

基于三维 DLT 方法的非量测数码相机检校^{*}

邓才龙¹,刘焱雄²,麻德明²,彭琳²,王鹏³,孙根云³

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院,湖北 武汉 430079; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266061; 3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院,山东 青岛 266580)

摘 要:低空无人机遥感系统应用日益广泛,其一般搭载传感器为非量测型数码相机,为了保证测量精度必须进行相机检校,以确定其内方位元素和畸变差系数。采用室外三维控制场的 DLT(直接线性变换)方法,编制了基于三维 DLT 方法的非量测型相机的检校软件,该软件具备相机检校参数解算和物方空间坐标解算功能。对于室外三维控制场的测量数据和一海岛的无人机航摄数据,分别使用和不使用相机检校参数进行处理,试验结果显示使用检校参数可以获得更好地测量精度,表明了室外三维检校场方案和编制的相机检校软件是正确可行的,可实现非量测数码相机的检校。

关键词:DLT;畸变差系数;内方位元素;相机检校;检校场

中图分类号:P75 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.02.005

近年来,低空无人机遥感系统日趋成熟,凭借其高时效性、高灵活性、低成本等优势在国土和海洋测绘中的应用日益频繁和广泛^[1-8]。无人机遥感系统中最常搭载的传感器一般为非量测型数码相机,即常用的单反数码相机,但其不是为测绘目的而设计制造,内方位元素未知,相机镜头也没有严格校正而存在较大的光学畸变,故用于遥感测量前要先进行相机检校以确定其内方位元素和光学畸变。

目前常用的检校方法包括基于自检校方法、控制场检校方法和基于灭点的检校方法等。其中,基于控制场的相机检校方法检校精度高、稳定性好,应用较为广泛,是摄影测量工作中常用的一种检校方法,但相应完善的相机检校软件较为缺乏^[9-14]。为此,本文提出建立室外三维控制场和采用 DLT 方法编制检校软件,并进行了数码相机检校的试验,以形成合格的高精度相机检校场和可靠的相机检校软件。

1 数码相机的畸变差

在摄影测量与遥感工作中,非量测型数码相机由于价格低廉、方便灵活,特别适用于

^{*} 收稿日期:2015-11-09

资助项目:国家自然科学基金项目——中国沿海海洋潮汐特征的 GPS 响应研究(41374044);国家海域动态监视监测管理系统升级改造项目——无人机在岸线勘定中的应用研究(SYJ0814001);海洋公益性行业科研专项——海域无人机监视监测关键技术研究与应用示范(201405028-4)

作者简介:邓才龙(1989-),男,博士研究生,主要从事摄影测量、海洋测绘等方面的研究。E-mail:deng.cai.long@163.com

(陈 靖 编辑)

风险相对较大、有效载荷较小的低空无人机遥感测量。但非量测型数码相机不是为测绘目的而设计制造,一般为常用的单反数码相机,其内方位元素未知,厂家不予提供,相机镜头也没有严格校正而存在较大的光学畸变。

非量测相机用于遥感测量须预先确定相机的内方位元素和光学畸变。在摄影测量中,内方位元素是表示摄影瞬间相机的摄影中心与像片之间相关位置的参数,包括像主点在框标坐标系中的坐标 (x_0, y_0) 和摄影中心到像片的垂距 f (主距)。

摄影机物镜系统设计、制作和装配所引起的像点偏离其理想位置的点位误差称为光学畸变差。光学畸变差是影响像点坐标质量的一项重要误差。光学畸变分为径向畸变差(Radial Distortion)和偏心畸变差(Decentering Distortion)两类^[15]。径向畸变差是指构像点沿物镜向径方向偏离其准确理想位置的畸变差;偏心畸变差是由于装配和震动使得物镜系统各单元透镜偏离了轴线或歪斜,从而引起像点偏离其准确理想位置的误差。一般情况下,偏心畸变差远比径向畸变差要小,尤其是对于较好的物镜系统。

非量测型数码相机的内方位元素和光学畸变对测量精度的影响较为明显,简单说来,相机检校就是为了提高量测精度而获取相机的内方位元素 (x_0, y_0, f) 以及镜头光学畸变误差参数 (k_1, k_2, p_1, p_2) 。同时需要注意的是,在进行相机检校前应确认相机框标理论坐标的准确性,或者是以足够的精度去测定框标坐标带来的误差,包括X轴和Y轴的单位长度不一以及摄影材料的不均匀变形等因素引起的坐标轴比例尺不一误差 d_s 和坐标轴不垂直等因素引起的坐标轴不正交误差 $d\beta$ 。

2 直线线性变换(DLT)解法

检校的方法有很多种,由于数码相机和检校内容的多样化,检校并未标准化。出于解求内方位元素和光学畸变的目的,以及检校环境的不同,非量测相机的检校方法大体可以分为基于控制场检校方法(光学实验室检校法、实验场检校法)、在任检校法(即在完成某个测量任务中同时对相机进行检校)、自检校法、恒星检校法和基于灭点的方法等^[16]。

直接线性变换(Direct Linear Transformation)解法是建立像点坐标系的像方坐标和相应物点物方空间坐标之间直接的线性关系算法。其中,像方坐标是指像点在像方坐标系上的直接读数,是指无需化算到以像主点为原点的坐标仪上的坐标读数^[15]。由于直接线性变换法可以将像点的像方坐标直接变换至相应物点的物方空间坐标,省去了转换为像片坐标的中间步骤,且不需要相机内外方位元素的初始近似值,检校方便迅速,所以特别适用于非量测型相机的检校来获取内外方位元素和畸变差系数,需借助控制试验场来实现检校。

直接线性变换法(DLT)从根本上是由共线条件方程式推导演化而来,基本关系式:

$$\begin{cases} x + \frac{l_1 X + l_2 Y + l_3 Z + l_4}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} = 0; \\ y + \frac{l_5 X + l_6 Y + l_7 Z + l_8}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 为像点的像方坐标, (X, Y, Z) 为像点相应的物方点的物方空间坐标, $(l_1, l_2, \dots, l_{11})$ 系数是内、外方位元素以及坐标轴不垂直性误差 $d\beta$ 和比例尺不一致误差 d_s 的函数。

3 室外三维检校场的建立、应用

本文采用建立室外三维检校场, 布设合理分布的数量足够的高质量控制点, 以及使用直接线性变换法(DLT)编制相应的检校软件, 来解算出像片的内方位元素和非量测型数码相机的畸变差系数, 并利用解算结果来反算已知的物方控制点坐标和全站仪测量的结果进行比对, 以验证程序的解算精度。

3.1 室外三维检校场的建立方案

选择研究所内的科研楼北侧楼体中上部为检校场主体, 充分利用该楼体侧面的凹凸层次, 布设三维分布的检校标志点, 构建三维检校场(图 1); 使用科研楼后方的实验楼顶部作为拍摄点, 二楼间距约 45 m, 满足相机检校场需要无穷远处的要求; 在实验楼正前方的空地上一字排开均匀布设 3 个控制点, 由左至右分别为 k_1 , k_2 和 k_3 , 控制点采用测绘专用测量标志。

1) 相机检校场建设

科研楼中西部北侧墙体(长约 60 m, 高约 26 m 的范围, 每层楼高约为 3 m)作为整个布设检校控制点的三维场地。在凹凸不平的北墙均匀布设控制点标志, 使其环绕作为检校场的整面北侧墙体, 并使控制点在像片上的构像范围尽量大, 四周稍微加大密度, 并于楼顶竖立标志杆以布设纵深较大的控制点标志, 总共布设约 39 个控制点标志, 控制点拟采用矩形标志为主, 辅以少量的圆形标志, 布设方案具体如图 1 所示。



图 1 标志点分布示意图

Fig. 1 Distribution of the marking points

考虑到标志要容易固定且长期使用, 标志的材料拟采用不易腐蚀的铝材, 标志的模板为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的正方形和直径为 60 mm 的圆形铝片, 表面刷白色防水漆, 四角留有小孔用于固定在楼体, 中间用黑色的防水漆刷出 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的黑色正方形, 然后在其中中心粘贴大小为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的反光片。黑色与白色形成明显反差, 利于标志图像的自动识别, 反光片保证全站仪准确获取控制点的物方空间坐标。

2) 地面控制点和检校控制点的测量

以 k_1 为原点, 近似垂直科研楼(检校场)为 z 轴(北向为正), 平行直线 $k_1 k_2$ 为 x 轴(西向为正), 铅垂线为 y 轴(向上为正), 构建独立直角坐标系。地面 3 个控制点先使用莱卡

NA700 系列水准仪来回测量获取其高度差,再使用莱卡 TCRP1201+ 全站仪获取了地面控制点之间的平面距离, k_1 、 k_2 和 k_3 的坐标分别为:(0,0,0)、(-39.731,0.042,-0.002) 和(-67.460,-0.092,1.987),单位为 m,测量精度为毫米级。然后分别在地面控制点 k_1 、 k_2 进行检校场控制点的测量,并将同一个点的 2 次测量结果进行比对,获取检校场全部检校点的三维空间坐标。至此,整个检校场建立完毕。

3.2 编制相机检校软件

直接线性变换(DLT)解法的具体解算过程主要包括 l 系数的迭代解算和物方空间坐标的迭代解算 2 个步骤,但在此之前需要先计算出 l 系数和物方空间坐标的近似值,以作为迭代初始值参与迭代解算。如图 2 所示:

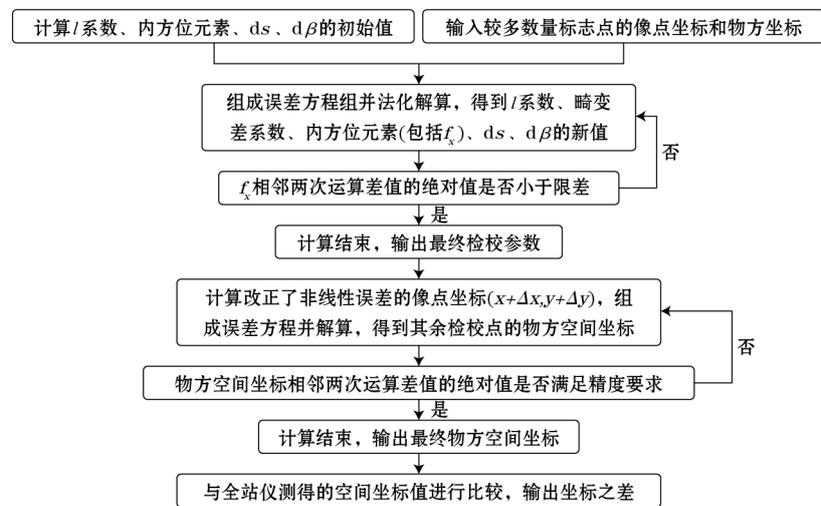


图 2 直接线性变换(DLT)解法的编程解算过程

Fig. 2 The programming calculation process of DLT solution

1) l 系数、内方位元素和 ds 、 $d\beta$ 的近似值的解算

畸变系数初始值设为零,利用获取像片中的 6 个检校点的像点坐标和相应的物方空间坐标,解算由式(1)组成的方程组得到 11 个 l 系数的近似值,然后计算得到内方位元素和 ds 、 $d\beta$ 的近似值。

2) 相机检校参数的精确值解算

当有较多的控制点时,即有多余观测值时,将 l 系数和内方位元素的近似值、已知的足够数量的像点坐标和相应的物方空间坐标代入式(1)构成的方程组进行迭代运算,迭代终止依据可为 f_x 相邻两次运算差值的绝对值是否小于 0.01 mm,若小于 0.01 mm 则运算结束并输出最终结果,即 l 系数和光学畸变系数的精确值,否则就继续进行运算直至满足条件。同时,由最终结果计算得到内方位元素和 ds 、 $d\beta$ 的精确值。

3) 未知点物方空间坐标的解算

在解算出上述步骤的各系数精确值之后,可计算改正了非线性误差(主要是光学畸变改正)的像点的像方坐标。由空间前方交会的概念可知,为了解求物方空间坐标(X, Y ,

Z),应在不同摄站拍摄两张以上的像片。此运算也需要进行迭代运算,迭代终止条件可设为物方空间坐标相邻两次运算之差的绝对值是否小于其精度要求的 1/10。

然后根据 DLT 解法的解算过程,在 Visual C++6.0 环境下进行了相机检校软件的编程,如图 3 所示。



图 3 相机检校软件界面

Fig. 3 The interface of the camera calibration software

3.3 检校精度与可靠性验证

使用需检校的数码相机在实验楼楼顶不同位置对检校场进行拍摄,并量测拍摄像片中各检校点中心的像点坐标,然后将大部分均匀分布的检校点的像点坐标和相应的三维空间坐标输入上述编写的检校软件,解算出数码相机的内方位元素(x_0, y_0, f)以及镜头的畸变误差参数;然后利用解算出的相机检校参数和不同位置拍摄的像片计算得到控制场内部其他检校点的三维空间坐标,将其与视为真值的全站仪测量的三维空间坐标进行比对,相应检校点的坐标之差即可看作测量误差。

由于科研楼检校场尚未正式建立,未布设检校点标志,故先行按照上述检校场建立方案选取了一定数量的均匀分布的特征点,并使用全站仪测量获取其三维物方坐标,测量精度为毫米级,如表 1 所示。

表 1 检校场标志点的三维坐标 (mm)

Table 1 The 3D coordinates of the marking points of the calibration field (mm)

| 点号 | 坐标 | | | 点号 | 坐标 | | | 点号 | 坐标 | | |
|----|---------|--------|--------|----|---------|--------|--------|----|---------|--------|--------|
| | X | Y | Z | | X | Y | Z | | X | Y | Z |
| 1 | -45 716 | 12 750 | 21 786 | 12 | -45 569 | 55 818 | 28 047 | 23 | -46 266 | 40 913 | 12 424 |
| 2 | -45 719 | 12 750 | 18 568 | 13 | -45 303 | 55 794 | 20 535 | 24 | -46 214 | 41 127 | 15 991 |
| 3 | -45 719 | 12 746 | 15 367 | 14 | -46 727 | 55 738 | 19 033 | 25 | -46 682 | 49 290 | 15 838 |
| 4 | -45 709 | 12 741 | 12 164 | 15 | -46 745 | 55 746 | 15 834 | 26 | -46 727 | 52 160 | 12 631 |
| 5 | -52 276 | 10 876 | 27 209 | 16 | -46 735 | 55 745 | 12 628 | 27 | -46 672 | 49 295 | 19 020 |
| 6 | -45 031 | 16 368 | 25 001 | 17 | -46 859 | 47 158 | 13 615 | 28 | -46 680 | 49 285 | 22 185 |
| 7 | -45 089 | 27 659 | 24 993 | 18 | -46 266 | 49 043 | 9 736 | 29 | -46 244 | 42 229 | 22 898 |
| 8 | -45 126 | 34 838 | 24 986 | 19 | -46 259 | 34 851 | 9 592 | 30 | -46 234 | 38 988 | 23 046 |
| 9 | -45 159 | 42 055 | 25 007 | 20 | -46 525 | 19 740 | 9 148 | 31 | -46 103 | 29 965 | 23 081 |
| 10 | -45 200 | 49 262 | 25 025 | 21 | -46 542 | 19 738 | 5 899 | 32 | -46 129 | 26 863 | 22 880 |
| 11 | -43 744 | 52 985 | 30 313 | 22 | -46 281 | 48 676 | 12 619 | 33 | -45 751 | 16 370 | 23 632 |

其次,使用数码相机 Canon EOS 5D Mark II 对科研楼进行拍摄,通过拍摄的像片获取了相应特征点的像点坐标。然后,使用 23 个特征点的像点坐标和物方三维坐标,通过编制的检校软件迭代计算(f 相邻两次运算差值的绝对值小于限差 0.01 mm)得到了相机的检校参数,如表 2 所示。

而后通过 3 张不同摄站像片的检校参数和其余 6 个特征点的像点坐标迭代运算得到其三维空间坐标(空间坐标的相邻两次运算差值的绝对值小于限差 0.1 mm),再与全站仪测得的空间坐标进行比对得到测量误差;并在上述的基础上不使用获取的检校参数计算得到检校点的三维空间坐标,以上 2 种方式获取的检校点坐标的测量误差如表 3 所示。

表 2 数码相机检校结果

Table 2 Calibration results of the digital camera

| 畸变差参数 | | 计算值 |
|------------|----------|------------------------|
| 像主点坐标/mm | x_0 | -0.089 4 |
| | y_0 | 0.023 4 |
| 焦距/mm | f | 35.503 6 |
| 坐标轴不交误差 | $d\beta$ | 2.27×10^{-5} |
| 坐标轴比例尺不一误差 | d_s | 2.27×10^{-4} |
| 径向畸变参数 | k_1 | 8.54×10^{-5} |
| | k_2 | -1.04×10^{-7} |
| 偏心畸变参数 | p_1 | 8.27×10^{-5} |
| | p_2 | -1.92×10^{-5} |

表 3 是否使用检校参数的检校点坐标误差(mm)

Table 3 Errors of the marking point coordinates when using and not using the calibration parameters (mm)

| 点号 | 使用检校参数的检校点坐标误差 | | | | 不使用检校参数的检校点坐标误差 | | | |
|----|----------------|------------|------------|---|-----------------|------------|------------|---|
| | ΔX | ΔY | ΔZ | $\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$ | ΔX | ΔY | ΔZ | $\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$ |
| 25 | 16.1 | -0.7 | 52.7 | 55.1 | -80.7 | -39.4 | -81.9 | 121.6 |
| 26 | 13.5 | 27.4 | 62.1 | 69.2 | -168.7 | -65.8 | -137.9 | 227.6 |
| 27 | 20.6 | -4.9 | 79.0 | 81.7 | -85.9 | -27.1 | -103.3 | 137.1 |
| 31 | -32.5 | -33.5 | 154.7 | 161.6 | -32.2 | -25.1 | 288.0 | 290.9 |
| 32 | -35.7 | -33.9 | 105.6 | 116.5 | -42.3 | -17.0 | 348.4 | 351.3 |
| 33 | -54.3 | -48.6 | 20.0 | 75.6 | -96.0 | 7.9 | 772.1 | 778.1 |

由于未布设检校点标志而导致特征点的像点坐标和物方三维坐标量测均存在一定的误差,从而上述检校参数的精度和检校点坐标误差值的大小受到了一定的影响,但均在估计范围之内,并且使用检校参数后的坐标精度得到了较大的提升,表明了室外三维检校场方案和编制的相机检校软件的可行性和正确性,可实现非量测数码相机的检校。

并且针对青岛海域崂山湾中一个海岛的无人机航摄数据,分别使用和不使用相机检校参数对航摄数据进行处理,得到了海岛的 2 幅 1:2 000 数字正射影像图(DOM);再分别测得抽取控制点的 DOM 坐标与实测坐标之差(表 4),表明在海岛海岸带的无人机航摄的实际应用中,使用相机检校参数整体上可以获得更好的量测精度。

表 4 是否使用检校参数的控制点坐标误差(m)

Table 4 Errors of control points coordinates when using and not using the calibration parameters (mm)

| 点 号 | 使用检校参数的坐标误差 | | 不使用检校参数的坐标误差 | |
|-----|-------------|------------|--------------|------------|
| | ΔX | ΔY | ΔX | ΔY |
| 4 | 0.14 | -0.22 | 0.52 | -0.40 |
| 7 | -0.42 | -0.15 | -0.63 | 0.03 |
| 16 | -0.07 | -0.02 | -0.08 | 0.15 |
| 21 | 0.13 | 0.05 | -0.16 | 0.16 |
| 32 | 0.08 | 0.27 | -0.12 | 0.58 |
| 39 | 0.20 | -0.03 | 0.03 | 0.22 |

4 结 语

针对无人机遥感系统的非量测型相机检校进行了试验和研究,编制了基于三维 DLT 方法的非量测型相机的检校软件,程序具备相机检校参数解算和物方空间坐标解算功能;试验结果表明了室外三维检校场方案和编制的相机检校软件是正确、可行的,可实现非量测数码相机的检校。但是,后续还需进一步完成科研楼室外三维检校场的建立和完善检校软件的检校标志点自动识别和像点坐标获取等相关功能,以期最后形成稳定可靠的相机检校场和检校软件。

参考文献:

- [1] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):505-540.
- [2] 李英成,叶冬梅,薛艳丽,等. GPS 辅助空中三角测量技术在无人机海岛测图中的应用[J]. 测绘科学,2012,37(5):55-57.
- [3] 麻德明,邓才龙,徐文学,等. 无人机遥感系统在岸线勘测中的应用[J]. 海洋开发与管理,2015,32(4):45-48.
- [4] 邓才龙,刘焱雄,田梓文,等. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究[J]. 海岸工程,2014,33(4):41-48.
- [5] REMONDION F, BARAZZETTI L, NEX F, et al. UAV Photogrammetry for mapping and 3D modeling current status and future perspectives[C]// International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich: 2011: 25-31.
- [6] FTANCESCO M, MARCO D, MARIO G, et al. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography[J]. Remote Sensing,2013,5(12):6880-6898.
- [7] COLOMINA I, MOLINA P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A Review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2014,92(2):79-97.
- [8] GONALVES J A, HENRIQUES R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2015,104:101-111.
- [9] 徐丽华,谢东海,江万寿. 基于预检校的数码相机自检校研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学

- 版), 2005, 24(1): 55-60.
- [10] 王留召, 张建霞, 王宝山. 航空摄影测量数码相机检校场的建立[J]. 河南理工大学学报, 2006, 25(1): 46-49.
- [11] 殷福忠, 刘红军. 基于 DLT 方法的非量测数码相机检校研究[J]. 地理信息世界, 2009, 7(1): 84-87.
- [12] 王永峰, 葛亮, 孙忠芳. 基于二维 DLT 的非量测相机检校[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(9): 165-167.
- [13] 曹良中, 杨辽, 阚培涛, 等. 地面检校场的非量测型数码相机检校[J]. 测绘科学, 2015, 40(2): 132-137.
- [14] 何敏. 基于多像灭点的非量测型相机检校方法的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [15] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [16] 李平. 非量测型数码相机的检校[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.

Non-Metric Digital Camera Calibration Based on 3D Direct Linear Transformation

DENG Cai-long¹, LIU Yan-xiong², MA De-ming², PENG Lin²,
WANG Peng³, SUN Gen-yun³

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 3. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The application of low-altitude UAV remote sensing system is rapidly increasing, and the sensor mounted on UAV is commonly a non-metric digital camera. To ensure the measurement accuracy, the camera must be calibrated in order to determine interior orientation elements and distortion coefficient. A set of software is developed for calibrating the non-metric digital camera based on the Direct Linear Transformation (DLT) used in the outdoor 3D calibration field. This software has the function of calculating camera calibration parameters and object space coordinates. We have tried to process the data measured in the outdoor 3D calibration field and the UAV aerial data of an island by and not by using the camera calibration parameters respectively. The results show that by using the calibration parameters better measurement accuracy can be obtained, indicating that this camera calibration software thus developed is correct and feasible and the calibration of non-metric digital camera is realizable.

Key words: DLT; distortion coefficient; interior orientation elements; digital camera calibration; calibration field