

文章编号 1004-924X(2005)06-0686-05

弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析

王向军, 韩双来

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对弹落点坐标测量系统的使用环境及精度要求, 提出了一种仅对焦距及光轴水平偏角进行现场校准的相机参数快速获取方法。通过分析坐标解算模型, 得出线性的校准方程, 利用测量区域内两个坐标已知点(靶标), 多个视觉传感器可一次完成校准。通过精度分析给出了该方法下最优的靶标摆放位置。该方法具有校准速度快, 精度较高, 实用和算法性能分析容易等优点, 适用于远距离、大范围视觉坐标测量中相机参数的获取, 尤其是野外坐标测量。实际应用中, 在1 200 m外对直径400 m靶区进行监测时, 该方法可保证区内各点的坐标测量误差均小于0.3 m。

关键词: 视觉坐标测量; 摄像机参数; 摄像机校准; 精度分析

中图分类号: TN948.41; TH72 文献标识码: A

A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis

WANG Xiang-jun, HAN Shuang-lai

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For the application environment and the necessary precision in vision coordinate measurement of bomb-fall, a corresponding method was proposed which just calibrate two key camera parameters: the focal length and the horizontal angle of the optical axis. By analyzing the coordinate calculation model, a linear calibration equation was presented, in which multiple vision sensors can derive their parameters at one time when getting two known coordinate points (target). Through analysis of precision, the optimum location of the target was given. The total errors were synthesized and the theoretical error values were obtained on every point in the measuring area. At last, the experimental results were given. The results show that the method is practical and simple for algorithm analysis, and is suitable for wide-range vision measurement, especially for field application. In the application of inspecting a $f400$ m area from 1 200 m away, the method can ensure that the coordinate measuring error is less than 0.3 m.

Key words: vision coordinate measurement; camera parameter; camera calibration; precision analysis

1 引 言

立体视觉坐标测量技术目前已得到广泛的应用,其采用的各种校准方法^[1-3]也在实用中取得了很好的效果,但这些方法都用于近距离小范围内,大部分是室内测量,当摄像机要在 1 km 之外对野外几百米宽的测量靶面进行大坐标测量时,受视觉传感器在野外安装及测试条件的限制,这些校准方法都很难于实现。

本文结合大坐标视觉测量系统在靶场弹落点坐标测量中的实际应用,通过分析坐标解算模型及测试条件,在保证精度的前提下,将校准参数降到最少,得出一个线性的校准模型,实现未知量的一次性求解,然后通过对此模型的误差分析,得出了最优化的靶标放置原则,最后进行误差合成,得到被测量物在靶区内各点的理论误差值,并结合实测数据,验证了这种校准方法的实用性。

2 测量模型及参数分析

图 1 给出的是靶场弹落点测量系统的布局,装备面阵 CCD 摄像机的两台视觉传感器水平放置,采用近似正交的交汇组合测量方式^[4],视场角

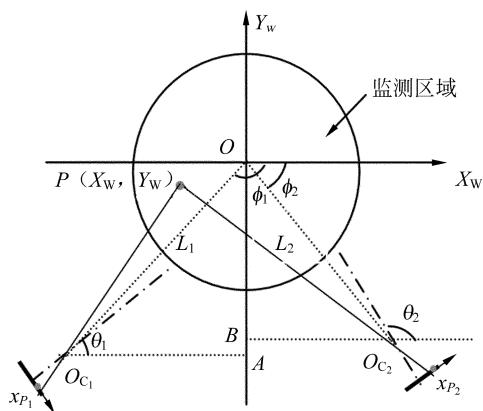


图 1 双面阵 CCD 交汇组合测量布局示意图
Fig. 1 Placement of two area CCD cameras in the intersection measurement

均小于 20°。O 为靶区中心,OO_{C1} = L₁, OO_{C2} = L₂ 是两像机光心距靶心的水平距离,φ₁ 与 φ₂ 是像机光心和靶心的连线与 X_w 轴正方向的水平夹角,θ₁、θ₂ 是两像机光轴与 X_w 轴正方向的水平夹角,x_{P1}、x_{P2} 则为弹着点 P 的像点在像面坐标系中的横向坐标。设两像机镜头焦距分别为 f₁、f₂,忽略镜头畸变,采用小孔摄像机模型^[5],通过立体视觉的坐标系映射矩阵^[5]推导出如下对应关系:

$$X_w = \frac{(-L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos \varphi_2) \sin[\theta_2 + \text{atan}(x_{P_2}/f_2)] \cos[\theta_1 + \text{atan}(x_{P_1}/f_1)]}{\sin[\theta_2 + \text{atan}(x_{P_2}/f_2) - \theta_1 - \text{atan}(x_{P_1}/f_1)]} + L_1 \cos \varphi_1, \quad (1)$$

$$Y_w = \frac{(-L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos \varphi_2) \sin[\theta_2 + \text{atan}(x_{P_2}/f_2)] \sin[\theta_1 + \text{atan}(x_{P_1}/f_1)]}{\sin[\theta_2 + \text{atan}(x_{P_2}/f_2) - \theta_1 - \text{atan}(x_{P_1}/f_1)]} - L_1 \sin \varphi_1. \quad (2)$$

这就是靶区弹落点坐标测量的线性数学模型。可以看出弹落点的靶面坐标由模型中 8 个像机参数决定,而其定位精度则取决于这些参数误差的合成。

对于参数 L_i, φ_i, 在视觉传感器的相机镜头正上方加装三棱反光镜(见图 2),通过大地测量仪器直接测得,其误差由仪器的测量精度及棱镜与光心间的偏差确定: |δL_i| ≤ (5+10) mm, |δφ_i| ≤ (3+2)°。

参数 x_i 通过图像中像点的像素值 u_i 获得,即 x_i = (u_i - u_{0i}) × d_x, 其中 d_x 为 CCD 的像元尺寸, u_{0i} 为摄像机光学中心对应的像素值。当视觉传感器水平调平精度满足 |η| ≤ 1° 时,计算得到俯

仰角与侧倾角对 x_i 带来的误差均满足 Δx_i < 0.1d_x, 仅为亚像素级,可以忽略不计,故 |δx_i| = d_x。镜头光心位置的校准方法见参考文献[6],由于使用中并不拆卸,故不进行现场校准。而对于参数 f_i, θ_i, 由于使用中经常变动,在现场又很难用仪器精确测量,需要进行现场校准。

3 校准方法及精度分析

若靶区内存在两个坐标已知点 P(X_{wP}, Y_{wP}), Q(X_{wQ}, Y_{wQ}) (x_{iP} < x_{iQ}), 设

$$\begin{cases} a_{iP} = X_{WP} - L_i \times \cos(\varphi_i) \\ b_{iP} = Y_{WP} + L_i \times \sin(\varphi_i) \end{cases} \begin{cases} a_{iQ} = X_{WQ} - L_i \times \cos(\varphi_i) \\ b_{iQ} = Y_{WQ} + L_i \times \sin(\varphi_i) \end{cases}$$
 则 f_i, θ_i 为未知量, 对式(1), (2) 进行反变换, 得到如下线性定标方程:

$$f_i = \frac{-(a_{iP}a_{iQ} + b_{iP}b_{iQ})(x_{iP} - x_{iQ}) + \sqrt{(a_{iP}a_{iQ} + b_{iP}b_{iQ})^2(x_P - x_Q)^2 - 4 \times (a_{iQ}b_{iP} - a_{iP}b_{iQ})^2 \times x_{iP} \times x_{iQ}}}{2 \times (a_{iQ}b_{iP} - a_{iP}b_{iQ})}, \quad (3)$$

$$\theta_i = \text{atan} \frac{-(a_{iP}a_{iQ} - b_{iP}b_{iQ})(x_{iP} - x_{iQ}) + \sqrt{(a_{iP}a_{iQ} - b_{iP}b_{iQ})^2(x_P - x_Q)^2 - 4 \times (a_{iQ}b_{iP} - a_{iP}b_{iQ})^2 \times x_{iP} \times x_{iQ}}}{2 \times (a_{iQ}b_{iP} - a_{iP}b_{iQ})}. \quad (4)$$

根据式(3)、(4), 在区域中心两侧各放置一光学靶标, 由大地测量仪器测定其中心位置, 由图像获得相应的像面坐标, 将测得量代入方程, 便可实现 f_i, θ_i 的现场求解。实用中靶标的大小、样式及其在图像上的显示情况如图 2 所示。

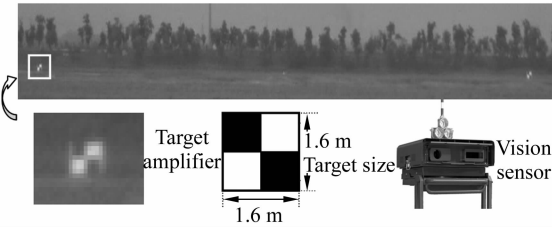


图 2 靶标与视觉传感器实物图

Fig. 2 Target and vision sensor used in the system

为便于进行误差分析, 将定标方程表示为:

$$\begin{cases} f_i = F_{f_i}(L_i, \varphi_i, X_{WP}, Y_{WP}, X_{WQ}, Y_{WQ}, x_{iP}, x_{iQ}) \\ \theta_i = F_{\theta_i}(L_i, \varphi_i, X_{WP}, Y_{WP}, X_{WQ}, Y_{WQ}, x_{iP}, x_{iQ}) \end{cases}, \quad (5)$$

由式(5)可知, 校准误差是由视觉传感器定位误差、靶标中心位置测量误差、以及靶标中心图像坐标的测量误差传递而来, 而各测量值的随机误差相互独立, 根据误差合成理论可确定校准精度 $|\delta_{\text{lim}} f_i|$ 和 $|\delta_{\text{lim}} \theta_i|$ 。求解中不难发现, 将靶标插在不同的位置时将得到不同的校准误差, 即校准精度与靶标摆放位置有关, 下面通过模型仿真, 找出最优的靶标摆放原则。

取 $L_1 = 1\ 200\ \text{m}$, $\varphi_1 = 135^\circ$, 选取 $Q(150, 0)$ 作为定点, 在直径 $400\ \text{m}$ 的区域内任取 P 点位置并计算此时的校准误差 $|\delta_{\text{lim}} f_1|$ 和 $|\delta_{\text{lim}} \theta_1|$ 。图 3 和图 4 显示的是 P 点以 $10\ \text{m}$ 为步长变化时, $|\delta_{\text{lim}} f_1|$ 和 $|\delta_{\text{lim}} \theta_1|$ 随 P 点位置变化的情况。

从误差的数值分布上看, $|\delta_{\text{lim}} f_1|$ 随着 PQ 间距离的增大逐渐变小, 光轴左侧误差均小于 $0.04\ \text{mm}$, 当 P 位于 $(-150, 0)$ 时, 误差仅为 $0.027\ \text{mm}$ 。 $|\delta_{\text{lim}} \theta_1|$ 的变化稍复杂一些, 当 P, Q

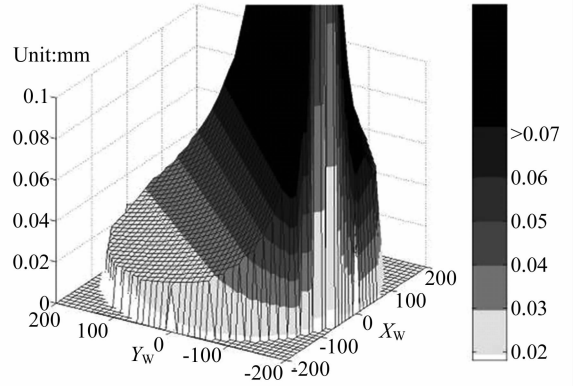


图 3 $|\delta_{\text{lim}} f_1|$ 随 P 点位置的变化情况

Fig. 3 Change of $|\delta_{\text{lim}} f_1|$ following the movement of point P

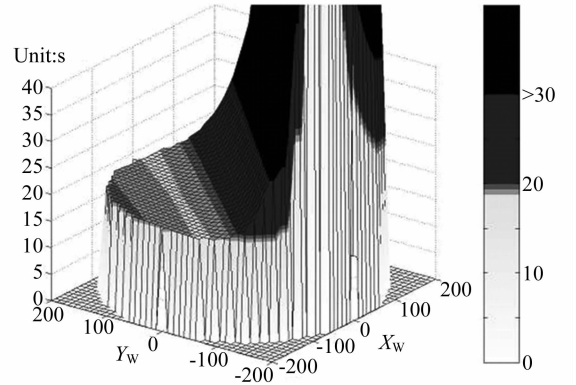


图 4 $|\delta_{\text{lim}} \theta_1|$ 随 P 点位置的变化情况

Fig. 4 Change of $|\delta_{\text{lim}} \theta_1|$ following the movement of point P

与光心连线关于光轴对称时, 误差最小, 接着以 P 与光心的连线为中心向两端逐渐扩大。为更好地显示这种对称性, 图 4 将 $18 \sim 20\ \text{s}$ 间的误差在灰度上做了拉伸, 当 P 位于 $(-150, 0)$ 时, $|\delta_{\text{lim}} \theta_1|$ 为 $18.8\ \text{s}$ 。于是可以得出如下结论, 为得到较小的校准误差, 两个靶标应依光轴对称放置, 且相距不宜太近。

实际使用中,为了使操作尽量简便,希望靶标一次摆放可以使两个视觉传感器同时完成校准。由于两像机光轴关于 Y_w 轴近似对称,因此选择 X_w 轴上的对称点将兼顾到两相机的校准精度。

对于 $\varphi 400$ 的靶圈,推荐选取 $P(-150, 0)$ 与 $Q(150, 0)$ 作为校准参照点位置,此时的校准误差为: $|\delta f_i| < 0.030 \text{ mm}$, $|\delta \theta_i| < 20.0''$ 。通过比较表 1 中的数据,可以看出这种选取的优越性。

表 1 选取不同位置的校准点时对 f 和 θ 产生的校准误差

Tab.1 Different calibration errors of f and θ following the change of P and Q

	$-X_{WP}=X_{WQ}=50 \text{ m}$		$-X_{WP}=X_{WQ}=75 \text{ m}$		$-X_{WP}=X_{WQ}=100 \text{ m}$		$-X_{WP}=X_{WQ}=125 \text{ m}$		$-X_{WP}=X_{WQ}=150 \text{ m}$	
	$ \delta_{im} f $	$ \delta_{im} \theta $	$ \delta_{im} f $	$ \delta_{im} \theta $	$ \delta_{im} f $	$ \delta_{im} \theta $	$ \delta_{im} f $	$ \delta_{im} \theta $	$ \delta_{im} f $	$ \delta_{im} \theta $
$Y_{WP}=Y_{WQ}=100 \text{ m}$	0.082 mm	40.82''	0.055 mm	30.91''	0.041 mm	26.58''	0.032 mm	24.31''	0.027mm	22.97''
$Y_{WP}=Y_{WQ}=50 \text{ m}$	0.081 mm	26.58''	0.054 mm	22.81''	0.040 mm	21.34''	0.032 mm	20.61''	0.027 mm	20.19''
$Y_{WP}=Y_{WQ}=0$	0.081 mm	18.83''	0.054 mm	18.82''	0.040 mm	18.80''	0.032 mm	18.79''	0.027 mm	18.76''
$Y_{WP}=Y_{WQ}=-50 \text{ m}$	0.081 mm	26.70''	0.054 mm	22.38''	0.040 mm	20.64''	0.032 mm	19.78''	0.027 mm	19.28''
$Y_{WP}=Y_{WQ}=-100 \text{ m}$	0.082 mm	44.03''	0.055 mm	32.12''	0.041 mm	26.70''	0.032 mm	23.77''	0.027 mm	22.00''

4 误差合成

将两视觉传感器按上面的定标条件对称放置,取定标误差 $|\delta f_i| = 0.03 \text{ mm}$, $|\delta \theta_i| = 30.0''$, 像机其余参数的误差按分析的极限误差取值,计算整个靶区内 X_w, Y_w 的合成误差,结果如图 5 和图 6 所示, $|\delta X_w|, |\delta Y_w|$ 均小于 0.3 m, 满足靶场大坐标测量中误差小于 1 m 的要求。

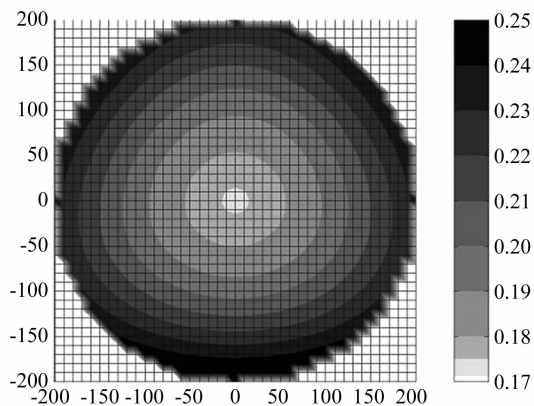


图 5 靶区内 X_w 的合成误差 $|\delta X_w|$

Fig.5 Synthetic error of X_w in the mearsuring area

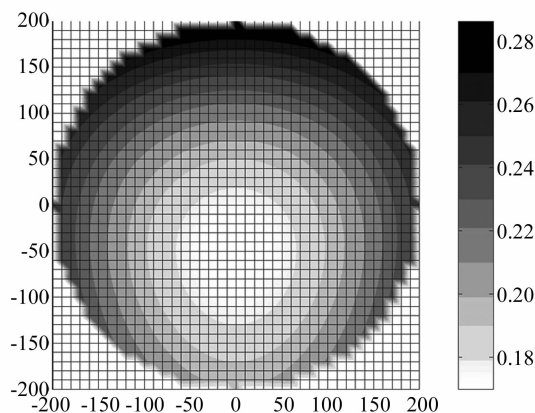


图 6 靶区内 Y_w 的合成误差 $|\delta Y_w|$

Fig.6 Synthetic error of Y_w in the mearsuring area

表 2 实测结果

Tab.2 Experimental result Unit:m

序号	光学靶坐标		系统测量值	
	X_w (m)	Y_w (m)	X_C (m)	Y_C (m)
1	-1.151	186.324	-0.935	186.890
2	-0.370	0.510	-0.339	0.637
3	-170.901	-43.319	-170.776	-43.441

5 结论

当立体视觉应用于野外大坐标测量时,由于视觉传感器安装及测试条件的限制,传统的各种校准方法无法满足要求,为此本文针对野外大坐标测量的应用环境,给出了一种仅对焦距及水平光轴偏角进行校准的相机参数获取方法。该方法只需放置两个光学靶,便可完成像机参数的一次线性求解,速度快、可操作性强、精度较高、适用于远距离、大范围视觉坐标测量中摄像机参数的获取,而具体应用中测量距离与测量范围的极限取值则取决于镜头与光电探测器件的水平。

参考文献:

- [1] 周富强, 郝继贵. CCD 摄像机快速标定技术[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 96-100.
ZHOU F Q, ZHU J G. A high speed CCD camera calibration technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(1): 96-100. (in Chinese)
- [2] 张业鹏, 何涛. 机器视觉在工业测量中的应用与研究[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 324-329.
ZHANG Y P, HE T. Applications of machine vision in industry inspection and its research[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 324-329. (in Chinese)
- [3] 段发阶, 张健新, 叶声华. CCD 摄像机参数标定新技术[J]. 计量学报, 1997, 18(4): 296-299.
DUAN F J, ZHANG J X, YE SH H. A new CCD camera calibration technique[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1997, 18(4): 296-299. (in Chinese)
- [4] 冯梦洪, 李林, 张颖. 面阵 CCD 交汇测量系统布站方式的优化设计[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 34-35.
FENG M H, LI L, ZHANG Y. Optimization for position of intersection measuring system with area CCD[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(1): 34-35. (in Chinese)
- [5] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 52-59.
MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer vision-calculation theory and algorithm bases*[M]. Beijing: Science Press, 1998, 52-59.
- [6] 张之江, 车仁生. 视觉坐标测量中直接光学法透镜光学中心的标定[J]. 光学精密工程, 2000, 8(5): 487-490.
ZHANG Z J, CHE R SH. Direct optical method for calibrating the optical center in vision coordinate measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(5): 487-490.

作者简介: 王向军(1955—), 男, 黑龙江人, 教授, 天津大学精密仪器与光电子工程学院博士生导师, 主要研究方向为计算机视觉。

韩双来(1980—), 男, 吉林人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉。