

文章编号: 0253-2239(2008)08-1496-06

基于光流直方图的云背景下低帧频小目标探测方法

管志强 陈 钱 顾国华 钱惟贤

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 对低帧频、云层背景下,低信噪比的弱点目标探测率降低的问题,提出了光流直方图(OFH)的定义,并且给出了 OFH 的性质。分析了低帧频下红外图像探测弱点目标时探测率降低的原因,提出了一种基于 OFH 背景补偿的红外点目标探测算法。利用 OFH 得到背景的运动矢量,进行运动背景补偿;然后利用目标与云层运动差异性,得到帧间比较结果,并对比较结果通过 Robinson 滤波器进一步滤除残留的边缘,达到降低虚警的目的。实验结果表明,该算法可以显著提高在复杂背景下红外点目标检测概率,并且能够探测出信噪比为 1 的目标。

关键词 图像处理; 红外技术; 目标检测; 光流直方图; Robinson 滤波器

中图分类号 TN911 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082808.1496

Dim Target Detection Based on Optical Flow Histogram in Low Frame Frequency in Clouds Background

Guan Zhiqiang Chen Qian Gu Guohua Qian Weixian

(School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The detection ratio of dim target with low signal-noise-ratio (SNR) in cloud background especially using low frame frequency detector decreased notably. Optical flow histogram (OPH), its characters is proposed, and its character is presented. Then the reason of low target detection ratio from infrared image using low frame frequency detector is analyzed. And based on this analysis, an algorithm of infrared dim target detection based on background motion compensation is advanced. This algorithm uses OPH to compute the background motion vector, and make background compensation. By distinguishing movement difference between target and background, the comparison result is gained. In order to reduce the false alarm, this result is filtered by Robinson filter to reduce the residues edges. The experimental results have proved that this algorithm can improve greatly the probability of infrared point target detection, and detect dim targets with SNR of 1.

Key words image processing; infrared technique; target detection; optical flow histogram (OFH); Robinson filter

1 引 言

红外警戒系统具有被动探测、全天候工作等优点,在现代高科技战争中发挥越来越大的作用。国外已经装备或者在研的全方位搜索警戒系统的探测装置均用线阵探测器^[1],采用旋转扫描工作方式,旋转周期 1~3 s/r,可见其帧频很低,由此背景的变化不能忽略。

目前国内外提出的各种检测算法,按对序列中帧间信息利用的前后顺序不同,可将检测算法分为两类:先检测后跟踪(Detect-before-track, DBT)和

先跟踪后检测(Track-before-detect, TBD)两种。先跟踪后检测,如动态规划^[2]、三维(3D)匹配滤波^[3]和序列假设检验^[4]等算法等,其性能的好坏关键在于能否成功地累积分布在一段图像序列中的目标能量。由于图像序列中目标的运动具有一定随机性,所以 TBD 算法可能需要进行全时空搜索,实现难度非常大。而先检测后跟踪由于其计算量少、速度快等特点,使其在实际系统中得到了广泛应用,该方法的关键在于前端背景杂波抑制技术,已有的算法如自适应背景预测检测^[5]、形态学方法^[6~10]、帧差法^[11]

收稿日期: 2007-11-29; 收到修改稿日期: 2008-02-25

基金项目: 国防预研项目(0405030103)资助课题。

作者简介: 管志强(1982—),男,博士研究生,主要从事红外图像处理和目标探测识别技术等方面的研究。

E-mail: gzq_njust@163.com

导师简介: 陈 钱(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测与成像技术等方面的研究。

E-mail: chenq@hjust.edu.cn

等,在高帧频,背景平缓的环境下具有较好的性能,而在背景复杂,且变化不能忽略时,检测性能受到很大影响。本文所针对警戒系统的帧频只有 0.5 Hz,由于帧频很低,背景(云层)的变化不可忽略。

在这种条件下,本文提出了光流直方图的概念,通过光流直方图统计得到云层背景的运动矢量,利用该矢量比较帧间的相关特征以检测目标,提高了目标检测的概率,并且有效地降低了虚警率。

2 二维光流直方图

光流^[7]是场景中可见点的三维速度矢量在像平面的投影,光流场是二维速度场,其计算方法如下:

定义物体上点的时间函数为 $[x(t), y(t)]$,图像中该点的灰度为 $E[x(t), y(t), t]$,那么根据“亮度约束”条件和“平滑约束”条件,得到

$$\epsilon_b = E_x u + E_y v + E_t, \quad (1)$$

$$\epsilon_c = \sqrt{(\bar{u} - u)^2 + (\bar{v} - v)^2}, \quad (2)$$

$$\epsilon^2 = \alpha^2 \epsilon_c^2 + \epsilon_b^2, \quad (3)$$

式中 ϵ_b 为根据亮度不变约束而定义的误差, ϵ_c 为根据平滑约束而定义的误差, \bar{u} 和 \bar{v} 分别为点 3×3 邻域中 u 和 v 的平均值, ϵ 为总误差, α 为用来权衡两种误差的常量。所求解的速度场应使各个点总误差达到最小值,即极值存在的必要条件:

$$\frac{\partial \epsilon^2}{\partial u} = -2\alpha^2(\bar{u} - u) + 2(E_x u + E_y v + E_t)E_x = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon^2}{\partial v} = -2\alpha^2(\bar{v} - v) + 2(E_x u + E_y v + E_t)E_y = 0, \quad (5)$$

然后用迭代方法求出各点的光流场。

通过光流场可认为得到场景各点的运动矢量,但红外图像均匀性差、噪声大的特点,且场景运动程度大时,光流会不准确,甚至是错误的。因此如果能够得到光流场的统计特性,得到全局的运动特征,可以降低因为光流场计算错误带来的误差。由此,仿照图像直方图的概念,本文提出光流直方图(The optical flow histogram, OFH)的概念。定义:光流直方图每个元素 $o(i, j)$ 表示图像光流场中具有该运动矢量运动点的个数。

从试验过程中统计发现,在同一场景下,一定场景运动范围内,光流直方图具有如下性质:

1) 光流直方图的投影面积 A 反映图像整体的运动强度,运动强度与 A 近似线性。

2) 光流直方图的重心位置 (\bar{x}, \bar{y}) 反映运动的

总体方向,且重心与中心的距离 $d_{\text{oph}} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ 与运动强度近似线性关系。

重心计算公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\iint x \cdot o(x, y) dx dy}{\iint o(x, y) dx dy}, \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y \cdot o(x, y) dx dy}{\iint o(x, y) dx dy}. \quad (7)$$

图 1 是在探测器匀速平移运动时,间隔 2 s 的两帧图像计算的 OFH,可见 OFH 分布偏向一侧,图 2(a)、图 2(b)是以 100 ms 采集周期下,OFH 的 d_{oph} 、 A 与采集时间的关系,可见,随着运动位移的增加, d_{oph} 、 A 也随着近似线性增加。

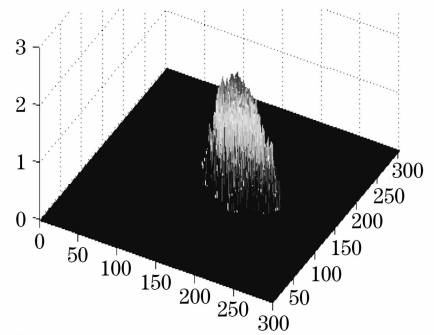


图 1 光流直方图

Fig. 1 Optical flow histogram

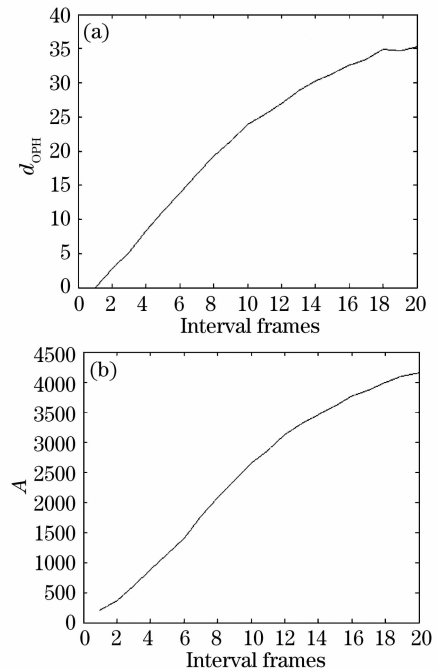


图 2 光流直方图的重心(a),投影面积(b)与帧间隔时间的关系

Fig. 2 Relation between barycenter (a), OFH projection area (b) and frame interval

3 基于 OFH 背景补偿的探测算法

3.1 目标与背景特性分析

3.1.1 目标性质分析

假定来袭目标大小为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$, 其飞行速度为 200 m/s , 距离 15 km , 飞行高度 1000 m 且高度不变, 飞行方向与光轴水平夹角为 α_h 。

由于目标距离远, 其在探测器上的成像面积在 $5\text{ pixel} \times 5\text{ pixel}$ 以内。

经过一周旋转运动后, 目标再次投影到探测器上时, 目标已运动 400 m , 则目标的运动方向与探测器在连续两帧投影距离的关系如下图 3 所示。

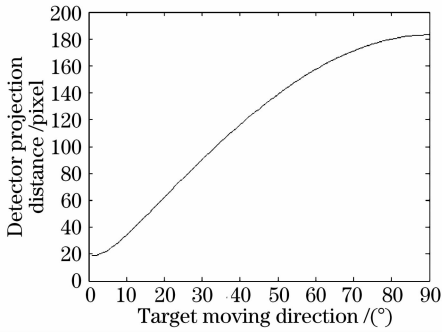


图 3 目标运动角度与探测器投影距离的关系

Fig. 3 Relationship between target moving direction and detector projection distance

从图 3 可见, 在目标速度 200 m/s 时, 相邻两帧目标距离最少为 8 pixel , 最多可达 100 pixel 以上, 目标的运动特征明显, 而且随目标的运动方向变化范围很大。

3.1.2 云层运动分析

在复杂的云层中, 不能简单地认为云层是平缓的低频成分, 其频率成分的分布也很丰富。由于扫描的帧频很低, 在高帧频下, 认为云层是缓慢运动的假设不再成立, 云层的飘移影响不能忽略。图 4 是扫描频率在 10 Hz , 0.5 Hz 时云随时间的变化图。

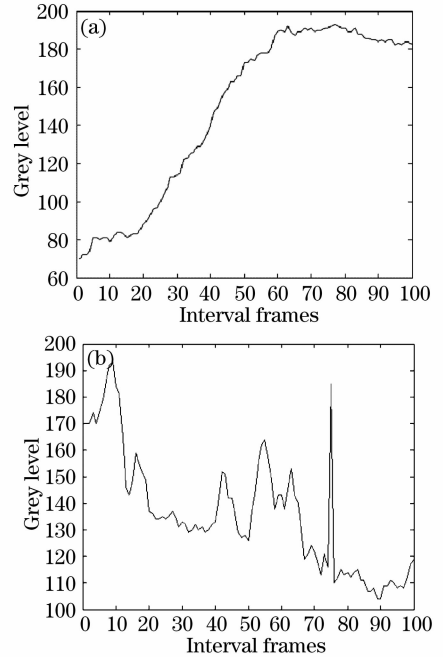


图 4 不同扫描频率下云随时间的变化图

Fig. 4 Clouds variation with time at different frame frequency

云层的变化给基于多帧的检测带来很大难度。

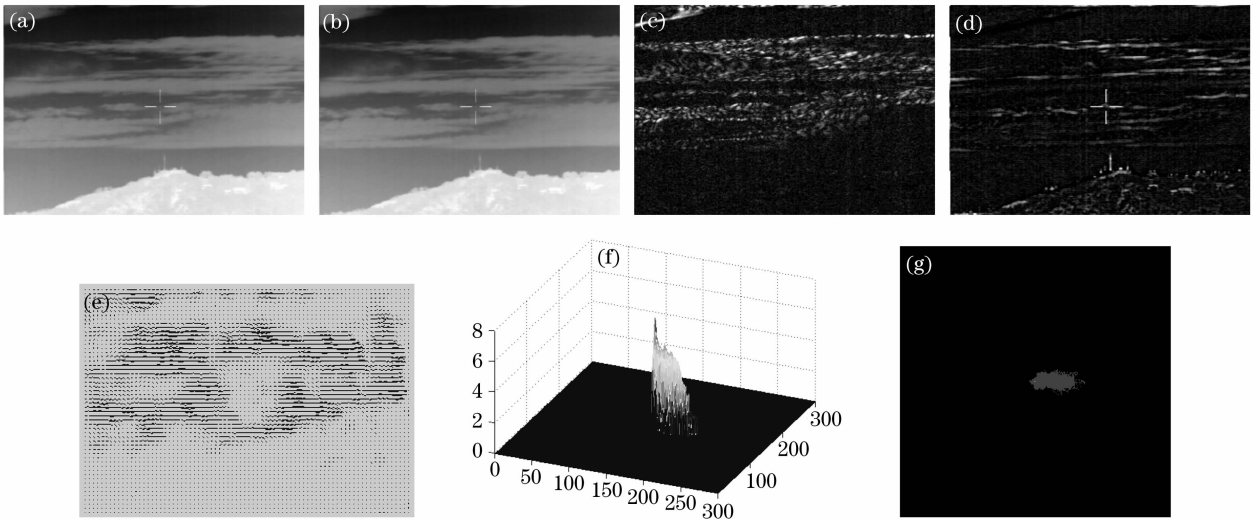


图 5 间隔 2 s 采集的两幅图像(a),(b), (a)与(b)的差值图像(c), TopHat 滤波结果(d), 光流场 (e), 光流直方图 (f), 光流直方图的投影(g)

Fig. 5 (a), (b) The interval is 2 s of tow image, (c) subtraction of (a) and (b), (d) TopHat filtered result, (d) optical flow field, (e) OFH, (f) projection of OFH

图 5(a)、图 5(b)是相隔 2 s 的两幅云层图像。从图 5(c)中可见,云层运动明显,大约是 3 pixel/s,其光流直方图投影明显偏向云的运动方向。

通过观察和比较大量的云层图片,发现云层的运动有一个明显的特征,在一定的视场范围内、一段时间内,云的运动速度和方向一致,即同向性,原因是云层的运动是由空气对流的引起,而在空气对流的速度和方向在短时间内接近不变,所以在一定视场范围内,云层的运动方向趋于一致,且整体速度一致,同时具有少量的形变,即云的运动可认为是“平移加少量的形变”。

3.2 本文算法

本文提出基于 OFH 背景补偿的探测算法,算法流程如图 6 所示。

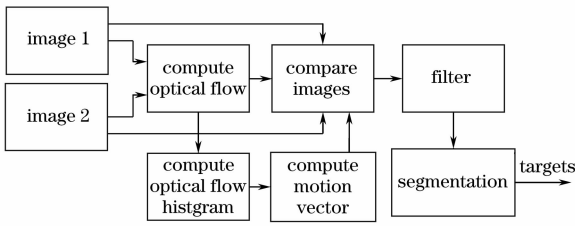


图 6 算法流程图

Fig. 6 Framework of the algorithm

1) 求光流场;经过实验发现,背景云层的运动速度平均在 10 pixel 以内,为了保证运动补偿精度和加速光流场计算速度,本文使用多分辨率层算法^[12]。首先由金字塔法将图像分解成不同的分辨率层;然后,在低分辨率层将计算的流速映射到下一高分辨率层,作为流速的初始值,进一步修正。多分辨率分层算法在一定程度上克服了光流算法在计算大的运动速度时带来的孔径问题^[7],提高了计算精度,并且减少了计算时间。

2) 根据光流直方图,计算出光流直方图的重心位置和面积,得出偏移矢量:

$$dx = kA^2 / \bar{x}, \quad (8)$$

$$dy = kA^2 / \bar{y}, \quad (9)$$

式中 k 为加权系数。

3) 图像比较;得到图像的运动矢量后,对当前图像中满足光流场强度大于某一阈值的区域进行比较,提取其中可能的目标。而因为帧频比较低,导致云层等背景除了平移运动之外,还包括少量的形变,因此通过小区域的比较,可以降低形变带来的影响,另外也可以减少由于 2) 中偏移矢量的误差,比较方法具体如下:从当前帧的图像块上匹配运动矢量上的图像块,在其运动矢量点为中心,3 pixel×3 pixel

的范围内进行搜索最佳匹配点,由最佳匹配块与当前块作差,得到差值图像。

$$I_{\text{sub}}(i:i+k, j:j+k) = im_1(i:i+k, j:j+k) - im_2(i+dx+\delta x:i+dx+\delta x+k, j+dy+\delta y:j+dy+\delta y+k), \quad (10)$$

式中 $\delta x, \delta y$ 分别为在运动矢量点 3 pixel×3 pixel 范围内的匹配位移量。

4) 经过运动补偿比较后的差值图像中,仍然不可避免地残留少量云的边缘,而由于云层边缘具有连续性,目标为点状特征,因此采用保护带 Robinson 滤波器^[6]。普通边缘滤波器只给出点目标边缘信息而滤除了目标内部信息,而 Robinson Guard 滤波器由于具有保护带,在目标不太大的情况下能给出目标的完整信息。本系统采用的滤波器尺寸为 7 pixel×7 pixel,保护带宽度为 2,对最大尺寸为 3 pixel×3 pixel 的目标不失真。

5) 恒虚警率分割:为使目标点数不超过后端的航迹处理的能力,对输出图像 f_{out} 利用恒虚警率分割。假设 $p(x)$ 为经过背景自适应调整后的输出图像 f_{out} 的概率密度分布,令

$$F(x) = \int_0^x p(t) dt, \quad (10)$$

可见 $F(x)$ 是递增函数。通过求解方程

$$1 - P_{fa} = \int_0^T p(x) dx, \quad (13)$$

可以得到阈值 T ,式中 P_{fa} 为恒虚警率,本文 P_{fa} 选取为 10^{-4} 。

4 实 验

仿真试验选取一段以天空为背景的红外图像序列,背景存在大量的云层,云层运动速度在 4 pixel/frame,在方框中为飞行的飞机,速度在 12 pixel/frame,定义目标的信噪比为

$$R_{\text{SN}} = (f_T - f_C) / \sigma_C, \quad (14)$$

式中 f_T 为目标的灰度, f_C 为目标周围背景的平均灰度, σ_C 为背景的标准差。

将本文算法同 TopHat 算法比较,其中分割阈值由刚能分割出目标的最佳阈值,本文算法的分割算法的恒虚警率分割,而 TBD 算法因为不适合该环境下检测目标,因此没有给出比较结果。

图 7 的目标信噪比是 2.5,目标在低频平坦区,从光流场和两幅图像的差值可见,云层具有明显的位移,并且云层的频谱成分丰富,本文算法虚警率明

显低于 TopHat 检测算法。

图 8(a1)为目标运动到中心云层的边缘上,在方框中标出,目标信噪比 1.1,如果要分割出目标,TopHat 的虚警率要到 5×10^{-3} ,而本文算法为

10^{-4} 。图 8(a2)为目标到右上角,目标信噪比为 0.8,如果要分割出目标,TopHat 的虚警率已经很高,而本文算法仍然检测出来,且虚警率不变。

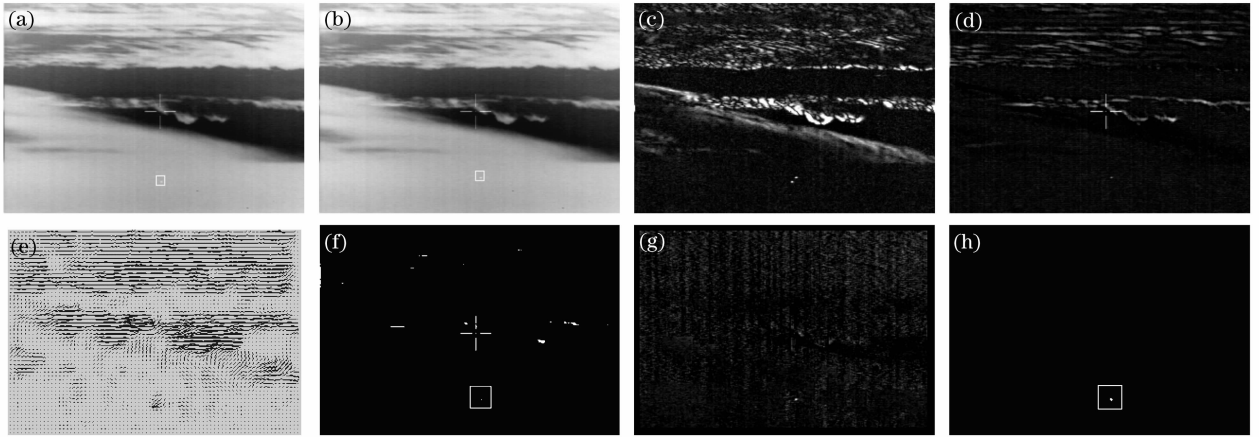


图 7 间隔 2 s 采集的两幅图像(a),(b), (a)与(b)的差值图像(c), TopHat 滤波结果(d), 光流场 (e), TopHat 分割结果(f), 基于背景补偿的比较结果(g), 本文算法检测结果 (h)

Fig. 7 (a), (b) interval is 2 s of tow image, (c) subtraction of (a) and (b), (d) TopHat filtered result, (e) optical flow, (f) segmented image of TopHat filtered, (g) compare result based on background compensation, (h) segmented image filtered by advanced method in this article

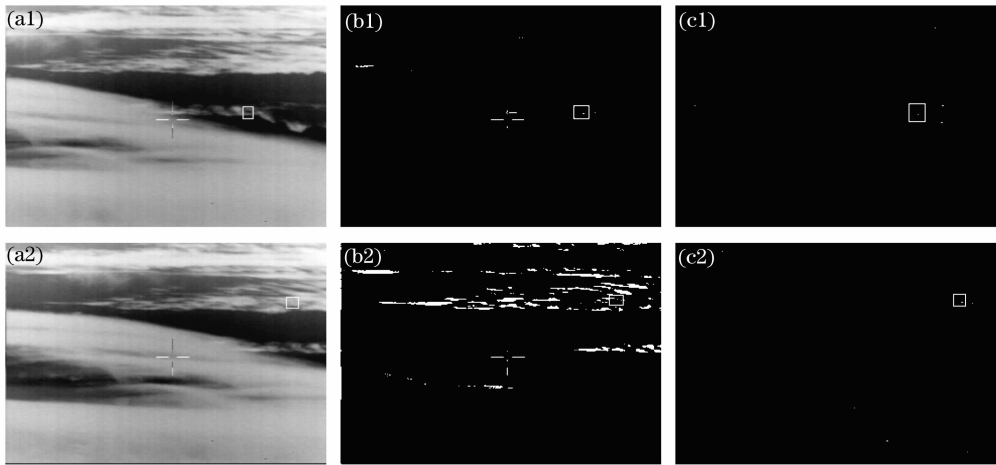


图 8 原图像(a1),(a2), TopHat 滤波分割结果(b1),(b2), 本文算法结果(c1),(c2)

Fig. 8 Source image (a1),(a2), segmented image of TopHat filtered (a1),(b2), segmented image filtered by advanced method (c1),(c2) in this article

5 结 论

提出的基于 OFH 背景运动补偿的红外点目标探测算法,利用光流直方图得到背景的运动矢量,对背景进行运动补偿的方法来提取目标。使得在低帧频,高杂波环境下仍然具有较高的检测率和较低虚警率。实验结果表明,该方法在背景运动超过 1 pixel 时,都有很好的匹配精度,其性能明显优于传统方法,并且算法易于硬件实现,因此具有良好的应

用前景。

参 考 文 献

- 1 J. M. Missirian, L. Ducruet. IRST: a key system in modern warfare[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3061**: 554~565
- 2 J. Arnold, S. Shaw. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electrical Systems*, 1993, **29**(1): 44~56
- 3 I. S. Reed, R. M. Gagliardi, L. Stotts. Optical moving target detection with 3-D matched filtering[J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electrical Systems*, 1988, **24**(4): 327~326
- 4 S. D. Blostein, H. S. Richardson. A sequential detection

- approach to target tracking[J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electrical Systems*, 1994, **30**(1): 197~211
- 5 B. S. Denney, R. J. P. de Figueiredo. Optimal point target detection using adaptive auto regressive background[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4048**: 46~57
- 6 B. R. David. Spatial signal processing for infrared detection[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2235**: 38~51
- 7 B. K. P. Horn, B. G. Schunck. Determining optical flow[J]. *Artificial Intelligence*, 1981, (17): 185~203
- 8 Zeng Ming, Li Jianxun. Optimized design of morphological improved Top-Hat filter based on improved genetic algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 510~515
曾明, 李建勋. 基于改进遗传算法优化的形态学修正 TOP-HAT 滤波器设计方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 510~515
- 9 Zong Siguang, Wang Jiangan. Multi-scale mathematical morphology fusion filtering and the evaluation of the filtered image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1176~1180
宗思光, 王江安. 多尺度形态算子融合图像滤波技术及滤波质量

- 评价[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1176~1180
- 10 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2163~2168
管志强, 陈钱, 钱惟贤等. 一种基于背景自适应调整的弱点目标探测算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2163~2168
- 11 Liu Guixi, Shao Mingli, Liu Xianhong *et al.*. Video moving object auto-extraction in real scene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1150~1155
刘贵喜, 邵明礼, 刘先红等. 真实场景下视频运动目标自动提取方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1150~1155
- 12 Zhang Zexu, Li Jinzong, Li Dongdong. Research of automated image registration technique for infrared images based on optical flow field analysis[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **22**(4): 307~312
张泽旭, 李金宗, 李冬冬. 基于光流场分析的红外图像自动配准方法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(4): 307~312

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

投稿方式,网上投稿:www.opticsjournal.net 或 E-mail:mayi@siom.ac.cn

咨询电话:021-69918427