

CCD 立靶靶面不重叠误差分析*

王泽民, 李 静, 雷志勇

(西安工业大学电子信息工程学院, 西安 710032)

摘要:应用 CCD 立靶时操作不慎造成的靶面不重叠降低了测量精度,有必要对靶面不重叠误差进行分析。通过研究坐标求解模型,将靶面不重叠对结构模型的影响转化为弹丸在 CCD 像面上成像位置的偏差,推导了三种靶面不重叠情况下成像位置的计算公式。对 8m×8m 靶面内的误差分布进行了仿真。结果表明:由平行和水平夹角不重叠造成的最大测量误差小于 1mm;由垂直夹角不重叠造成的最大测量误差超过 6.8mm,对测量精度影响较大。

关键词:CCD 立靶;测量误差;不重叠;误差分布

中图分类号:TJ06 **文献标志码:**A

Noncoplanar Error Analysis on CCD Vertical Target

WANG Zemin, LI Jing, LEI Zhiyong

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: The system accuracy is affected by noncoplanar target caused by operational errors when it is placed. So the analysis on the noncoplanar error is necessary. According to the study on the coordinates solving model, the impact on the structural model was converted to the imaging position deviation in the CCD image plane. The formulas of image position under the three noncoplanar target conditions were derived. The simulations of error distribution in 8m×8m target were carried out. The studies show that the maximum measurement error is less than 1mm caused by parallel and horizontal angle; The maximum measurement error is more than 6.8mm caused by vertical angle. The precision of the system is impacted greatly.

Keywords: CCD vertical target; measurement error; noncoplanar; error distribution

0 引言

作为一种非接触式光电测量系统,CCD 立靶由于其独特的优点而在现代靶场中武器系统的射击精度和立靶密集度测量领域得到了广泛的研究和应用^[1-2]。引起坐标测量误差的因素有很多,以往对 CCD 立靶测量误差的分析都集中针对坐标求解模型求偏微分,研究各参数的偏差与弹丸坐标测量误差之间的关系^[3],往往忽略了 CCD 立靶的结构模型偏差所引入的测量误差。CCD 立靶的结构模型偏差主要是在工程实际应用过程中,由于现场布靶操作不慎等原因造成两 CCD 的成像平面不重叠,这种现象使得坐标求解模型与结构模型之间的对应关系出现了失真,从而引起系统的测量误差^[4-5],针对 CCD 立靶在实际应用中由于操作不慎造成的靶面不重叠进行了分类,并对靶面内误差分布进行了分析和仿真。

1 CCD 立靶坐标测量原理

CCD 立靶由两台结构和性能完全相同的线阵

CCD 摄像机组成,且使其光轴交汇,两个线阵 CCD 相机的探测视场共面且垂直于弹道方向,构成测试靶面^[6]。弹丸过靶坐标测量原理见图 1。

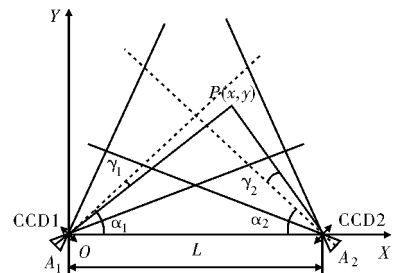


图 1 线阵 CCD 交汇测量原理

当弹丸从靶面内任意点 $P(x, y)$ 穿过靶面时,弹丸坐标计算如下:

$$x = \frac{L \times \tan \left[\alpha_2 - \arctan \left(\frac{A_2}{f} \right) \right]}{\tan \left[\alpha_2 - \arctan \left(\frac{A_2}{f} \right) \right] - \tan \left[\alpha_1 - \arctan \left(\frac{A_1}{f} \right) \right]} \quad (1)$$

$$y = \frac{L \times \tan \left[\alpha_2 - \arctan \left(\frac{A_2}{f} \right) \right] \times \tan \left[\alpha_1 - \arctan \left(\frac{A_1}{f} \right) \right]}{\tan \left[\alpha_2 - \arctan \left(\frac{A_2}{f} \right) \right] - \tan \left[\alpha_1 - \arctan \left(\frac{A_1}{f} \right) \right]} \quad (2)$$

式中: f 为镜头焦距; A_1 、 A_2 分别为弹丸在 CCD1 或 CCD2 像面所成像位置到像面中心的距离; α_1 、 α_2 分别

* 收稿日期:2010-12-10

作者简介:王泽民(1978-),男,河北任丘人,讲师,硕士,研究方向:靶场测试、机器视觉等。

为 CCD1 和 CCD2 光轴与水平面之间的夹角; L 为两台 CCD 之间的距离。

2 靶面不重叠误差分析

设 CCD1 的成像面为像面 I, CCD2 的成像面为像面 II, CCD1 的探测视场为平面 I, CCD2 的探测视场为平面 II。当平面 I 和平面 II 完全重叠时, 目标在像面 I 的坐标为 $P(x_0, y_0, 0)$, 在像面 II 的坐标为 $P'(x'_0, y'_0, z'_0)$, 像素坐标分别为 A_{10} 和 A_{20} , 根据式(1)和式(2)反求 A_{10} 和 A_{20} 有:

$$A_{10} = \frac{f \tan \left[\alpha_1 - \arctan \left(\frac{y_0}{x_0} \right) \right]}{d_x} \quad (3)$$

$$A_{20} = \frac{f \tan \left(\alpha_2 - \arccos \left(\frac{\sqrt{(L-x'_0)^2 + z'_0{}^2}}{\sqrt{(L-x'_0)^2 + y'_0{}^2 + z'_0{}^2}} \right) \right)}{d_x} \quad (4)$$

式中 d_x 为 CCD 的像素尺寸。

应用式(1)和式(2)计算弹丸的坐标 (x, y) 与 (x_0, y_0) 一致。即当靶面重叠时射角对系统的测量精度没有影响。

实际中, 由于操作不慎往往无法使得平面 I 和平面 II 完全共面, 造成靶面不重叠。为分析方便, 以像面 IXO_1Y 为基准平面, 目标飞行轨迹直线与平面 XO_1Y 的交点为 $P(x_0, y_0, 0)$, 与像面 II 的交点为 $P'(x'_0, y'_0, z'_0)$ 。使得目标在像面 II 上的像素位置偏离 A_{20} 至 A_2 , 根据式(1)和式(2)计算弹丸的坐标 (x', y') , (x', y') 与 (x, y) 的差值即为靶面不重叠所产生的测量误差。通过分析, 平面 I 和平面 II 不重叠由三种基本原因产生。假设目标的飞行轨迹与 X, Y 和 Z 轴的夹角分别为 α, β 和 θ , 目标飞行轨迹直线方程为:

$$\frac{x-x_0}{\cos \alpha} = \frac{y-y_0}{\cos \beta} = \frac{z}{\cos \theta} \quad (5)$$

从图中可以看出, 出现靶面不重叠情况直接影响到目标在像面 II 上的中心像素位置, 分别分析计算如下。

$$A_{20} = \frac{f \tan \left(\alpha_2 - \arccos \left(\frac{\sqrt{\left(L - \frac{\cos \theta x_0 + \cos \alpha \tan \gamma L}{\cos \theta + \cos \alpha \tan \gamma} \right)^2 + \left(\tan \gamma \left(\frac{\cos \alpha \cos \theta x_0 + \tan \gamma L}{\cos \alpha \cos \theta + \tan \gamma} - L \right) \right)^2}}{\sqrt{\left(L - \frac{\cos \theta x_0 + \cos \alpha \tan \gamma L}{\cos \theta + \cos \alpha \tan \gamma} \right)^2 + \left(y_0 + \frac{\cos \beta \tan \gamma (L - x_0)}{\cos \theta + \cos \alpha \tan \gamma} \right)^2 + \left(\tan \gamma \left(\frac{\cos \alpha \cos \theta x_0 + \tan \gamma L}{\cos \alpha \cos \theta + \tan \gamma} - L \right) \right)^2}} \right)}{d_x} \quad (15)$$

2.3 两台 CCD 成像平面垂直夹角 $\phi \neq 0$

如图 2(c) 所示, 平面 II 方程为:

$$z = y \tan \phi \quad (16)$$

目标穿过平面 II 的空间坐标:

$$x'_0 = \frac{y_0 \cos \alpha \cos \beta \tan \phi + x_0 \cos \beta}{\cos \beta \cos \theta + \cos^2 \beta \tan \phi} \quad (17)$$

2.1 两台 CCD 成像面平行且距离 $d \neq 0$

如图 2(a) 所示, 平面 II 方程为:

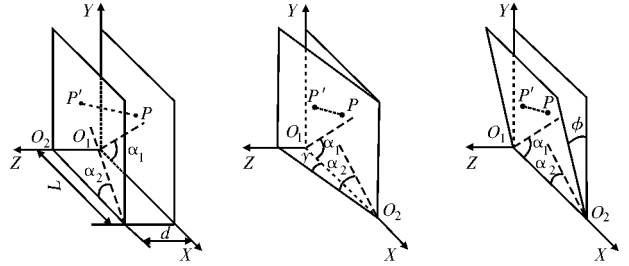
$$z = d \quad (6)$$

目标穿过平面 II 的空间坐标:

$$x'_0 = x_0 + \frac{d}{\tan \alpha} \quad (7)$$

$$y'_0 = y_0 + \frac{d}{\tan \beta} \quad (8)$$

$$z'_0 = d \quad (9)$$



(a) 平行造成的不重叠 (b) 水平夹角造成的不重叠 (c) 垂直夹角造成的不重叠

图 2 靶面不重叠产生原因

代入式(4)得到目标在像面 II 上中心像素位置:

$$A_{20} = \frac{f \tan \left(\alpha_2 - \arccos \left(\frac{\sqrt{\left(L - x_0 + \frac{d}{\tan \alpha} \right)^2 + d^2}}{\sqrt{\left(L - x_0 + \frac{d}{\tan \alpha} \right)^2 + \left(y_0 + \frac{d}{\tan \beta} \right)^2 + d^2}} \right) \right)}{d_x} \quad (10)$$

2.2 两台 CCD 成像面水平夹角 $\gamma \neq 0$

如图 2(b) 所示, 平面 II 方程为:

$$z = -\tan \gamma (x - L) \quad (11)$$

目标穿过平面 II 的空间坐标:

$$x'_0 = \frac{\cos \theta x_0 + \cos \alpha \tan \gamma L}{\cos \theta + \cos \alpha \tan \gamma} \quad (12)$$

$$y'_0 = y_0 + \frac{\cos \beta \tan \gamma (L - x_0)}{\cos \theta + \cos \alpha \tan \gamma} \quad (13)$$

$$z'_0 = -\tan \gamma \left(\frac{\cos \alpha \cos \theta x_0 + \tan \gamma L}{\cos \alpha \cos \theta + \tan \gamma} - L \right) \quad (14)$$

目标在像面 II 上中心像素位置:

$A_{20} =$

$$f \tan(\alpha_2 - \arccos(\frac{\sqrt{(L - \frac{y_0 \cos \alpha \cos \beta \tan \phi + x_0 \cos \beta}{\cos \beta \cos \theta + \cos^2 \beta \tan \phi})^2 + (\frac{y_0 \cos \theta \tan \phi}{\cos \theta + \cos \beta \tan \phi})^2}}{\sqrt{(L - \frac{y_0 \cos \alpha \cos \beta \tan \phi + x_0 \cos \beta}{\cos \beta \cos \theta + \cos^2 \beta \tan \phi})^2 + (\frac{y_0 \cos \theta}{\cos \theta + \cos \beta \tan \phi})^2 + (\frac{y_0 \cos \theta \tan \phi}{\cos \theta + \cos \beta \tan \phi})^2}})) \quad (20)$$

3 靶面不重叠误差分布仿真

利用式(10)、式(15)、式(20)可以分别求出由于每一种情况产生的靶面不重叠而造成目标在 CCD2 像面的像素中心位置,将其代入式(1)和式(2),并将计算结果与理想坐标相比较即可得到靶面不重叠误差。假定 $f = 50\text{mm}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$, $L = 10\text{m}$, $d = 0.05\text{mm}$, $\alpha = \beta = 87^\circ$, $\theta = 3^\circ$, $\gamma = \phi = 0.05^\circ$ 。计算不同靶面不重叠情况下 $8\text{m} \times 8\text{m}$ 靶面内测量误差的分布,如图 3 ~ 图 5 所示。

图 3 平行不重叠误差分布

图 4 水平夹角不重叠误差分布

图 5 垂直夹角不重叠误差分布

由仿真结果可知:

1) 当目标垂直过靶时,平行不重叠对系统测量误差没有影响;水平夹角和垂直夹角不重叠对系统测量误差都较小;

2) 当目标不垂直过靶时,由平行不重叠产生的测量误差 $|\Delta x|_{\max} = 0.9\text{mm}$, $|\Delta y|_{\max} = 0.5\text{mm}$;水平夹角不重叠产生的测量误差 $|\Delta x|_{\max} = 0.6\text{mm}$, $|\Delta y|_{\max} = 0.5\text{mm}$;垂直夹角不重叠产生的测量误差 $|\Delta x|_{\max} = 6.9\text{mm}$, $|\Delta y|_{\max} = 6.8\text{mm}$,且随 α 和 β 的减小、 θ 的增加,误差增大速度较快。

4 结论

对 CCD 立靶在工程应用中由于操作不慎造成的靶面不重叠及其产生原因进行了分析和分类,推导了靶面不重叠情况下的弹丸成像位置计算公式。对误差分布仿真结果表明,平行不重叠和水平夹角不重叠造成的误差较小,可以忽略;垂直夹角造成的靶面不重叠误差较大。需要进一步研究适用于野外环境的高精度调平和对准装置,以提高 CCD 立靶的测量精度。

参考文献:

[1] 雷志勇,姜寿山. 线阵 CCD 技术及其在靶场测试中的应用[J]. 西安工业学院学报, 2002, 22(3): 220-224.
 [2] 雷志勇,姜寿山. 线阵 CCD 测量弹丸飞行姿态方法的研究[J]. 西安工业学院学报, 1998, 2(18): 87-91.
 [3] 罗红娥,陈平,顾金良,等. 线阵 CCD 立靶系统全视场测量误差分析[J]. 光学技术, 2009(5): 391-393.
 [4] 颜树华,叶湘滨,王跃科,等. 线阵 CCD 交汇测量靶中非共面误差的研究[J]. 光电子·激光, 2000, 1(11): 65-68.
 [5] 王泽民,高俊钊,雷志勇,等. CCD 交汇测量系统布站方式的精度分析[J]. 山西电子技术, 2006(5): 38-40.
 [6] 薛淑磊,王泽民. 双线阵 CCD 交汇测量中的自动标定方法[J]. 西安工业大学学报, 2008, 5(28): 422-425.