

文章编号:1007-2780(2016)12-1161-07

一种基于 FPGA 的彩色图像实时增强方法

侯天娇^{1,2}, 郝志成^{1*}, 朱 明¹, 陈典兵^{1,2}, 杨 航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:彩色图像中包含了丰富的颜色信息,能够直观地感知世界,它使我们的工作生活更加便利。但是,由于一些恶劣环境的影响,彩色图像的成像会出现模糊、目标被淹没、对比度偏低等问题。针对此问题,本文设计了一款基于 FPGA 的嵌入式实时图像增强处理系统。并提出一种灰度值拉伸变换方法,将该方法直接对 RGB 色彩空间的 R、G、B 三分量进行增强处理,既增大了灰度值的变化范围提高人眼视觉效果,也避免了色彩空间转换带来的计算量及节省了处理时间满足了工程的实时性要求。目前该系统已在实际工程项目中应用,工程结果表明该系统工作稳定有效,能够有效解决工程中出现的光线条件差,低对比度情况下的彩色图像增强问题。

关键词:彩色图像增强;RGB 空间;拉伸变换;FPGA

中图分类号:TP751.1;TP317.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163112.1161

Real-time color image enhancement method based on FPGA

HOU Tian-jiao^{1,2}, HAO Zhi-cheng^{1*}, ZHU Ming¹, CHEN Dian-bing^{1,2}, YANG Hang¹

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

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

Abstract: Color image contains rich detail information, and can apperceive the world intuitively. It makes our work and life more convenient. However, due to the impact of bad environment, it will cause to obtain a degraded image, such as the captured image is usually be blurred, the target is submerged. The existing color image enhancement methods are mainly post-processing approaches. It is difficult to achieve the real-time requirement for identification and tracking in practical engineering applications. To solve this problem, an embedded real-time image enhancement processing system is designed based on FPGA. The system carries on the gray value stretch transformation to each color component of RGB color space and outputs real-time enhancement image. It not only increases the range of gray value to improve the visual effect of the human eyes, but also saves processing time to meet the real-time requirements of the project. It has been put into application in the actual project. The engineering results show that the system works stably, and can effectively solve the low contrast and

收稿日期:2016-08-10;修订日期:2016-09-12.

基金项目:国家自然科学基金(No.61401425)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61401425)

* 通信联系人, E-mail: haozhicheng9725@sina.com

insufficient light problem.

Key words: color image enhancement; RGB space; stretch transform; FPGA

1 引言

彩色视频图像^[1]从图像获取到显示器显示的过程中,在光照条件差的情况下,相机采集的图像质量下降,对比度低,不适于人眼观看^[2-3]。为了使显示输出的视频图像达到更好的显示效果、提高人眼对图像信息的辨别能力,通常对视频图像进行图像增强处理。图像增强技术不只在军事遥感、航空航天方面发挥着重要作用,在医学诊断、公共安全和数字娱乐方面也具有广泛的应用。

图像增强技术主要有空间域法和频域法,频域法是在图像是傅里叶变换的基础上进行的,该图像增强处理更适合于软件实现,空间域法是对图像平面各像素的灰度值直接进行处理,更适合于硬件系统实现。在各种彩色图像增强技术中,比较常用的是先把彩色图像从 RGB 色彩空间^[4-6]转换为 HSI 色彩空间,然后在保持色调变量 H 不变的情况下,对亮度变量 I 进行增强,但是该方法在空间转换的过程中,会增大计算量而且计算复杂度很高,耗费时间,不利于彩色图像的实时处理。直方图均衡方法^[7-9](空间域法),对图像进行增强处理是简单有效的,但是会出现过度增强以及噪声放大等情况,影响实验效果。因此研究学者们提出灰度拉伸变换^[10-11]即是对比度扩展,它的目的是扩展感兴趣的灰度区间并压缩不感兴趣的灰度区间,图像的视觉效果会更好。为了达到更好的彩色图像增强效果,并且降低时延、满足实时性,本文对灰度拉伸方法进行改进并应用到 RGB 色彩空间上,既满足了实时性也提高彩色增强的增强效果。

DSP 是最早的硬件实现图像增强,然而 DSP 不论是在图像接收还是在图像处理过程中都存在着延迟,实时性很难得到保障。之后出现 DSP+FPGA 的混合架构,但是实现 DSP 和 FPGA 的通信由比较复杂,并且价格成本也很高。现在 FPGA 的硬件结构已成为主流趋势,FPGA 特有的并行处理能力和其丰富的逻辑资源和乘除法器使其能完成高速的运算处理,并且系统结构具有

很强的灵活性^[12]。在这里设计一个基于 FPGA 的实时彩色视频图像硬件处理系统。

2 FPGA 彩色图像增强算法的原理

2.1 直方图均衡

一幅图像的直方图灰度范围是 $[0, L-1]$,先计算出每个灰度级的像素个数:

$$h(X_k) = n_k \quad (1)$$

式中: $k=0, 1, 2, \dots, L-1$; X_k 表示的是第 k 级灰度值; n_k 是图像中灰度为 X_k 对应的像素个数;

再计算出图像每个灰度级的概率密度函数 $P(X_k)$ 为:

$$P(X_k) = \frac{n_k}{M \times N}, \quad (2)$$

式中: M 是图像的行数, N 是图像的列数;

输入图像中灰度级为 X_k 的各像素映射到输出图像中灰度级为 S_k 的对应像素的公式为:

$$S_k = T(X_k) = (L-1) \times \sum_{j=0}^k P(X_j) = \frac{L-1}{M \times N} \sum_{j=0}^k n_j, \quad (3)$$

式中:映射 $T(X_k)$ 称为直方图均衡。

2.2 灰度值拉伸变换

灰度值拉伸变换即灰度值范围拉伸,包括二次函数变换、抛物线变换和线性变换等。最简单有效且易于实现的是线性变换,变换公式为:

$$\text{Data}' = \begin{cases} 0 & 0 \leq \text{Data} \leq A \\ \frac{255}{B-A} [\text{Data} - A] & A < \text{Data} < B \\ 255 & B \leq \text{Data} \leq 255 \end{cases} \quad (4)$$

Data' 和 Data 分别表示输出图像和输入图像的灰度值。经线性变换,拉伸了 A 到 B 之间的灰度值,同时对小于 A 和高于 B 的区间进行抑制。

这种方法虽然很好的增强了中间区域,但是当环境光线差,图像过暗的情况下,抑制小于 A 的区间会使得图像增强效果不明显,本文对灰度

值拉伸变换公式进行改进,将公式变换为:

$$\text{Data}' = k \frac{\text{Data} - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}}, \quad (5)$$

Max 和 Min 为求得的每帧图像灰度的最大最小值, k 为拉伸系数,为了得到更好的增强效果, k 值在实验中获取。

2.3 RGB 彩色空间增强

为了避免对 FPGA 外部存储器的应用,简化硬件电路,并且减少空间转换带来的延迟和彩色信息缺失,达到彩色视频的实时处理,本文是在空间域法的 RGB 空间上直接对彩色图像进行增强处理,即将改进后的灰度值拉伸变换分别应用到彩色空间的 R、G、B 三个分量上。基于 RGB 模型的彩色图像增强算法的基本思想是:分解 RGB 模型彩色图像为 3 个颜色分量,基于像素灰度值的点操作对分解后的 3 个彩色分量分别进行图像增强,最后将增强后的 3 个分量合成为新的彩色图像。该算法的关键是:基于分量像素值的最大值和最小值的计算选取及对比度拉伸系数的选取。

彩色图像 RGB 模型增强算法步骤如下:

(1) 输入图像:

通过 CameraLink 接口并行输入 RGB 模型彩色图像的 3 个彩色分量: R 分量、G 分量、B 分量。

(2) 计算一帧彩色图像的最大值 Max、最小值 Min:

并行扫描 R、G、B 3 个分量的每一行的各个像素点,取每行 3 个分量的 Max_行、Min_行,将所有行的 Max_行、Min_行进行累加后求平均,得到彩色图像一帧的 Max、Min。

(a) 因为 RGB 模型是分解后的 3 个彩色分量的相关性程度非常高的颜色模型,而颜色模型与彩色图像的增强过程是密切相关的,所以不是得到 3 个分量各自的 Max、Min,而是综合得到一帧彩色图像的 Max、Min。

(b) 一帧图像可能会出现纯白和纯黑的像素点,取所有行的 Max_行、Min_行进行平均而不是单纯的取一帧图像所有像素点的 Max、Min 值,能够充分的避免视频不稳定的情况,为后续进行增强处理提供了很好的数据。

(3) 分别计算增强后的 R' 分量、 G' 分量、 B' 分量:

将输入的 R 分量的像素值 Data_R 和上一步得到的一帧图像的 Max、Min 值代入公式(5)中得到 Data_R' ,如式(6):

$$\text{Data}_R' = k \frac{\text{Data}_R - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}}, \quad (6)$$

其中: Data_R 为输入的 R 分量像素点灰度值, Data_R' 为 R 分量增强后的像素点灰度值。

G 分量、B 分量的增强变换方法和 R 分量计算公式一样。

(4) 输出图像:

并行输出增强处理后的彩色图像的 3 个彩色分量,通过网盒和显示器进行输出显示。

3 FPGA 实现增强算法

3.1 硬件系统架构

该硬件系统通过 CameraLink 接口输入彩色视频图像,以 FPGA 为主处理器,实时完成彩色图像的增强处理,再将增强处理后的图像进行输出显示,系统框图如图 1 所示。

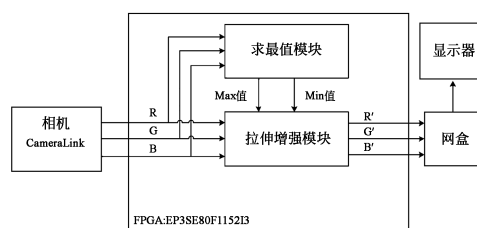


图 1 实时彩色图像增强系统硬件框图

Fig.1 Hardware block of real-time color image-enhancement system

FPGA 芯片采用 ALTERA 公司的 StratixIII 系列的 EP3SE80F1152I3,该芯片具有逻辑单元 80K、18 bit×18 bit 的嵌入式乘法器 672 个、PLL 8 个,最大可用 IO 数 744 个、器件的可配置位数达到 6 331 392 bit。该芯片的丰富资源足以满足本文算法的要求。

3.2 FPGA 工作原理

FPGA 内部两大主要模块:求最值模块和拉伸增强模块。

3.2.1 求最值模块

图 2 为 FPGA 内部的求最值模块。因为 FPGA 的并行能力,在求得图中所示一系列最大值的同时也并行求得对应最小值,这里只描述最大

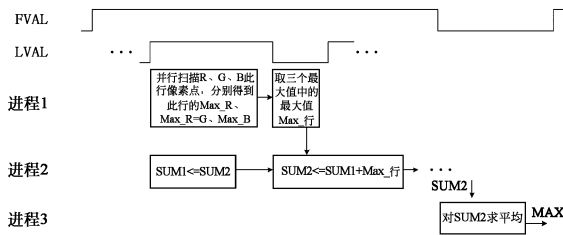


图 2 求最值模块

Fig.2 Module of seeking the most value

值的求取过程。

图中所示进程 1、进程 2、进程 3 为并行运算，FVAL 为场信号，LVAL 为行信号，SUM1 和 SUM2 是为了对所有行最大值求和设置的变量。行场时钟彩色图像信息进入求最值模块：

进程 1：

(1)场信号有效、行场信号也有效时，进程 1 并行扫描 R、G、B 3 个分量的每一行的各个像素点，R、G、B 3 个分量分别得到当前行的最大值 Max_R、Max_G、Max_B。

(2)场信号有效时、行信号无效时，将(1)中求得的当前行的最大值 Max_R、Max_G、Max_B 进行比较取 3 个值中的最大值得到当前行的最大值 Max_行。

进程 2：

(1)场信号有效、行信号也有效时，将上一行得到的 SUM2 赋值给 SUM1。

(2)场信号有效、行信号无效时，将 SUM1 和进程 1 中的(2)得到的 Max_行进行累加求和得到 SUM2。

进程 3：

场信号无效时，即一帧图像有效信息结束时，将进程 2 得到的 SUM2 除以一帧图像的行数即求平均，得到一帧图像的最大值 Max。场有效时，不进行任何操作。

得到一帧图像的最大值 Max 和最小值 Min 后输出给拉伸增强模块。

3.2.2 拉伸增强模块

FPGA 内部有并行的 3 个相同的拉伸增强模块。彩色图像的 R、G、B 3 个分量和 Max、Min 分别同时进入拉伸增强模块进行增强，如图 3 所示为拉伸增强模块。

同样以 R 分量为例，输入像素点灰度值为 Data_R，输出像素点灰度值为 Data_R'。

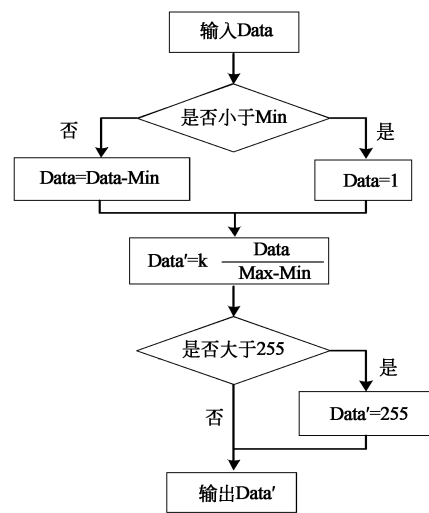


图 3 拉伸增强模块

Fig.3 Module of stretch enhancement

(1)输入 Data_R 后，条件判定是否小于 Min，若是，则将数值 1 赋给 Data_R，若否，将 Data_R 值减小 Min 值。求最值模块中得到的 Min 是每行像素最小值累加求平均，而不是一幅图像所有像素中的最小值，所有会出现 Data_R 值小于 Min 值的情况，若是不进行条件判定而直接相减的话会出现负数情况。

(2)判定结束后将 Data_R 代入公式(6)中，得到增强后的灰度值 Data_R'。因为灰度级为 8 的像素最大值为 255，所以一般的图像拉伸都会选取 K 值为 255，但是本文求最值模块中得到的 Max 是每行像素最大值累加求平均，而不是一幅图像所有像素中的最大值，会有一些输入的像素值大于 Max，如果将 K=255 代入公式(6)中，会得到很多大于 255 的像素点，影响实验效果。经多次实验得出 K=224 的情况下得到的溢出很少并且增强图像效果很好。

(3)为了不出现任何基色溢出而导致色调失真的情况，将增强后 Data_R' 进行条件判定是否大于 255，若是，则将数值 255 赋给 Data_R'，若否，Data_R' 值不变，判定结束后将 Data_R' 输出。

4 实验结果

实验采用的相机型号为 AD_080CL，通过 Coyote 工具对采集设备的配置，相机所采集到

的图像为 24 位彩色图像,图像大小为 $1\,024 \times 768$ 。为了验证实时彩色图像增强系统的有效性,搭建了实时仿真平台。设计中使用 QuartusII 中 SignalTapII 逻辑分析仪对彩色视频实时图像数据进行观察,如图 4。TV_R、TV_G、TV_B 分别为输入彩色图像的 R、G、B 三通道的数据,OUT_R、OUT_G、OUT_B 分别为增强后输出彩色图像的 R、G、B 三通道的数据。从实验仿真结果数据可看出,FPGA 实现的增强效果明显且满足实时性。

为了更好地对原图像和增强后的图像进行观察,清晰明了的完成相同场景相同时间的图像对比,本文在 FPGA 程序中设计了两路输出,一路输出原始图像,一路输出增强后的图像。图

5 和图 6 给出了两组在 FPGA 上实现后增强处理后的实验结果对比图,包含原始图像、在 RGB 空间上分别应用直方图均衡方法、拉伸变换及本文算法增强后的图像。

从图 4 和图 5 两组实验结果可以看出,由于实验采集图像时光线特别弱,(a)列的原始图像效果特别差,图中目标基本被淹没,肉眼很难看见图像信息。(b)列为在 RGB 色彩空间上应用直方图均衡方法进行增强处理,图中内容可以分辨出来,说明图像的对比度有所提高,但是有噪声过大的现象。(c)列为在 RGB 色彩空间上应用拉伸变换进行增强处理,图中有较好的对比度,但是图像过亮在一些区域出现了过增强的现象,而且颜色有失真现象。(d)列应用为本文算法增强后的图

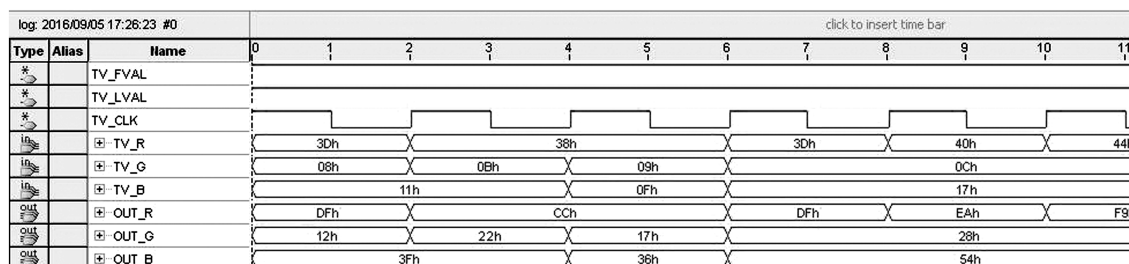


图 4 仿真结果

Fig.4 Simulation result

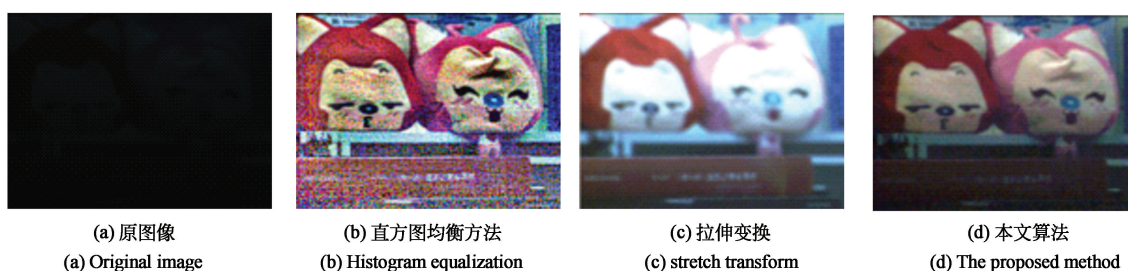


图 5 第一组实验结果

Fig.5 Experiment results of group 1

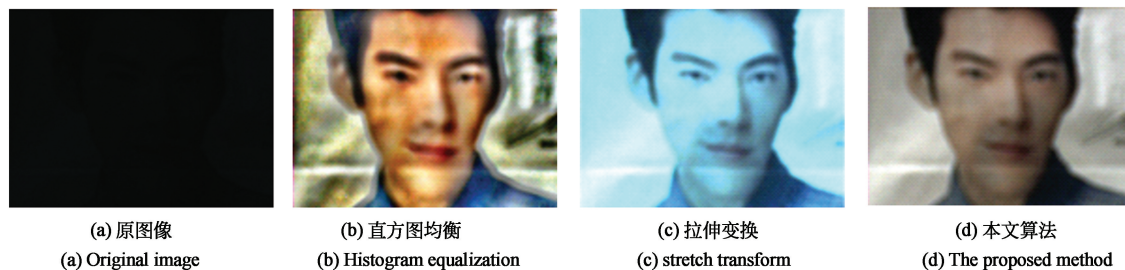


图 6 第二组实验结果

Fig.6 Experiment results of group 2

像,可以看出图像清晰且颜色信息明显,未出现过噪和过增强的现象。所以在光线照射条件极差的情况下,应用本文算法能得到清晰的、彩色信息明显的图像。

5 结 论

根据彩色图像 RGB 三分量颜色相关性非常

高的特点,对原彩色图像 RGB 三分量同比例增强,设计了一款基于 FPGA 的嵌入式实时图像增强处理系统。通过两组实验结果对比表明,本文算法在 FPGA 系统上实现后,对于光线条件极差的彩色图像,增强后图像边缘清晰、对比度高、彩色细节信息明显,人眼视觉效果显著性提高。且系统集成度高、图像处理速度快、实时性强,在军事和民用领域都有广泛的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] 许廷发,李俊涛,张一舟,等.真彩色传递双波段图像融合[J].中国光学,2014,7(3):402-410.
XU T F, LI J T, ZHANG Y Z, *et al.* True color transfer for dual band image fusion [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7 (3): 402-410. (in Chinese)
- [2] 方明,李洪娜,雷立宏,等.低照度视频图像增强算法综述[J].长春理工大学学报:自然科学版,2016,39(3):56-64,69.
FANG M, LI H N, LEI L H, *et al.* A review on low light video image enhancement algorithms [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology : Natural Science Edition*, 2016, 39(3): 56-64, 69. (in Chinese)
- [3] 王闻博,穆向阳,汤楠.低照度图像增强算法[J].计算机与现代化,2014(1):27-31.
WANG W B, MU X Y, TANG N. Algorithm of low illumination image enhancement [J]. *Computer and Modernization*, 2014(1): 27-31. (in Chinese)
- [4] 王建卫.基于对比度增强的彩色图像边缘检测算法[J].计算机技术与发展,2014,24(2):79-83.
WANG J W. An edge detection algorithm of color image based on contrast enhancement [J]. *Computer Technology and Development*, 2014, 24(2): 79-83. (in Chinese)
- [5] 韩磊,曲中水.一种 RGB 模型彩色图像增强方法[J].哈尔滨理工大学学报,2014,19(6):59-64.
HAN L, QU Z S. A kind of enhancement method of color image based on RGB color model [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2014, 19(6): 59-64. (in Chinese)
- [6] 史东承,倪康.基于 YCbCr 颜色空间背景建模与手势阴影消除[J].中国光学,2015,8(4):589-595.
SHI D C, NI K. Background modeling based on YCbCr color space and gesture shadow elimination [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 589-595. (in Chinese)
- [7] 蔡式东,杨芳.基于直方图修正的图像增强算法[J].光电子技术,2012,32(3):155-159,194.
CAI S D, YANG F. Image enhancement based on histogram modification [J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, 32(3): 155-159, 194. (in Chinese)
- [8] 范永杰,张亚萍,陈华.平台直方图均衡算法实现的存储优化方法[J].激光与红外,2013,43(5):522-525.
FAN Y J, ZHANG Y P, CHEN H. Realizing memory optimization to plateau histogram [J]. *Lasers & Infrared*, 2013, 43(5): 522-525. (in Chinese)
- [9] 陈莹,朱明.多子直方图均衡微光图像增强及 FPGA 实现[J].中国光学,2014,7(2):225-233.
CHEN Y, ZHU M. Multiple sub-histogram equalization low light level image enhancement and realization on FPGA [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 225-233. (in Chinese)
- [10] 李毅,张云峰,年轮,等.尺度变化的 Retinex 红外图像增强[J].液晶与显示,2016,31(1):104-111.
LI Y, ZHANG Y F, NIAN L, *et al.* Infrared image enhancement method based on scale varies Retinex theory [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(1): 104-111. (in Chinese)
- [11] 杨磊.多段线性拉伸增强算法及其 FPGA 实现[J].红外技术,2013,35(10):642-645.
YANG L. Research on multi-segment linear stretch algorithm and its FPGA implementation [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(10): 642-645. (in Chinese)

- [12] 赵建,赵凡,曲锋.彩色图像的 FPGA 实时增强系统实现[J].液晶与显示,2014,29(4):629-636.
ZHAO J, ZHAO F, QU F. Implement of system for color image enhancement in real-time based on FPGA [J].
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(4): 629-636. (in Chinese)

作者简介:侯天娇(1990—),女,吉林长春人,硕士研究生,2012 年于重庆大学获得学士学位,研究方向为数字图像处理,图像增强。E-mail:houtj90@163.com

郝志成(1978—),男,辽宁大石桥人,副研究员,硕士生导师,主要从事图像处理,图像增强、电视跟踪和自动目标识别技术等方面的研究。E-mail:haozhicheng9725@sina.com