

文章编号:1007-2780(2017)09-0741-07

高速弹丸位置坐标自动测量系统设计

樊 博^{1,2*}, 王延杰¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了精确测量高速弹丸穿越光幕靶瞬间的位置坐标,设计一种基于 FPGA 加 DSP 的实时图像处理板卡,采用处理板卡与嵌入式软件算法相结合的方式组成高速弹丸位置坐标自动测量系统。该系统可以设置相机面阵和线阵工作,使测量前端自动互瞄、自动组成光幕靶,提高系统自动化程度。设计基于 FPGA 的 SATA 硬盘阵列控制方法,保证高速图像的实时记录和回放。利用 FPGA 实现的 PCIe 接口保证上位机与板卡数据交换和通信的实时性。实验结果表明,本系统能够自动完成测量前的准备工作,高速弹丸的捕获概率超过 99%,以中心点为原点的 200 mm 直径范围内的测量精度优于 1 mm。本系统能够满足高速弹丸位置坐标的测量需求,具有捕获率高、精度高、实时性好等特点,有很高的实用价值。

关键词:高速弹丸;位置测量;自动;FPGA;DSP

中图分类号:TP333.5;TP334.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173209.0741

Design of automatic measurement system of high-speed projectile position

FAN Bo^{1,2*}, WANG Yan-jie¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

Abstract: In order to measure the transient coordinates that high-speed projectile goes through the screen accurately, a real-time image processing card based on FPGA and DSP is designed. We designed an automatic measurement system of high-speed projectile location coordinates by using processing card and embedded software algorithm. We can set camera work at planar array mode or linear array mode, we also let measuring front-end do automatic mutual alignment, do automatic composition of laser screen target. We improve the degree of automation of the system and design a SATA hard disk array control method based on FPGA, so that the high speed real-time image can be recorded and re-played. We use FPGA to implement the PCIE interface to ensure the real-time data exchanging and communication between host computer and the card. The experimental results show that this system can automatically complete the preparatory work before measurement, high-speed projectile capture

收稿日期:2017-07-07;修订日期:2017-08-14.

* 通信联系人, E-mail: namefanbo@163.com

probability is close to 100%, the measurement accuracy is better than 1 mm within the point of origin to the center of the range of 200 mm in diam. This system can meet the requirement in measurement of high-speed projectile location coordinates. It has characteristics such as high capture rate, high precision, real-time and so on. It has very high practical value.

Key words: high-speed projectile; position measurement; automatic; FPGA; DSP

1 引言

高速弹丸位置测量系统主要利用两台相机在空间中交汇形成的光幕靶,完成快速小目标过靶瞬间的位置坐标、密集度分析和姿态等参数测量的系统,也是目前现代化常规武器靶场的重要测试设备之一^[1-3]。为了保证高速弹丸能够被相机采集到,相机需要有很高的帧频,为了保证测量精度和光幕靶的尺寸,相机也需要有很高的分辨率。由于高速弹丸位置测量系统需要处理的图像具有高帧频和高分辨率的特点,所以需要有高速高带宽的实时图像处理系统完成后续计算。

目前,高速弹丸位置测量系统采用的图像处理设备主要处理单一线阵图像,测量前需要手动调整系统状态,对测量精度有不利影响。需要长时间调整,自动化程度不高,降低了系统的实用性。例如董涛等人采用单线阵 CCD 相机探测弹丸在投影板的投影位置完成室内立靶测量^[1],该方法减少一个 CCD 相机,但是 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 靶的测量误差为 1.4 mm。李华等人研制了一种 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的立靶坐标测量系统^[2],该系统也采用线阵 CCD 相机,利用激光主动照明保证系统捕获率达到 90%。以上两个系统都采用线阵相机,在系统准备阶段很难让两个 CCD 相机的探测面重合,因此很难保证系统捕获率和精度。

本文设计了一种基于 Xilinx Virtex-6 系列 FPGA 和 TI TMS320C6000 系列 DSP 的实时图像处理平台。该平台设计有千兆网口、PCIE 接口、相机 Cameralink 接口和存储系统扩展接口等丰富的图像传输接口和控制接口。FPGA 内部逻辑具有多种工作模式,能够满足线阵和面阵不同相机图像数据的采集、缓存、传输和存储。DSP 主频最高可以达到 1.2 GHz,配合流水线操作等程序优化手段,可以完成高速图像实时计算。以此处理平台为基础,采用支持面阵和线阵切换的高速 CMOS 相机。在准备阶段采用面阵图像模式,软件自动识别标志

点,完成自动互瞄、自动测量参数、自动形成光幕靶;在测量阶段采用线阵图像模式,提高帧频,保证对高速弹丸越靶时刻的采集。

2 测量原理

测量站的两个测量单元按规定距离布置,其光轴相互对准重合后,分别在俯仰方向上扬起 45° ,形成一个光幕靶,当高速弹丸穿越光幕靶时,两台测量单元分别捕获弹丸穿越视场瞬间的景象,根据各自的图像信息计算出弹丸在各自视场中的位置。目标的坐标信息可以通过交汇测量的方法运算获得。

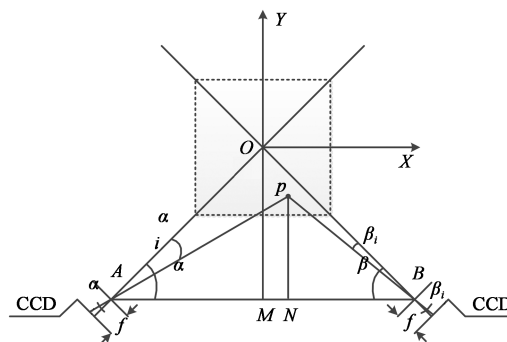


图 1 测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the measuring principle

如图 1 所示,设 α_i 和 β_i 分别是通过图像处理得到的两摄像机镜头的轴外物点 p 的物方角, AB 和 OM 的长度确定坐标原点后,根据正弦定理和三角关系可得点 p 的坐标 (x, y) 的计算公式^[1-5]:

$$\begin{cases} x = \left[\frac{1}{\tan(\alpha + A_1 d_a / f_1) \cot(\beta + A_2 d_a / f_2) + 1} - \frac{1}{\tan \alpha \cot \beta + 1} \right] d_0 \\ y = \left[\frac{1}{\cot(\alpha + A_1 d_a / f_1) + \cot(\beta + A_2 d_a / f_2)} - \frac{1}{\cot \alpha + \cot \beta} \right] d_0 \end{cases} \quad (1)$$

3 系统设计

为了保证系统测量精度和捕获率,根据目前立靶测量系统的优缺点,采用相机分别工作在面阵和线阵的方式;利用硬件板卡计算高速图像,实时结算目标位置坐标;使用 SATA 高速存储原始图像数据便于事后查证分析。

3.1 系统组成

如图 2 所示,系统主要分为 3 个部分,测量端 A/B 站、图像采集处理板和配置计算机。测量端 A/B 站主要完成光幕靶的形成和目标的探测,包括主动照明激光器、高速 CMOS 相机和二维转台。其中激光器和二维转台可以通过 RS422 串口控制,相机图像数据接口为 Cameralink Base 接口。图像处理板主要完成各个组件的控制,完成图像采集、存储、计算和下载等功能。主要包括 FPGA、DSP、DDR3 SDRAM 和 SSD 硬盘等主要功能部件。图像处理板卡通过 PCIe 接口和千兆以太网接口与配置计算机通讯。配置计算机运行上位机程序,完成控制命令的发送、图像查看、结果显示和事后分析等功能。

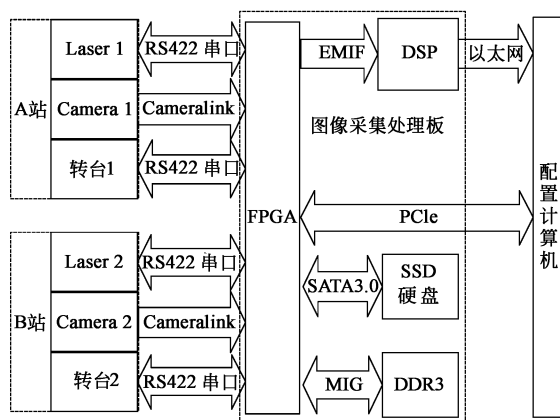


图 2 系统结构框图

Fig.2 System structure diagram

3.2 模块设计

3.2.1 采集模块

系统工作过程中,采集模块主要完成相机图像数据、GPS 时间码、转台位置、激光器状态、启动信号等信息采集。

图像数据采集接口为 2 路 Cameralink Base 接口,分别采集两个相机图像,每路接口工作频率为 50 MHz,数据位宽为 24 bit,带宽为 150 MB/s。满

足 2400x1 线阵模式下 50 000 帧/s 的速率,也满足 1920x1080 面阵模式下 30 帧/s 的速率。利用 Cameralink 接口的命令通道发送相机控制命令^[6]。

GPS 时间码采集接口采用 1 路 RS232 电平标准的串口,该串口的波特率为 9 600 bps。转台位置和激光器状态采集接口为 4 路 RS422 电平标准的串口,串口的波特率为 115 200 bps。启动信号为 RS422 电平,通过接口芯片转换为 LVTTTL 信号接入 FPGA。

3.2.2 存储模块

在测量阶段系统需要存储线阵图像,同时在事后分析阶段系统需要下载线阵图像完成复算。存储模块采用 SATA 3.0 协议,4 块 SSD 硬盘并行写入,理论带宽为 2.4 GB/s。可以满足图像存储要求。存储模块结构如图 3 所示,分为硬件资源、SATA 控制和逻辑接口 3 部分。

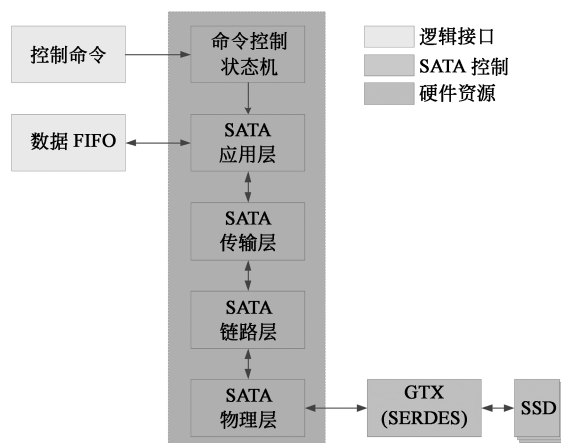


图 3 存储模块结构图

Fig.3 Storage modular structure chart

硬件资源主要包括 SSD 硬盘阵列和 FPGA 内部 GTX 高速收发器。其中 GTX 高速收发器可以实现单路 10 Gbps 的高速串行数据收发,满足 SATA 3.0 协议规定的 6 Gbps 的带宽要求。

SATA 控制主要实现 SATA 的层次化结构协议。其中物理层配合 GTX 完成数据的串并转换,同时从串行信号中恢复时钟信号,进行数据对齐,完成带外信号的接收和发送,使用带外信号进行 SATA 接口初始化和速率协商,并向链路层发送链接状态。链路层主要完成上层数据的 CRC 校验,并在数据上增加本层帧头、帧尾和 CRC 校验信息,同时接收对方链路层数据信息,完成数据校验和拆包工作。另外对数据进行 8b/10b 编解

码、加扰和解扰,控制数据帧的流量。传输层主要通过数据帧的组帧和解帧完成命令交互和数据传递。传递数据和命令过程中需要管理数据缓存区,并向链路层发送流量控制信息,向应用层报告传输状态。应用层主要完成对收到的 ATA 命令的解析并作出相应的回应。命令控制状态机主要完成命令解析,根据命令类型生成相应操作参数,完成对应用层操作。

逻辑接口包括控制命令接口和数据 FIFO 接口。控制命令包括 DMA 读写命令、PIO 命令、NCQ 命令等。可以完成对 SATA 的选择控制。数据 FIFO 用来缓存发送或者接收的数据。

3.2.3 处理模块

在测量阶段处理模块完成图像实时计算,剔除干扰目标,交汇合成目标位置。处理模块主要由 TI TMS320C6455 定点 DSP 处理器组成,该处理器的主频为 1.2 GHz。DSP 复位信号受 FPGA 控制,DSP 定时给看门狗芯片发送信号,超时而看门狗发送复位信号给 FPGA,FPGA 给 DSP 发送复位信号完成 DSP 复位。这种设计保证了系统的健壮性。DSP 外挂 250 MB DDR2 SDRAM 存储器,用来缓存图像数据和计算过程中的数据。在测量模式下,启动信号到来前 DSP 收到 FPGA 发送的图像中断信号后,开启 DMA 通过 EMIF 总线将图像数据从 FPGA 外挂 DDR3 SDRAM 搬移到 DSP 外挂的 DDR2 SDRAM 中,作为背景图像。启动信号到来后,采用相同的方法将图像缓存到 DDR2 SDRAM 的另外一块区域。然后将收到的图像与背景图像做对应位置差,背景差后超过阈值的位置为可疑目标位置。结合目标大小、速度等参数,剔除干扰目标。最终根据交汇原理计算出真实目标的坐标位置,并将坐标位置传送到计算机。

3.2.4 输出模块

在准备阶段、测量阶段和事后分析阶段都需要输出模块参与。在准备阶段输出模块需要将面阵图像数据传送给计算机完成转台位置调整,使两个相机相互瞄准。在测量阶段输出模块需要将图像处理结果传送给计算机来显示坐标位置。在事后分析阶段输出模块需要将存储的线阵图像传送给计算机完成复算。

在准备阶段计算机收到图像中断时,配置

PCIe DMA 原地址、目标地址、DMA 长度等参数,然后开启 DMA 将图像从板载 DDR3 SDRAM 中到计算机内存中。计算机通过不同地址可以选择需要传送 A 站或者 B 站相机的图像。

在测量阶段当 DSP 完成图像处理,计算出目标坐标位置时,通过 DSP 外挂的千兆以太网口向计算机发送位置信息,计算机收到位置信息后发送握手信号表示已经成功接收数据。传输过程中千兆以太网采用 TCP/IP 协议,这样可以保证准确传输。

在事后分析阶段计算机发送需要下载图像名称和长度,然后发送图像下载开始命令,FPGA 开始读取 SSD 硬盘中的相应图像数据并缓存到 FPGA 的 FIFO 中,当缓存图像数据长度够一次 DMA 的长度,通知计算机开始 DMA 搬运,计算机将图像缓存到内存中,然后打包成文件写入本地硬盘中。

3.3 工作流程

系统工作主要分为 3 个阶段,分别为准备阶段、测量阶段和事后分析阶段,具体流程如图 4 所示。

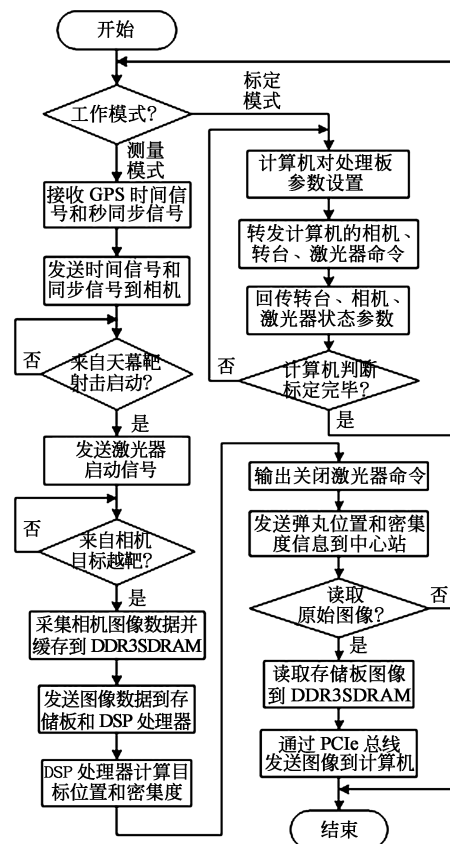


图 4 系统工作流程图

Fig.4 System flowchart

3.3.1 准备阶段

准备阶段主要目的是自动调整设备状态并获取测量阶段所需的参数。具体过程:两相机对视,调整调平机构使其处于水平并且在相同高度,然后调整转台水平方向使两个相机光轴重合。利用已知距离的两个合作点、相机镜头焦距和相机像元尺寸可以精确计算出两个探测器面的距离,并将此距离结果作为后续计算的参数之一。调整转台垂直方向,使两个相机光轴指向 45° ,组成光幕靶。设置被测目标的特性,方便剔除干扰目标。

3.3.2 测量阶段

在测量阶段处理板卡接收 GPS 模块发送的 RS232 串口信号,通过协议解码还原绝对时间信息,并对图像进行准确标时。当启动信号到来时,实时图像处理板卡发送触发信号给激光器使其出光,同时开始采集并存储相机图像,当采集一帧图像结束时 FPGA 发送中断命令给 DSP, DSP 开启 DMA 将一帧图像搬移到 DSP 内部存储中,然后开始计算图像,当图像中有符合特性的目标时,根据交汇测量原理计算出该目标的位置坐标信息,并将该目标位置上报给计算机,计算机根据准备阶段获取的参数和 DSP 发送的坐标信息,绘制靶面和目标坐标位置。

3.3.3 事后分析阶段

事后分析阶段主要是计算机软件和实时图像处理板卡 FPGA 的数据和命令交互,其中数据通过 PCIe DMA 引擎传输,命令通过 PCIe 基址寄存器传输。计算机软件发送查询存储列表命令到实时图像处理板卡,板卡将存储列表传送到计算机软件^[7-9]。计算机软件选择需要下载的文件名称,并将此名称发送给 FPGA。板卡 FPGA 将相应的文件通过 SATA 接口从 SSD 硬盘中下载到片上存储中,然后发送给计算机软件。计算机软件遍历图像数据的像素点并计算出图像中目标的位置,交汇出坐标位置,与实时计算结果进行比对和修正,并完成存档。

4 实验

4.1 捕获能力实验

本系统架设在室外空旷的场地,根据上述操作流程将系统展开,并测量好各种参数^[10]。使用弹弓和玩具枪发射不同直径的钢珠来模拟高速运动的目标。分别瞄准模拟靶面的中心区域和四个边角区域,各发射 4 发,20 发为一组。实验共计 5 组 100 发,将弹丸的大小和发射速度等参数填入系统作为判断依据。系统捕获目标 100 发,与瞄准射击的位置一致,捕获率 100%。其中一组的实验结果如图 5 所示。

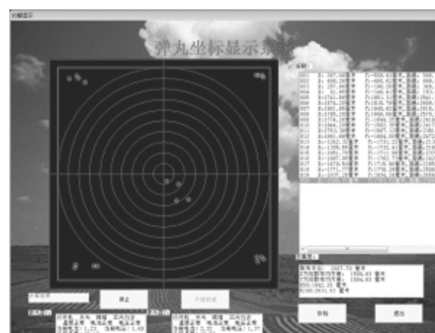


图5 捕获结果

Fig.5 Result of capture

4.2 精度实验

目前精密机械加工精度可以达到 $1\ \mu\text{m}$,因此采用精密加工圆柱固定在精密加工的钢板上模拟目标的位置。实验过程中控制激光器发出窄脉冲激光,激光照射圆柱,反射光进入相机探测器成像,相机感光结果与目标穿越靶面特性一致。我们利用在钢板上多个精密加工的固定位置可以模拟出靶面内多个点的精确位置^[11],从而与系统实际测试的结果进行对比。实验数据如表 1 所示。

表1 精度测量结果(单位:mm)

Tab.1 Result of precision measurement (Unit: mm)

序号	X 坐标	X 理论坐标	Y 坐标	Y 理论坐标
	-0.21	0	100.72	100
	-0.736	0	-100.747	-100

续 表

序号	X 坐标	X 理论 坐标	Y 坐标	Y 理论 坐标
	−100.589	−100	−0.2	0
	100.434	100	0.186	0
	−71.007	−70.716 78	71.423	70.716 78
	71.308	70.716 78	71.323	70.716 78
	−70.685	−70.71678	−71.5	−70.716 78
	72.178	70.716 78	−71.42	−70.716 78
	0.12	0	−0.19	0
均方根 误差	0.683 17		0.632 02	

5 结 论

针对高速弹丸位置测量系统的主要特点，本文设计了一种基于 FPGA+DSP 的高速图像处理平台，配合主动照明和成像单元可以完成高速弹丸越靶位置的精确测量，也可以统计越靶目标的密集度等参数^[12]。采用支持面阵和线阵切换的高速 CMOS 相机，在准备阶段使用面

阵图像模式，自动完成系统各项准备工作，提高了自动化程度，在测量阶段采用高速线阵图像模式，保证了目标捕获率和测量精度。图像处理平台具有采集、存储、计算、下载等系列功能，具有集成度高、传输带宽高、存储带宽高等优势。实验结果显示，本系统目标捕获率接近 100%，R20 范围内测量精度优于 1 mm。本系统具有自动化、捕获率高、精度高、处理速度快等优点，具有很高的实用价值。

参 考 文 献：

[1] 董涛,倪晋平.单线阵 CCD 相机立靶测量原理[J].应用光学,2011,32(3):482-485.
DONG T, NI J P. Measuring principle of vertical target based on single linear array CCD camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3): 482-485. (in Chinese)

[2] 李华,雷蕾,常何氏,等.CCD 立靶对暗弱高速飞行弹丸的捕获研究[J].光子学报,2008,37(6):1238-1241.
LI H, LEI L, CHANG H M, *et al.* Research on capture rate of the 4×4 m² CCD measurement system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(6): 1238-1241. (in Chinese)

[3] 何凯平,徐达,李华.大面积三角组合光幕弹幕武器密集度的高精度测试[J].光学精密工程,2015,23(6):1523-1529.
HE K P, XU D, LI H. High precision measurement for barrage weapon dispersion based on large area triangle composite light-screens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1523-1529. (in Chinese)

[4] 张茂桢,景文博,刘学,等.激光照射器立靶测试中靶板识别方法[J].长春理工大学学报:自然科学版,2016,39(2):67-72.
ZHANG M Z, JING W B, LIU X, *et al.* Target recognition method for laser director target measurement [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 39(2): 67-72. (in Chinese)

[5] 张宁,沈湘衡.采用 CCD 相机测量目标靶形心位置精度的方法[J].红外与激光工程,2015,44(1):279-284.
ZHANG N, SHEN X H. Verification method for measuring accuracy of shape center location of target by using CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 279-284. (in Chinese)

- [6] 樊博,王延杰,孙宏海,等.FPGA实现高速实时多端口图像处理系统的研究[J].液晶与显示,2013,28(4):620-625.
FAN B, WANG Y J, SUN H H, *et al.* High speed real-time multiport image processing system realized on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 620-625. (in Chinese)
- [7] DECKER R, DUCA M, SPICKERT-FULTON S. Measurement of bullet impact conditions using automated in-flight photography system [J]. *Defence Technology*, 2017, 13(4): 288-294.
- [8] AMIRI M, SIDDIQUI F M, KELLY C, *et al.* FPGA-based soft-core processors for image processing applications [J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2017, 87(1): 139-156.
- [9] NI J P, CAI R L, CUI C Q, *et al.* Measurement system for precise bullet location and signal processing circuitry [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2005, 19(1): 11-17.
- [10] 王苗,李华.CCD立靶测量系统目标捕获性能研究[J].光子学报,2009,38(6):1539-1542.
WANG M, LI H. Capturing of CCD vertical target measurement system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1539-1542. (in Chinese)
- [11] 黄士亮,丁璐,王李笛.CCD立靶密集度测量精度分析[J].兵器装备工程学报,2016,37(9):28-31.
HUANG S L, DING L, WANG L D. Accuracy analysis of CCD vertical target dispersion measurement [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(9): 28-31. (in Chinese)
- [12] TOMASI M, PUNDLIK S, LUO G. FPGA - DSP co-processing for feature tracking in smart video sensors [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2016, 11(4): 751-767.

作者简介:樊博(1987—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士研究生,研究实习员,2011年于吉林大学获得学士学位,2014年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事实时图像处理软硬件方面的研究。E-mail: namefanbo@163.com