

线阵 CCD 精度靶图像触发算法设计

孟炳全, 蔡荣立, 谭林秋

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 针对线阵 CCD 精度靶测量弹丸坐标时需要额外触发光幕发送触发信号来决定其何时开始采集的问题; 在图像采集过程中, 设计一种图像触发算法在接收线阵 CCD 相机的图像数据信号的同时自动检测弹丸并实时发送触发信号; 通过研究弹丸图像的特性以及算法在 FPGA 上的硬件实现方法, 利用当前采集到的图像对算法进行了实验验证; 实验验证表明, 该算法可有效识别弹丸信号, 并能排除其它非弹丸信号的干扰; 该算法对提高线阵 CCD 精度靶触发精度, 精简线阵 CCD 精度靶结构具有十分重要的意义。

关键词: 数字图像处理; 弹丸识别; FPGA; 精度靶

Design of Image Triggering Algorithm for Linear Array CCD Precision Target

Meng Bingquan, Cai Rongli, Tan Linqiu

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021)

Abstract: According to the linear CCD measurement precision target projectile coordinate additional trigger screen transmits a trigger signal to decide when to start the acquisition problem. In the image acquisition process, the design of a trigger device and image acquisition device and receiving image data signal line array CCD camera, automatic detection and real-time transmission of the trigger signal of projectile. By studying the characteristics of projectile image and the hardware implementation method of the algorithm on the FPGA, the algorithm is verified by experiments using the currently collected images. Experiments show that the algorithm can effectively identify projectile signals and eliminate the interference of other non-projectile signals. This algorithm is very important to improve the triggering accuracy of linear array CCD precision target and to simplify the structure of linear array CCD precision target.

Keywords: digital image processing; projectile recognition; FPGA; precision target

0 引言

武器在投入使用前, 测试是武器研制和生产过程中必不可少的环节, 主要对武器的各种性能参数进行测试, 确定武器的各种性能指标和最终产品合格与否。在枪、炮、弹和发射药的检验中, 通过对枪、炮射击精度进行测量, 从而得到武器瞄准系统性能、发射药性能、弹丸质量等重要参数^[1-3]。近日, 随着 CCD 器件性能的不提高和成本不断下降, 且基于线阵 CCD 相机的着靶密集度测量系统具有较高的测量精度, 测量过程中能够获得弹丸穿幕影像, 利于事后分析。所以线阵 CCD 精度靶在靶场测试领域被广泛使用。

双线阵 CCD 精度靶是随着图像处理等技术的发展而产生的一种较新技术, 将两台线阵 CCD 布置在同一平面内矩形的两个底角, 该矩形平面即为靶面, 当弹丸穿过靶面时两个 CCD 可从两个底角捕捉到弹丸的位置信息, 再通过布

阵的三角形关系即可得到弹丸的位置坐标信息。当被用于室内弹丸着靶坐标测量时, 目前所有的线阵 CCD 精度靶都需要配备触发系统来启动图像采集系统开始采集图像。现有的触发系统一般采用光幕方式进行触发。触发光幕设置在线阵 CCD 精度靶靶面的正前方, 当弹丸穿越触发光幕时, 光幕探测器的信号处理电路将输出一个脉冲触发信号, 并将该信号传输至延时触发控制系统, 控制系统根据之前输入系统的预定弹丸飞行速度和 2 个光幕的距离, 以及系统预留的触发安全距离计算出需要延时的时间, 利用延时电路将光幕探测器输出的脉冲信号延长一定时间之后输出至后续图像采集系统, 启动图像采集系统开始采集数据^[4-5]。显而易见的是, 这种光幕触发方式结构复杂、成本昂贵、触发精度低。

为解决上述问题, 本文设计了一种线阵 CCD 精度靶图像触发算法, 不仅可以精简精度靶结构, 而且可以提高精度靶触发精度。

1 系统总体结构

针对线阵 CCD 精度靶, 设计了一种图像触发装置, 作为图像触发算法的实施平台, 系统整体结构如图 1 所示, 线阵 CCD 相机同时向 FPGA 和采集卡发送图像数据, FPGA 采集到图像数据后识别弹丸信号, 随后向采集卡发送触发信号, 采集卡从板载缓存中读取图像数据并通过 PCI 总线发送给 PC 机进行后续的处理分析。

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-07。

基金项目: 陕西省教育厅科学研究项目(16JK1365); 西安工业大学校长基金项目(XAGDXJJ16005); 西安工业大学光电工程学院院长基金项目(16GDYJZ05)。

作者简介: 孟炳全(1993-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事智能仪器设计与信号处理等方向的研究。

通讯作者: 蔡荣立(1974-), 男, 陕西岐山县人, 硕士生导师, 副教授, 主要从事靶场兵器测试技术等方向的研究。

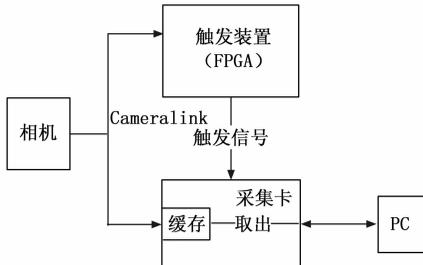


图 1 系统总体框图

其中, 相机为线阵 CCD 相机, 行频为 140 kHz, 通过 CameraLink 接口传输数据, 接口速度为 85 MHz, 测试要求为弹速 < 1000 m/s、弹长 > 15 mm, 弹丸穿过光幕的时间约为 15 μs, 即要求触发时间小于 15 μs。触发信号为 TTL 电平信号, 触发信号电流 $I > 20$ mA。

2 图像触发算法原理

2.1 背景差分法

在运动目标检测方面常用的方法有背景差分法, 这种方法事先把背景图像存储下来, 然后将前景图像与背景图像作差, 利用两幅图像相减所获取的具有动态特性变化的部分对可疑区域进行判定^[6-7]。

$$id(x, y, i) = f(x, y, i) - b(x, y) \quad (1)$$

式中, $id(x, y, i)$ 为差值图像, $b(x, y)$ 为背景图像, 图像系列为 $f(x, y, i)$, (x, y) 为图像位置坐标, i 为图像帧数。一般情况下, 由于运动物体在灰度上与背景灰度存在着很明显的差异, 这样作差之后的差值图像只是在运动物体处有较大的灰度值。选取适当的阈值 T , 差值图像的灰度值大于 T , 则 $bid(x, y, i) = 1$, 灰度值小于 T , 则 $bid(x, y, i) = 0$ 。

$$bid(x, y, i) = \begin{cases} 1 & |id(x, y, i)| \geq T \\ 0 & |id(x, y, i)| < T \end{cases} \quad (2)$$

这种方法的优点是对运动目标的检测十分有效而且对发生变化的图像很敏感, 尤其适用于背景基本无变化且前景图与背景图灰度值相差较大的情况下。与之对应的是, 当目标区域背景图像长时间内不断发生变化, 这种方法的检测精度便会大幅下滑^[8]。

2.2 图像触发算法

针对线阵 CCD 精度靶采集速度快, 图像差别小的特点, 设计了如下图像触发算法, 算法流程如图 2 所示。

首先将第一帧图像作为背景图像, 随后将当前帧图像与背景图像作差, 得到差值图像为:

$$D(x, y) = |B_i(x, y) - B_{i-1}(x, y)| \quad (3)$$

式中, $B_{i-1}(x, y)$ 为背景图像, $B_i(x, y)$ 为当前帧图像, $D(x, y)$ 为当前帧图像。随后根据阈值对背景图像进行更新, 背景图像为:

$$B(x, y) =$$

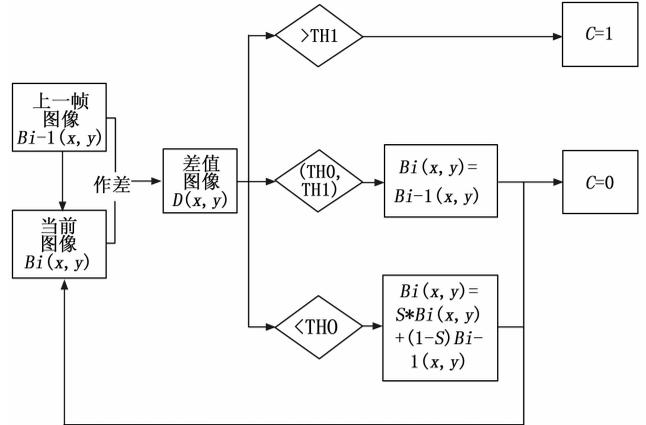


图 2 图像触发算法流程图

$$\begin{cases} B_{i-1}(x, y), & D(x, y) > TH1 \\ B_{i-1}(x, y) & D(x, y) \in (TH0, TH1) \\ B_i(x, y) = S * B_i(x, y) + & \\ (1 - S)B_{i-1}(x, y), & D(x, y) < TH0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $TH1$ 为触发阈值, $TH0$ 为变化阈值, S 为比例因子, 即当差值图像灰度值小于变化阈值时认为背景有变化但变化不大, 用比例因子 S 更新背景图像, 当差值图像灰度值大于变化阈值时, 用当前点的灰度值更新背景图像。相对应的, 触发信号为:

$$C = \begin{cases} 1, D(x, y) > TH1 \\ 0, D(x, y) \in (TH0, TH1) \\ 0, D(x, y) < TH0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, C 为触发信号, 1 代表有弹丸经过, 0 代表没有弹丸经过, 只有当差值图像灰度值大于触发阈值时, 才会判断有弹丸经过。

3 图像触发算法实现

3.1 阈值的选择

为了实现图像触发算法, 首先对现有 CCD 精度靶采集到的图像进行分析, 进一步得到图像触发阈值 $TH1$ 以及图像变化阈值 $TH0$ 。选用 MATLAB 对现有图像进行分析并进行后续的触发算法软件仿真。

操作目前实验室现有的 XGK-CCD-1000 型 CCD 精度靶采集若干图像, 图 3 为没有弹丸经过时采集到的图像, 图 4 为弹丸经过时图像。图像分辨率均为 $2048 * 679$, 对于线阵 CCD 来说, 即图中共有 679 帧图像。

如图 4 所示, 实验弹丸为钢珠, $D=10$ mm, 用气枪打出, 弹速约为 150 m/s, 在图中约占了 10 行 (图 4 中最下方中间黑点)。对图 4 中相邻行作差, 以便观察相邻像素灰度值的变化量, 为便于观察, 二值化后得到图 5, 其中灰度值大于 0 的点为白色。

图 5 灰度值分布直方图见图 6。

图 6 中可见, 当没有弹丸经过时连续帧间每个像素灰度值变化多在 5 以下, 变化最大值不超过 21。将所得的差



图 3 无弹丸经过



图 4 有弹丸经过



图 5 相邻行差值图

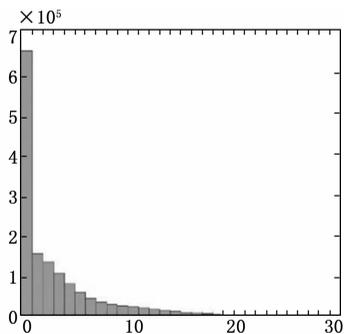


图 6 逐行作差后灰度值分布

值图利用 MATLAB 中的 graythresh 函数求取阈值, 得到的阈值也为 5, 所以取背景变化阈值 TH_0 为 5。

对图 5 有弹丸经过时采集到的图片进行处理, 提取出弹丸及周边背景变化区域的矩形范围, 灰度值分布见图 7 右。对图 5 中任取一帧背景, 灰度值分布见图 7 左。

如图 7 所示, 背景帧的灰度值大多在 200 以上, 最低不低于 90 且仅有少量; 由于弹丸灰度值分布图中有大量周围矩形区域内的背景点, 所以灰度值 250 及以上的点为非有效统计数据, 可见弹丸灰度值总体较为均衡, 中心区域灰度值达到了 50 以下。将背景帧灰度值与弹丸区域灰度值进行对比后, 不难发现, 弹丸经过 CCD 相机视场范围时, 灰度值变化非常大, 最高可达到 230 的灰度值变化量, 在背

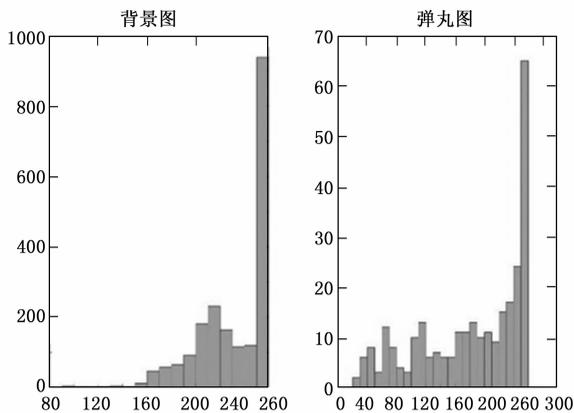


图 7 背景帧与弹丸区域灰度值对比图

景帧灰度值最低值 90 以下, 弹丸还有大约 50 个像素点。观察图 6, 不难发现, 提取出的噪声图像灰度值集中在 220 到 250 之间, 与弹丸图像灰度值差别较大。

综上, 现有的 XGK-CCD-1000 型精度靶光源亮度高且较为稳定, 取 $TH_0=5$ 为背景变化阈值, $TH_1=50$ 为弹丸信号触发阈值, 如图 7 所示, 即使弹丸经过亮度最低的光源点 (灰度值为 90 左右), 也可以确保有足够多的像素点灰度值低于 40 可以发送触发信号。依据弹丸尺寸, 精度靶光源工作情况, 阈值还可以进行进一步调整。

3.2 算法硬件实现

本文设计的图像触发算法最终要在 FPGA 上实现, 使用硬件描述语言实现相关算法。使用 FPGA 可以充分发挥其硬件并行和流水线技术上的优势, 以及设计灵活性好、开发周期短等特点, 从而提高图像处理速度, 满足精度靶测试系统中的实时性要求。而算法的硬件实现并不是简单地把操作级算法移植到 FPGA, 而是把软件的功能通过修改算法映射到硬件上面。在一些情况下, 也许需要修改不同的图像处理操作来获得统一的计算结构。这是因为利用并行性操作级算法可以改变很多。对于一些操作, 从串行到并行算法的转换是直接的, 然而对于其他操作完全是一个崭新的方法并且算法可能需要重新开发^[9-11]。

所以, 针对算法的硬件实现需求, 本文选用 Verilog HDL 语言实现图像触发算法, 选用 Altera 公司的 QuartusII 13.1 作为开发平台, 配合 ModelSim Starter Edition 10.1 d 进行波形仿真。

为了更清楚的描述以及更方便的实现图像触发算法, 将触发算法分为 4 个部分: 计数模块, 拼接模块, 信号分割模块, 图像处理模块, 触发总流程如图 8 所示。

如图 8 所示, 外部信号为时钟信号与图像数据信号, 输出信号为触发信号。计数模块负责将接收到的像素数进行计数, 直到达到一帧图像的像素数, 此时发出溢出信号; 拼接模块将图像数据信号进行拼接, 将每个时钟接收到的像素拼接为一帧完整的图像, 将单帧图像输出; 信号分割模块根据溢出信号将拼接好的单帧信号分别存储为当前帧图像信号与上一帧图像信号并进行输出; 图像处理模块实

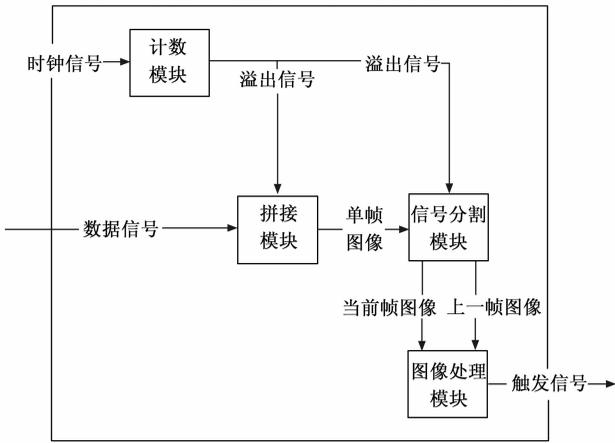


图 8 基于 HDL 语言的触发流程

时更新背景图像，将当前帧图像与背景图像作差，根据阈值 $TH0$ 更新背景，根据阈值 $TH1$ 发出触发信号。

4 实验结果和分析

4.1 MATLAB 仿真结果

按照图 2 所示总体流程编写 MATLAB 代码，取 $TH0=5$ 、 $TH1=50$ ，对图 3 进行处理识别的结果见图 9，对图 4 进行处理识别的结果见图 10。

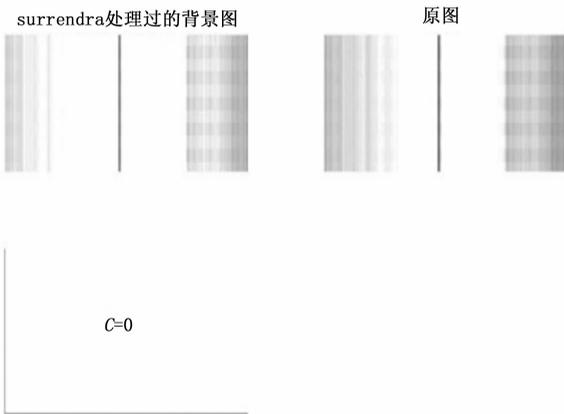


图 9 无弹丸经过时的处理结果

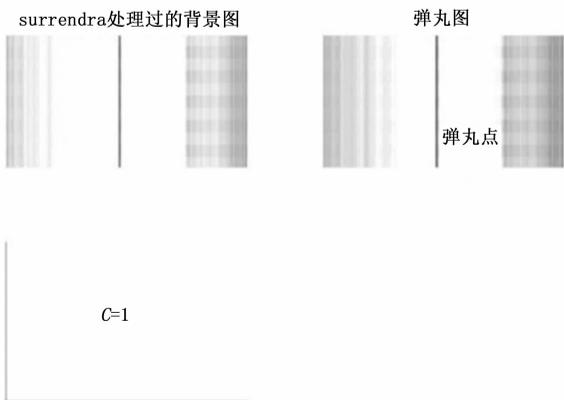


图 10 有弹丸经过时的处理结果

由图 9 中可见，对于图 3 所示没有弹丸经过时采集到的图像，本文设计的图像触发算法成功分离出了背景图像并

且输出触发信号 $C=0$ ，即不发送触发电平。

由图 10 中可见，对于图 4 所示有弹丸经过时采集到的图像，本文设计的图像触发算法成功将弹丸信号滤掉，从而得到没有弹丸的背景图像，并且输出触发信号 $C=1$ ，即向图像采集卡发送触发电平。

MATLAB 仿真验证了本课题方法的合理性并且通过进一步实验找到了合理的阈值，为后续的触发算法硬件实现打下了基础。

4.2 硬件实现结果

按照图 8 所示的硬件触发流程用 Verilog HDL 语言描述各个模块的具体功能。其中，计数模块输入为时钟信号，输出为溢出信号，目的是对 FPGA 接收到的像素数进行计数，当接收到一帧图像的像素数时发出溢出信号，用于后续处理；拼接模块输入为时钟信号 CLK 及计数模块发送的溢出信号 F 以及 FPGA 接收到的图像数据数组 D，目的是将接收到的图像数据拼接为一帧图像并输出；信号分割模块输入为单帧图像的数组 line，时钟信号 CLK 与溢出信号 F，目的是分离出当前帧图像 line_now 与前一帧图像 line_fw 并进行输出；图像处理模块输入为当前帧图像数据信号 line_now，上一帧图像信号 line_fw，以及时钟信号 clk1，目的是将当前帧图像与上一帧图像逐像素作差，根据差值与阈值 $TH0$ 、 $TH1$ 的大小关系更新背景求得差值图像并发送触发信号 t_s，设置参数触发阈值 T ($TH0$) 为 50，背景阈值 $T0$ ($TH1$) 为 5。

针对现有的线阵 CCD 精度靶的相机参数，每个时钟周期接收到 8 个像素，每帧图像有 2 048 个像素，时钟频率为 85 MHz^[12]。即需要 256 个时钟周期才能接收到完整的一帧图像，所以设置参数 N 为计数模块的计数上限为 256，时钟周期设为 $T=10$ ns，参数 b 为每帧图像所包含的像素数为 2048。随后，分别对各个模块进行功能仿真，以验证各自的功能。

将上述各个模块的接口相互对应并拼接起来再对代码进行简单修改便可以得到顶层模块，顶层模块包含了工程中所有的底层模块，最后目的为实现图像触发功能。顶层模块原理图如图 11 所示，输入为时钟信号 CLK 及图像数据 D，输出为触发信号 t_s，溢出信号 F、单帧图像 line、当前帧图像 line_now、前一帧图像 line_fw 为中间信号，设置为输出信号方便观察仿真波形。

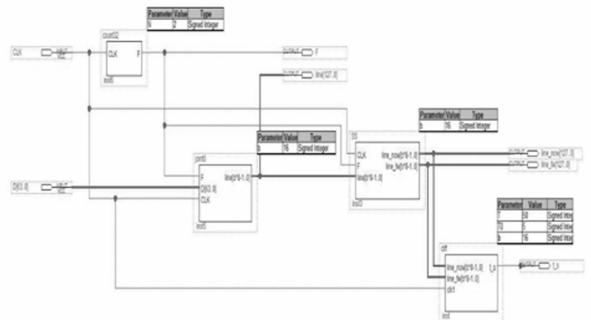


图 11 顶层原理图

编写 verilog test bench 文件, 将 CLK 时钟信号周期 T 设为 10 ns, D 随着时钟信号的上升沿发生变化, 每 6 个时钟周期为一个循环。同样为了方便仿真时观察波形, 取参数 $N=2$, $b=16$, 同时 D 位宽为 64, 表示每幅图像有 16 个像素, 每 2 个时钟周期可以传输一帧图像。仿真结果如图 12 所示。

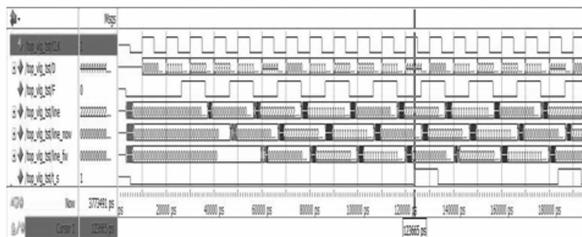


图 12 顶层仿真图

如图 12 所示, D 接收到的数据信号在 test bench 里设为 16 进制的全为 0、1、2、3、1、4 的循环, 每两组数据 16 个像素为一行图像, 即第一行为 00、11 组成的 16 进制数据, 第二行为 22、33 组成的 16 进制数据, 第三行为 11、44 组成的 16 进制数据。根据上文设置的阈值 $T=50$, 只有第三行包含了弹丸信号。其中除了判断触发信号 t_s 的发送在时钟下降沿执行, 其它过程块均在时钟上升沿执行。可见, 触发信号的第一次产生在 123 ns 左右, 而开始接收到与第三行相差较大的第四行数据时为 80 ns 时刻, 触发延时为 43 ns 左右。

考虑到图像信号传输中的延时 23.3 ns, 触发延时大约为 70 ns 左右。虽然仿真时假设每帧图像只有 16 个像素, 但 FPGA 中的并行执行结构导致运行速度并不会因为像素数的增多而变慢太多, 考虑到此, 整体的触发延时最终不会超过 100 ns。

5 结束语

针对现有 CCD 精度靶结构复杂触发精度低的问题, 设计一种图像触发算法, 用于精简精度靶结构, 提高触发精度。其结论如下:

1) 根据现有 CCD 精度靶采集到的图像, 利用 MATLAB 分析研究了其图像特征, 针对性的设计出图像触发算法并进行了验证, 可以实现图像触发的基本逻辑功能。

(上接第 244 页)

5 结束语

基于 Spacewire 高速总线实现的路由单元可以提高卫星平台及载荷数据业务的传输效率, 简化卫星数据流的设计。该设计采用标准化接口, 实现了组网设备的即插即用功能, 支持数据包的自适应路由, 同时该路由单元支持在轨可重构功能, 可应用于不同型号的星载 SpaceWire 总线网络构建, 符合未来航天器的发展需求。

参考文献:

[1] Parkes S M. Standard ECSS-E-50-12A, SpaceWire, links,

2) 随后将设计的图像触发算法用 Verilog HDL 语言实现并进行时序仿真, 仿真结果表明可以满足图像触发的时间要求。

3) 触发算法后续还需要搭建电路平台进行调试。但经过实验分析, 算法已经在逻辑功能和时序上完全满足线阵 CCD 精度靶的测试要求。

参考文献:

- [1] 李翰山, 高洪尧, 江 铭. 天幕靶光电探测性能改善研究 [J]. 弹道学报, 2007 (1): 33-36.
- [2] 王弘恺. 精度靶坐标定位测量系统研究 [J]. 长春邮电学报, 1997, 15 (3): 72-78.
- [3] 马卫红, 倪晋平, 董 涛, 等. 高精度 CCD 室内立靶测试系统设计 [J]. 光学技术, 2012, 3 (8): 180-184.
- [4] 董 涛, 华灯鑫, 李 言, 等. 用于 CCD 立靶的双光幕触发系统研究 [J]. 应用光学, 2014, 35 (4): 638-642.
- [5] Zahir Larabi, Yves Mathieu. Efficient Data Access Management for FPGA-based Image Processing SoCs [J]. IEEE/IFIP International Symposium on Rapid System Prototyping, 2009, (20): 159-164.
- [6] Syed Manzoor Qasim, Shuja Ahmad Abbasi. An Overview of Advanced FPGA Architectures for Optimized Hardware Realization of Computation Intensive Algorithms [J]. IEEEIMPACT, 2009, (9): 300-303.
- [7] Iakovidou C, Vonikakis V. FPGA implementation of a real-time biologically inspired imageenhancement algorithm [J]. Real-Time Image Proc, 2008, (3): 269-287.
- [8] An S, Wang C. Recursive algorithm architectures and FPGA implementation of 2-DDCT [J]. IET Image Process; 2008, 2 (6).
- [9] 仙云森. 基于 FPGA 的图像处理算法研究及硬件设计 [D]. 辽宁: 大连理工大学, 2007.
- [10] 马向前. 基于 FPGA 的实时图像采集和去噪系统的研究与设计 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [11] 王夷恬. 嵌入式视频监控系统的 FPGA 图像处理子系统设计 [D]. 江苏: 南京理工大学, 2009.
- [12] Basler. Specification of the camera link interface standard for digital cameras and flame grabbers [Z]. Ahrensburg, Germany: Basler, 2000.
- [1] nodes, routers and networks [S]. European Cooperation for Space Standardization, 2003.
- [2] 刘伟伟. SpaceWire 路由器研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [3] 万书芹, 等. 高速 SpaceWire 路由器的设计研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2010. 2 (1): 24-26.
- [4] 丁海峰. SpaceWire 即插即用网络管理器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [5] 郝 伟. SpaceWire 总线在航天器上的应用 [J]. 华人时刊, 2012. 10 (中): 89-90.
- [6] 牛跃华, 等. 一种星载强容错 SpaceWire 总线网络拓扑设计与分析 [J]. 计算机应用, 2014. 34 (9): 2497-2499.
- [7] 毛春静, 等. 星载 SpaceWire 路由器的研究与设计 [J]. 电子与信息学报, 2010. 8 (32): 1906-1907.