

文章编号: 1001-0920(2012)01-0147-05

## 基于分数阶积分算子的红外弱小目标检测

陈炳文<sup>a</sup>, 王文伟<sup>a</sup>, 秦前清<sup>b</sup>

(武汉大学 a. 电子信息学院, b. 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:** 针对现有背景抑制算法不能有效抑制背景而导致目标检测率低的问题, 提出一种基于分数阶积分背景抑制的弱小目标检测算法. 首先通过研究分数阶积分理论, 分析分数阶积分非线性、尖锐的低通频率特性, 结合分数阶积分和警戒环技术来抑制背景; 然后依据目标和背景边缘的空间特征, 采用模板均差法来提取候选目标; 最后结合目标的运动连续性进行多帧轨迹关联, 从而检测出真实目标. 实验结果表明, 该算法能有效抑制背景, 提高信噪比, 进而有效检测出弱小目标.

**关键词:** 弱小目标检测; 分数阶积分算子; 警戒环; 模板均差法

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

## Infrared dim target detection based on fractional integral operator

CHEN Bing-wen<sup>a</sup>, WANG Wen-wei<sup>a</sup>, QIN Qian-qing<sup>b</sup>

(a. School of Electronic Information, b. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China. Correspondent: WANG Wen-wei, E-mail: wangww@whu.edu.cn)

**Abstract:** In order to solve the problem that the current algorithms cannot eliminate the background effectively and lead to the low detection rate, a infrared dim target detection approach based on fractional integral operator is proposed. Firstly, through studying the fractional integral theory and analyzing its predominant sharp low-pass frequency character, the fractional integral operator is introduced to combine with the guard ring technology to eliminate the infrared background. Then, by analyzing the space features of targets and background edges, the difference of template average algorithm is introduced to detect the candidate targets. Finally, by combining with the continuous motion character of targets, the multi-frame trajectory related algorithm is used to eliminate the false targets. Experiment results show that the proposed approach can eliminate the background effectively so as to enhance the signal-to-noise value, and the targets can be detected effectively in the low signal noise ratio background.

**Key words:** dim target detection; fractional integral operator; guard ring; difference of template average

## 1 引言

作为红外制导、搜索跟踪和预警等领域的一项关键技术, 红外弱小目标检测跟踪一直是红外图像处理领域的热点研究方向, 而红外背景抑制是其重要环节之一. 近年来红外背景抑制技术得到了较大的发展, 常用的抑制技术有小波域滤波、形态学滤波、空域滤波和时域滤波等<sup>[1]</sup>. 一些结合神经网络<sup>[2]</sup>和超分辨率重建<sup>[3]</sup>理论的算法也在不断涌现. 由于弱小目标的信噪比较低, 单帧检测率低, 越来越多的算法结合了多帧相关特性来提高检测率. 采用多帧关联技术能有效

降低虚警率, 但前提是能够将不同时刻的目标准确地对应起来, 且要求采集系统的帧速够高.

本文通过分析分数阶积分理论, 研究分数阶积分的频域特性, 结合红外图像特征, 尝试性地将分数阶积分理论应用于红外弱小目标检测, 提出一种基于分数阶积分背景抑制的弱小目标检测算法. 实验结果表明了该算法的有效性.

## 2 分数阶积分背景抑制

### 2.1 分数阶积分

分数阶积分是相对于传统意义上的整数阶积分

收稿日期: 2010-09-02; 修回日期: 2010-11-12.

基金项目: 国家973计划项目(2006CB701303); 湖北省自然科学基金重点项目(2009CDA141); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(212274467).

作者简介: 陈炳文(1986—), 男, 博士生, 从事图像处理、目标检测跟踪的研究; 王文伟(1966—), 男, 副教授, 博士, 从事图像处理、模式识别等研究.

而提出来的,是整数阶积分运算的推广.本文采用 Cauchy 积分公式来定义分数阶积分<sup>[4]</sup>.

假设  $I$  为积分算子,  ${}_0I_x^n$  表示  $[0, x]$  区间内的  $n$  次整数积分,  $n \in N$ . 则依据 Cauchy 公式, 可得  $n$  次整数积分为

$${}_0I_x^n f(x) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^x (x-t)^{n-1} f(t) dt, \quad (1)$$

其中  $\Gamma(n)$  为 Gamma 函数, 即

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty t^{n-1} e^{-t} dt. \quad (2)$$

由 Cauchy 公式可扩展出分数阶积分的定义: 设  $f(x)$  在  $[0, a]$  ( $a$  可为  $+\infty$ ) 上连续,  $0 < v < 1$ , 则  $f(x)$  在  $[0, a]$  上的  $v$  次分数阶积分定义为

$${}_0I_x^v f(x) = \frac{1}{\Gamma(v)} \int_0^x (x-t)^{v-1} f(t) dt. \quad (3)$$

根据分数阶积分的定义, 利用幂函数积分性质, 若  $f(x)$  在  $(-R, R)$  内存在幂级数, 则  $f(x)$  在  $[0, R]$  上的  $v$  次分数阶积分可展开为级数形式, 即

$${}_0I_x^v f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{\Gamma(n+v+1)} x^{n+v}, \quad 0 \leq x < R. \quad (4)$$

### 2.2 分数阶积分用于图像处理

依据式 (3) 的分数阶积分定义, 借助傅里叶变换工具, 可得到分数阶积分的频域表达式为

$$F[{}_0I_x^v f(x)] \approx (j\omega)^{-v} F(f(x)). \quad (5)$$

依据式 (5) 可画出分数阶积分的幅频特性曲线图, 如图 1 所示, 其中频率为归一化后的频率. 从图 1 可以看出, 当频率  $\omega < 0.1$  时, 信号的幅度得到大幅度非线性提升; 当  $0.1 < \omega < 0.5$  时, 信号幅度得到非线性增强; 当  $\omega \gg 0.5$  时, 信号幅度基本不变. 各个阶次的分数阶积分趋势大体相同, 阶次越低, 信号的低通区域被压缩得越紧; 阶次越高, 信号低频部分的幅度被提升得越强. 由此可知, 分数阶积分具有尖锐的非线性低通特性.

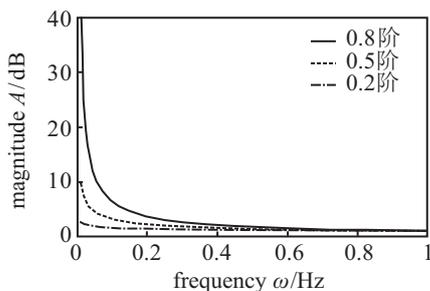


图 1 分数阶积分的幅频特性曲线

依据分数阶积分定义与级数展开式, 可以得到分数阶积分的数值计算公式. 将区间  $[0, x]$  按单位长度  $h = 1$  进行等分, 可推导出一元信号分数阶积分的累加和表达式为

$$\begin{aligned} I^v f(x) \approx & f(x) + v f(x-1) + \frac{v(v+1)}{2} f(x-2) + \\ & \cdots + \frac{\Gamma(v+1)}{n! \Gamma(v+n+1)} f(x-n), \\ & n = \lfloor (x-0)/h \rfloor. \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) 的前  $n$  项系数为

$$\begin{cases} a_0 = 1, a_1 = v, a_2 = \frac{v(v+1)}{2}, \\ a_3 = \frac{v(v+1)(v+2)}{6}, \dots, \\ a_n = \frac{\Gamma(v+1)}{n! \Gamma(v+n+1)}. \end{cases} \quad (7)$$

依据式 (6) 和 (7) 可以构建各向同性的滤波模板, 如图 2 所示. 采用分数阶积分模板  $P$  (尺寸为  $s \times s$ ) 对图像  $f$  (尺寸为  $M \times N$ ) 进行线性滤波, 得到的滤波结果为

$$g(x, y) = \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-a}^a p(i, j) f(x+i, y+j), \quad (8)$$

其中  $a = (s-1)/2$ .

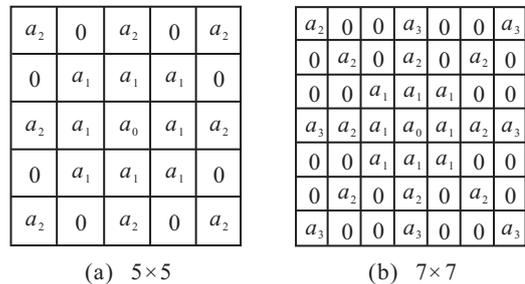


图 2 分数阶积分算子模板

### 2.3 分数阶积分用于红外背景抑制

在远距离红外成像条件下, 红外目标一般成团状, 其尺寸仅为几个像素, 且与背景不相关, 属于图像的高频成分. 像素点若属于背景, 则它与背景具有较高的相关性, 属于图像的低频成分. 由上述分析可知, 分数阶积分具有尖锐的非线性低通特性, 可用于构造红外图像的背景.

本文结合警戒环技术<sup>[1]</sup>, 对图 2 所示的分数阶积分算子作进一步的改进, 得到用于红外弱小目标检测的分数阶积分算子, 并命名为 FIWG (Fractional integral with guard) 算子, 如图 3 所示. 该图显示了两种尺寸为  $7 \times 7$  的 FIWG 算子, 外围尺寸相同, 但中间

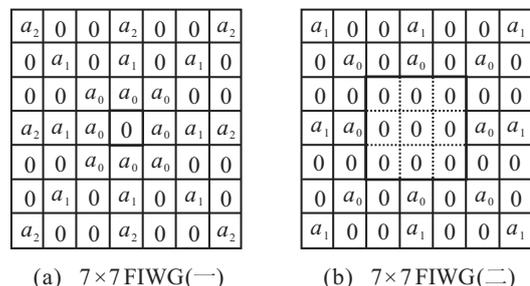


图 3 警戒分数阶积分算子

的警戒环尺寸不同. 因为红外弱小目标一般呈点状结构, 所以将警戒环设为方形结构, 其尺寸等于或略小于目标的尺寸, 而目标的尺寸大小在算法初始化时依据经验值来确定. 采用警戒环技术可以避免中间点为可能的目标点而带来的干扰.

采用 FIWG 算子, 依据式 (8) 可得到预测后的背景 BG, 则背景抑制后的残差图像为

$$E(x, y) = F(x, y) - \text{BG}(x, y). \quad (9)$$

### 3 目标提取

#### 3.1 模板均差法

采用 FIWG 算子来预测背景并抑制背景, 可剔除大部分图像背景——平滑背景和一部分背景边缘, 只剩余目标、噪声和一些较尖锐的背景边缘. 然而, 目标、背景边缘和噪声等都具有鲜明的空域或时域特征, 如经过了背景抑制后的目标具有比邻域背景像素更高的灰度值, 同时具有空间突变性; 而背景边缘的邻域沿边缘方向两边的像素具有较大的差异度; 噪声具有很大的时域与空域随机性.

依据剩余像素类别的特征, 本文设计了 5 种模板, 如图 4 所示. 其中: 图 4(a)~图 4(d) 模板为背景边缘模板; 图 4(e) 为目标模板, 它结合了警戒环技术. 图 4(e) 中最里面的环为警戒环, 第 2 环为内环, 第 3 环为外环. 本文根据各类像素的特征结合各个模板, 对所有像素进行模板运算.

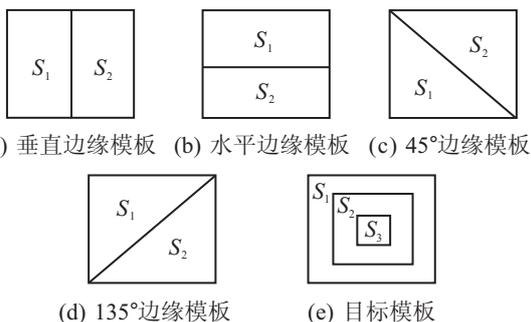


图 4 模板均差法的 5 种特征模板

假设  $E$  为背景抑制后的图像,  $\text{FP}^i$  为采用图 4(a)~图 4(e) 模板进行模板运算后的模板对比度, 即

$$\text{FP}^i(x, y) = \left| \frac{1}{Q_1} \sum_{(x,y) \in S_1} E(x, y) - \frac{1}{Q_2} \sum_{(x,y) \in S_2} E(x, y) \right|, \quad (10)$$

$i = a, b, c, d, e.$

其中:  $Q_1$  为区域  $S_1$  的面积大小,  $Q_2$  为区域  $S_2$  的面积大小. 则最终的模板均差值为

$$T = \text{FP}^e - \max\{\text{FP}^i | i = a, b, c, d\}, \quad (11)$$

并命名为模板均差法 (DTA).

根据上述各类的特征分析, 由图 4 中各个模板可以看出, 当像素点为背景边缘点时, 图 4(a)~图 4(d)

模板中必存在一个模板对比度较高的模板, 而图 4(e) 模板的模板对比度较低, 故模板均差值  $T$  较小; 当像素点为噪声时, 由于噪声的随机性, 各个模板的模板对比度都比较接近, 此时模板均差值  $T$  较小; 当像素点为目标点时, 图 4(e) 模板的模板对比度较高, 而图 4(a)~图 4(d) 模板的模板对比度都较低, 故模板均差值  $T$  较大. 可见通过模板均差法 (DTA) 可有效削弱剩余的背景边缘, 突出目标.

#### 3.2 多帧轨迹关联

经分数阶积分背景抑制与模板均差后, 可消除背景干扰, 突出目标, 只需设置一个全局门限便可提取出目标. 门限的选择可视实际情况而定, 较常用的有恒虚警门限法. 门限的选择直接关系到目标的检测率与虚警率. 为了提高检测率、降低虚警率, 本文先降低检测的全局门限阈值来检测候选目标点, 再利用目标运动的连续特性进行多帧轨迹关联来剔除虚假目标.

借鉴文献 [5] 的轨迹关联法, 本文采用卡尔曼滤波器来进行目标的预测跟踪与帧间轨迹关联, 并对其目标匹配部分进行了一定的改进. 在目标预测跟踪框架中, 目标间的匹配是其重要组成部分. 较常使用的匹配特征是核密度灰度直方图分布特征<sup>[6]</sup>, 但因红外目标的尺寸较小, 一般为十几个甚至几个像素点, 且灰度值都较接近, 故采用核密度灰度直方图分布特征来描述弱小目标的效果欠佳, 因此本文改用目标的灰度点集来描述目标, 采用 Hausdorff 距离<sup>[7]</sup>来描述目标间的相似度.

假设红外原始图像为  $f$ , 目标  $i$  的灰度点集为

$$\text{TP}^i = \{f(x, y) | x, y \in \text{target}^i\}, \quad (12)$$

则目标间的匹配度为

$$\text{MS} = H(\text{TP}^i, \text{TP}^j), \quad (13)$$

其中  $H(\cdot)$  为 Hausdorff 距离算子. 目标间的 MS 值越小, 目标越匹配.

### 4 实验结果

为了验证本文算法的有效性, 采用一些实际拍摄和人工合成的红外视频进行实验, 并与部分现有算法进行对比实验. 其中 Video 1, Video 2 为实际采集到的红外数据; Video 3 为采用实际数据作为背景, 叠加了人为目标和背景噪声得到的人工仿真数据 (目标在作从左上角到右下角的匀加速直线运动). 3 个视频的帧速均为 15 f/s. Video 1 中目标的 SNR 值为 0.708, Video 2 中目标的 SNR 值为 1.139, Video 3 中目标的 SNR 值为 1. 本实验中的 SNR 值定义为

$$\text{SNR} = (t - \mu) / \sigma. \quad (14)$$

其中: 局部区域大小设为  $13 \times 13$ ,  $\mu$  为目标周围背景的灰度均值,  $\sigma$  为周围背景的均方差, 目标灰度均值

为  $t$ . 由于目标弱小, 本文采用矩形框将检测到的目标框起来以便观察目标.

候选目标提取实验部分的阈值选择方法是: 首先采用尺寸为  $7 \times 7$  的中值滤波器进行滤波; 然后取  $\lambda$  倍的最大值作为全局阈值 (实验中采用  $\lambda = 0.6$ ), 即

$$Th = \lambda \times \max(\text{medfilt}(T)), \quad (15)$$

其中  $T$  为采用模板均差法处理后的图像.

首先本文就背景抑制部分进行对比实验, 针对 Video 1, Video 2 序列与部分现有背景抑制算法 (高通滤波法、一阶和二阶积分法) 进行比较. 一阶和二阶积分算法都具有低通频域特性, 都是通过预测背景来抑制背景, 而高通滤波算法则直接筛选出目标. 由于 3 段测试视频中的红外目标尺寸均约为十几个像素点, 本文采用外围尺寸  $7 \times 7$ , 警戒环尺寸  $3 \times 3$  的 FIWG 算子来抑制背景.

表 1 为针对 Video 1 序列各种背景抑制算法的 SNR 提升效果比较; 表 2 为针对 Video 2 序列各种背景抑制算法的 SNR 提升效果比较. 从表中可以看出, 当目标的 SNR 值较高时 (如 Video 2 序列) 一阶积分、二阶积分和高通滤波法都能增强目标对比度; 但当

表 1 各种抑制算法针对 Video 1 的 SNR 提升度比较

算 法	SNR 提升度
高通滤波	0.712
一阶积分	0.714
二阶积分	0.643
1/5 阶积分	0.854
3/5 阶积分	0.953

表 2 各种抑制算法对 Video 2 的 SNR 提升度比较

算 法	SNR 提升度
高通滤波	1.346
一阶积分	1.563
二阶积分	1.151
1/5 阶积分	1.873
3/5 阶积分	2.271

目标的 SNR 值较低时 (如 Video 1 序列), 这几种算法的 SNR 提升量较小, 甚至降低了 SNR 值 (如二阶积分法). 而采用分数阶积分算法 (如 1/5 阶, 3/5 阶) 进行背景抑制, 则能较大地提升 SNR 值. 当目标的 SNR 值较低时也能有效提升目标对比度, 提升效果明显.

分数阶积分算子具有阶次可连续变化的特点, 阶次与 SNR 提升度间是否存在规律? 为此本文就分数阶积分阶次与图像 SNR 值间的关系进行了实验, 结果如表 3 所示. 从表 3 可以看出, 对于 3 种不同的红外序列, SNR 提升度都随分数阶积分阶次的增加而增加; 但当阶次变为整数阶时, SNR 提升度呈下降趋势. 由此可得, 分数阶积分的背景抑制效果与分数阶的阶次成正比, 但分数阶的阶次的取值范围应为  $0 < v < 1$ ; 若阶次为大于 1 的整数 (即整数积分), 则背景的抑制效果呈下降趋势.

表 3 分数阶积分阶次与目标 SNR 值间的关系比较

Video(SNR)	阶 次					
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2
Video1(0.708)	0.854	0.912	0.953	0.976	0.714	0.643
Video2(1.139)	1.873	2.187	2.271	2.359	1.563	1.151
Video3(1)	1.674	1.751	1.863	1.916	1.235	1.184

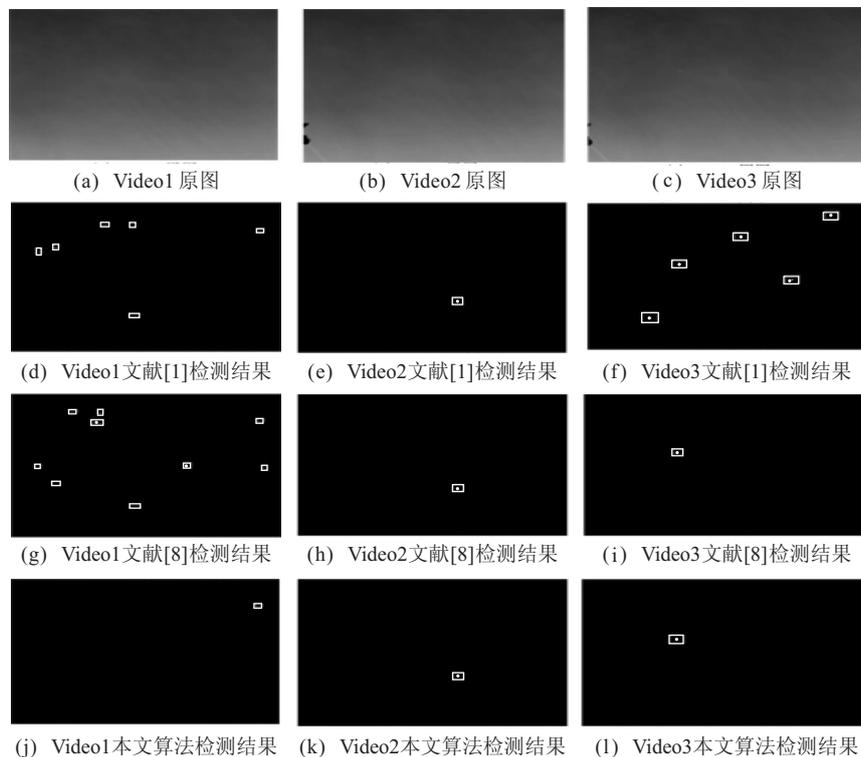


图 5 部分算法间的检测结果比较

另外, 本文对总体算法与部分现有算法进行了对比实验. 各种算法的参数设置为: 本文采用外围尺寸  $7 \times 7$ , 警戒环尺寸  $3 \times 3$  的 FIWG 算子, 最大丢失帧数为 5 帧; 文献 [1] 的滤波模板尺寸为  $7 \times 7$ ; 文献 [8] 的局部窗口尺寸为  $16 \times 16$ . 3 种算法针对各序列的样本图片的检测结果如图 5 所示. 其中: 第 1 列为 Video 1 样本图片的检测结果, 第 2 列为 Video 2 样本图片的检测结果; 第 3 列为 Video 3 样本图片的检测结果; 第 2 行为文献 [1] 的检测结果; 第 3 行为文献 [8] 的检测结果; 第 4 行为本文算法的检测结果.

从图 5 中第 2 列可以看出, 对于 SNR 值较高的实际数据, 3 种算法的检测结果均无虚假目标存在, 都能正确地检测出目标; 从第 3 列可以看出, 对于 SNR 稍高的仿真数据, 文献 [1] 的检测结果中存在较多的虚假目标, 而 [8] 和本文算法的检测结果中无虚假目标, 能正确地检测出目标; 从第 1 列可以看出, 对于 SNR 值较低的实际数据, [1] 与 [8] 的检测结果中都存在较多的虚假目标, 而本文算法的检测结果无虚假目标. 由此可知, 对于 SNR 值较低的目标, [1] 与 [8] 算法的检测效果欠佳; 而不论是 SNR 值较低的实际数据还是仿真数据, 本文算法都能有效抑制背景, 检测出弱小目标.

由上述对比实验可知, 采用 FIWG 算子能有效地抑制背景, 提高信噪比, 结合 DTA 算法与卡尔曼多帧轨迹关联算法能有效地剔除虚假目标, 检测出红外点目标.

## 5 结 论

本文研究分数阶积分的优越低通频域特性, 结合分数阶积分和警戒环技术, 利用空域相关信息来估计背景, 能有效抑制背景; 分析像素的空域与时域特征, 结合目标的运动连续特性, 采用模板均差法与卡尔曼多帧轨迹关联算法来检测目标. 通过实际数据与仿真数据进行对比实验, 表明了本文算法能有效抑制背景, 提高信噪比, 从而检测出弱小点目标.

本文现阶段只考虑了各向同性的 FIWG 算子, 下一步将分析各向异性的 FIWG 算子的背景估计性能, 以便更好地抑制背景.

## 参考文献(References)

- [1] Luo Jun-hui, Ji Hong-bing, Liu Jin. An algorithm based on spatial filter for infrared small target detection and its application to an all directionalIRST system[C]. The 27th Int Congress on High-speed Photography and Photonics. Xi'an, 2007: 62793E-1-6.
- [2] Wang Zhi-cheng, Gao Chen-qiang, Tian Jin-wen, et al. Multifeature distance map based fusion detection of small infrared targets with low contrast in image sequences[C]. Int Conf on Space Information Technology. Huazhong, 2005: 59853J-1-5.
- [3] Judith Dijk, Adam W M van Eekeren, Klammer Schutte, et al. Superresolution reconstruction for moving point target detection[J]. Optical Engineering, 2008, 47(9): 096401-1-12.
- [4] Engheta Nader. Fractional calculus and fractional paradigm in electromagnetic theory[C]. Proc of the 1998 Int Conf on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Kharkov, 1998: 43-49.
- [5] 罗寰, 于雷, 廖俊, 等. 复杂背景下红外弱小目标跟踪系统[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1536-1541.  
(Luo H, Yu L, Liao J, et al. Tracking framework for small infrared multi-target in complex background[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1536-1541.)
- [6] Jin Ting, Zhou Fu-gen, Bai Xiang-zhi, et al. Multiple cues fusion for object tracking with particle filter in infrared image[C]. Int Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging: Advances in Infrared Imaging and Applications. Beijing, 2009: 73833W-1-7.
- [7] Tan Hua-chun, Zhang Yu-jin. Computing eigenface from edge images for face recognition based on hausdorff distance[C]. Proc of the 4th Int Conf on Image and Graphics. Chengdu, 2007: 639-644.
- [8] 彭复员, 周鑫杰. 基于多重相关分析的红外弱小目标快速检测[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(6): 454-456.  
(Peng F Y, Zhou X J. A multiple-correlation analysis-based high-speed detection of infrared weak target[J]. J of Infrared Millim Waves, 2000, 19(6): 454-456.)

(上接第146页)

- [10] Li P C, Li S Y. Learning algorithm and application of quantum BP neural networks based on universal quantum gates[J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(1): 167-174.
- [11] 李盼池. 一种量子神经网络模型学习算法及应用[J]. 控

制理论与应用, 2009, 26(5): 531-534.

(Li P C. Learning algorithm and applications of the quantum neural networks model[J]. Control Theory & Application, 2009, 26(5): 531-534.)