

星载光电成像系统空间目标的检测与识别技术研究

杨露 牛燕雄 张颖 吕建明 李建平 牛海莎 刘雯文 张月新

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 针对星载光电成像系统的空间目标检测与识别技术,设计了一套数字信号处理器(DSP)结合现场可编程门阵列(FPGA)的图像处理系统,并提出了一种卫星目标检测与识别方法。在没有先验知识条件下,利用改进的图像差分法对具有星空背景的序列图像进行目标检测,再根据卫星与天然星体具有不同的边缘轮廓信息,通过最小距离分类器识别出卫星目标,获得卫星模板,从而可进行模板匹配以实现卫星的快速检测和识别。实验结果表明,提出的方法相对于传统方法,运算时间减少了15%~40%,满足星载光电成像系统对卫星目标检测与识别的准确性与实时性的要求,在工程实践中具有一定的应用价值。

关键词 图像处理;目标检测;目标识别

中图分类号 TP368.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.121102

Research on Detection and Recognition of Space Targets Based on Satellite Photoelectric Imaging System

Yang Lu Niu Yanxiong Zhang Ying Lü Jianming Li Jianping Niu Haisha
Liu Wenwen Zhang Yuexin

Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract In order to achieve the space target detection and identification based on the satellite photoelectric imaging system, an image processing system is designed with combination of a leading processor digital signal processor (DSP) and an auxiliary processor field programmable gate array (FPGA). A method of the satellite targets recognition is put forward. The targets are detected with the modified differential method in sequential images on the starry background, in the absence of a priori knowledge conditions. The satellites are identified with the minimum distance classifier and their templates are acquired based on the different profiles of the satellites and natural stars. Therefore, the rapid detection and identification of the satellite targets can be achieved via the template matching algorithm. Experimental results show that compared with traditional method, the running time is reduced by 15%~40%. It satisfies the accuracy and real-time requirement of satellite target detection and identification with practical value.

Key words image processing; target detection; target identification

OCIS code 110.2970; 100.2000; 100.3008; 100.5010

1 引言

星载光电成像系统能够在太空中近距离获取空间目标可见光图像,得到其几何形状、姿态等特征信息,进而可对目标进行识别、监视和跟踪,因此得到了广泛的应用^[1]。而星空背景下,实现空间目标检测是其关键技术之一^[2]。

目前,国内外的星空背景空间目标检测算法主要包括假设检验算法、背景抑制法、轨迹检测法及光谱分析法等^[3-11]。假设检验法是一种先假设后检验的识别方法。Tzannes等^[9]提出的时域假设检验法,建立了背景和目标的时域分析模型;Klimenko等^[4]提出的最大似然比法假设检验算法应用于高斯噪声背景下的低信噪比点目标的检测。假设检验算法可以很好地从低信噪比的图像中检测出目标,但是如果模型概率偏差较

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-06-30; 网络出版日期: 2014-11-12

作者简介: 杨露(1989—),女,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: yl8908@163.com

导师简介: 牛燕雄(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: niuyx@buaa.edu.cn

大,会大大降低目标的检测概率。背景抑制法是通过图像的预处理技术,抑制复杂背景和杂波干扰。典型的为高通滤波法^[5]、数学形态学滤波法^[6]、二维最小均方滤波法(TDLMS)^[7]及非线性滤波法^[8]等。这种方法算法复杂,难以满足实时性的要求。轨迹检测法是从目标速度的变化规律和运动轨迹等方面识别目标的一种算法。Gibson等^[9]提出的光流法是根据各个像素点的速度矢量特征,对图像进行动态分析,能够在不知道场景的任何信息下,检测出空间目标。其他的轨迹检测法还有窗口检测法、动态规范法^[10]等。轨迹检测法的优点是可以检测出独立运动的目标,主要问题在于不仅抗干扰性差,而且计算耗时,实时性和实用性都较差。光谱分析法一种是分析光谱特性的目标检测算法。王钦军^[10]通过将谱带强度与波形特征进行有机结合,提高了目标提取的精度。光谱分析法虽然可以利用反映目标本质的光谱特性来进行目标检测,但是分析目标的光谱特性难度很大,探测精度不高。

基于数字信号处理(DSP)与现场可编程门阵列(FPGA)的图像处理系统,在没有先验知识的条件下,提出了一种针对星空背景下的卫星目标检测与识别方法。利用改进的差分图像法滤除恒星获取空间目标,由于卫星和天然星体具有不同的边缘轮廓信息,可以通过最小距离分类器识别卫星,并得到卫星模板,从而用快速模板匹配方法实现卫星目标的检测与识别。

2 系统硬件设计

综合评价了芯片的处理能力和算法设计方面的需要,设计了如图1所示的DSP结合FPGA的图像处理系统。其中,主处理器DSP采用ADI公司的高性能双核ADSP-BF561,负责整个数据流的控制及核心算法的实现,并通过PPI口进行图像数据的采集与显示^[12]。FPGA作为DSP的协处理器,选用Altera公司的EP2C5,利用其高度的并行处理能力,与DSP实现24位地址线及32位数据宽的数据寻址与交换,完成图像预处理中大量的累加乘运算。

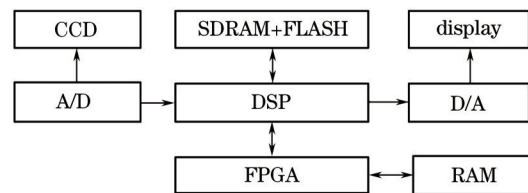


图1 图像处理系统总体结构图

Fig.1 Schematic of image processing system

系统用电荷耦合器件(CCD)摄像头获取标准的帕尔(PAL)制式模拟视频信号,经ADV7181B模数转换之后以ITU-R-656格式YUV(4:2:2)输出给DSP,图像大小为720 pixel×576 pixel。处理结果经视频编码器7171转换成PAL制式电视信号,用专用的监视器将图像结果显示出来。

3 空间目标检测与识别技术

卫星主要由太阳帆板和主体构成,具有不规则的形状。因此,在序列图像中,识别卫星的主要判断依据是卫星轮廓信息与天然星体不同。在星空背景下,恒星是不运动的,而卫星与其他的运动星体具有不同的运动轨迹。因此在滤除恒星的基础上,可以利用目标的边缘点到中心点的距离位置关系来实现对卫星的识别^[13],具体的实现方法如图2所示。

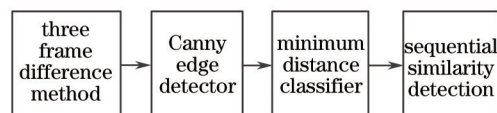


图2 目标检测与识别实现方法

Fig.2 Methods of targets detection and identification

首先,利用三帧差分法^[14]将图像序列中的恒星目标滤除,检测出空间目标;然后,结合Canny边缘检测算子^[15]得到空间目标的边缘信息,通过最小距离分类器^[16]实现卫星目标的识别,并提取出卫星目标的模板;最后,利用改进的序贯相似性检测(SSDA)^[17-18]模板匹配方法,对图像中卫星目标进行检测与识别。

3.1 恒星目标滤除

在星空背景下,空间目标是指卫星和天然星体,但是由于恒星是固定不动的,因此可以利用图像差分法滤除恒星目标,实现空间目标的检测。三帧图像差分法不易受到背景环境变化等干扰的影响而降低检测精度,因此利用三帧图像差分法对图像序列中连续的三张图像 k_{-1} 、 k_0 、 k_1 进行恒星目标滤除,其算法实现过程如图3所示。

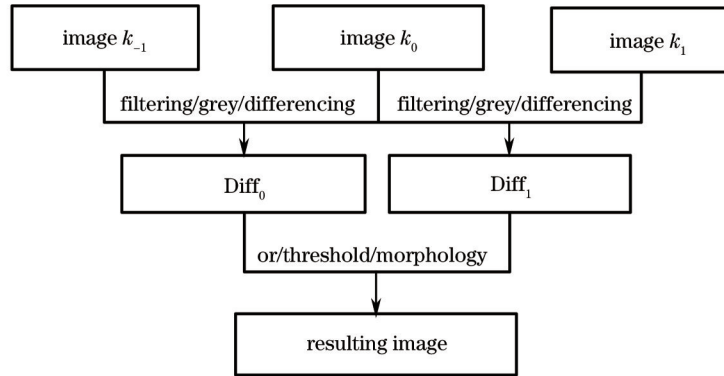


图3 三帧图像差分法

Fig.3 Three frame difference method

对图像 k_{-1} 和 k_0 、图像 k_0 和 k_1 分别进行灰度变换、滤波、图像差分法处理之后,将得到的两幅差分图像 $Diff_0$ 和 $Diff_1$ 进行相与运算,不仅能够将恒星很好地滤除,并且可以用形态学方法恢复出完整的目标图像。

3.2 空间目标的检测

3.2.1 目标边缘提取

在滤除恒星目标之后,将卫星目标与天然星体进行分类识别是关键。Canny 算子相对于 Prewitt 和 Sober 等边缘检测算子具有边缘定位准确度高,连续性好,虚假边缘少且边缘均具有单像素宽度的优点。Canny 算子认为阶跃型边缘的最优边缘检测器的形状与高斯函数的一阶倒数类似,因此根据二维高斯函数的圆对称及可分解性,可计算高斯函数在任意方向上的方向导数与图像 $f(x,y)$ 的卷积。二维高斯函数公式为

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (1)$$

在某一方向上 $G(x,y)$ 的一阶导数为

$$G_n = \frac{\partial G}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{n} \cdot \nabla G, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{n} = (\cos\theta, \sin\theta)^T$ 为单位方向矢量; $\nabla G = (G_x, G_y)^T$ 为梯度矢量。将图像 $f(x,y)$ 与 G_n 作卷积,同时改变 \mathbf{n} 的方向,当 $\partial[G_n * f(x,y)]/\partial \mathbf{n} = 0$ 时,可求解出 $G_n * f(x,y)$ 为最大值时的 \mathbf{n}

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla G * f(x,y)}{\|\nabla G * f(x,y)\|}. \quad (3)$$

从(3)式可以看出, \mathbf{n} 正交于检测边缘的方向,即在该方向上, $G_n * f(x,y)$ 有最大输出响应。

通过 Canny 算子获得空间目标的边缘信息,从而判断卫星目标与天然星体的边缘点到中心点不同的距离关系,为实现目标分类而做准备,可靠性较高。

3.2.2 目标分类

决定卫星模式向量 \mathbf{x} 类别的方法是,将它分配给与它最接近的原型类 w_i , 利用欧几里德距离做相似性度量,可以得到最小距离的评估函数 $d_i(\mathbf{x})$, 如公式

$$d_i(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{m}_i - \frac{1}{2} \mathbf{m}_i^T \mathbf{m}_i, \quad \mathbf{m}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{\mathbf{x} \in w_i} \mathbf{x}, \quad i = 1, 2, \dots, W, \quad (4)$$

式中 $d_i(\mathbf{x})$ 为决策函数, W 为模式分类 w_1, w_2, \dots, w_W 的数目, \mathbf{m}_i 为均值向量,用于表示模式分类 w_i 的原型, N_i 是 w_i 的模式向量数量。

得到类 w_i 和 w_j 之间的最小距离分离器的决策边界公式为

$$d_{ij}(x) = d_i(x) - d_j(x) = x^T(m_i - m_j) - \frac{1}{2}(m_i - m_j)^T(m_i + m_j) = 0. \quad (5)$$

如果模式向量 x 属于类 w_i 的模式, 则有 $d_{ij}(x) > 0$, 相反则有 $d_{ij}(x) < 0$ 。由于卫星的样本均值向量为 $m_1 = (0.5, 0.5)^T$, 天然卫星的样本均值向量为 $m_2 = (0.15, 0.15)^T$, 因此结合决策公式就可得到最小距离分类的边界方程式

$$X_1 + X_2 - 0.65 = 0. \quad (6)$$

通过决策边界方程(6), 可以将卫星和天然星体进行分类, 位于直线右上方的是卫星目标, 位于直线左下方的是天然卫星, 从而得到卫星模板, 为后面的模板识别提供依据。

3.2.3 目标识别

通过上述的方法, 将得到的卫星目标作为模板, 利用改进的SSDA实现卫星目标的检测与识别。改进的SSDA采用自适应阈值以及粗细结合的匹配方法进行匹配, 不仅不影响匹配精度, 而且提高了匹配的效率和节省了大量的计算时间。

设搜索子图 $S(i, j)$ 和模板图像 $T(i, j)$ 的相似程度 $D(x, y)$ 的计算公式为

$$D(x, y) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M |S(x+j, y+i) - T(i, j)|. \quad (7)$$

如图4所示, 改进的SSDA在运算过程中阈值是自适应单调递增序列, 非匹配点A和B使用更少的计算就达到阈值而被丢弃, 真匹配点C需要更多次误差累计才达到阈值, 不仅使得阈值逐渐逼近最佳阈值, 达到了精确检测卫星的目的, 且时间的复杂度降低为 $1/mn$, 满足系统快速处理的要求。

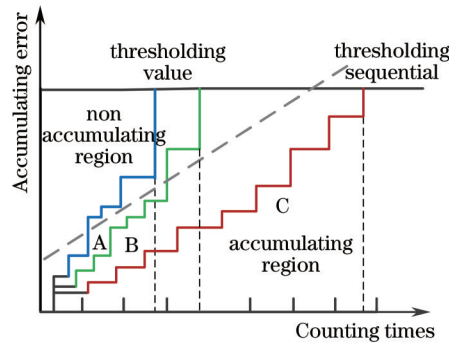


图4 改进的SSDA

Fig.4 Improved SSDA

4 实验与验证

实验仿真生成一组卫星目标运动速度大于 1 pixel/frame 的 $500 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 的序列图像, 进而利用 CCD 摄像机进行视频采集, 在 Visual DSP++5.0 和 Quartus II 11.0 开发平台上采用 C 语言与 Verilog 语言共同实现空间目标检测与识别的实验验证。

在任务分配上, DSP 负责图像的输入与输出及核心算法的处理, FPGA 则负责图像的处理算法。图5中三幅图像分别是原始图像中的第 0、1、2 帧图像, 并将其定义为 k_{-1} 、 k_0 、 k_1 。首先, 将 DSP 与 RAM 总线直接对

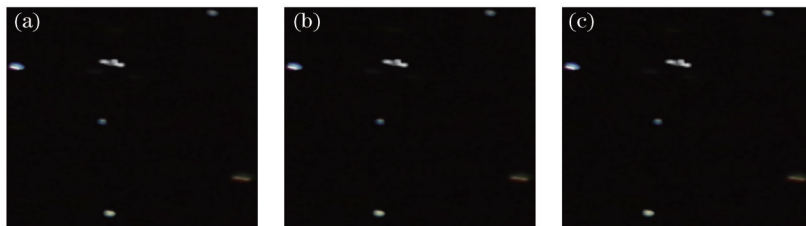


图5 原始图像。(a) 图像 k_{-1} ; (b) 图像 k_0 ; (c) 图像 k_1

Fig.5 Original images. (a) Image k_{-1} ; (b) image k_0 ; (c) image k_1

接,在A核控制下图像 k_{-1} 、 k_0 、 k_1 通过PPI0口的DMA总线送入RAM中,图像接收完毕后,DSP将RAM转交给FPGA,FPGA对图像进行 3×3 的中值滤波,提高信噪比,再利用阈值为50的三帧差分法滤除恒星目标,进行空间目标的检测。从图6(a)中可以看出三帧差分法出现了空洞现象,所以用膨胀矩阵 $M^{[19]}$ 对检测结果进行形态学处理,结果如图6(b)所示,并将目标分别记为 S_1 和 S_2 , M 是半径为2的圆盘矩阵。

将膨胀之后的结果图传送给DSP处理,并且经过多次的实验比较,用Canny算子提取图6(b)中目标 S_1 和 S_2 的边缘信息时,若将高斯函数的标准差设为0.3,低阈值和高阈值的比值设为0.02,高阈值占图像像素总数的比例设为0.8时,得到的效果最佳,如图6(c)所示。

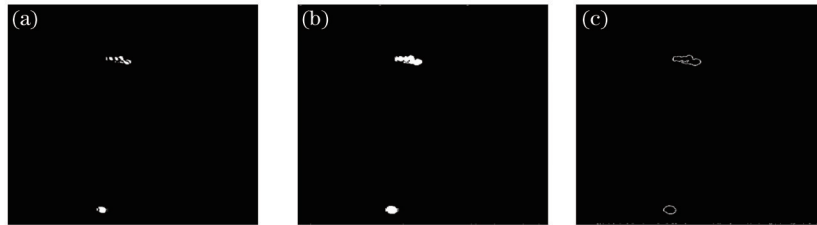


图6 实验结果图。(a)三帧差分结果图像;(b)膨胀结果图像;(c)边缘检测结果图像

Fig.6 Resultant images of the experiment. (a) Image of three frame difference method;
(b) image of expansion; (c) image of edge detection

为进行卫星与天然星体分类,根据卫星与天然星体的边缘点与中心点有不同的位置关系,建立了一个模式向量 (X_1, X_2) ,其中:

$$X_1 = \frac{D_{\max} - D_{\text{aver}}}{D_{\text{aver}}}, \quad X_2 = \frac{D_{\text{aver}} - D_{\min}}{D_{\text{aver}}}, \quad (8)$$

式中 D_{\max} 表示目标 S_1 和 S_2 的边缘点到中心点的最大距离; D_{\min} 表示目标 S_1 和 S_2 的边缘点到中心点的最小距离; D_{aver} 表示目标 S_1 和 S_2 的边缘点到中心点的平均距离。从而利用(8)式以及决策边界方程(6)识别出目标 S_1 为卫星目标,目标 S_2 为天然星体目标,如表1和图7所示,其中图7横坐标为模式向量元 X_2 ,纵坐标为模式向量元 X_1 。

表1 边缘比较判断表

Table 1 Comparison and judgment table

	Object S_1	Object S_2
D_{\max}	23.7697	11
D_{\min}	1	7.0711
D_{aver}	13.5346	9.2198
Pattern vector	(0.7562, 0.9261)	(0.1931, 0.2331)
Result	Satellite	Nature stars

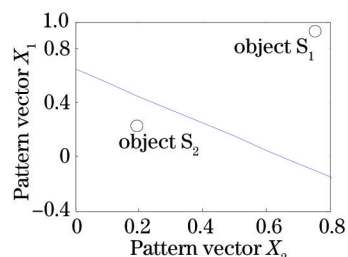


图7 最小距离分类器结果

Fig.7 Result of minimum distance classifier

由于图6(c)中卫星目标的中心点 O 的坐标位置(129, 178)与图像 k_0 最接近,在图像 k_0 中以 O 为中心,取一个长和宽均为 $3D_{\max}$ 的卫星模板,与 k_1 以后的图像作SSDA模板匹配,进行卫星目标的检测与识别。

为充分发挥DSP的流水线处理及FPGA并行处理的优势,提高卫星检测与识别的效率,系统采用乒乓结构的操作模式实现模板匹配。如图8所示,将SDRAM、RAM依次分块为Frame0、Frame1、Frame2及Buffer0、Buffer1、Buffer2,以 T_0 、 T_1 、 T_2 表示三个依次推移的操作时刻。在 T_0 时刻,将DSP与RAM总线直接对

接, Buffer0接收从PPI0口的DMA总线送入的图像 k_5 ,当图像 k_5 接收完毕后,DSP将RAM转交给FPGA。在 T_1 时刻,FPGA对Buffer1中图像 k_4 进行预处理,结果存放在Buffer2,同时,A核通过PPI1的DMA总线将Frame2中的结果图像 k_2 输出。在 T_2 时刻,FPGA预处理结束之后,DSP再一次与RAM总线对接,A核将图像 k_4 送入Frame0。在 T_0 、 T_1 、 T_2 的整个过程中,B核一直对Frame1中的图像 k_3 进行匹配处理。如此反复将图像在Buffer0、Buffer1及Frame0、Frame1中交错分工合作,使得目标匹配的效率达到最高。

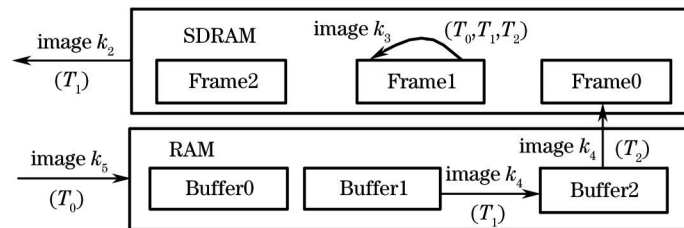


图8 乒乓操作示意图

Fig.8 Schematic diagram of ping-pang processing

经反复试验表明,在粗匹配过程中,间隔为 $m \leq 25$ 、 $n \leq 14$ 时匹配效果最佳,图9(b)和(c)分别是在图像序列的第24帧和第98帧中实现卫星检测与识别的效果图。

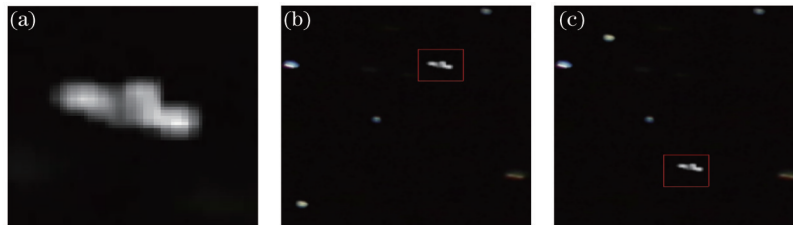


图9 实验结果图。(a) 模板图像;(b) 第24帧图像;(c) 第98帧图像

Fig.9 Resultant images of experiment. (a) Template image; (b) 24th frame image; (c) 98th frame image

另外,实验中采用假设检验法、背景抑制法及轨迹检测法进行卫星目标的检测与识别处理,并对上述的各种方法及文章所述方法的运行时间进行了测试,结果如表2所示,可以看出文章的方法具有明显的优势。

表2 多种检测识别方法的运行时间

Table 2 Running time table of various kinds of target recognition methods

	Hypothesis test method	Background suppression method	Track detection method	Proposed method
Running time/s	0.8013	0.5917	0.7664	0.4841

5 结 论

为实现星载光电成像系统的空间目标检测与识别,设计了DSP结合FPGA的图像处理系统,并且在没有先验知识条件的情况下,提出了一种卫星目标检测与识别方法。通过对多帧图像进行三帧差分、边缘提取以及最小距离分类算法处理后,获得了卫星目标的模板,从而可以实现卫星目标的快速检测与识别。实验结果表明,在工程允许误差范围内,即使星空背景中出现了天然星体的干扰,也可实现卫星的快速检测与识别,与传统的识别方法相比,运算时间减少了15%~40%。所提方法具有较高的准确性,能满足星载光电成像系统对卫星目标快速检测识别的要求,有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

- Li Yanbin, Jiang Lizhong, Huang Yong. Development research on space-based target detection and surveillance system [J]. Guidance & Fuze, 2012, 33(3): 50-61.
李雁斌,江利中,黄勇.天基目标探测与监视系统发展研究[J].制导与引信,2012,33(3):50-61.
- Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1178-1182.
张已化,姚东升,谈斌.地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J].光学学报,2008,28(6):1178-1182.

- 3 A P Tzannes, D H Brooks. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing[J]. IEEE Trans, On Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 570-586.
- 4 Klimenko S, Mohanty S, Rakhmanov M, *et al.*. Constraint likelihood analysis for a network of gravitational wave detectors[J]. Phys Rev D, 2005, 72(12): 122002.
- 5 Li Kexin, Zhang Wei, Cong Mingyu, *et al.*. A streak detection algorithm of space target in deep space background[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 445-451.
李克新, 张伟, 丛明煜, 等. 一种深空背景空间小目标条痕检测算法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 445-451.
- 6 Scharfand L L, Friedlander B. Matched subspace detectors[C]. IEEE Trans, Signal Proc, 1994, 42(8): 2146-2157.
- 7 Toufiq, Parag. Coupled label and intensity MRF models for IR target detection[C]. IEEE Computer Society Conference on CVPRW, 2011. 7-13.
- 8 Liu Shaohua, Zhang Maojun, Xiong Zhihui, *et al.*. A robust and efficient video moving object detection and tracking algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(8): 1055-1062.
刘少华, 张茂军, 熊志辉, 等. 一种鲁棒高效的视频运动目标检测与跟踪算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(8): 1055-1062.
- 9 Gibson E J, Gibson J J, Smith O W, *et al.*. Motion parallax as a determinant of perceived depth[J]. J Experimental Psychology, 1959, 58(1): 40-51.
- 10 Wang Qinjun, Lin Qizhong, Li Mingxiao, *et al.*. Spectra sort encoding algorithm for target extraction[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(3): 30-36.
王钦军, 蔺启忠, 黎明晓, 等. 一种目标提取新方法光谱排序编码法[J]. 光电工程, 2007, 34(3): 30-36.
- 11 Hu Kai, Qian Weixian, Chen Qian, *et al.*. Improvement and implementation of KLT tracking algorithm based on TMS320C6678[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041001.
胡楷, 钱惟贤, 陈钱, 等. 基于TMS320C6678的KLT跟踪算法的改进与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041001.
- 12 Analog Devices, Inc. Blackfin Processor Hardware Reference[M]. Revision 3.0, Norwood: Analog Device, Inc, 2004.
- 13 Xu Tuoqi, Zhang Liu, Xu Wei, *et al.*. Space-based dynamic space targets image identification[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(3): 406-415.
徐拓奇, 张刘, 徐伟, 等. 空间目标图像的天基动态识别[J]. 液晶与显示, 2012, 27(3): 406-415.
- 14 Huo Jinming, Shen Xiangheng, Ye Lu, *et al.*. Testing of low-contrast dynamic target acquisition ability for photoelectric tracker[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0512004.
霍金明, 沈湘衡, 叶露, 等. 光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力的检验[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0512004.
- 15 Wei Guojian, Hou Zhiqiang, Li Wu, *et al.*. Moving object detection algorithm based on edge subtraction[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(10): 3530-3535.
魏国剑, 侯志强, 李武, 等. 基于边缘差分的运动目标检测方法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(10): 3530-3535.
- 16 Song Yifei, Zheng Li. Improvement and implementation of image correlation matching algorithm[J]. Electro-optic Technology Application, 2013, 28(4): 61-65.
宋刘非, 郑丽. 一种图像相关匹配算法的改进及实现[J]. 光电技术应用, 2013, 28(4): 61-65.
- 17 Gu Cheng, Qian Weixian, Chen Qian, *et al.*. Rapid head detection method based on binocular stereo vision[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108001.
顾骋, 钱惟贤, 陈钱, 等. 基于双目立体视觉的快速人头检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108001.
- 18 Zhang Su, Wang Wensheng. Optical correlation recognition of the moving target in cluttered background[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0107001.
张肃, 王文生. 复杂背景下运动目标的光学相关识别[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0107001.
- 19 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. Fast target recognition in ladar using projection contour features[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0209003.
郭裕兰, 鲁敏, 谭志国, 等. 采用投影轮廓特征的激光雷达快速目标识别[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0209003.