松, 方勇华, 孙晓兵, 等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 999-1003.
- [8] Yang Weifeng, Hong Jin, Qiao Yanli, *et al.* Optical-mechanical system design of unmanned aerial vehicle polarization



- CCD camera[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 469-472.
- 杨伟锋, 洪津, 乔延利. 无人机载偏振 CCD 相机光机系统设计[J]. *光学技术*, 2008, 34(3): 469-472.
- [9] Zhang Nan, Wang Fei, Liu Jun, *et al.* Spatial distribution polarization pattern acquisition based on polarization imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091101.  
张楠, 王飞, 刘俊, 等. 基于偏振成像技术的空间大气偏振模式分布获取[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091101.
- [10] Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 175-189.  
孙晓兵, 乔延利, 洪津. 可见和红外偏振遥感技术研究进展及相关应用综述[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 175-189.
- [11] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, *et al.* Instrumental concept and performances of the POLDER instrument[C]. *SPIE*, 1995, 2572: 7090-7101.
- [12] Salomonson V V, Marlatt W E. Anisotropic solar reflectance over white sand, snow and stratus clouds[J]. *Application Meteorology*, 1968, 7: 475-483.
- [13] Xiao Chao, Chen Feng, Zhong Min, *et al.* Panoramic display system geometric calibration method based on fisheye camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 021201.  
肖朝, 陈锋, 钟敏, 等. 基于鱼眼相机的全景显示系统几何校正方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 021501.
- [14] Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli, *et al.* Project of multi-angle polarimetric system onboard satellite for remote sensing of atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(3): 198-201.  
孙晓兵, 洪津, 乔延利, 等. 卫星大气多角度偏振遥感系统方案研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(3): 198-201.
- [15] Goldstein D H. *Polarized light*[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [16] Chen Ligang, Hong Jin, Qiao Yanli, *et al.* Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2384-2387.  
陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 2384-2387.
- [17] Xu Feifei, Zeng Chaoyang, Chen Hang. Research on active Laser polarization imaging of vehicle targets under complicated background[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051103.  
徐飞飞, 曾朝阳, 陈杭. 复杂地物背景下的车辆目标激光主动偏振成像研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051103.
- [18] Sun Xianming, Wang Haihua, Shen Jin, *et al.* Study on polarized light scattering by aerosol over ocean[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 040101.  
孙贤明, 王海华, 申晋, 等. 海洋背景下气溶胶的偏振光散射特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 040101.
- [19] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Pre-flight calibration of the POLDER instrument[C]. *SPIE*, 1995, 2553: 218-231.
- [20] Chen Ligang. Study of laboratory calibration of the airborne polarization CCD camera with wide field of view (optics) [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.  
陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 合肥: 中科院安徽光学精密机械研究所, 2008.
- [21] Smith M H, Woodruff J B, Howe J D. Beam wander considerations in imaging polarimetry[C]. *SPIE*, 1999, 3754: 50-54.
- [22] Yang Fei, Qu Hongsong, Jin Guang, *et al.* Fast geometric correction of space time delayed and integration CCD camera dynamic imaging based on ray tracing point matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0511002.  
杨飞, 曲宏松, 金光, 等. 基于光线追迹逐点匹配的航天时间延迟积分 CCD 相机机动成像快速几何校正算法[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0511002.
- [23] Hu Huijie, Gong Yan, Wu Xiaodong. Simulation about influence of specular scattering on microscope objective stray light characteristics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 101104.  
胡慧杰, 巩岩, 武晓东. 镜面散射对显微镜物镜杂散光特性影响的仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 101104.