一种新的移轴相机两步标定方法

柳升龙¹, 孙聪^{2,3}, 刘海波^{2,3}, 于起峰^{2,3*}

1. 黑龙江省电力有限公司电力科学研究院, 哈尔滨 150030;

2. 国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073;

3. 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 长沙 410073

* E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

收稿日期: 2017-12-14; 接受日期: 2018-04-25; 网络版发表日期: 2018-07-11

国家电网公司科技项目(编号: 522400180002)资助

摘要 针对移轴相机内参数标定问题, 提出了一种不依赖高精度合作标志且操作简便的相机标定方法. 在深入分析移轴相机成像特性的基础上, 建立了基于二维倾斜角的成像面与理想像面间的单应关系. 进而提出了两步标定算法: 第一步, 通过成像面与标定板面的单应分解得到相机的内外参数初值; 第二步, 基于最大似然准则的相机参数非线性迭代优化. 实验结果显示算法正确可靠, 且收敛速度快, 说明初值确定方法有效可行. 此外实验结果表明切向畸变模型参数与像面二维倾斜角存在耦合, 仅考虑径向畸变模型参数可获得更高精度的二维倾斜角.

关键词 移轴相机, 相机标定, 两步法, 沙姆定律, 铰链定律

1 引言

近景摄像测量实践中, 常由于景深的限制难以捕获占据较大范围目标的清晰图像. 对于特定的相机-镜头组合, 一种常用增大景深的方式是减小镜头的孔径, 然而, 该方法可能导致图像强度降低以及图像噪声的增大^[1,2]. 另一种新颖的方法是相对于成像平面倾斜透镜像面, 使其满足沙姆定律(Scheimpflug principle)以增大景深, 对应的相机称之为移轴相机, 亦可称为Scheimpflug相机^[3,4].

沙姆定律最早由奥地利陆军上尉Theodor Scheimpflug(1865~1911年)提出^[3,4], 当拍摄主体平面、镜头平面(镜头中心点垂直于光轴所延伸出来的平面)

和成像平面(相机的感光媒介平面)三者相交于一线(Scheimpflug线)时, 拍摄主体平面上的全部景物都会呈现清晰的状态. 虽然对于实际光学成像系统, 成像畸变与光圈随着物距变化而变化, 使得拍摄主体平面难以达到完全清晰, 但在移轴相机标定过程通常忽略这一影响^[5].

移轴相机不必依赖缩放光圈, 可以较好地解决景深分布的问题, 在粒子图像测速PIV^[6,7]、线结构光^[8]和手持三维激光扫描仪^[5,9]等领域已经有了广泛应用. 同时, 移轴相机还被引入到医学领域, 极大地助力于白内障等眼科手术^[10,11]. 国内多家单位也已开展了移轴相机的相关研究^[9,12~15], 但在摄像测量领域应用较少, 在大型结构变形测量等领域有广阔的应用前景.

引用格式: 柳升龙, 孙聪, 刘海波, 等. 一种新的移轴相机两步标定方法. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 836-844

Liu S L, Sun C, Liu H B, et al. A new two-step method for tilt/shift camera self-calibration (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 836-844, doi: 10.1360/N092017-00235

移轴相机内参数高精度的标定是其应用于高精度测量任务的前提和基础, 由于成像模型的不同, 现有的成熟相机标定方法难以直接适用^[16-18]. 虽然Legarda等人^[19], Nocerino等人^[1], Cornic等人^[20]等指出, 在透镜倾斜角(又称之为Scheimpflug角)较小($\leq 6^\circ$)时, 现有标定方法可利用像差畸变系数补偿倾斜效应, 在一定程度上能解决移轴相机标定问题. 但当倾斜角较大时, 传统的相机标定方法表现乏力.

为此, 越来越多的学者开展了相关的研究工作. Wang等人^[21], Peng等人^[14], Kumar和Ahuja^[22]将移轴相机的Scheimpflug角作为一个额外畸变参数加入到现有的小孔成像模型中. 而Loughichi等人^[23]和Fournel等人^[24]在提出的成像模型中采用一维Scheimpflug角描述倾斜像面, 随之Legarda等人^[2], Zhang和Zhou^[13], Fasogbon等人^[25], Cornic等人^[20]将之扩展至二维, 且Zhang和Zhou^[13]证明了二维Scheimpflug角已足以描述透镜倾斜. Legarda等人^[2]的标定方法条件苛刻, 需要高精度的平面标定靶板; Zhang和Zhou^[13]的方法需要平行光管辅助以获得成像面主点初值; 而Cornic等人^[20], Fasogbon等人^[25]的方法又局限于倾斜角较小的情况, 迫切需要研究不依赖高精度合作标志且操作简便、高效可靠的移轴相机内参数标定方法.

目前主流的相机标定算法最终均可归结为非线性参数优化问题, 合适的初值选取是标定算法快速收敛的关键. 现有的移轴相机标定初值获取方法大体可分为3类: (1) 以相机标称参数作为优化算法初值^[14,23]; (2) 以张氏标定算法结果作为初值^[2,19,20,25]; (3) 借助辅助工具如平行光管获取移轴相机成像面主点坐标^[13]. 前两种初值获取方法虽然简便易行, 但并未考虑移轴成像独有特性, 后一种方法虽可获得较高精度的初值, 但需要额外的辅助工具. 因此, 仍需深入研究更好适应于移轴相机的初值确定方法.

针对移轴相机内参数标定问题, 提出了一种不依赖高精度合作标志且操作简便、高效可靠的标定方法. 在深入分析移轴相机成像特性的基础之上, 建立了基于二维倾斜角的成像面与理想像面间的单应关系. 进而提出了两步标定算法: 第一步, 通过成像面与标定板面的单应分解相机内外参数初值; 第二步, 基于最大似然准则的相机内参数非线性迭代优化. 实验论证了移轴相机两步标定算法的正确性和可行性. 此外, 深入分析了切向畸变模型参数与像面二维倾斜角的耦合

关系.

2 移轴相机成像

如图1(a)所示, 常规相机配置中相机的前焦面、透镜面以及成像面通常相互平行. 而移轴相机如图1(b)所示, 透镜倾斜使得光轴不再垂直像面. 沙姆定律^[3]指出, 当成像面、透镜面以及聚焦平面相交于同一条直线(Scheimpflug线)时, 倾斜的待测主体平面可清晰成像.

仔细分析不难发现, 仅沙姆定律难以实现移轴相机清晰成像. 对于任意给定的成像面和透镜面, 存在无数个物方平面可满足3个平面相交于同一直线这一条件, 然而很显然, 这无数个物方平面不可能均能清晰成像.

实际上, 对于任意给定的移轴相机配置, 是由沙姆定律和铰链定律(hinge rule)共同确定唯一的清晰聚焦平面^[4]. 铰链定律可看作是经典的薄透镜高斯公式在沙姆定律配置下的一种应用. 如图2所示, PTF(parallel to film)平面指的是过透镜的前节点且平行于成像面的假想平面. 铰链定律指出, PTF平面、聚焦平面以及透镜的前焦平面应相交于同一直线, Hinge线^[4]. 同时, 铰链定律可给出透镜倾斜角 $\alpha = \arcsin(f/J)$. 其中, f 为透镜焦距, J 为透镜的前节点到Hinge线的距离.

图1 相机成像示意图. (a) 常规相机成像示意图; (b) 移轴相机成像示意图

当且仅当移轴成像系统满足沙姆定律和铰链定律时, 待测主体平面可清晰成像, 且此时仍满足透镜高斯公式^[3,4].

3 移轴相机标定原理

3.1 移轴相机成像模型

移轴相机成像模型如图3所示. 图中, $P_W(X_W, Y_W, Z_W)$ 为三维空间世界坐标系中任意点, O 点为光心, $OX_C Y_C Z_C$ 表示相机坐标系. 平面 S 和平面 P 分别表示Scheimpflug相机移轴成像面以及垂直于光轴的理想正视成像面, 由于理想像面可任意布置, 可令平面 S 与平面 P 坐标系原点重合^[2,19].

r 为过点 P_W 与光心 O 的直线, 交平面 S , 平面 P 分别于点 P_S, P_P . $(\mathbf{m}, \mathbf{n})$ 为平面 S 内的基向量, 向量 $\mathbf{m}$ 位于坐标轴 X_C 和坐标轴 Z_C 所确定平面内, 向量 $\mathbf{n}$ 垂直于 $\mathbf{m}$ 且与坐标轴 Y_C 夹角为 α . 参考文献^[19]中定义, 令 $\mathbf{m}=(\cos\beta, 0, \sin\beta)$, 则向量 $\mathbf{n}$ 可表示为 $\mathbf{n}=(-\sin\alpha\sin\beta, \cos\alpha, \sin\alpha\cos\beta)$. 检验易知, 向量 $\mathbf{m}, \mathbf{n}$ 满足约束 $\mathbf{m}^T \mathbf{n}=0$, 其中符号 $\mathbf{A}^T$ 表示矢量 $\mathbf{A}$ 的转置.

直线 r 的方程可表示如下:

图2 沙姆定律以及铰链定律

图3 Scheimpflug相机标定模型

$$r: \lambda P_W = \lambda(X_W, Y_W, Z_W). \quad (1)$$

直线 r 与像面 P , 像面 S 的交点可分别表示为

$$\mathbf{P}_P = (P_{Px}, P_{Py}, f)^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_S = (0, 0, f)^T + P_{Sx} \mathbf{m} + P_{Sy} \mathbf{n}. \quad (3)$$

整理式(2)和(3), 可得

$$\begin{bmatrix} P_{Px} \\ P_{Py} \\ f \end{bmatrix} = \lambda \times \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\alpha \times \sin\beta & 0 \\ 0 & \cos\alpha & 0 \\ \sin\beta & \sin\alpha \times \cos\beta & f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{Sx} \\ P_{Sy} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, $\lambda=f/(P_{Px}\sin\beta+P_{Py}\sin\alpha\cos\beta+f)$, 由式(4)可得像面 P 与像面 S 间像点坐标的转换关系.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{f} \mathbf{K} \mathbf{R}_S \mathbf{K}_S^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ v_S \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, $(u, v), (u_S, v_S)$ 分别为像面 P, S 上的像点坐标,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f/dx & 0 & C_{Px} \\ 0 & f/dy & C_{Py} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_S = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & C_{Sx} \\ 0 & 1/dy & C_{Sy} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_S = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\alpha\sin\beta & 0 \\ 0 & \cos\alpha & 0 \\ \sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & f \end{bmatrix}.$$

$(C_{Px}, C_{Py}), (C_{Sx}, C_{Sy})$ 分别为像面 P 与像面 S 的主点坐标, (dx, dy) 为摄像机单个像元尺寸. 以标定靶板面作为世界坐标系的 W - XY 平面, 则对该平面场景中的所有点有 $Z=0$, 即

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s \mathbf{K} [r_1 \ r_2 \ \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, s 为任意比例因子, $\mathbf{K}$ 为对应于正射像面 P 的内参数矩阵, r_1, r_2 为其姿态矩阵 $\mathbf{R}$ 的前两列, $\mathbf{T}$ 为平移向量. 综合式(5)和(6)可得

$$\lambda' \begin{bmatrix} u_S \\ v_S \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{H}=\mathbf{f} \mathbf{K}_S \mathbf{R}_S^{-1} [r_1 \ r_2 \ \mathbf{T}]$, $\mathbf{H}$ 为描述标定板平面至成像

面的单应, λ' 为任意非零比例因子. 由式(7)可知, 当 Scheimpflug 角均为零时, 移轴成像模型即退化为传统小孔成像模型. 由于实际镜头不可避免地存在透镜畸变, 式(5)不再严格成立, 因此引入镜头成像相差.

$$\begin{cases} u_d - \delta u = u, \\ v_d - \delta v = v, \end{cases} \quad (8)$$

其中, (u_d, v_d) 为像面上实际成像点, (u, v) 为理想像点, 而 $(\delta u, \delta v)$ 表示由于镜头畸变导致的像差. 高精度测量任务要求对像差畸变进行精确建模, 像差通常可分为径向像差和切向像差, 径向像差主要包括球面像差、彗形像差、像散和像场弯曲等, 而切向像差主要由离心像差和薄棱镜像差等组成^[26].

$$\begin{cases} \text{Dist_rad} = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix}, \\ \text{Dist_tan} = \begin{bmatrix} 2k_3 x_n y_n + k_4 (r^2 + 2x_n^2) \\ k_3 (r^2 + 2y_n^2) + 2k_4 x_n y_n \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (9)$$

其中, $(x_n, y_n)^T$ 为归一化像点坐标, $r^2 = x_n^2 + y_n^2$, (k_1, k_2, k_3) , (k_3, k_4) 分别为径向和切向畸变系数, 实际经验表明, 四阶径向畸变模型已足以满足高精度测量任务需要, 即 k_5 常置为零. 以式(8)中 (u_d, v_d) 代替式(6)中 (u, v) , 再代入式(7)中即可得到实际像面与标定板面的单应关系.

Wang 等人^[26]进一步指出薄棱镜畸变源自于镜头设计和制造的缺陷, 以及图像传感器阵列的轻微倾斜. 这也给文献[1, 19, 20]提供了理论基础, 即在透镜倾斜较小时, 现有标定方法可利用切向畸变参数补偿倾斜效应, 在一定程度上能解决移轴相机标定问题. 同时也暗示二维 Scheimpflug 角与切向畸变参数很有可能存在耦合关系.

3.2 初值获取

现有主流标定算法^[2, 13, 23, 25, 27]大多可归结为非线性参数优化问题, 合适的初值选取是标定算法快速收敛的关键. 现有的初值获取方法大体可分为以下几类: (1) 以相机标称参数直接作为优化算法初值^[14, 23]; (2) 以张氏标定工具箱结果作为初值^[2, 19, 20, 25]; (3) 借助辅助工具如平行光管获取移轴相机成像面主点坐标^[13].

很显然, 前两种初值获取方法并未充分利用移轴相机成像独有特点, 初值精度相对较差. 而第3种需借

助平行光管辅助, 操作复杂. 实际上在移轴相机(如 Nikon D300s 数码照相机+Nikon PC-E Micro NIKKOR 移轴镜头)拍摄过程中, 镜头倾斜角有明确刻度, 可根据拍摄需求人为调节倾斜角度 α , 而绕 Y_C 轴倾斜角 β 为镜头与相机装配过程中的轻微误差, 默认为零, 因此可方便获得透镜倾斜角 (α, β) 初值. 基于此即可利用 Scheimpflug 成像面与标定板面单应分解相机内参数初值.

式(7)中, 令 $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ h_3]$, 则有

$$\mathbf{H} = \lambda' [h_1 \ h_2 \ h_3] = \mathbf{B} [r_1 \ r_2 \ \mathbf{T}], \quad (10)$$

其中, $\mathbf{B} = f \mathbf{K}_s \mathbf{R}_s^{-1}$, 即

$$\begin{cases} r_1 = \lambda' \mathbf{B}^{-1} h_1, \\ r_2 = \lambda' \mathbf{B}^{-1} h_2, \\ \mathbf{T} = \lambda' \mathbf{B}^{-1} h_3. \end{cases}$$

又已知 r_1, r_2 正交, 且模为1, 即

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1^T \mathbf{B}^{-T} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0, \\ \mathbf{h}_1^T \mathbf{B}^{-T} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{B}^{-T} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{h}_2. \end{cases}$$

易证 $\mathbf{A}_s = \mathbf{B}^{-T} \mathbf{B}^{-1}$ 为正对称矩阵,

$$\mathbf{A}_s = \mathbf{B}^{-T} \mathbf{B}^{-1} = \frac{1}{f^2} \begin{bmatrix} dx^2 & 0 & A_{13} \\ 0 & dy^2 & A_{23} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} A_{13} = f dx \sin \beta - dx^2 C_{sx}, \\ A_{23} = f dy \sin \alpha \cos \beta - dy^2 C_{sy}, \\ A_{33} = f^2 + dx^2 C_{sx}^2 + dy^2 C_{sy}^2 - 2f dx \sin \beta - 2f dy \sin \alpha \cos \beta. \end{cases}$$

至此, 已转换为传统的张氏方法的形式, 参考现有张氏解析解法^[18]即可便捷地计算得到内参数矩阵 $\mathbf{A}_s$, 进而可获得移轴相机的内参数初值主点 (C_{sx}, C_{sy}) , 等效焦距 (F_{sx}, F_{sy}) 以及外参数 (R^i, T^i) .

由图4的几何关系可知, 透镜倾斜前后有效焦距 f_p , f_s 以及像面主点 (C_{Px}, C_{Py}) 和 (C_{Sx}, C_{Sy}) , 存在以下关系, $f_s = f_p \cos \alpha$, 其中 (F_{Px}, F_{Py}) 为像面 P 对应的等效焦距.

$$\begin{cases} C_{Sx} = C_{Px} - F_{Px} \sin \beta, \\ C_{Sy} = C_{Py} + F_{Py} \sin \alpha. \end{cases} \quad (12)$$

图 4 透镜倾斜后像面主点变化示意图

至此, 对应于人为调节的不同Scheimpflug角, 相机标定的内参数初值均可方便获得。

3.3 标定流程

为了简便高效地进行移轴相机标定, 采用棋盘格标定板, 通过在多个不同的视点采集靶标图像, 以实现摄像机的标定. 标定算法主要分为两步: 第一步, 通过成像面与标定板面的单应分解得到相机的内外参数初值; 第二步, 基于最大似然准则的相机参数非线性迭代优化. 具体流程如下:

(1) 利用移轴相机拍摄得到多个不同视点下的标定板图像, 采用harris特征提取算法高精度获取各图像中棋盘格特征点的像点坐标;

(2) 根据3.2节中获取的内外参数初值以及式(5), 将像面S上的像点 $P_S^{(i,j)}(u_s, v_s)$ 投影至像面P中 $P_P^{(i,j)}(\tilde{u}, \tilde{v})$, 其中 $(i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m)$ 分别表示像点数目和视点个数;

(3) 计算多个不同视点下的标定板面控制点 $P_W^{(i,j)}(X_W, Y_W, Z_W)$ 与对应像点 $P_P^{(i,j)}(\tilde{u}, \tilde{v})$ 的单应 H^i , 进而分解得到对应于像面P的内参数矩阵 $\mathbf{K}_P$ 以及外参数 (R_P^i, T_P^i) ;

(4) 忽略像差影响, 将 $P_W^{(i,j)}(X_W, Y_W, Z_W)$ 投影至像面P为 $P_P^{(i,j)}(\tilde{u}, \tilde{v})$, 再利用式(5)及 (α, β) 初值将 $P_P^{(i,j)}(\tilde{u}, \tilde{v})$ 投影至像面S中 $P_S^{(i,j)}(\tilde{u}_s, \tilde{v}_s)$, 以像面S上像点重投影误差最小为准则, 建立目标方程:

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left\| P_S^{(i,j)}(u_s, v_s) - P_S^{(i,j)}(\tilde{u}_s, \tilde{v}_s) \right\|^2. \quad (13)$$

采用L-M迭代优化算法得到此时的 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 以及其

他内外参数最优估计;

(5) 在像面P引入式(9)镜头畸变模型, 将 $P_W^{(i,j)}(X_W, Y_W, Z_W)$ 再次投影至像面P中 $P_{P(\hat{\alpha}, \hat{\beta})}^{(i,j)}(\tilde{u}, \tilde{v})$, 并利用式(5)及 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 将经过像差修正后的 $P_{P(\hat{\alpha}, \hat{\beta})}^{(i,j)}(\tilde{u}, \tilde{v})$ 投影至像面S中 $P_{S(\hat{\alpha}, \hat{\beta})}^{(i,j)}(\tilde{u}_s, \tilde{v}_s)$, 再次以像面S上像点重投影误差最小为准则, 建立目标方程:

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left\| P_S^{(i,j)}(u_s, v_s) - P_{S(\hat{\alpha}, \hat{\beta})}^{(i,j)}(\tilde{u}_s, \tilde{v}_s) \right\|^2. \quad (14)$$

采用L-M迭代优化算法估计得到包括像差系数在内的Scheimpflug相机内外参数;

(6) 返回至步骤(2)直至结果收敛。

4 移轴相机标定实验

4.1 实验布置

为验证标定算法性能, 移轴相机标定实验共采用两组Scheimpflug成像系统: 第一组由如图5所示Nikon D300s数码相机(分辨率4288×2848, 像元尺寸5.5 μm)和Nikon PC-E Micro NIKKOR移轴镜头(焦距45 mm)组成; 受制于移轴镜头相对相机上下倾斜角度范围有限(±8.5°), 本文在MVI-D2048相机(分辨率2048×2048)和Kowa-LM25JC5M2镜头(焦距25 mm)的基础上自制了一个倾斜角约为10°的Scheimpflug成像系统, 以进一步验证标定算法性能. 实验共分为ABC三组, A组调节倾斜角约为0°, 此时可认为移轴相机退化为常规相机; B组调节倾斜角约为7°, 而C组倾斜角约为10°. 此处调节透镜倾斜角θ即是按3.1节成像模型绕 X_C 轴旋转θ角. 三组实验均采集15幅不同视角、位置、姿态下的8×11棋盘格标定板图像。

以基于小孔模型的张氏标定方法为参考^[18], 重点

图 5 Nikon D300s相机+PC-E Micro NIKKOR移轴镜头

研究传统标定算法和本文算法在不同倾斜角下的标定性能. 同时, 通过对比分析3组实验中采用不同的像差畸变模型的标定结果, 论证切向畸变系数是否与Scheimpflug角存在耦合.

移轴相机标定实验结果如表1所示, ABC三组各采用3种不同标定模型: A1B1C1, A2B2C2, A3B3C3, 即分别代表传统小孔标定模型, 本文中仅考虑径向畸变像差以及综合考虑径向畸变和切向畸变像差模型的Scheimpflug标定模型.

4.2 实验结果分析

观察A1, B1, C1组标定结果易知, 在倾斜角为零时, 传统小孔模型具有较好的标定效果, 但当倾斜角较大时(7° , 10°), 像点重投影中误差(RMS)相较于Scheimpflug标定模型明显较大, 这也侧面印证了文献[19]的结论, 即在倾斜角较大($>6^\circ$)时, 切向畸变难以补偿倾斜效应.

观察A组实验结果, 若以A1组张氏标定方法为参考, A2组标定的内参数结果(C_x , C_y), (f_x , f_y)与A1组结果差异较小, 说明本文标定算法模型正确. 在忽略切向畸变系数 k_3 , k_4 后, 绕 X_c 轴、 Y_c 轴Scheimpflug角(α , β)标定结果为(0.2149° , 0.9623°). 虽然A3组综合考虑径向畸变和切向畸变像差, 但其标定内参数结果相对张氏结果误差角A2组略大(0.7449 , -3.1642), 由于实际倾斜角约为零, 明显A2组较A3组标定结果更为可信, 采用更为全面的像差畸变模型并未得到精度更高的标定

结果.

观察B, C组实验结果, 当透镜倾斜为 7° 或 10° 时, 可看出B2, C2组标定结果(6.4463 , 0.8197), (9.1981 , 1.0680)明显较B3组结果(5.1486 , 2.6659), C3组结果(2.9987 , -0.0337)精度较高. 综合比较A2, A3, B2, B3, C2, C3可知成像系统的切向畸变项和实际成像面倾斜二维倾斜角存在耦合, 而且仅考虑径向畸变项对于最终的标定精度影响较小. 为获取较高精度的Scheimpflug角标定结果, 像差畸变模型可只考虑径向畸变项.

而同时纵观整个ABC三组实验, 在透镜倾斜角增大时, 基于Scheimpflug成像模型的标定结果RMS相对于小孔模型较小, 说明Scheimpflug成像模型小孔成像模型是对移轴相机的更好描述. 同时观察易知, 随着透镜倾斜角度的增大, 标定结果(C_x , C_y), (f_x , f_y)较镜头标称参数差异也愈大, 即以镜头标称参数作为标定算法的优化初值精度愈低.

文献[2]以张氏标定算法结果为初值, 需要15次迭代算法才能收敛, 而本文算法迭代7次即可收敛至正确结果, 说明提出的基于Scheimpflug成像面与标定板面单应分解获取的内参数初值方法正确有效, 有助于提高标定算法的计算效率.

为进一步验证标定方法的性能, 表2给出本文标定方法与Cornic等人^[20]标定性能的比较, 值得说明的是此处只考虑了径向畸变像差.

根据表2可知, 两种方法标定的内外参数结果(α , β , C_x , C_y , f_x , f_y , k_1 , k_2)基本一致, 进一步说明本文标

表1 移轴相机标定实验结果

倾斜角	0° (A组)			7° (B组)			10° (C组)		
标定模型	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
α (°)	—	0.2149	0.7449	—	6.4463	5.1486	—	9.1981	2.9987
β (°)	—	0.9623	-3.1642	—	0.8197	2.6659	—	1.0680	-0.0337
C_x	2044.4909	2045.6208	2077.7127	2099.2407	2058.8085	2151.2302	1015.8023	1014.2669	1011.9323
C_y	1461.1779	1462.4681	1447.5127	1935.0271	1984.6398	1784.6398	373.6203	921.0598	684.9546
f_x	48.0073	47.9954	48.1980	48.2806	48.6472	48.7253	25.8743	26.4134	26.1090
f_y	47.9663	47.9954	48.1980	48.4798	48.6472	48.7253	27.1610	26.4134	26.1090
k_1	-0.07854	-0.0852	-0.0806	-0.0824	-0.0694	-0.0663	-0.0023	-0.0748	0.0003
k_2	0.1255	0.2329	0.0922	0.2271	0.0252	-0.0085	-1.2101	0.8104	-1.4587
k_3	-0.0018	—	0.0015	0.0022	—	0.0107	0.0046	—	0.0044
k_4	0.0025	—	0.0028	0.0041	—	0.0019	0.0005	—	0.0002
RMS	0.1620	0.1660	0.1608	0.1928	0.1693	0.1690	0.1548	0.1078	0.1076

表 2 本文标定算法与文献方法标定性能比较

倾斜角	0°		7°		10°	
标定模型	本文方法	Cornic等人 ^[20]	本文方法	Cornic等人 ^[20]	本文方法	Cornic等人 ^[20]
α (°)	0.2149	0.1928	6.4463	6.4126	9.1981	9.2544
β (°)	0.9623	-0.5407	0.8197	0.9920	1.0680	-0.9193
Cx	2045.6208	2045.3706	2058.8085	2055.3751	1014.2669	1017.8545
Cy	1462.4681	1461.8725	1984.6398	1978.2631	921.0598	945.0634
f_x	47.9954	48.0056	48.6472	48.2024	26.4134	26.3688
f_y	47.9954	48.0024	48.6472	48.1955	26.4134	26.0862
k_1	-0.0852	-0.0837	-0.0694	-0.0755	-0.0748	-0.0695
k_2	0.2329	0.2126	0.0252	0.0795	0.8104	0.6203
RMS	0.1660	0.1623	0.1693	0.1701	0.1078	0.1076

定方法可靠有效。区别于本文利用空间投影光线与两平面交点的几何关系建立理想像面至倾斜像面间的单应变换关系, Cornic等人^[20]直接采用旋转矩阵描述两平面间的单应。两种模型并无本质上的区别, 但Cornic等人^[20]需要先进行经典张氏标定以获取标定初值, 标定流程更加繁琐。

5 总结

针对移轴相机内参数标定问题, 提出了一种不依

赖高精度合作标志且操作简便的相机标定方法。在深入分析了移轴相机成像特性的基础之上, 建立了基于二维倾斜角的成像面与理想像面间的单应关系。进而提出了一种新的移轴相机两步标定算法。实验结果显示算法正确可靠, 且收敛速度较快。此外实验结果表明切向畸变模型参数与像面二维倾斜角存在耦合, 仅考虑径向畸变模型参数可获得更高精度的二维倾斜角。本文提出的移轴相机两步法标定对实验条件要求低, 操作简单便捷, 具有重要的应用价值。

参考文献

- 1 Nocerino E, Menna F, Remondino F, et al. Experiments on calibrating tilt-shift lenses for close-range photogrammetry. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2016, XLI-B5: 99-105
- 2 Legarda A, Izaguirre A, Arana N, et al. A new method for Scheimpflug camera calibration. In: 10th International Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals (ECMS). Liberec: IEEE, 2011
- 3 Merklinger H M. Focusing the View Camera: A Scientific Way to Focus the View Camera and Estimate Depth of Field. Bedford: Seaboard Print, 1993
- 4 Berliner P. The Scheimpflug Principle. Projection Lights & Staging News, 2010
- 5 Miks A, Novak J, Novak P. Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule. *Opt Express*, 2013, 21: 18225
- 6 Prasad A K, Jensen K. Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows. *Appl Opt*, 1995, 34: 7092
- 7 Calluaud D, David L. Stereoscopic particle image velocimetry measurements of the flow around a surface-mounted block. *Exp Fluids*, 2004, 36: 53-61
- 8 Li J, Guo Y, Zhu J, et al. Large depth-of-view portable three-dimensional laser scanner and its segmental calibration for robot vision. *Opt Lasers Eng*, 2007, 45: 1077-1087
- 9 Yin Y, Wang M, Gao B Z, et al. Fringe projection 3D microscopy with the general imaging model. *Opt Express*, 2015, 23: 6846-6857
- 10 Grewal D S, Grewal S P S. Clinical applications of Scheimpflug imaging in cataract surgery. *Saudi J Ophthalmol*, 2012, 26: 25-32
- 11 Hon Y, Lam A K C. Corneal deformation measurement using Scheimpflug noncontact tonometry. *Optometry Vision Sci*, 2013, 90: e1-e8
- 12 Zhang H, Liu J, Zhai M, et al. Theoretical analysis and experimental validation of sampling volume in tilted imaging system. *IEEE Photon J*, 2015, 7: 1-12

- 13 Zhang X, Zhou T. Generic Scheimpflug camera model and its calibration. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Zhuhai: IEEE, 2015
- 14 Peng J, Wang M, Deng D, et al. Distortion correction for microscopic fringe projection system with Scheimpflug telecentric lens. *Appl Opt*, 2015, 54: 10055
- 15 Sun T, Fang J Y, Zhao D, et al. A novel multi-digital camera system based on tilt-shift photography technology. *Sensors*, 2015, 15: 7823–7843
- 16 Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE J Robot Automat*, 1987, 3: 323–344
- 17 Heikkila J, Silven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan: IEEE, 1997
- 18 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell*, 2000, 22: 1330–1334
- 19 Legarda A, Izaguirre A, Arana N, et al. Comparison and error analysis of the standard pin-hole and Scheimpflug camera calibration models. In: 2013 IEEE 11th International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM). Toulouse: IEEE, 2013
- 20 Cornic P, Illoul C, Cheminet A, et al. Another look at volume self-calibration: Calibration and self-calibration within a pinhole model of Scheimpflug cameras. *Meas Sci Technol*, 2016, 27: 094004
- 21 Wang J, Shi F, Zhang J, et al. A new calibration model of camera lens distortion. *Pattern Recognition*, 2008, 41: 607–615
- 22 Kumar A, Ahuja N. Generalized radial alignment constraint for camera calibration. In: 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Stockholm, 2014
- 23 Louhichi H, Fournel T, Lavest J M, et al. Self-calibration of Scheimpflug cameras: An easy protocol. *Meas Sci Technol*, 2007, 18: 2616–2622
- 24 Fournel T, Louhichi H, Barat C, et al. Scheimpflug self-calibration based on tangency points. In: The 12th International Symposium on Flow Visualization. Göttingen, 2006
- 25 Fasogbon P, Duvieubourg L, Lacaze P-A, et al. Intrinsic camera calibration equipped with Scheimpflug optical device. In: The International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015. Le Creusot, 2015
- 26 Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell*, 1992, 14: 965–980
- 27 Hamrouni S, Louhichi H, Ben Aissia H, et al. A new method for stereo-cameras self-calibration in Scheimpflug condition. In: 15th International Symposium on Flow Visualization. Minsk, 2012

A new two-step method for tilt/shift camera self-calibration

LIU ShengLong¹, SUN Cong^{2,3}, LIU HaiBo^{2,3} & YU QiFeng^{2,3}

¹ State Grid Electric Power Research Institute of Heilongjiang Electric Power Co, Harbin 150030, China;

² College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

³ Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha 410073, China

Aiming to calibrate the internal parameters of a tilt/shift camera, a flexible self-calibration method with roughly-known calibration pattern is proposed. Based on the imaging characteristics of the tilt/shift camera, two angle parameters are added to explicitly model the homography of the tilted image plane and the ideal image plane which form a part of tilt/shift camera calibration parameter set. Then, a two-step self-calibration algorithm is developed, the first step is to solve the initial parameters of the subset of the calibration parameters via the decomposing of the homography of the imaging plane and the calibration pattern; the second step is a nonlinear optimization technique based on the maximum likelihood criterion. Experimental results confirm the feasibility and validity of the proposed method. The fast convergence of the algorithm shows that the initialization method of the calibration subset parameters is correct and effective. Furthermore, experimental results show that the parameters of the tangential distortion model are coupled with the two-dimensional tilt angle of the image plane. Only the radial distortion model parameters can be taken into account, and the two-dimensional tilt angle with higher accuracy can be obtained.

tilt/shift camera, camera calibration, two-step method, Scheimpflug principle, hinge principle

doi: [10.1360/N092017-00235](https://doi.org/10.1360/N092017-00235)