

高速摄像实现高精度矢量脱靶量测量方法研究

张献中 高炳哲 李桂芝 王亚中

(中国人民解放军 92941 部队 98 分队, 辽宁葫芦岛市 125001)

摘要 讨论了如何利用高速摄像系统,完成某型导弹虚拟立靶脱靶量测量的可行性、测量方法和测量精度分析,力求利用较简单固定指向的高速电视摄像系统完成该型号导弹脱靶量测量任务。

关键词 布站;高速摄像;误差计算;脱靶量测量精度计算

中图分类号 文献标识码 A

0 引言

根据国内靶场需求,为充分利用靶场试验资源,我们认为可以应用较简单固定指向的高速电视摄像系统完成某型导弹脱靶量测量任务。下面就测量方案中装备布站、测量原理及测量精度等问题加以论证。

1 测量原理

1.1 测量要求

虚拟立靶空间尺寸: 100 m × 100 m

脱靶量测量精度: $\rho = 1$ m

高速摄像帧频: 250 帧/秒

1.2 布站方案与测量原理

利用二台高速电视摄像设备,通过交会测量计算某型导弹中靶时刻的脱靶量。为提高测量精度和简化处理方法,二台高速摄像设备相互垂直布站,布站方法见图 1。

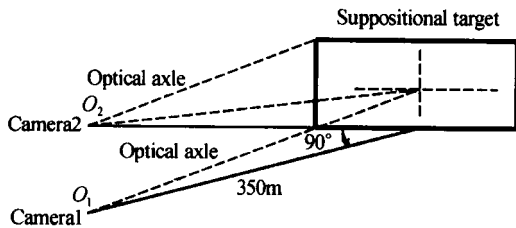


图 1 靶区高速摄像系统布局示意图
Fig 1 Distribution of the range telecameras

摄像机 1 位于靶面正前方 350 m 处,其光轴对准靶心,摄像机 2 光轴与靶面平行相交且通过靶心,两台摄像机到靶面基线相互垂直。测量方法是利用摄像机 2 靶面图像判读导弹过靶时刻。在导弹过靶时刻摄像机 2 对应的虚拟立靶靶面空域图像如图 2。

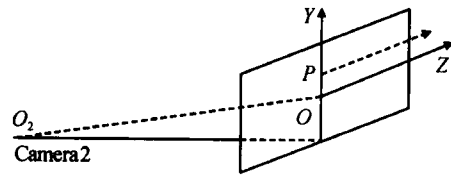


图 2 摄像机 2 在导弹过靶时刻所对应的虚拟靶面空域图像
Fig 2 Dimensional image of the suppositional target plane in the camera2 while the missile is passing through the target

假设 YOZ 对应摄像机 2 像平面坐标,可以看出导弹过靶时刻为目标在摄像机 2 像平面坐标中 $Z = 0$ 时 Y 轴某点(如 P 点)。由对应导弹过靶时刻摄像机 1 所对应的靶面图像即可判读计算出导弹通过虚拟立靶时偏离其立靶中心位置的脱靶量。摄像机 1 对应目标过靶时刻的虚拟立靶靶面图像和摄像机像平面图像如图 3。

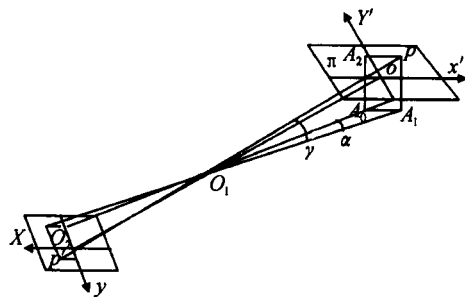


图 3 摄像机 1 在导弹过靶时刻所对应的虚拟立靶及摄像机 1 像平面图像
Fig 3 The image of the suppositional target and the camera 1 with its image plane while the missile is passing through the target

平面 π 为过目标中靶点 P 且与光轴 O_1O 垂直的平面, XOY 为 π 平面内的直角坐标系, A_2 为 P 点在 y 轴上投影点, PA_2 在水平面的投影为 A_1A_0 , 平面 $A_2PA_1A_0$ 与实际的虚拟立靶靶面重合, $PA_2 = A_1A_0$ 为中靶点距离立靶中心的水平距离, PA_1 为中靶点距离水平面的高度。

设 $PA_2 = x$, $y = PA_1 - h$ (立靶靶面中心距水平面高 $h = 50$ m), O_1 点为摄像机 1 的三轴交点, $A_0O_1A_1 = \alpha$ 为 P 点在水平面投影的方位角, $PO_1A_1 = \beta$ 为 P 点的高低角, XO_2Y 为摄像机 1

靶面直角坐标系, P 为目标过点 P 时在摄像机靶面的投影, $O_1O_2 = f$ 为摄像机 1 焦距, $OO_1A_0 = \alpha$ 为光轴指向的高低角, $O_1A_0 = R = 350\text{m}$ 为布站距离. 可得

$$x = R \cdot \tan \alpha$$

$$y = \frac{R}{\cos \alpha} \cdot \tan \beta - h$$

P 点的脱靶量为

$$P = \sqrt{x^2 + y^2}$$

2 测量精度分析

2.1 摄像机参数选择

选择高速电视摄像机, 主要参数如下: 靶面尺寸: $16\text{ mm} \times 16\text{ mm}$; 像素数: 1024×1024 ; 帧频: 250 帧/秒 ;

2.2 计算摄像机焦距

通常布站距离 $R = 350\text{ m}$, 立靶中心距离地面高度为 $h = 50\text{ m}$, 立靶靶面尺寸为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, 则摄像机焦距为

$$f = \frac{16 \times \sqrt{R^2 + h^2}}{100} = \frac{16 \times \sqrt{350^2 + 50^2}}{100} = 56.6\text{ (mm)}$$

2.3 脱靶量测量精度分析

已知中靶点 P 在摄像机 1 像平面坐标值为 x, y (可判读出), 由图 3 可算出 P 点投影到水平面的方位角 α 和高低角 β (推导从略).

$$\alpha = \arctan \frac{x}{f \cos \beta - y \sin \beta}$$

$$\beta = \arcsin \frac{y \cos \alpha + f \sin \alpha}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}$$

式中, β 为摄像机 1 光轴指向的高低角, $\beta = \arctan h/R = \arctan 50/350 = 8.13^\circ$

方位角 α 和高低角 β 的误差由高速摄像的轴系误差、视轴瞄准误差、数据处理误差、光学畸变误差、测量环境微扰误差等组成. 由于布站距离较近, 在满足脱靶量测量精度的条件下, 可以适当放宽对跟踪架轴系误差的要求.

2.3.1 轴系误差估算

对高速摄像系统主要轴系误差作如下选择:

1) 横轴差: $\Delta x = 30$, 其对 α 角测量误差的影响为

$$\Delta \alpha_{\text{横}} = \Delta x \tan \beta = 30 \times \tan 8.13^\circ = 4.29$$

2) 垂直轴误差: $\Delta y = 30$, 其对 β 角测量误差的影响为

$$\Delta \beta_{\text{垂}} = \Delta y \tan \alpha = 30 \times \tan 8.13^\circ = 4.29$$

其对 α 角测量误差的影响为

$$\Delta \alpha_{\text{垂}} = \Delta y \sqrt{2} = 21.2$$

3) 摄像机十字丝倾斜误差: $\Delta \alpha_{\text{倾}} = 6.6$, 当 $X = Y = 4\text{ mm}$ 时, $\Delta \alpha_{\text{倾}} = 27.6 = \Delta \alpha_{\text{倾}}$; 当 $X = Y = 8\text{ mm}$ 时, $\Delta \alpha_{\text{倾}} = 55.2 = \Delta \alpha_{\text{倾}}$

综上所述 1)、2)、3): $\Delta \alpha_{\text{轴}} = \sqrt{\Delta \alpha_{\text{横}}^2 + \Delta \alpha_{\text{垂}}^2 + \Delta \alpha_{\text{倾}}^2} = 56$

$$\Delta \alpha_{\text{轴}} = \sqrt{\Delta \alpha_{\text{横}}^2 + \Delta \alpha_{\text{垂}}^2} = 55.2$$

2.3.2 标定误差

1) 摄像机像素分辨率误差

$$\Delta \alpha_{\text{分}} = \arctan \frac{100}{1024 \times \sqrt{R^2 + h^2} \times \sqrt{3}} = 33$$

2) 瞄准误差 (对准 350 m 处 20 cm 宽方位标头)

$$\Delta \alpha_{\text{瞄}} = (\arctan \frac{0.2}{350}) / 4 = 29.5$$

3) 19 位编码器分辨率为 $\Delta \alpha_{\text{编}} = 2.5$

综上所述 1)、2)、3) 得

$$\Delta \alpha_{\text{定}} = \sqrt{\Delta \alpha_{\text{分}}^2 + \Delta \alpha_{\text{瞄}}^2 + \Delta \alpha_{\text{编}}^2} = 44.3$$

2.3.3 方位角 α 和高低角 β 的数据处理误差

方位角 α 和高低角 β 的数据处理误差为

$$\Delta \alpha_{\text{处}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial f}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y}\right)^2}$$

$$\Delta \beta_{\text{处}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial f}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial y}\right)^2}$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 为判读误差, Δf 为焦距误差, 取 $\Delta x = \Delta y = 0.016\text{ mm}$, $\Delta f = 0.5\% \times f$

2.3.4 方位角和高低角测量总误差计算

方位角测量总误差

$$\Delta \alpha_{\text{总}} = \sqrt{\Delta \alpha_{\text{轴}}^2 + \Delta \alpha_{\text{定}}^2 + \Delta \alpha_{\text{畸}}^2 + \Delta \alpha_{\text{环}}^2}$$

高低角测量总误差

$$\Delta \beta_{\text{总}} = \sqrt{\Delta \beta_{\text{轴}}^2 + \Delta \beta_{\text{定}}^2 + \Delta \beta_{\text{畸}}^2 + \Delta \beta_{\text{环}}^2}$$

其中 $\Delta \alpha_{\text{畸}}$ 为光学系统畸变修正误差, 取 0.3% ; $\Delta \alpha_{\text{环}}$ 为测量环境 (风、太阳、震动等) 引起的测角误差, 取 60 .

3 脱靶量测量精度计算

目标命中立靶点 P 的脱靶量 x, y

$$y = \frac{R}{\cos \alpha} \tan \beta - h$$

$$x = R \cdot \tan \alpha$$

不难求得 x 和 y 的误差 $\Delta x, \Delta y$

$$\Delta x = \sqrt{\left(R \tan \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}\right)^2 + \left(\frac{R}{\cos \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\tan \alpha}{\cos \alpha}\right)^2}$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{R}{\cos^2 \theta}\right)^2 + (\tan \theta \cdot R)^2}$$

其中取 $R = 0.5 \text{ m}$

由 2 2 可知 ,脱靶量 $P = \sqrt{x^2 + y^2}$

脱靶量测量误差用全偏微分得

$$P = \frac{\partial P}{\partial x} x + \frac{\partial P}{\partial y} y$$

$$= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} x + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} y$$

立靶中心距水平面的高度为 $h = 50 \text{ m}$,布站距离 $R = 350 \text{ m}$,假设目标在摄像机靶面 (即通常所说的像面 ,这里像面大小为 $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$) 坐标为 (x, y) , 综上可得脱靶量误差计算结果如表 1.

表 1 脱靶量误差计算结果表

目标在摄像机的像面坐标 (x, y) /mm	立靶脱靶量 (x, y)	脱靶量测量精度 (ρ)
(0, 0)	$x=0, y=0$	0.48 m
(8, 8)	$x=51.06 \text{ m}, y=51.56 \text{ m}$	0.8 m

4 结论

综上所述 ,可见目标命中立靶中心或命中立靶

边缘的脱靶量测量精度在 $0.48 \sim 0.8 \text{ m}$ 之间 ,完全能够满足脱靶量测量精度 $\rho = 1 \text{ m}$ 的靶场测量要求 . 因此 ,我们利用数学建模从理论上论证了利用二台固定指向高速电视摄像设备 ,通过交会测量手段完全可以实现巡航导弹中靶时刻的矢量脱靶量测量 ,充分利用了试验资源 ,具有重大的军事和经济效益 .

参考文献

- 何昭才 . 光电测量 . 北京 :国防工业出版社 ,2002, 10: 56 ~ 302
He Zhaocai Photoelectric Measurement Beijing: Notional Defence Industry Press, 2002, 10: 56 ~ 302
- 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 . 高速摄像记录仪总体设计报告 . 2003, 8 : 2 ~ 60
Changchun Institute of Optics and fine mechanics Total design report of high-speed telecamera 2003, 8: 2 ~ 60
- 冯师颜 . 误差理论与实验数据处理 . 北京 :科学出版社 , 1995, 7: 11 ~ 159
Feng S Y. Error theory and test data dealing Beijing: Science Press, 1995, 7: 11 ~ 159

Method Research on High-accuracy Survey of Vector Missing the Target in Shooting Practice Based on High-speed Telecamera

Zhang Xianzhong, Gao Bingzhe, Li Guizhi, Wang Yazhong

Unit 92941, PLA, Liaoning 125001

Received date: 2004-07-14

Abstract It is mainly discussed how to use high-speed telecamera system with a fixed directing to accomplish the measurement of vector missing the suppositional target in shooting practice of one certain type of the missile. The demonstration of the feasibility, the research of the procedure and the analysis of the accuracy are presented

Keywords Station-distribution; High-speed telecamera; Error computing method; Accuracy computing method



Zhang Xianzhong was born in July, 1970, in Hunan Province, P. R. China. He graduated from Changchun University of Science and Technology with his B. S. degree in 1992. His current research interests are infrared technology and optical measurement on range.