

基于虚拟立体靶标的线阵相机标定与分析

王子辰^{1,2}, 戴明¹, 李刚¹, 汪永阳^{1,2}, 宋悦铭¹, 高玉军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对线阵相机的特点, 论文提出了一种线阵相机标定方法。首先, 利用设计的平面靶标与相机多次曝光巧妙地构建了虚拟立体标定靶标, 通过分析数学建模得到靶标上标定特征点空间位置与像点的对应关系; 其次, 分别使用最小二乘法与迭代求解的方法对多个特征点的线性参数超定方程与镜头的非线性畸变参数进行求解, 讨论了标定过程中相机与靶标非严格平行时对标定结果的影响; 最后, 实验室条件下使用论文设计的靶标与方法对线阵相机标定进行实验验证。理论分析与实验结果表明此线阵相机标定方法简单灵活, 标定特征点个数不拘泥于靶标的制作, 相机与靶标的位置无需严格平行, 标定精度高, 且具有较好良好的实用工程应用价值。

关键词: 线阵相机标定; 虚拟立体靶标; 最小二乘法; 迭代优化; 标定误差分析

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0902-06

Calibration and analysis of line-scan camera based on virtual stereo pattern

Wang Zichen^{1,2}, Dai Ming¹, Li Gang¹, Wang Yongyang^{1,2}, Song Yueming¹, Gao Yujun¹

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: A novel method that can be used for improving line-scan camera calibration according to its features was proposed. Firstly, the designed planar pattern and multiple exposures of line-scan camera were used to produce a virtual stereo calibration pattern. Secondly, a mathematical model was analyzed and established to seize the relation between the coordinates of calibration points on the pattern and those of their images. Then, the technique of least mean square and iterative optimization were employed to solve both the over-determined equations for multiple feature points and nonlinear parameters of lens. The impact to the calibration result that was caused by the non-parallel nature between the camera and calibration pattern was also analyzed. Finally, both the analysis and experimental results reveal that this

收稿日期: 2013-07-05; 修订日期: 2013-08-26

基金项目: 国家重点基础研究“973 计划”(2009CB7240012A); 装备预先研究(402040203);

中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金(Y2HC1SR129)

作者简介: 王子辰(1985-), 男, 博士生, 主要从事光电平台测量与误差分析方面的研究。Email: wzichen@126.com

导师简介: 戴明(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事机载光电平台测量总体技术方面的研究。Email: daim@vip.126.com

proposed calibration method is not only convenient and flexible, but the calibration points are also independent of calibration pattern and that the condition of parallelism is not required. All these features make the devised method accurate and practical.

Key words: line-scan camera calibration; virtual stereo pattern; least-square solution; iterative optimization; calibration error analyze

0 引言

相机标定是视觉测量的关键。Guillemaut^[1], 刘国忠^[2], Zhang^[3], 牛海涛^[4]等人都对面阵相机的标定进行过研究, 深入地分析了由于镜头畸变等诸多因素造成的成像测量误差。线阵相机在时空分辨率上具有面阵相机不可比拟的优点, 但由于线阵相机的成像单元仅有一列, 标定过程中特征点的选取一直困扰着研究人员, 因此针对线阵相机的标定问题研究较少。20 个世纪 90 年代, Grosky, Horaud^[5-6]等人分别使用不同的方法较早地对线阵相机标定的方法进行了研究; 2007 年, 蔡盛^[7]等针对基于神经网络的线阵相机的标定方法开展了相关研究; 2010 年, Luna^[8]等人提出一种使用空间立体交线对线阵相机标定的方法; 2012 年, Hui^[9]使用主动成像的原理对线阵相机扫描成像标定进行了研究。很多情况下相机的标定需制作复杂且成本较高的立体靶标, 另外靶标上标定特征点的数量有限, 严重影响最终的标定精度。为此, 论文设计了可用于线阵相机标定的虚拟立体靶标并提出了使用此靶标对线阵相机标定的方法; 此线阵相机标定方法仅需制作简单的平面靶标, 且特征点数目不受靶标限制; 文中使用设计的方法完成相机标定的同时重点分析了像面与靶标不平行时对标定结果的影响。

1 线阵相机标定原理

假定特征点的全局坐标为 $C_w(X_w, Y_w, Z_w)^T$, 各物征点对应像点的像面坐标为 $C_i(u_i, v_i, 1)^T$ 。相机的外参数矩阵分别使用旋转矩阵 R 和位移 T 表示为:

$$R = \begin{pmatrix} r'_{11} \\ r'_{12} \\ r'_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$$

则物像间满足

$$C_i = \frac{1}{r'_{33}C_w + T_z} (RC_w + T) \tag{1}$$

对于镜头畸变参数不计的理想线阵相机模型, 当其物像关系为:

$$u + e_u = u_0 + f \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} \tag{2}$$

相机标定即确定公式(2)中各未知参数的过程; 其中, (u_0, f) 为相机镜头的焦距与中心像素位置, 称为内参数, 余下各个变量包含相机坐标系相对全局坐标系的相对位置关系, 称为外参数。目前常用的相机标定方法主要包括传统相机标定法、主动视觉相机标定方法与自标定方法。

2 虚拟立体靶标的构建

设计的线阵相机标定方法并建立标定相机系 $O_c-x_c y_c z_c$ 与靶标坐标系 $O_p-x_p y_p z_p$ 如图 1 所示, 平面靶标放置于三维精确可调平台上, 靶标坐标系 $O_p-x_p y_p z_p$ 的原点 O_p 位于靶标平面的左下角, 且其全局坐标位置可精确测量; $O_p x_p$ 与 $O_p y_p$ 分别与靶标平面的下边缘与左边缘线平行, $O_p z_p$ 与 $O_p x_p, O_p y_p$ 构成右手坐标系。

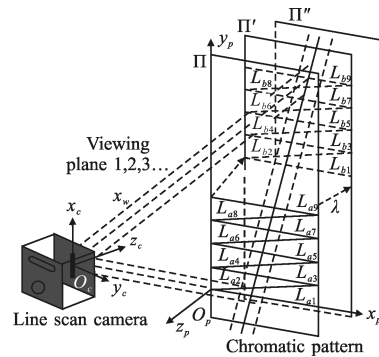


图 1 虚拟立体靶标构建示意图

Fig.1 Diagram of fabricating the virtual stereo pattern

靶标平面的初始位置在图 1 所示的平面 Π 上; 假定平面靶标的位置可精确控制同时靶标平面

$x_p O_p y_p$ 始终与相机像面平行若沿水平方向 $O_p x_p$ 移动 λ 同时沿垂直方向 $O_p y_p n\eta/2+k\sigma$ ($n=0,1,2 \dots; k=0,1,2 \dots$) 后靶标将处于平面 Π' 上; 同理, 继续沿此方向移动 λ 与 $n\eta/2+k\sigma$, 此时靶标处于平面 Π'' ; 任一平面内均沿 x_p 方向移动靶标 $n'\chi \dots$, 通过多次重复上述平移过程即完成了虚拟立体靶标的构建。通过虚拟立体靶标上标定特征点及其像点间的位置, 即可得到标定控制物像点的对应关系。不难发现, 上述过程等效于在线阵相机的物方空间内放置了立体靶标。同时, 构建靶标的过程中需要调节相机视场; 同时, 标定特征点不发生重叠的现象

3 线阵相机标定分析

3.1 立体靶标特征点位置

图 2 给出了对应某位置时平面靶标上特征点分布。其中, $P_{a1}, \dots, P_{an}, P_{b1}, \dots, P_{bn} \dots$ 与 $u_{a1}, \dots, u_{an}, u_{b2}, \dots, u_{bn} \dots$ 分别为特征点及对应的特征像点, 且 P_{in} 与 u_{in} 间的关系如公式(5)所示:

$$\left| \frac{\overrightarrow{P_{in}P_{i,n-1}}}{P_{i,n-1}P_{i,n-2}} \right| \approx \left| \frac{\overrightarrow{u_{in}u_{i,n-1}}}{u_{i,n-1}u_{i,n-2}} \right| \quad i=a, b, \dots, n=1, 2, \dots \quad (3)$$

且公式(3)仅在靶标与相机平行时取等号。同时, 论文后续将重点研究二者不平行时对标定结果的影响。

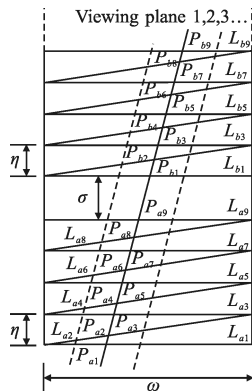


图 2 虚拟立体靶标标定点及其成像

Fig.2 Calibration points on the virtual stereo pattern and their images

各标定特征点在靶标坐标系中的坐标值(X_m, Y_m, Z_m)如表 1 所示。其中, $a, b, c \dots$ 代表不同的靶标平面, χ, η, λ 分别为平面靶标沿 $O_p x_p, O_p y_p$ 与 $O_p z_p$ 方向移动的距离。特征点在全局坐标可靶标坐标系与

全局坐标系的变换关系得到。

表 1 标定模板上虚拟标定特征点坐标

Tab.1 Coordinate of virtual calibration feature points on the pattern board

$P_m(i=a, b, \dots; n=0, \pm 1, \pm 2, \dots; n'=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$			
	X_m	Y_m	Z_m
a	$2n+1$	$x_2 + \frac{x_4-x_2}{y_4-y_2} (y_n-y_2) \pm n' \chi \quad \eta \frac{n-1}{2}$	0
	$2n$	$\frac{\omega u_{a(n-1)} \pm n' \chi}{u_{a(n-1)} + u_{an}} \quad \eta + \frac{\eta u_{a(n-1)}}{u_{a(n-1)} + u_{an}}$	0
b	$2n+1$	$x_2 + \frac{x_4-x_2}{y_4-y_2} (y_n-y_2) \pm n' \chi \quad \sigma + \eta \frac{n-1}{2}$	$-\lambda$
	$2n$	$\frac{\omega u_{b(n-1)} \pm n' \chi}{u_{b(n-1)} + u_{bn}} \quad \eta + \sigma + \frac{\eta u_{b(n-1)}}{u_{b(n-1)} + u_{bn}}$	$-\lambda$
	\dots	\dots	\dots

3.2 线性参数超定方程的最小二乘法求解

将成像模型公式(2)化简可得公式如下:

$$Xl_1 + Yl_2 + Zl_3 + l_4 - uXl_5 - uYl_6 - uZl_7 = u \quad (4)$$

待标定的相机内外参数实际都隐含在系数 l_1, l_2, \dots, l_7 中。对于 n 个特征点, 其标定方程组可以使用公式(5)所示矩阵表达:

$$\begin{pmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -uX_{w1} & -uY_{w1} & -uZ_{w1} \\ X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 & -uX_{w2} & -uY_{w2} & -uZ_{w2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -uX_{wn} & -uY_{wn} & -uZ_{wn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ u \\ \vdots \\ u \end{pmatrix} \quad (5)$$

当特征点个数大于待定参数个数时, 公式(5)作为一个超定方程组可使用最小二乘法求解。记公式(5)为:

$$XL=U \quad (6)$$

其正规方程组解的矩阵表达式为:

$$\hat{L} = (X^T X)^{-1} X^T U \quad (7)$$

使用直接线性变换(DLT)方法可以得到系数 l_1, l_2, \dots, l_7 , 进而得到相机的线性内外参数。

3.3 非线性畸变参数的迭代求解

对于公式(4), 使用 3.1 节得到的系数 l_1, l_2, \dots, l_7 建立特征点的反投影公式:

$$u' = \frac{l_1X+l_2Y+l_3Z+l_4}{l_5X+l_6Y+l_7Z+l_8} \quad (8)$$

由公式(4)与公式(8)得到的反投影像点误差为:

$$\delta u = u - u' \quad (9)$$

一般认为公式(9)的误差由镜头的畸变引起。高精度测量中,要考虑镜头畸变带来的影响。镜头的畸变包括径向与切向畸变两部分,即:

$$\delta u = u_d(k_0r^2+k_1r^4+\dots)+2p_1u_dv_d+p_2(r^2+2u_d^2) \quad (10)$$

式中: $k_0, k_1, \dots, p_1, p_2$ 为畸变系数; $u_d=(u'-u_0)/f_x$; $v_d=(v'-v_0)/f_y$; $r^2=(u-u_0)^2+(v-v_0)^2$ 。线阵相机镜头认为 $v_d=0$, 同时二阶径向畸变已经能够满足一般测量要求, 则公式(10)化简为:

$$\delta u = u_d(k_0r^2+k_1r^4)+p(r^2+2u_d^2) \quad (11)$$

结合公式(9)与公式(11), 通过多次迭代的方法得到线阵相机镜头的畸变参数 k_0, k_1 与 p 。其迭代求解过程如图3所示。

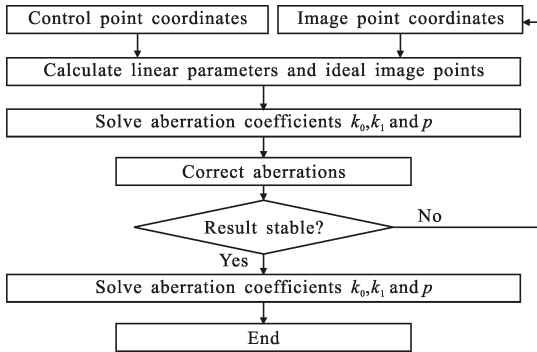


图3 非线性参数的迭代求解步骤

Fig.3 Steps to calculate nonlinear parameters with iteration technique

3.4 像面与靶标不平行引起的标定误差分析

使用3.1节建立的理想成像坐标系由于特征点空间坐标的求解建立在特征像点 P_iP_j 间距的基础上, 因此, 分析像面与靶标平面不平行引起 P_iP_j 间距的变化进而得到对标定精度的影响。

假定 μ_x, μ_y 与 μ_z 分别为相机坐标与靶标坐标系间的相对线位移, 为相对角位移, 公式(12)表示由相对角位移 φ, θ 与 ψ 得到的旋转矩阵 Q 。

$$Q = \begin{pmatrix} c\varphi & -s\varphi & 0 \\ s\varphi & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: $c\varphi=\cos\varphi, s\varphi=\sin\varphi, c\theta=\cos\theta, s\theta=\sin\theta, c\psi=\cos\psi,$

$s\psi=\sin\psi; q_{ij}$ 为矩阵 Q 的元素。平面靶标上某点在靶标坐标系与相机坐标系的关系可以表示为:

$$\begin{pmatrix} x_{jc} \\ y_{jc} \\ z_{jc} \end{pmatrix} = Q^T \begin{pmatrix} x_{jp}-\mu_x \\ w-\mu_y \\ z_0-\mu_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{jp}-\mu_x \\ w-\mu_y \\ z_0-\mu_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

取靶标上特征点代入上述方程(13), 化简有:

$$\begin{cases} x_{cp}-\mu_x = -\frac{q_{21}(w-\mu_y)+q_{31}(z_0-\mu_z)}{q_{11}} \\ y_{cc} = \frac{q_{33}(w-\mu_y)-q_{23}(z_0-\mu_z)}{q_{11}} \\ z_{cc} = \frac{q_{32}(w-\mu_y)-q_{22}(z_0-\mu_z)}{q_{11}} \end{cases} \quad (14)$$

整理公式(14), 可得光轴对称两侧像点间距 w_{+c} 与 w_{-c} 如公式(15)、(16)所示。

$$w_{+c} = \frac{F[q_{33}(w-\mu_y)-q_{23}(z_0-\mu_z)]}{-q_{32}(w-\mu_y)+q_{22}(z_0-\mu_z)} \quad (15)$$

$$w_{-c} = \frac{F[q_{23}(z_0-\mu_z)+q_{33}(w+\mu_y)]}{-q_{32}(w-\mu_y)+q_{22}(z_0-\mu_z)} \quad (16)$$

其中, $W=2w; F$ 为线阵相机镜头焦距; z_0 表示平面靶标与相机像面间距。像面上测得特征像点间距 W 的测量值与及其间距分别如公式(17)、(18)所示。

$$W^{(0)} = \frac{Fq_{11}W(z_0-\mu_z)}{[q_{22}(z_0-\mu_z)+q_{32}\mu_y]^2-(q_{32}W)^2} \quad (17)$$

实际标定特征点间距 $W_c=z_0W^{(0)}/F$, 即

$$W_c = \frac{z_0q_{11}W(z_0-\mu_z)}{[q_{22}(z_0-\mu_z)+q_{32}\mu_y]^2-(q_{32}W)^2} \quad (18)$$

若引入标定特征点间距相对值 $\rho_w=W_c/W$, 由公式(17)可得:

$$\rho_w = \frac{q_{11} \left(1 - \frac{\mu_z}{z_0}\right)}{\left[q_{22} \left(z_0 - \frac{\mu_z}{z_0}\right) + q_{32} \frac{\mu_y}{z_0}\right]^2 - \left(q_{32} \frac{W}{z_0}\right)^2} \quad (19)$$

同时, 定义测量百分比误差 $\delta_w=|1-\rho_w| \times 100\%$ 能够更直接的判断不平行性对标定精度的影响。

(1) 当线阵相机像面与靶标平面间仅存在线位移, 即 $Q=I$ 且 $\mu \neq 0$ 时, 测量百分比误差 δ_w 满足。

$$\delta_w = \left| \frac{\mu_z}{z_0 - \mu_z} \right| \times 100\% \quad (20)$$

显然, 测量误差与 μ_x, μ_y 无关, 仅由 μ_z 产生。由于 $\mu_z \ll z_0$, 因此, 测量百分比误差 δ_w 很小。图4给出了线位移与标定测量百分比误差的关系, 且线位移误差在 ± 3 mm 内时, 测量百分比误差不超过 0.5%。实际上, 公式(3)使用的是特征点间距比例关系, 因此线位移对测量的影响完全可以忽略不计。

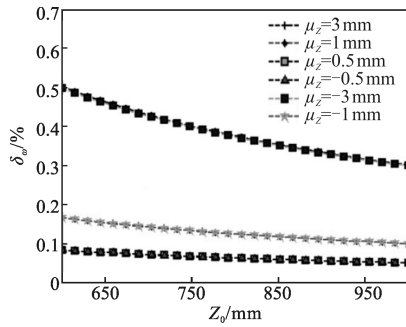


图 4 相对线位移与测量百分比误差的关系

Fig.4 Relationship between translation and percentage error

(2) 当两平面间仅存在角位线位移, 即 $Q \neq I$ 且 $\mu=0$ 时, 测量百分比误差 δ_w 满足:

$$\delta_w = \left| \frac{(q_{22}^2 - q_{11})z_0^2 - q_{32}^2 w^2}{q_{22}^2 z_0^2 - q_{32}^2 w^2} \right| \times 100\% \quad (21)$$

结合公式(12)、(21)可得

$$\delta_w = \left| 1 - \frac{c\theta c\varphi c\psi - s\varphi s\psi}{(c\varphi c\psi - c\theta s\varphi s\psi)^2 - \left(\frac{w}{z_0}\right)^2 (s\varphi s\psi)^2} \right| \times 100\% \quad (22)$$

(1) 当 $\psi = \varphi = 0$ 且 $\theta \neq 0$ 时,

$$\delta_w = 1 - \cos^2\theta \times 100\% \quad (23)$$

(2) 当 $\theta = 0$, $\psi \neq 0$ 且 $\varphi \neq 0$ 时,

$$\delta_w = \left| \frac{\cos(\varphi + \psi) - 1}{\cos(\varphi + \psi)} \right| \times 100\% \quad (24)$$

图 5 给出了存在角位移时对应测量百分比误差。可以看出, 靶标与相机非严格平行(相对角位移小于 5°)时, 测量误差不超过 0.6%。以上分析表明, 当相对位移较小时, 引起的测量与标定误差可以忽略。

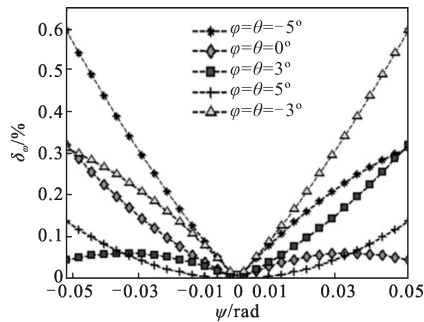


图 5 相对角位移与测量百分比误差的关系

Fig.5 Relationship between angular translation and percentage error

4 实验验证

实验将选用 E2V-LM2 线阵相机, 线阵相机的部分参数如表 2 所示。

表 2 线阵相机参数

Tab.2 Parameters of line scan camera

Parameter	Value
Model/pixel	0.50
Pixel number	2 048
Pixel size/ μm	10
Focus length/mm	50
F-number	1.8

实验过程中设定 $\sigma=20.00$ mm, $\eta=10.00$ mm, $\lambda=100.00$ mm, $\chi=30$ mm, $\omega=200.00$ mm, $i=a, b, c, n=0, \pm 1, \dots, \pm 20, n'=0, \pm 1$, 共 9 组 360 个标定特征点, 实验室条件下标定并计算得到相机内外参数如表 3 所示。

表 3 360 个标定点获得的标定参数

Tab.3 Acquired parameters with 360 calibration points

Parameter	Value
$\alpha/^\circ$	-0.521
$\beta/^\circ$	0.914
$\gamma/^\circ$	1.028
T_x/mm	216.754
T_y/mm	-81.517
T_z/mm	1 241.820
f/mm	50.30
u_0/pixel	946.30
k_0	4.91×10^{-8}
k_1	-1.44×10^{-15}
p	2.98×10^{-6}

标定特征点图像残差的均方根作为相机标定精度的判断标准^[10], 同理, 也可以通过反投影误差即像点位置反求解投影点空间位置, 二者在标定精度判断上具有等效性。文中以投影误差计算相机的标定精度, 即目标函数公式(26)的均方根残差记为线阵相机标定的精度。

$$E_{\text{is}}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\hat{u}_i - \frac{\mathbf{r}'_1 \mathbf{C}_w + T_x}{\mathbf{r}'_3 \mathbf{C}_w + T_z} \right)^2 \right] \quad (25)$$

选定相机视场内的 10 个目标点用于检验标定精度, 其标定最大误差优于 0.52 pixel, 平均误差 0.21 pixel。表 4 给出了论文的标定方法与另外几种标定方法精度对比。显然, 论文的标定方法精度得到

了明显的提升。

表4 几种线阵相机标定方法精度对比

Tab.4 Comparison of precision by several line scan camera calibration method

Method	RMSE/pixel
Grosky's method	0.50
Luna's method	0.28
Hui's method	0.30
The proposed method	0.21

5 结论

有关线阵相机标定的相关研究开展较少,如何选取特征点是关键。结合线阵相机自身的特点,文中提出了构建虚拟立体靶标并实现线阵相机标定的方法。此方法的优点在于简单灵活,标定精度较高,很好的解决了线阵相机标定过程中特征点的选取与丢失问题;另外,特征点的数目不受靶标制作的限制,同时也无须严格保证相机与靶标的相对平行关系。此具有良好的应用价值。需要说明的是,论文的标定方法及原理亦可以用于其他类似线性光电探测器测量装置的标定中。

参考文献:

- [1] Jean Yves Guillemaut, Alberto S Aguado, John Illingworth. Using points at infinity for parameter decoupling in camera calibration [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(2): 265-270.
- [2] Liu Guozhong, Wang Boxiong, Shi Hui, et al. Global calibration of CCD camera in measurement system for 3D foot shapes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(7): 1124-1129. (in Chinese)
- [3] Zhang Zhengyou. Camera calibration with one dimensional objects [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(7): 892-899.
- [4] Niu Haitao, Zhao Xunjie. New method of camera calibration based on checkerboard [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 133-137. (in Chinese)
- [5] Grosky William I, Tamburino Louis A. A unified approach to the linear camera calibration problem [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 663-671.
- [6] Radu Horaud, Roger Mohr, Boguslaw Lorecki. On single-scanline camera calibration [J]. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1993, 9(1): 71-75.
- [7] Cai Sheng, Li Qing'an, Qiao Yanfeng. Camera calibration of attitude measurement system based on BP neural network[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18 (7): 832-834. (in Chinese)
- [8] Luna C A, Manuel M, Lazaro J L, et al. Calibration of line scan camera [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(8): 2185-2190.
- [9] Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin. Line scan camera calibration in close range photogrammetry [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(5): 053602-1-053602-11.
- [10] Chatterjee C, Roy V P, Chong E P K, et al. A nonlinear Gauss-Seidel algorithm for non-coplanar and coplanar camera calibration with convergence analysis [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, 67(1): 58-80.