

## 应用于可穿戴微光成像系统的嵌入式平台设计

肖 龙, 徐 超, 刘广荣

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 得益于嵌入式软硬件平台的迅猛发展, 可穿戴式成像设备成为发展的新趋势, 并对传统便携式成像设备产生了深刻的影响。以集成了 TI DM3730 双核异构处理器、SDRAM、NAND Flash 及电源管理的 Jorjin AP 模块作为处理核心, 接入低功耗、小型化微光探测器和高分辨率的 OLED 微显示器, 设计构成了应用于微光环境下目标辅助观察的嵌入式平台。平台对并行视频信号做差分对转换, 提高视频传输距离和稳定性的同时, 简化了视频接口线数, 创新性地强化了设备穿戴的灵活性。平台算法处理能力强、功耗低、重量轻, 可无线通信、视频存储及电池供电, 能有效提高使用者的夜间目标探测能力, 在工业、科学、军事等领域有着广泛的应用前景。

**关键词:** 微光成像系统; DM3730; OLED; 嵌入式系统

**中图分类号:** TN223 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0118006

## Design of embedded platform applied in wearable low-light level imaging system

Xiao Long, Xu Chao, Liu Guangrong

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Profit from the rapid development of embedded software and hardware, wearable imaging device has become a new trend and exerted a profound influence on traditional portable imaging equipments. Choosing Jorjin AP Module as the core, which integrates Texas Instruments Heterogeneous dual-core processor Synchronous Dynamic random access memory, SDRAM, NAND Flash and Power Management IC, utilizing low power consumption small size low-light camera and high resolution Organic Light Emitting Diode micro-display display, an embedded platform was designed to be applied to auxiliary target observation in low-light conditions. Platform creatively transformed video signal from parallel format into differential format, which not only improved the stability and transmission distance, but also reduced the number of physical interface's lines and made it more flexible to support more kinds of application scenarios. With the advantage of strong algorithm processing ability, low power consumption, light weight, wireless communication, video storage and battery powered, platform can be deeply used in improving users' target detection ability at night in industry, science, military and other fields.

**Key words:** low-light imaging system; DM3730; OLED; embedded system

收稿日期: 2015-05-07; 修订日期: 2015-06-13

基金项目: 兵器预研支撑基金(62201070116); 国防预研(40405030202); 北京理工大学基础研究基金(20130442012);

“光电成像与系统”教育部重点实验室 2015 开放基金(20150EIOF04)

作者简介: 肖龙(1989-), 男, 硕士生, 主要从事嵌入式系统与图像处理方面的研究。Email: powerxlgood@163.com

通讯作者: 徐超(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电图像处理和光电成像技术与系统方面的研究。Email: rockyxu@bit.edu.cn

## 0 引言

可穿戴设备是在“以人为本”、“人机合一”为理念的计算机模式下衍生出的一类个人移动计算机<sup>[1]</sup>,整合了芯片、传感器、操作系统、显示、存储、电池等多项技术,具有可穿戴及用户可随时访问等特点<sup>[2]</sup>,被广泛应用在工业、国防及科研等领域。

缘于嵌入式软硬件的快速发展,可穿戴设备越来越多地走入人们的视野。在军用领域,美国国防部高级研究计划局(DARPA)于 2008 年重启了“陆地勇士”项目,目的是研制一种结合常规武器并以穿戴设备为核心的数字化单兵作战系统<sup>[3-4]</sup>。该项目在伊拉克和阿富汗战场完成了实验性作战部署,取得较好的反响。在工业领域, Motorola Solution 公司面向工程师人群,以“释放双手”为理念设计了头戴式计算设备 HCI。HCI 在人眼视场下方放置与 15 英尺屏幕显示效果相当的微显示屏,通过语音命令、头部动作完成文件和远程协助操作,腾出双手,以提高工作效率。

传统便携式微光成像系统在特种和军用装备中被广泛使用,依然存在功耗高、体积大、质量重等问题。将轻巧、低功耗、智能化的可穿戴设备应用其中可提供更丰富的功能和更出色的用户体验。为平衡处理器的外设控制、图像视频处理及低功耗等实际需求, TI 公司针对多媒体应用领域在其已有 DaVinci 产品系列中推出了低电压的 ARM、DSP 双核异构处理器 DM3730,相比单一 ARM 架构处理器具备更高的运算性能,相比同系列 DaVinci 处理器拥有更低的能耗。DM3730 的高集成度、高性能、低功耗和支持 Linux 操作系统等特点,使之在穿戴应用及多媒体应用中具备得天独厚的优势。

因此,设计了应用于微光环境下目标辅助观察的可穿戴嵌入式平台,以集成 TI DM3730 双核异构处理器、SDRAM、NAND Flash 及电源管理芯片的 Jorjin AP 模块作为处理核心,利用低功耗微光探测器、高分辨率 OLED 微型显示器及 Wi-Fi、蓝牙通信模块,根据 Linux 操作系统及应用程序的运行需求展开平台的软硬件设计。平台既可满足可穿戴微光成像的基本需求,又具备结合通信等模块进一步丰富和扩展应用场景的能力。平台在设计中将并行视

频信号转换成差分信号传输,简化了视频接口线数,创新性地提高了设备穿戴的灵活性。

## 1 硬件设计

平台硬件包含探测器模块、图像处理板和显示模块三个部分,如图 1 所示。

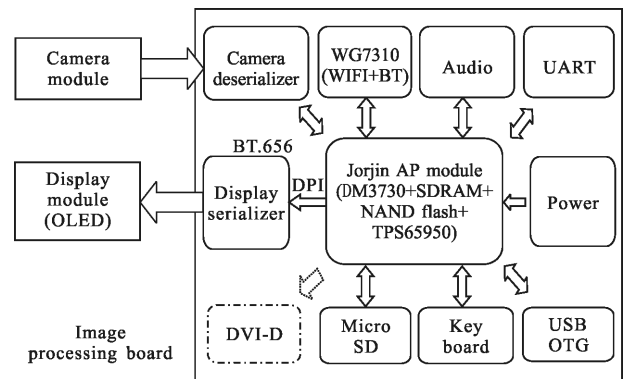


图 1 硬件框图

Fig.1 Block diagram of hardware

### 1.1 探测器模块

探测器模块分为小型微光探测器和接口电路两部分。平台采用昆山锐芯微电子有限公司的固体微光探测器,能在  $10^{-2}$  lx 照度下以 25 帧/s 的帧频连续成像,支持  $768 \times 582$  分辨率的 8 bit ITU-BT.656 格式数字视频信号输出。其高灵敏度、低功耗、结构紧凑等特点,使之成为应用于便携、可穿戴微光成像系统的理想选择。

探测器的并行数字视频信号多采用 FFC 线缆传输,动辄十多根信号传输线。实际使用时,FFC 线缆及适配连接器占据较大空间,其弯折方向和角度有限,频繁扭动易致接口松动或是线缆破损,降低了走线灵活性和可靠性,同时还存在传输距离短、易受干扰等弊端。平台采用探测器串行器、解串器芯片组简化接口为单对差分信号传输。芯片组提供高速串行接口,包括高速正向通道和差分对上的双向控制通道,在探测器与处理器间利用单对 CAT-6 类双绞线建立差分信号连接,用以传输 I<sup>2</sup>C 控制信号及 20~100 MHz 像素时钟频率的视频信号。

如图 2(a)所示,探测器经上位机软件配置,输出 8 bit ITU-BT.656 格式视频信号至接口电路的串行器编码,通过高速串行接口传输视频及控制信号至图像处理板。

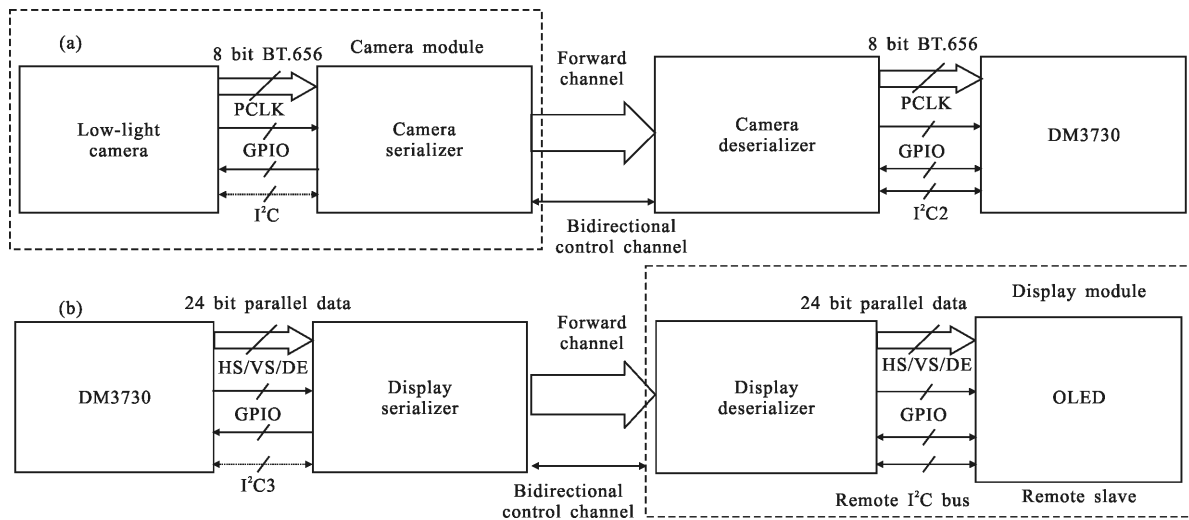


图 2 视频信号传输示意图

Fig.2 Video signal transmission

### 1.2 图像处理板

在图像处理领域，利用 ARM 和 DSP 处理器共同构建硬件平台是众多方案之一。相比单独使用 DSP 或 FPGA, ARM+DSP 方案既能满足系统对算法处理高性能的需求, 又展现出灵活的外设控制能力<sup>[5]</sup>。图像处理板选用美国 TI 公司双核异构的 DM3730 作为核心处理器。DM3730 拥有 1 GHz 的 ARM Cortex-A8 核心和 800 MHz 具有高级数字信号处理能力的 DSP 核心, 支持 12 bit 数字视频输入和 24 bit SXGA+分辨率显示输出, 通信接口丰富, 在低功耗、高集成度、外设控制能力和算法处理性能方面优点突出。针对平台小型化的设计需求, 采用规格仅 30 mm×22 mm, 集成 DM3730 处理器、4 Gb SDRAM、4Gb NAND Flash、电源管理芯片 TPS65950 及晶振等元器件的 Jorjin AP 模块作为图像处理板的核心器件, 以缩小整板面积。

图像采集、显示及外设控制通过 ARM 核完成, 具体图像处理相关算法的实现由支持浮点运算的 DSP 核完成。图像处理板接收探测器模块输出的差分信号, 通过 DM3730 的 I<sup>2</sup>C 接口控制板载探测器解串器解码还原差分信号为 ITU-BT.656 格式数字视频信号, 进而输出到 DM3730 的 Camera 接口。信号经 ARM 端 ISP(Imaging Signal Processor)解码得到 YUV422 格式图像数据并填充至内存帧缓冲, 图像数据通过 TI CodecEngine 双核通信机制交由 DSP 端处理并返回到 ARM 端显示专用的内存帧缓冲。处

理后的图像数据由 ARM 端 DSS(Display Sub System) 获取并转换为 RGB 格式, 以并行方式传输至板载显示串行器, 最终编码为串行差分信号输出至显示模块。

平台的实际应用对视频存储及无线通信均存在需求。通过 DM3730 MMC 接口扩展小体积、可插拔的 micro SD 卡, 用于视频、图像数据的存储。Jorjin WG7310 模块实现了 Wi-Fi 无线连接, 配合网络传输协议及视频编解码, 可实现视频的无线网络传输。图像处理板另扩展 DVI-D 显示、模拟视频输出、串口调试、USB OTG、音频以及矩阵键盘接口, 以便调试系统和人机交互。

### 1.3 显示模块

显示模块由微显示器和接口电路两部分组成。可穿戴设备对显示器件的小尺寸和低功耗要求较高, 常规显示器难以应用于近眼显示, 因此涌现出 LCoS、OLED 等类型的微显示器。与 LCoS 相比, OLED 不需背光源、功耗低、重量轻、厚度薄、对比度高、视场角广、反应速度快和工作温度范围宽等突出的优点<sup>[6]</sup>, 使之越来越多地应用于可穿戴设备。平台采用 OLED 微显示器是由云南北方奥雷德光电科技股份有限公司生产的硅基主动式全彩色微显示器 SVGA060, 并适配便于近眼观察的光学目镜。SVGA060 功耗小于 0.2 W, 重量轻于 1.8 g, 兼容 DM3730 输出的 24 位 RGB 格式数字视频信号, 通过 DM3730 的 I<sup>2</sup>C 接口调整其亮度、色度、对比度等参数。

DM3730 显示接口线数众多,平台使用支持高分辨率及最高 85 MHz 像素时钟数字视频信号编码传输的显示串行器、解串器芯片组,以简化显示接口的控制、时钟及数据信号为单对差分信号,利用单对 CAT-6 类双绞线在图像处理板与显示模块间传输信号。如图 2(b)所示,显示模块的显示解串器接收图像处理板输出的串行差分信号,将其解码还原为并行视频信号后传入 OLED 显示。

## 2 软件设计

### 2.1 嵌入式 Linux 内核移植

当前主流的嵌入式操作系统有 VxWorks、Windows CE 和 Linux 等<sup>[7]</sup>。TI 公司为 DM3730 提供了开发支持包 DVSDK4.02.00.06,涵盖了支持 OMAP 架构微处理器的 Linux 2.6.32 内核,平台的 Linux 系统移植以该内核为基础。

在 Windows 交叉编译环境下开发 Linux 内核及驱动,需在内核源码顶层目录下 Makefile 文件中指定交叉编译工具链。配置内核选项并编译后在/arch/arm/boot 路径下得到内核镜像 uImage。

### 2.2 探测器驱动开发

Linux 系统下设备的运行离不开驱动程序的支持。设备驱动程序充当了硬件和操作系统连接的桥梁,并融入在内核中。当驱动程序按照操作系统给出的独立于设备的接口而设计时,应用程序就可以使用统一的系统调用接口访问各种设备<sup>[8]</sup>。DVSDK 的 Linux 内核仅提供了 WG7310、micro SD 卡和 LCD 等外设的驱动程序,针对探测器串行器需开发视频设备驱动程序。

Linux 视频设备驱动程序开发遵循 V4L2 (Video for Linux 2) 驱动框架,通过实现 V4L2 相关命令为上层应用程序提供标准接口。在 Linux 系统中,视频设备的设备节点为/dev/videoX,对应主设备号 81,次设备号分布在 0~63 范围内。Linux 下 DM3730 的 Camera 驱动框架与 OMAP 系列产品一脉相承,由 V4L2 Master 驱动、ISP 和探测器驱动三个部分组成,如图 3 所示。内核文件 omap34xxcam.c 实现了 V4L2 驱动中与平台相关的 V4L2 主设备以及 DM3730 Camera 接口相关的配置。图像传感器驱动实现了与平台无关的 V4L2 从设备,驱动开发工作集中于此。

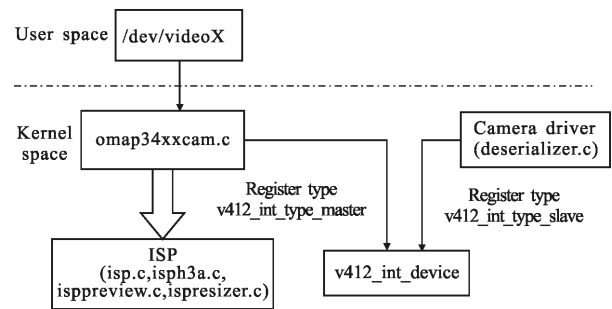


图 3 DM3730 视频设备驱动框架

Fig.3 Block diagram of video device driver for DM3730

探测器解串器解码得到并行数字视频信号并传入 DM3730,且通过 DM3730 I<sup>2</sup>C 接口配置其片内寄存器。上述两个特征使得探测器解串器在功能和控制方式上与常规探测器一致,决定探测器解串器的 Linux 驱动程序可按照 V4L2 视频输入设备驱动框架实现。驱动程序实现 v4l2\_int\_ioctl\_desc 类型结构体变量中像素格式、图像分辨率及颜色空间等参数设置相关的函数,通过预设值或 ioctl 句柄接收应用层传递的配置信息完成设备初始化。

V4L2 框架虽提供对数据时序性和视频缓冲区的管理,却不直接操作硬件,需通过 I<sup>2</sup>C 接口完成设备配置。探测器解串器作为 I<sup>2</sup>C 从设备,通过在平台的板级文件中设置结构体变量 i2c\_board\_info,从而向系统注册 I<sup>2</sup>C 设备地址为 0x60 的 i2c\_client 结构体变量。在驱动程序内实现 i2c\_driver 结构体变量,于 probe 函数中设置解串器内主、从设备 ID 和别名寄存器,并使用 v4l2\_int\_device\_register 函数完成 V4L2 主设备注册和从设备绑定。当驱动和设备匹配成功,系统自动调用 probe 函数生成对应设备号 81:0 的设备节点/dev/video0。

### 2.3 OLED 驱动开发

OLED 的正常显示以在其驱动程序内完成对显示串行器、OLED 微显示器和 DM3730 显示接口的正确设置为前提。OLED 作为远程从机挂载在显示器解串器的远程 I<sup>2</sup>C 总线上,OLED 驱动程序向 Linux 系统注册显示串行器的 I<sup>2</sup>C 设备和驱动,并使之工作在 PASS THROUGH 模式,建立起远程 I<sup>2</sup>C 总线和双向控制通道的通信连接,以便 DM3730 通过 I<sup>2</sup>C 接口访问 OLED 内部寄存器。

使能 OLED 微显示器,并使之工作在 24 bit RGB444、“外同步+DE”同步信号模式以及逐行扫描



状态下。根据 OLED 数据手册所提供上述工作状态下视频信号时序相关信息,将分辨率、像素时钟频率及同步信号的脉冲宽度、前后廊参数添加到 OLED 驱动程序,完成 DSS 输出视频信号的调整。

### 2.4 应用程序开发

视频采集与显示应用程序为平台提供实时视频显示功能,并在 V4L2(Video4Linux2)框架下开发。V4L2 是 Linux 下视频设备的驱动程序框架,通过加载视频采集、显示设备的驱动程序,使探测器串行器与 OLED 被分别映射成设备文件/dev/video0 和/dev/video2,应用层可像访问普通文件一样对其执行各种操作。

通过设备节点,应用程序完成对探测器串行器和 OLED 的初始化操作,包括设备文件打开、设备功能获取、视频格式查询与设置、帧缓冲申请和到用户空间的映射。在 V4L2 框架下,视频帧缓冲在队列中以三帧轮转的形式运作,以提供连续、稳定的视频采集和显示功能。采集、显示帧缓冲经历出队、入队、出队的循环过程。程序将填满的采集帧缓冲出队列经过处理后,拷贝至显示帧缓冲,实现视频的显示。应用程序设计流程如图 4 所示。

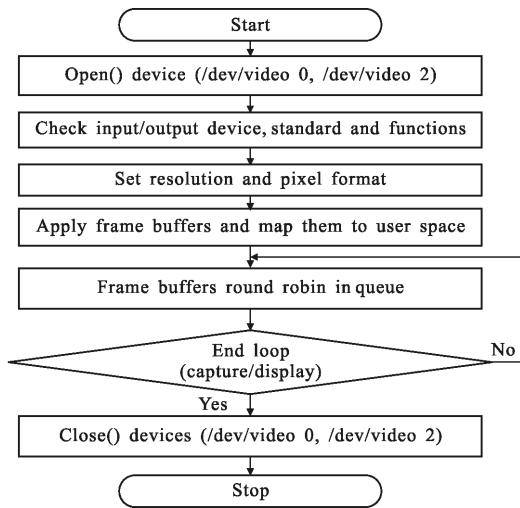


图 4 应用程序流程图

Fig.4 Flow chat of application program

## 3 平台性能测试

依据软硬件设计搭建平台,如图 5 所示。虚线框内为探测器模块,细实线框内为显示模块,粗实线框内为图像处理板。根据平台应用背景,针对平台重量、功耗和成像效果设计测试实验。

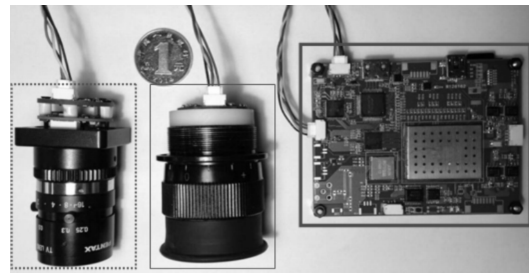


图 5 应用于可穿戴微光成像系统的嵌入式平台

Fig.5 Embedded platform applied to wearable low-light imaging system

### 3.1 平台重量与功耗

平台硬件总重量实测 62 g,其中图像处理板 44 g,探测器模块 12 g,显示模块 6 g。其轻巧的特点使用户不会因为负重而感疲惫。结合相应的光学系统,构成了功能丰富的完整系统。

选用电源 GWINSTEK GPC-3303S 为平台提供 5 V 直流总电源输入,根据电源实时显示电压、电流值计算平台功耗水平。平台功耗测试针对两种不同工作模式展开,即所有模块均工作的模式一及仅使图像处理板与显示模块工作的模式二。模式一提供了微光视频的实时显示功能。模式二配合未来计划开发的应用程序可提供对 micro SD 卡或 NAND Flash 内已存视频、图像的回放功能。

根据表 1 数据,采用两节 2000 mAh 的 18650 电池供电,平台具备长时间工作特点。电池能够维持模式一的微光视频实时显示功能 3.6 h、模式二的视频回放功能 5.2 h。

表 1 平台功耗测试数据

Tab.1 System power consumption test datas

Mode	Description	Voltage /V	Current /mA	Power consumption /W
1	Camera+OLED+ Image processing board	5	835	4.17
2	OLED+Image processing board	5	560	2.81

### 3.2 成像效果

暗室环境下,平台在 0.7 lx 和  $6 \times 10^{-2}$  lx 两种量级的光照度条件下分别采集靶标图像,如图 6 所示。环境光照度降至  $10^{-2}$  lx 量级时,相比光照充足时所采图像变得模糊并出现明显噪点,但靶面条纹依然

可以分辨,为视频显示和潜在图像处理需求提供了高质量的微光图像。

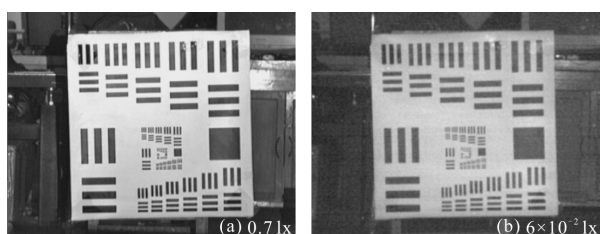


图 6 不同环境照度场景下平台成像效果

Fig.6 Platform imaging demonstration with different ambient light illumination

### 3.3 显示效果

不同于常规 Linux 命令行操作方式,平台搭载 Angstrom 桌面文件系统,为用户提供熟悉便捷的可视化窗口操作方式,使人机交互更为友善。

硬件平台配合应用程序,实现了视频采集、存储和近眼实时视频显示。通过目视实际观察到的 OLED 显示画质清晰,细节丰富,视频显示流畅,视觉感官舒适。图 7(a)是平台采集并存储的室内实验场景的灰度图像,图 7(b)是在相同场景下另一台摄像机透过目镜光学系统拍摄到的 OLED 实时视频显示画面,由于通过目镜拍摄,无法获得和人眼观察相应的良好效果。

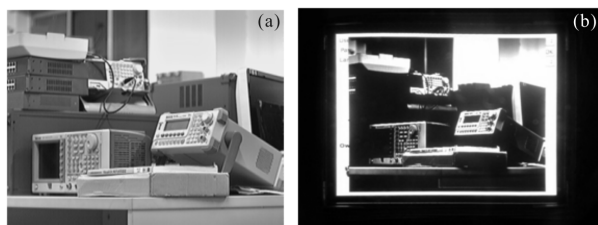


图 7 平台显示效果演示

Fig.7 Platform display demonstration

## 4 结论

文中以 Jorjin AP 模块为核心设计了应用于微光环境下目标辅助观察的智能可穿戴嵌入式平台。平台可流畅运行嵌入式 Linux 桌面系统,具备强大的算法处理能力,实现了低照度下视频及图像的采集、存储和实时近眼显示,所采视频清晰可辨,视频显示流畅、感官舒适且无颗粒感。平台可建立稳定快速的 Wi-Fi、蓝牙无线连接,所采用的视频信号差分方式

可保证远距离传输和稳定的工作性能,已具备低功耗、轻重量及夜视等特点。

平台的差分视频信号工作频率较高且采用了无屏蔽双绞线传输。在实际使用中,当受到强电磁辐射干扰时会导致视频画面轻微的抖动,之后的新版本硬件可进而采用带屏蔽的双绞线或射频同轴电缆代替现有传输线以解决上述问题。

文中所述平台仍为原型设计,在后期的产品化进程中可在此基础上进一步完成硬件裁剪、应用程序界面开发和穿戴式机械结构设计,从而更好地体现“以人为本”、“释放双手”的设计理念。

### 参考文献:

- [1] Cheng Dongyi, Xiahou Shiji. The development of wearable computing [J]. *Communications of the China Computer Federation*, 2011, 7(8): 8-14. (in Chinese)
  - [2] Andrés A Calvo, Saverio Perugini. Pointing devices for wearable computers [J]. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2014, 17: 1.
  - [3] John Kim. The origin of the see-through graphical interface: World War II aircraft gunsights and the status of the material in early computer interface design [J]. *Convergence: The International Journal of Research into New Media Technologies*, 2015, 21(2): 213-227.
  - [4] Fernando Maymi, John Surdu, Andrew Hall, et al. Modeling the wireless network architecture of Land Warrior [C]// Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2002, 1: 960-961.
  - [5] Wang Hanghang. Research and implementation on video coding system based on TMS320DM8168 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 59-64. (in Chinese)
  - [6] Zhang Wenwen, Bai Yonglin, Ouyang Xian. Intelligent streak camera with OLED display [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 484-488. (in Chinese)
  - [7] Tang Xinyi, Peng Dingxiang. Embedded real-time signal processing technology in IR image tracking system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 379-383. (in Chinese)
  - [8] Song Baohua. Explain of Linux Device Driver Development: Based on Linux 4.0 Kernel [M]. Beijing: The China Machine Press, 2015: 4-5. (in Chinese)
- 宋宝华. Linux 设备驱动开发详解:基于最新的 Linux4.0 内核 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 4-5.