

基于多板协同的多通道内窥镜图像处理系统

陈传阳^{1,2}, 张金刚^{2,3}, 刘铁根¹

1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049; 3. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 陕西 西安 710126

【摘要】为满足内窥镜场景下立体成像的需求,本研究依据内窥镜系统的构成设计提出一种快速可实现、灵活可扩展的多板协同的多通道图像采集多线程图像处理方案,可基于已有的单通道图像处理电路板,实现多通道相机的同步触发和影像采集。根据所提方案搭建一套双通道图像采集双线程图像处理电子内窥镜系统,并与常规方案中设计的双通道图像采集单块图像处理电子内窥镜处理系统进行对比分析。搭建的立体电子内窥镜系统可以实现立体成像,图片分辨率固定为800×800像素,深度测量平均误差小于5%。基于所提设计方案搭建的双通道立体内窥镜立体成像效果显著、研发周期短、研发成本低、灵活性强,表明该方案可以实现并且可拓展到其他多通道系统,比如多通道不同焦距相机等。

【关键词】内窥镜;多通道;图像处理电路板;立体成像

【中图分类号】R318;TH776.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)08-1016-06

Multi-board cooperative multi-channel endoscope image processing system

CHEN Chuanyang^{1,2}, ZHANG Jingang^{2,3}, LIU Tiegeng¹

1. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China

Abstract: To meet the requirements of stereoscopic endoscopic imaging, a fast, achievable, and flexible multi-board collaborative multi-channel image acquisition and multi-thread image processing scheme is proposed based on the composition design of the endoscope system. It enables synchronous triggering and image acquisition of multiple-channel cameras using existing single-channel image processing circuit boards. A dual-channel image acquisition and dual-thread image processing electronic endoscope system is built according to the proposed scheme and compared with the conventional scheme which designs a dual-channel image acquisition single-thread image processing electronic endoscope system. The built electronic endoscope system can achieve stereoscopic imaging for a fixed image resolution of 800×800 pixels with an average depth measurement error less than 5%. The dual-channel stereoscopic endoscope imaging system constructed based on the proposed scheme demonstrates high stereoscopic imaging quality, short development cycles, low development costs, and high flexibility, indicating its feasibility and scalability to other multi-channel systems, such as multi-channel cameras with different focal lengths.

Keywords: endoscope; multi-channel; image processing circuit board; stereo imaging

前言

内窥镜在各个领域的应用十分广泛,尤其在医

疗领域更是占据着不可缺失的地位,医生借助内窥镜可以顺利进入复杂的内腔器官,更好地对病灶进行观察诊断,提高诊断以及手术的准确性^[1-2]。医用内窥镜从最初的硬性内窥镜到纤维内镜再到主流电子内窥镜,向着小型化、多样化、便携化、智能化的趋势发展^[3-5]。目前医用电子内窥主要是基于简单的单通道成像,影像比较单一,不能实现更复杂的成像和图像增强功能,如深度信息获取、多焦距显示等^[6]。随着科学技术的发展,传统的单通道内窥镜已不能满足检测要求,对内窥镜的需求不断提升,趋向从多

【收稿日期】2023-03-01

【基金项目】中国科学院科研仪器专项(YJKYYQ20180039)。

【作者简介】陈传阳,硕士研究生,研究方向:医学内窥成像,E-mail: yangcctel@163.com;刘铁根,教授,研究方向:光电检测技术,E-mail: tgliu@tju.edu.cn

【通信作者】张金刚,教授,研究方向:智能成像技术、医学内窥成像,E-mail: zhangjg@ucas.ac.cn

维度、多通道展示病灶信息,如深度信息、多谱段增强、不同视野切换等^[7]。针对以上需求,研发一套全新的多通道内窥电子学系统需要设计电路原理图、电磁兼容、电路板制造加工和功能调试等,研发周期长、研发成本高;而通过双通道相机获取深度信息实现双目立体显示便能辅助医生对病灶进行定位,如使用此方案进行手术导航的达芬奇手术机器人^[8]。

电子内窥成像系统主要由图像采集模块、图像处理模块、光源模块以及图像显示模块构成,图像处理模块是内窥镜的核心,对如何基于已有单通道内窥镜图像处理电路板快速升级满足医生实际需求具

有重要意义^[9-10]。电子内窥镜系统构成如图1所示。本研究从电子学角度对内窥镜系统提出一种多通道图像采集多线程图像处理的设计方案,主要针对电子内窥镜系统中的图像处理模块进行改动,增加图像处理模块内部图像处理电路板的数量完成多通道采集图像的处理。以双通道图像采集多线程图像处理的立体电子内窥镜为例,基于提出的方案搭建双通道图像采集多线程图像处理立体电子内窥成像系统,然后与常规电子学方案的立体电子内窥镜从拓展性、研发周期、灵活性方面进行对比分析,最后从深度测量误差方面分析该设计方案的可行性。

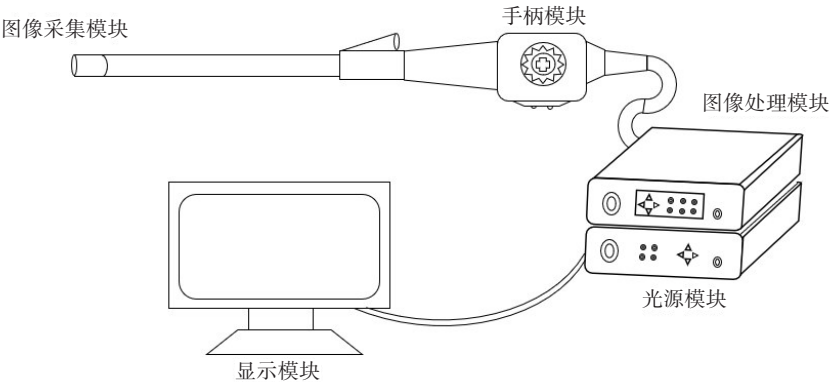


图1 电子内窥镜系统构成
Figure 1 Electronic endoscope system composition

1 理论分析

1.1 内窥镜工作原理

电子内窥镜通过图像传感器互补式金属氧化物半导体(CMOS)或电荷耦合器件(CCD)将光信号转换成电信号,再经过图像处理器处理采集数据并输出视频信号到显示器^[11-12]。目前图像处理器主要分为PC方案和嵌入式方案^[13-14],嵌入式方案又分为数字信号处理(DSP)方案^[15-16]、现场可编程门阵列(FPGA)方案^[17-18]、精简指令集处理器(ARM)方案^[19],其中DSP方案采用专用的数字信号处理技术的芯片,能快速完成大量编码解码运算^[12],图像处理速度较快、技术相对成熟,能满足双目立体电子内窥镜大量图像实时处理需求。

1.2 双目立体成像原理

双目立体视觉机器的一种重要形式是基于视差原理通过多幅图像获取物体三维几何信息,是机器视觉的一种重要形式^[20]。双目视觉采用单个相机从不同角度不同时刻获取待测物的两幅图像或者两个恢复出物体三维信息。相较于单目三维信息获取,双目立体成像原理简单,成本低廉且易于实现,基于

视差原理,相机能从不同角度同时获取周围景物的两幅图像,故本研究采用双相机方案实现立体显示。双相机依据人眼模型放置,如图2所示,左右相机在同一平面上成像, x 轴重合, y 、 z 轴各自平行并垂直各自成像平面,基线 B 为光心 O_l 与 O_r 的距离。理想状态下 $y_l = y_r$,根据三角形相似原理,左右成像点 $P_l(x_l, y_l)$ 、 $P_r(x_r, y_r)$ 坐标为式(1)所示:

$$\begin{cases} x_l = f \frac{X}{Z} \\ x_r = f \frac{X - B}{Z} \\ y_l = y_r = f \frac{Y}{Z} \end{cases} \tag{1}$$

其中, f 为相机的焦距, X 、 Y 、 Z 为待测点 P 在空间中的位置。根据式(1)可得视差 d 为式(2):

$$d = x_l - x_r = f \frac{B}{Z} \tag{2}$$

在双目立体电子内窥成像系统中,相机的焦距 f 与基线 B 固定不变,视差的大小取决于相机与待测点的距离 Z ,即物体的深度信息取决于相机参数。随着深度神经网络在自动驾驶领域的广泛应用,一些前

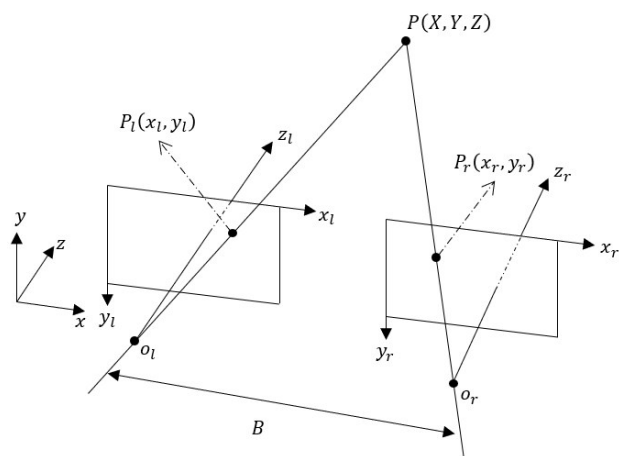


图2 平行双目相机模型
Figure 2 Parallel binocular camera model

沿工作基于上述原理搭建的模型能生成实时深度映射信息^[21-23]。

1.3 多板协同的多通道方案

不同的医用电子内窥镜的组成模块基本一致^[6-10]。单通道二维电子内窥镜与双通道立体电子

内窥镜的主要区别在于相机的通道数和图像处理模块中的电路板功能不同。传统的单通道电子内窥镜系统采用单个图像处理电路板对收集到的数据进行处理。现有双通道电子内窥镜系统采用常规专门设计的电子学方案,图像处理模块采用单个图像处理电路板对收集到的两路数据进行处理,存在不兼容不同型号的图像传感器、设计专用的图像处理电路板开发周期长等问题。多通道图像采集多线程图像处理方案是基于单通道电子内窥镜图像处理电路板,保持图像处理电路板数量与相机数量相同,设计控制模块对多块单通道图像处理电路板同步控制,从而驱动多相机采集图像,不需要专门设计图像处理电路板。本研究搭建的立体电子内窥镜系统采用两块完全相同的单通道电子内窥镜的图像处理电路板对采集的两路数据分别进行数据处理,处理后的数据同步输出显示,在单通道图像处理电路板基础上实现立体显示,方案框架如图3所示。本方案采用成熟的单通道电子内窥镜的图像处理电路板,研发周期短、开发成本低、可拓展性强、易拆卸。

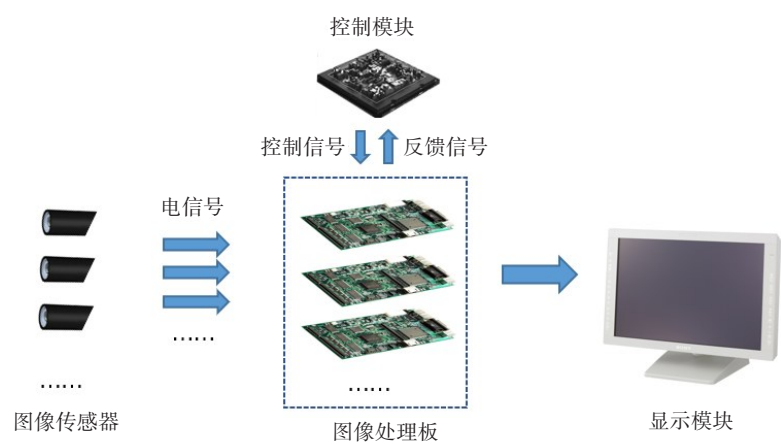


图3 多通道输入多处理板输出图像处理方案
Figure 3 Image processing scheme of multi-channel input and multi-processing board output

2 实验验证

2.1 系统构成

为验证本方案的可行性,搭建双通道图像采集双线程图像处理立体电子内窥镜系统。本系统图像采集模块选用两组豪威集团的OV6946传感器,像素高、功耗低、视野宽、体积小;两块OV426芯片,专门用于小型医疗器械上的单芯片解决方案;图像处理模块板选用两块相同的图像处理电路板,能够满足大量图像的实时处理;光源选用LED类型,寿命长、效率高;控制器选用开源微控制器板 Arduino pro mini,编译环境简便、接口丰富拓展性强;显示器选用

艺卓 CurafOPR 系列的 EX2620-3D,需要配合偏振眼镜使用。

2.2 系统工作流程

光源通过光导纤维把光传递到内窥镜导管前端,为图像采集提供光照;两路OV6946图像传感器的内部发生光电效应,将光信号转换成电信号,经过OV426芯片的模数转换后输出两路数字视频信号,然后分别通过低压差分信号方式同时传递给图像处理模块内的两块图像处理电路板;接收到信号后,DSP芯片对信号处理后并行输出;经过内置算法滤波、缩放处理好后,信号输出到显示端;控制器把按

键板的指令信号同时发送给两块图像处理电路板,在信号处理过程中同时接收按键板的控制命令,系统框架如图4所示。搭建的立体电子内窥镜系统在工作过程中要保证两路图像处理电路板同步进行数据处理,采用控制器接收按键板的发出的信号,控制器对接收按键板控制信号进行处理后,输出两路同步的信号并同时把信号传递给两块图像处理电路板,通过控制模块同时控制两路图像处理电路板进行图像拍照、冻结、录像等操作。

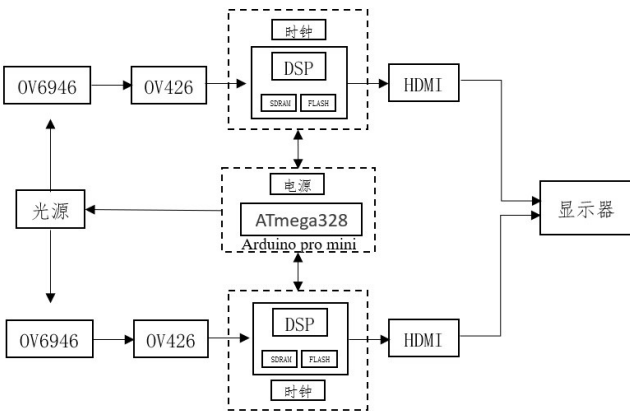


图4 双通道输入双图像处理电路板输出的立体电子内窥镜框架
Figure 4 Stereo electronic endoscope frame of dual-channel input and dual-image processing circuit board output

2.3 结果分析

为分析本方案的可行性,搭建的双目立体电子内窥镜系统需要从以下3方面分析:(1)双通道输入影像信号的同步;(2)立体图像演示;(3)搭建的立体电子内窥镜深度测量误差。根据本方案搭建的立体电子内窥镜系统与常规电子学方案的设计的立体电子内窥镜系统在图像处理模块存在差异,其他模块在完全相同条件下展开实验。实验选用人体支气管橡胶模型作为测试环境,实验过程中图像处理器保存的图片分辨率固定为800×800像素。在按键板的控制下,两块存储介质同时存储两块图像处理电路板的获取的图像,实验结果如图5所示,根据保存的图像可以看出所搭建的系统中两块图像处理电路板能正常同步显示两路相机采集的图像。当搭建的内窥镜前端插入支气管模型测试时,手机相机拍摄显示器显示的存在视差的图像如图6所示。20名测试人员佩戴偏振眼镜后可以观察到立体图像,根据显示器成像结果以及测试人员反馈成像效果好,搭建的系统可以实现立体成像目标。利用搭建的立体深度映射的深度卷积网络模型,将内窥镜系统在人体肠道模型中获取的图像生成视差图,再根据式(2)建立模型^[24-26],将视差图转化成深度图,同时得到预测

的深度数据,样机在人体支气管模型中靶标(图像红色方框所示),如图7所示。读取获取的深度卷积网路预测的深度值大小并与实际测量的深度数值进行比较并计算误差,结果如表1所示。本方案搭建的双目立体电子内窥镜在支气管橡胶模型深度测量平均误差为4.2%。

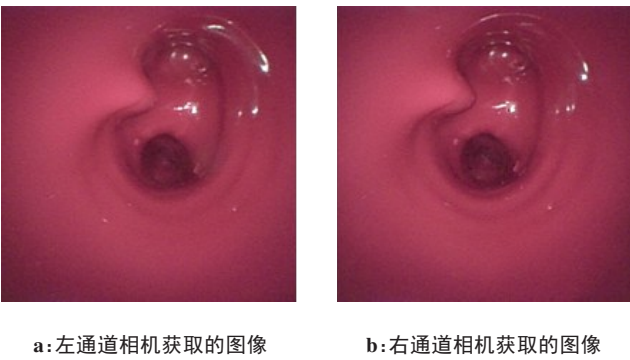


图5 搭建的内窥镜人体支气管模型中双通道相机同时获取的图像
Figure 5 Image acquired by two cameras simultaneously in the constructed endoscope human bronchial model

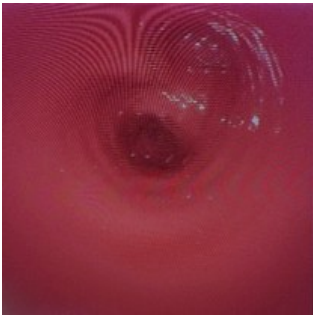


图6 搭建的内窥镜在显示器显示的立体图像
Figure 6 Stereoscopic images displayed on the monitor of the built endoscope

3 结论

为解决立体成像内窥研发周期长、研发成本高的问题,本研究基于提出的多板协同设计方案,搭建立体电子内窥镜系统。该电子内窥镜系统能实现立体显示并且深度测量平均误差小于5%。实验表明多板协同的多通道图像采集多线程数据处理内窥镜解决方案可以实现并能满足目前医生在内窥场景下立体成像的需求。本方案相对常规方案中专门设计的双通道电子内窥处理系统的方案具有以下特点:(1)拓展性强,能拓展到其他多通道系统,如多通道不同焦距相机等;(2)研发周期短、研发成本低,能在单通道图像处理电路板基础上快速升级;(3)灵活性强,能根据医生实际需求进行二维显示或三维显示切换。

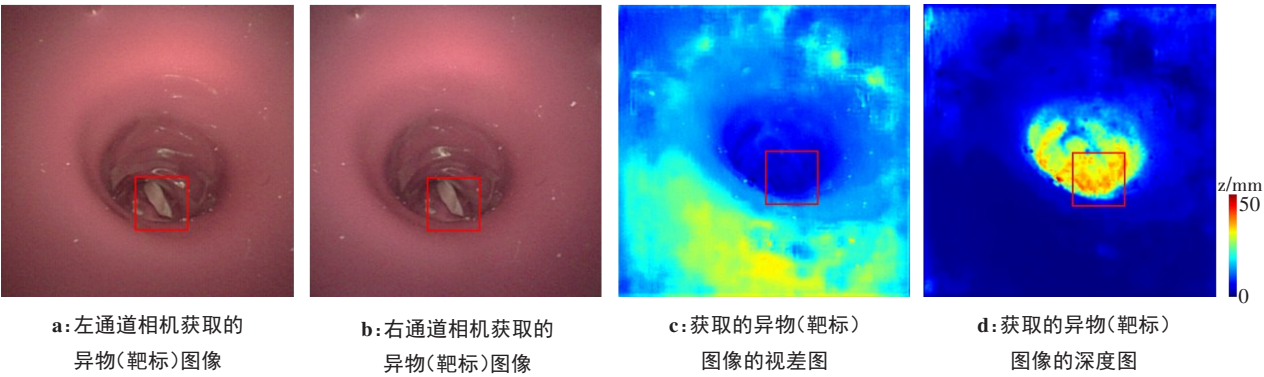


图7 搭建的内窥镜在人体支气管模型中获取的图像及网络训练生成的图像

Figure 7 Images acquired by the constructed endoscope in the human bronchial model and images generated by network training

表1 支气管橡胶模型深度测试结果

Table 1 The human bronchial model deep test results

实际深度/mm	估计深度/mm	误差/%
30.944	29.697	4.2
29.470	28.391	3.8
28.438	29.840	4.7

【参考文献】

[1] 孟羽俊, 高霞. 常用诊断技术[M]. 北京: 人民军医出版社, 2010. Meng YJ, Gao X. Common diagnostic techniques [M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2010.

[2] Alberti DD, Riboni F, Cosma S, et al. Feasibility and acceptability of office-based polypectomy with a 16F mini-resectoscope: a multicenter clinical study[J]. J Minim Invasive Gynecol, 2016, 23(3): 418-424.

[3] 赵承奇, 雷晴峰, 张炜, 等. 便携式野战外科内窥镜系统-LED前置光源在便携式野战外科内窥镜中的应用与设计[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(6): 5295-5300. Zhao CQ, Lei QF, Zhang W, et al. The research of portable endoscope system-the design and application of LED lead light source in the portable surgical field endoscope[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(6): 5295-5300.

[4] 尤若宁, 许海树, 张明旭, 等. 医用便携式内窥镜关键技术及未来发展方向[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(3): 123-126. You RN, Xu HS, Zhang MX, et al. Research on key technology of portable medical endoscope[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(3): 123-126.

[5] 陈晓冬, 郝道银, 宋玲玲, 等. 医用电子内窥镜成像系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(10): 1047-1051. Chen XD, Yu DY, Song LL, et al. Design of medical electronic endoscope imaging system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(10): 1047-1051.

[6] 许敏芬. 高清3D电子内窥镜图像处理系统研究与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. Xu MF. High-definition 3D electronic endoscope image processing system research and development[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[7] 王帝. 微型双目内窥镜与双目匹配技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019. Wang D. Research on miniature binocular endoscope and binocular matching technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[8] 张伟. 达芬奇机器人手术系统-原理、系统组成及应用[J]. 中国医疗器械信息, 2015, 21(3): 24-25. Zhang W. Da Vinci rototit surgical system--principle, composition and application of system[J]. China Medical Device Information, 2015, 21(3): 24-25.

[9] 孙正捷, 黄丹, 张沁园, 等. 电子内窥镜的电磁兼容特性分析[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(4): 135-137. Sun ZJ, Huang D, Zhang QY, et al. Characteristic analysis of electromagnetic compatibility of electronic endoscope[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2016, 37(4): 135-137.

[10] 汪正道. 医用电子内窥镜系统的设计与实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017. Wang ZD. Design and implementation of medical electronic endoscope system[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.

[11] 卢毅. 医用内窥镜的结构及常见故障处理[J]. 中国医疗设备, 2011, 26(10): 134-135. Lu Y. Discuss the structure of the endoscopic medical and common fault handling[J]. China Medical Devices, 2011, 26(10): 134-135.

[12] 陈英俊, 黄平. 图像传感器在体内无线内窥镜机电系统的应用[J]. 中国医学影像技术, 2009, 25(10): 1879-1882. Chen YJ, Huang P. Application of image sensor in wireless endoscopic micro-electro-mechanical-system [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2009, 25(10): 1879-1882.

[13] 叶伟. 高清电子内窥镜嵌入式信号处理技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013. Ye W. Research on embedded signal processing technology of high-definition electronic endoscope[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.

[14] 周文光, 王春飞, 毛坤剑, 等. 一种新型内窥镜视频系统的设计[J]. 中国医学装备, 2015, 12(3): 30-33. Zhou WG, Wang CF, Mao KJ, et al. Design of a new endoscopic video system[J]. Chinese Medical Equipment, 2015, 12(3): 30-33.

[15] Liu X, Li L. FPGA-based three-dimensional endoscope system using a single CCD camera[C]//2015 IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE, 2015: 614-618.

[16] 孟占红, 赵保军. 基于DSP的实时图像压缩软件优化技术研究[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1558-1561. Meng ZH, Zhao BJ. The study on software optimizing technology of real-time image compression system based on DSP [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1558-1561.

[17] 刘速, 孙伟峰, 王洪君. 目标跟踪系统在FPGA上的实时实现[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(5): 168-173. Liu S, Sun WF, Wang HJ. Real-time object tracking system on the FPGAs [J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(5): 168-173.

[18] 赵保军, 史彩成, 毕莉, 等. 基于FPGA和DSP实现的实时图像压缩[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1317-1319. Zhao BJ, Shi CC, Bi L, et al. Implementation of Real-Time 2D-DCT with FPGA and DSP[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1317-1319.

[19] 宋璐, 卫亚博, 冯艳平. 基于ARM9的便携式医用电子内窥镜的设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(12): 73-75. Song L, Wei YB, Feng YP. Design of portable medical electronic endoscope based on ARM9[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(12): 73-75.

[20] 冯大伟, 姜会林, 张光伟. 基于双目立体视觉的医用三维电子内窥镜系统[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(1): 38-42.

- Feng DW, Jiang HL, Zhang GW. 3D medical electronic endoscope system based on binocular stereo vision[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(1): 38-42.
- [21] Wang XZ, Nie Y, Lu SP, et al. Deep convolutional network for stereo depth mapping in binocular endoscopy[J]. IEEE Access, 2020(99): 11.
- [22] Wang Y, Lai Z, Huang G, et al. Anytime stereo image depth estimation on mobile devices[C]. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 5893-5900.
- [23] Chang JR, Chen YS. Pyramid stereo matching network [C]// Proceedings of the IEEE Conference On Computer Vision and Pattern Recognition. 2018: 5410-5418.
- [24] Khamis S, Fanello S, Rhemann C, et al. Stereonet: guided hierarchical refinement for real-time edge-aware depth prediction[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018: 573-590.
- [25] Wang Y, Lai Z, Huang G, et al. Anytime stereo image depth estimation on mobile devices[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 5893-5900.
- [26] Xu H, Zhang J. Aanet: adaptive aggregation network for efficient stereo matching[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020: 1959-1968.

(编辑:谭斯允)