

## 近距离分布式飞弹测量系统硬件设计

张岳<sup>1</sup>, 岱钦<sup>1</sup>, 吴凯旋<sup>1</sup>, 李明晶<sup>2,3</sup>, 吕耀文<sup>2,3</sup>

(1. 沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 介绍了一种应用于靶场的低成本分布式测量系统: 在靶场端布设低成本的高速成像设备, 通过高速光纤把成像设备所记录的实时数据传送到远端安全区, 安全区内接收高速的实时数据, 并加以存储、处理。详细介绍了多摄像机低成本近距离布设的方法, 所设计的前端高速摄像机、中部光纤传输和后端采集系统的组成和性能指标。最后通过两个实验测试了整个系统的误码率, 并给出了提高误码率的方法。该系统不仅可以用于靶场目标测量, 而且对远距离大量数据的传输、存储也具有实用意义。

**关键词:** 分布式测量; 高速摄像; 远距离控制; 靶场测量

中图分类号: TN29 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)S-0099-05

## Hardware design of close range distributed missile target measurement system

Zhang Yue<sup>1</sup>, Dai Qin<sup>1</sup>, Wu Kaixuan<sup>1</sup>, Li Mingjing<sup>2,3</sup>, Lu Yaowen<sup>2,3</sup>

(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A distributed measurement system used in shooting range was introduced. A low-cost high-speed imaging equipment setting was set on the shooting range end. Through high-speed fiber optic imaging device, real-time data was transmitted to the remote safety zone that receives high-speed real-time data for storage and processing. The low-cost close-range setting method by more camera was presented. Besides, the front-end high speed camera, central optical fiber transmission, the composition and performance indicators of back-end acquisition system were also presented. Finally, two experiments were conducted for testing the bit error rate of the whole system, and a method to improve the bit error rate was advanced. This system not only can be used in the shooting range measuring target, but also has practical significance in the transmission and storage of large volume of data over a long distance.

**Key words:** distributed measurement; high speed camera; remote control; range measurement

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61378042); 沈阳理工大学激光与光信息辽宁省重点实验室开放基金

作者简介: 张岳(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电技术方面的研究。Email: pzyy\_zhang@163.com

### 0 引言

兵器试验靶场是随着各种武器试验而生，近些年随着武器装备的升级换代，靶场试验中飞弹姿态多参数测量的要求随之提高。目前，飞行目标姿态的测量，不仅要完成传统的外弹道测量，还要对目标姿态和脱靶量进行测算，但测量目标多具有毁伤性，而传统的如弹道摄像机等测量设备价格昂贵，无论是采取光学跟踪测量还是凝视测量，都必须防止设备毁伤，测量设备多放置于靶场外围，成像清晰度和测量范围受到了限制。

文中设计了一种低成本分布式多摄像机靶场测量系统：采用低成本的 CMOS 高速摄像机以及激光照明系统作为前端凝视设备，在靶场有效测量区域内布设。而图像存储以及数据处理计算机等不可毁伤设备作为后端处理设备，设置在安全区内。凝视设备与处理设备通过高速光纤相互传输数据。该系统应用了低成本的 CMOS 高速摄像机在靶场区域内交汇式布设，扩展了视场范围；运用了大数据量实时传输与存储技术，保证目标高速影像的实时存储。同时，由于前端凝视设备成本低廉，可以作为消耗品，如果被毁伤可随时更换，从而实现了对于靶场快速目标超近距离的影像实时记录。

### 1 分布式测量原理

分布式凝视测量实际上是立体视觉技术的一种。利用 CCD 或者 CMOS 摄像机拍摄待测目标，构成交汇靶面，建立数学模型，从而获得高速飞行目标的位置和姿态参数。最为基本的双目分布式测量是在某一时刻从两个方向拍摄同一目标后，基于计算机视觉原理和三角方法，求取目标的位置坐标，通过一定的数据处理方法得到目标的速度值。基于面与面交汇中轴线原理，通过图像处理方法提取目标中轴线，求取目标的高低角、偏航角等姿态参数。双目交汇测量中，对于目标位置的测量是基于三角法原理实现的，如图 1 所示。

空间任意一点  $P(x_w, y_w, z_w)$  在左右摄像机坐标系下的坐标分别为  $P(x_a, y_a, z_a)$  和  $P(x_b, y_b, z_b)$ ，在左右像平面坐标系下的坐标分别为  $P_a(x_a, y_a)$  和  $P_b(x_b, y_b)$ ，左右摄像机的有效焦距分别为  $f_a$  和  $f_b$ ，联立即可得空

间点在左右摄像机的坐标<sup>[1]</sup>。

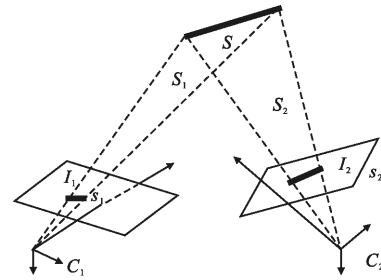


图 1 目标位置坐标的三角法原理

Fig.1 Position coordinates of the target of the triangulation

三维姿态是反映飞行目标的重要参数，一般采用中轴法测量。原理如图 2 所示。

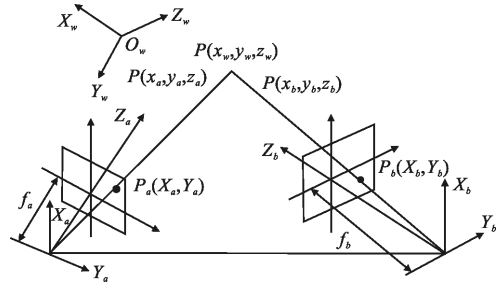


图 2 中轴法测量目标姿态原理

Fig.2 Measurement of target axis method attitude

两台摄像机在同一时刻，不同角度拍摄目标图像，视摄像机为点，两幅目标图像分别与两台摄像机各自确定一平面  $S_1$  和  $S_2$ 。通过这两个面的交汇处提取目标中轴线。

$$\begin{cases} A_1X+B_1Y+C_1Z+D_1=0 \\ A_2X+B_2Y+C_2Z+D_2=0 \end{cases}$$

其三个方向数为  $l, m, n$  为：

$$l = \begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \end{vmatrix} \quad m = \begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \end{vmatrix} \quad n = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}$$

根据三维姿态俯仰角和偏航角的定义<sup>[2]</sup>，俯仰角  $\varphi$  和  $\psi$  分别为：

$$\varphi = \arctan\left(\frac{m}{\sqrt{l^2+n^2}}\right)$$

$$\psi = -\arctan\left(\frac{n}{l}\right)$$

由上可知，分布式测量主要应用三角形和中轴法。三角法测量目标位置和速度，可以通过近似目标为点目标来实现，对图像质量要求不高；但中轴法测量目标姿态，需要对被测目标成像，而不能近似于点目标。这就要求高速成像设备应尽可能地接近被测目标，但如果过度接近靶场测量目标，成像设备可能

被毁伤,昂贵的高速成像设备无法布设在危险区域只能远距离成像,无疑加重了系统设计的难度,造成测量效果不佳。

### 2 近距离布设方式

文中所提出的低成本凝视设备,随时可以被毁伤。其优点在于可以超近距离布设,拍摄清晰的目标图像。可以通过常用的双摄像机交汇测量系统的布设方式<sup>[3]</sup>布设在靶场中,无限接近被测目标,如图 3 所示图中  $O_1$  和  $O_2$  分别是摄像机平面。 $2\alpha$  为摄像机的视场角; $L$  为两个摄像机基线距离; $\varphi$  为摄像机主光轴与水平面的夹角,即摄像机布站时的高低角。以  $O_1$  为原点建立坐标系,则 CMOS-1 摄像机安放在  $(0,0)$  处, CMOS-2 安放在  $(L,0)$  处。双摄像机同时可以拍摄的区域为可用区域,通常用半径为  $R$  的内切圆表示,如图中的  $ABCD$  所在圆,即有效视场<sup>[4]</sup>。实际布站考虑成本因素,像机选用定焦镜头,视场角  $2\alpha$  和高低角  $\varphi$  不变。很明显  $R$  与  $L$  成正比例变化。实际布站时调整基线  $L$  距离时不能无限增大,既要考虑摄像机的最远探测距离,还要兼顾测量精度。

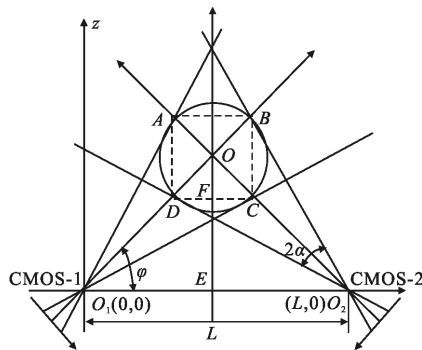


图 3 双摄像机交汇布设方式  
Fig.3 Double camera intersection arrangement

多目交汇摄像机是基于双目交汇测量进行了改进发展,在目标的飞行区域内布设若干高速摄像机,主要目的是测量目标的姿态参数。如图 4 侧视图与图 5 俯视图所示,多目交汇测量通过多台摄像机拼接,形成更大的纵向视场覆盖范围。

该系统的另一优势是:由于凝视设备成本低,可以布设落点实时影像记录摄像机,其主要目的是记录目标飞弹在命中靶标时刻的影像和或飞弹脱靶时的脱靶量。由于接近靶标中心,落点实时影像记录摄像机被毁伤的概率极高,传统布设方式是不考虑布设的。但

该系统,可以跟踪拍摄目标在击中靶标的全部运动过程,更方便测量目标的轨迹、速度、转速等信息,同时在目标未击中靶标时得到较为精确的靶量。

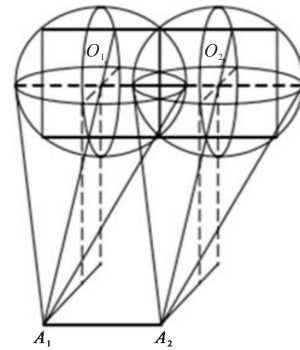


图 4 多摄像机布设侧视图

Fig.4 Side view of multi-camera arrangement

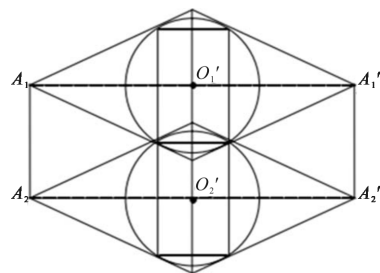


图 5 多摄像机布设俯视图

Fig.5 Top view of multi-camera arrangement

实际应用时,若需要延长有效视场的长度,可以通过在目标沿途方向上增设摄像机的方法延长有效视场的长度;若有效视场在高度上不能满足测量要求,可以通过在同一布设位置增加摄像机,通过调整摄像机的俯仰角度采用叠加的方法,在高度方向上拼接有效视场;若有效视场在宽度上不能满足要求,可以通过横向拼接的方式在宽度方向上扩展有效视场。如图 6 所示

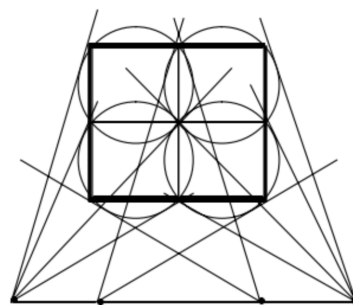


图 6 扩展布设

Fig.6 Extended layout

的布设在高度和宽度上扩展了有效视场<sup>[5]</sup>。如果选用相同视场角的定焦镜头,那么此种布设方式需要 8 台高速摄像机。

### 3 电子系统组成

该系统要求前端凝视设备尽可能接近目标,降低光学镜头的设计难度,完成对被测目标的清晰成像。同时目标速度较快,要求摄像设备首先具有较高的帧频;其次传输数据的带宽要足够宽;最后还必须要要求后端存储设备有足够快的存储速度。根据这样的目标特点,所采用的系统方案为:前端凝视设备,中段光纤传输设备,后端高速处理及存储设备来组成整个系统。

前端凝视设备主要包括激光主动照明设备、定焦光学镜头和高速 CMOS 摄像机组成。考虑到前端凝视设备有可能被毁伤,造价应尽量低廉,选取高速 CMOS 芯片作为摄像传感器。假设在双目凝视系统中,所测运动目标的最大速度为  $v=150\text{ m/s}$ ,定焦光学镜头的焦距  $f=25\text{ mm}$ ,凝视设备距离被测目标  $100\text{ m}$ ,CMOS 像元尺寸为  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,要求单一 CMOS 摄像机所能采集到目标的帧数大于 10 帧。这就要求 CMOS 有一定宽度,以使成像不出离范围;同时要求有最小的曝光时间,以保证成像清晰,通过计算可以得到所需 CMOS 摄像机的定量指标<sup>[6]</sup>:即 CMOS 摄像机最小像元个数为 1500,最小曝光时间为  $10\text{ }\mu\text{s}$ 。选择 CMOSIS 公司的芯片 CMV2000 开发高速 CMOS 摄像机。其摄像机的性能指标如表 1 所示。

表 1 摄像机的性能指标

Tab.1 Performance index of the camera

Parameter	Value
Maximum resolution	2 048×1 024
Pixel size	5.5 $\mu\text{m}$
Frame frequency	Under the 2048×1024 resolution 280 f/s Under the 1 280×720 resolution 400 f/s
Minimum exposure time	10 $\mu\text{s}$
Data interface	Chip output interface LVDS Maximum Bandwidth 600 MB/s
Camera output interface	Camera link-full maximum bandwidth 780 MB/s

芯片 CMV2000 采用双时钟驱动,高速输出 LVDS 时钟频率为芯片主频的 10 倍频<sup>[7]</sup>。采用 30 MHz 主频,则数据输出频率为 300 MHz,数据为 16 位,其带宽为 600 MB/s。通过 FPGA 对此信号进行处理,转换为 Camera Link-Full 端口对外输出数据。

Camera Link 在 Full 模式下,带宽为 680 MB/s<sup>[8]</sup>,满足摄像机系统要求。基于数据的高带宽,选取高速光纤传输方案。选用 TLK2711 作为光纤传输芯片,其并行数据宽度 16 位,参考时钟在 85~135 MHz 内,提供 1.6~2.7 Gbps 的串行速率,最大带宽可达到 2.16 Gbps,适用于双向点对点数据传输系统<sup>[9]</sup>。即使如此,一片 TLK2711 还是不能满足带宽 680 MB/s 的要求。由于 Camera Link-Full 为 3 个 Base 模式组合而成。选用 3 片 TLK2711,每一片 TLK2711 对应一个 Base 模式的 Camera Link 端口。这样不仅可以满足带宽要求,又可以既能分而传输 3 路 Base 模式的 Camera Link,又能合一传输 Camera Link-Full 模式信号,增强了整个系统的适应能力。在传输距离上,如果采用多模光纤,数据可以传输 500~800 m;如果采用单模光纤传输距离 20 km,完全满足脱离可毁伤区域,实施远距离控制、存储的条件。在安全区域,通过终端设备,把光纤传输的光信号再还原为 Camera Link-Full 模式的电信号,以便后端设备采集存储。

后端设备需要对最高 680 MB/s 的数据进行实时高速存储,传统的硬盘是无法满足这种高带宽的实时存储要求的。应用新的 FLASH 固态存储技术,采用以基于 PCIEx16 总线的固态硬盘为核心的高速采集系统。选用某公司产品的 THS-2000 固态硬盘。其指标如下:对外其接口为 Camera Link-Full 模式,最高实时存储速度为 1 000 MB/s,存储容量 8T,可以满足系统要求。高速采集系统通过 PCIEx16 总线插槽与工控机连接,选用不同规格的工控机可以扩展高速采集系统个数,实现单台计算机对多路数据的同时采集,以便调用和数据处理。

### 4 系统测试

主要从两个方面测试了系统。

实验一:最大靶面 2 048×1 024 下即 1 路 Camera Link-Full 输出模式下的存储系统运行情况;通过调整曝光时间控制帧频,当曝光时间为  $11\text{ }\mu\text{s}$ ,帧频达到 278 f/s 时,通过 Camera Link-Full 接口直接进入



存储系统,存储 20 s 时间图像,调用存储图像  $278 \times 20 = 5\,560$  幅图像,没有发现丢帧现象。

实验二:由于需要远距离通讯,测试了长时间通讯的误码率。首先由光纤传输前端,在 FPGA 内生成的有规律数列组成的模拟视频数据,经过电光转换经由 100 m 多模光纤传送到光纤传输后端,恢复为电信号后在后端 FPGA 比对数据,判断误码情况。在实际测试中经过 24 h 连续传输,误码率几近于 0,说明通讯误码率可以忽略不计。连接摄像机,通过 CMOS 摄像机内部产生渐变条,即视频数据为数列 0-255 逐次加 1 循环,在后端测试视频从生成到传输的全系统误码率,测试中发现在 LVDS 输出时钟在 300 M/s 内时,误码率约 0.01%,当输出时钟超过 300 M/s 后,误码率显著提高,450 M/s 时误码率达到 2.48%。

经分析,主要是由于芯片 CMV2000 输出信号为并行的 LVDS 差分信号,在布线长度或 FPGA 内部走线长度不一致时,当传输速度过快时差分线数据读取错误,所以造成误码率随时钟频率提高。由于时钟伴随信号一同并行传输,无法保证时钟与每条信号线的相对时间基准一致,此种误码和系统的使用条件、布线、芯片优劣都有一定关系,误码极容易产生,并且解决困难。虽然可以通过提高 PCB 的布线质量减少误码率,但经过反复实践发现最好的解决办法是通过 FPGA 内部的 IOBDELAY 功能模块实现对每个数据线的延时微调,使每路 LVDS 信号基于时钟的延时一致,通过此种方法可有效降低 LVDS 高速并行传送时造成的误码问题。

## 5 结 论

文中建立了一套可近距离观测靶场目标的测量系统,前端凝视系统,采用定焦镜头与 CMOS 像机,其具有造价低、可被毁伤的特点,根据分布式布站原理以及视场拼接技术可实现大区域布站。中段通过光纤传输,以保证通讯带宽,后端以 FLASH 固态硬盘为基础搭建存储控制系统。实时存储速率可达 1 000 M/s,并以 PCIe x16 总线安装在工控机中,满足多路数据实时采集、存储、延后调用、计算的功能。该系统通过模块化设计,前端和后端设备之间的接口

均采用通用接口。设备可更换,可升级,不仅适用于白天可视环境,也适用于夜间微光或红外测量,只需将前端凝视系统改为输出为 Camera Link 接口的红外成像设备,后端系统无需改动即可实现;通过改用单模光纤传输数据,可实现 20 km 外的实时控制观测。这些扩展能力皆极大拓宽了该系统的应用场合。文中基于分布式测量原理,对低成本多目标测量系统的硬件组成以及性能进行了比较详细的介绍,未来将进一步开展分布式测量的多台像机标定、视场拼接、多目标姿态测量与精度分析等后续工作。

## 参 考 文 献:

- [1] Li Mingjin. Concept research on stations arrangement of active measurement system for more, small, rapid and dark objects [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011: 24-28. (in Chinese)
- [2] Fu Qifeng, Cui Yanping, Ge Xingwei. Measuring approach of projectile landing parameters based on binocular vision model [J]. *Journal of Yanshan University*, 2005, 29 (3): 271-274. (in Chinese)
- [3] Yan Shuhua, Ye Xiangbin, Wang Yueke. Research on intersection measurement precision of CCD optical target in theory [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 1999, 10 (4): 328-332. (in Chinese)
- [4] Wu Xiaoqin, Zhang Lin, Yuan Min, et al. Optimal designing and simulating for structure layout of intersection measurement system with linear-CCD [J]. *Journal of Hefei University*, 2005, 15(4): 33-35, 46. (in Chinese)
- [5] Cui Shuhua, Hu Shaolin, Li Guo. Analysis and optimization of theodolite station distribution.[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(5): 12-15. (in Chinese)
- [6] Lv Yaowen. Research on key technology of close measurement for small, dark, rapid, and multi targets [D]: Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2014: 37-39. (in Chinese)
- [7] Cmosis Incorporation. 2.2 Megapixel Machine vision CMOS image sensor datasheet [EB/OL]. [2001-11-10]. [www.cmosis.com/products/product\\_detail/cmv2000](http://www.cmosis.com/products/product_detail/cmv2000).
- [8] National Semiconductor. Specifications of the camera link [EB/OL]. [2000-03-10]. [www.visiononline.org/standards](http://www.visiononline.org/standards).
- [9] Texas Instruments. TLK2711 1.6 to 2.7 Gbps transceiver datasheet [EB/OL]. [2006-07-24]. [www.visiononline.org/standards](http://www.visiononline.org/standards).